



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK MİMARLIK
FAKÜLTESİ
DERGİSİ

ÇUKUROVA UNIVERSITY
JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING AND ARCHITECTURE

Cilt/Vol: 35

Sayı/Issue: 3

Eylül/September 2020

ISSN 1019-1011



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK-MİMARLIK FAKÜLTESİ
DERGİSİ



Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture

Sahibi (Owner)

Mesut BAŞIBÜYÜK
Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dekanı

Editör (Editor)

Özen KILIÇ

EDİTÖR KURULU (Editorial Board)

Selma Ayşe ÖZEL (ÇÜ)	Ulvi Can ÜNLÜGENÇ (ÇÜ)
Mustafa GÜVEN (ÇÜ)	Özen KILIÇ (ÇÜ)
Ahmet Mahmut KILIÇ (ÇÜ)	Olcayto KESKİNKAN (ÇÜ)
Hüseyin AKILLI (ÇÜ)	Ali KESKİN (ÇÜ)
Ulus ÇEVİK (ÇÜ)	R.Tuğrul OĞULATA (ÇÜ)
Ali KOKANGÜL (ÇÜ)	F. Duygu SABAN (ÇÜ)
Mesut BAŞIBÜYÜK (ÇÜ)	Hüseyin R. YERLİ (ÇÜ)
İsmail Hakkı ÇAĞATAY (ÇÜ)	Nil YAPICI (ÇÜ)
Metin GÜRÜ (GÜ)	Serter ATABAY (AUS-BAE)
Mehmet Emin AYDIN (UWE-İngiltere)	Muammer KOÇ (HBKU-BAE)
Azra BİLGİN (UCB-ABD)	Tamio ENDO (MU-Japonya)

Hakemli Bir Dergidir. Yılda Dört Sayı Basılır. / Refereed Journal. Published Quarterly.

Dergimiz **TÜBİTAK ULAKBİM** Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi'nde taranmaktadır.
Indexed by **TÜBİTAK ULAKBİM** Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi

YAZIŞMA ADRESİ/CONTACT

Ç.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergi ve Yayın Kurulu Başkanlığı Balcalı 01330 Sarıçam/ADANA
Tel : (322) 338 63 57 Fax : (322) 338 61 26 E-posta: mmfdergi@cu.edu.tr - cu.mmfdergi@gmail.com

AMAÇ ve KAPSAM

Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, yılda dört sayı olarak yayımlanan hakemli bilimsel bir dergidir. Dergi akademik ve araştırma kurumlarındaki mühendislik ve mimarlık alanındaki araştırmacı ve uygulamacılara hizmet etmeyi amaçlamaktadır. Daha önce başka bir yerde yayımlanmamış tüm özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları kapsayan yenilikçi, değerli ve yararlı araştırma makaleleri kabul edilmektedir.

AIM and SCOPE

Journal of the Engineering and Architecture of Çukurova University is a peer-reviewed scientific journal which is currently published quarterly. The journal aims to serve researchers and practitioners in the fields of engineering and architecture in academic and research organizations. All innovative, valuable, and useful research articles including original and current scientific research and applications, previously unpublished anywhere else, will be regarded.

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Performance Evaluation of Various Regression Models and Features for Prediction of Ozone Concentration 567**
Ozon Konsantrasyonu Tahmininde Çeşitli Regresyon Modelleri ve Özniteliklerin Performans Değerlendirmesi
Sezer DÜMEN, Ercan AVŞAR ve Ulus ÇEVİK
- Aydınlatma Armatürleri için Soğutucu Modüllerinin Deneysel Değerlendirilmesi ve Yenilikçi Ürün Tasarımı 575**
Experimental Evaluation of Cooling Modules with High Heat Transfer Capacity for Illumination Armatures and Innovative Product Design
Ahmet FEYZİOĞLU
- True Variable-Depth Milling of Nickel-Based Alloy IN-718..... 583**
Nikel-Bazlı Alaşımarda (IN-718) Gerçek Değişken-Derinlikli Frezeleme
Durul ULUTAN
- Çan Linyitlerinin Kendiliğinden Yanma Yatkınlıklarının Araştırılması 593**
Investigation of Spontaneous Combustion Tendency of Çan Lignites
Cem ŞENSÖĞÜT ve Özer ÖREN
- Basit Mesnetli Köprülerde Hareketli Yük Dağılım Faktörleri Denklemlerinin Yapay Sinir Ağları ile Elde Edilmesi..... 609**
Obtaining Live Load Distribution Factors Equations for Simply Supported Bridges Using Neural Networks
Ö. Fatih YALÇIN
- Fotovoltaik Paneller için Parametre Kestirim Sistemi 623**
Parameter Estimation System for Photovoltaic Panels
Kübra ÖZCAN, Zehan KESİLMİŞ, Murat AKSOY, M. Alpaslan KARABACAK ve Bülent BÜYÜKGÜZEL
- Yıllık Pelinotunun (Artemisia annua L.) Kimyasal Kompozisyonu ve Antioksidan Kapasitesinin Belirlenmesinde Sub ve Süperkritik Akışkanların Etkisi 631**
The Effect of Sub and Supercritical Fluids in Determination Chemical Composition and Antioxidant Capacity of Artemisia annua L.
Murat TÜRK ve E. Sultan GİRAY

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Soğutma Panellerinde Kullanılabilecek Yeni Tip Kompozit Yalıtım Malzemelerin Sayısal İncelenmesi..... 647**
Numerical Analysis of New Type Composite Insulation Materials for Cooling Panels
Mustafa KILIÇ ve Mehmet YANARDAĞ
- Bir Top ve Çubuk Sisteminin Ayrıklaştırılmış Geri Adımlamalı Kayan Kipli Kontrolü..... 659**
Decoupled Backstepping Sliding Mode Control of a Ball and Beam System
Barış ATA
- BN İlavasının Sıkıştırma Döküm Yöntemi ile Üretilen B4C/Al Hibrit Kompozitlerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri 669**
Effect of BN Addition on the Mechanical Properties of B4C/Al Hybrid Composites Produced via Squeeze Casting Method
Mehmet İPEKOĞLU, Amin NEKOUYAN, Önder ALBAYRAK ve Sabri ALTINTAŞ
- Horzum (Feke/Adana) Çinko-Kurşun Cevherleşmesinin 3 Boyutlu Modellemesi 679**
3D Ore Modeling of Horzum (Feke/Adana) Zinc-Lead Mineralization
Ceren Gizem ÇETİN ve Mustafa AKYILDIZ
- Farklı Kültürlere ait Farklı Türdeki Müziklerden Duygu Tanıma 687**
Emotion Recognition From Different Types of Music From Different Cultures
Serhat HIZLISOY ve Zekeriya TÜFEKÇİ
- Evaluation of CNT/MOSFET Based Active Electrode with ECG, EMG, and EEG Signals..... 699**
KNT/MOSFET Tabanlı Aktif Elektrotun EKG, EMG, EEG İşaretleri ile Değerlendirilmesi
Mustafa İSTANBULLU ve Mutlu AVCI
- Determination of High Efficiency Standard Cyclone Performance Using Numerical Methods..... 711**
Yüksek Verimli Standart Siklon Performansının Nümerik Yöntemler Kullanılarak Belirlenmesi
Nihan UYGUR
- Investigation of Alternative Material and Design of Rotary Kiln: A Case Study 721**
Döner Fırının Alternatif Malzeme ve Tasarımının İncelenmesi: Bir Örnek Olay
Fatih DÖKME ve Sadık ÜNAL

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Toz Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilen Parçada İç Vida Geometrisinin Elde Edilmesinin Araştırılması..... 729**
Investigation of Achieving Internal Screw Geometry in Part Produced by Powder Injection Molding
Mehmet SUBAŞI
- Hastelloy C276/UNS S32205 Malzeme Çiftinin Birleştirilmesinde ER 316 L İlave Metal Kullanımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi 737**
Influence of ER 316 L Filler Metal to Microstructure and Mechanical Properties of Hastelloy C276/UNS 32205 Dissimilar Welds
Tuba KARAHAN
- Merkezi Bir Isıtma Sisteminde Enerji ve Ekserji Analizinin Eksergoekonomik Yönden Değerlendirilmesi 745**
Exergoeconomic Evaluation of Energy and Exergy Analysis in a Central Heating System
İrfan UÇKAN ve Erkan ULUSOY
- Türkiye'deki Şirketlerin Müşteri Şikayetlerini Değerlendirme Sistemlerinin Araştırılması ve Analizi 753**
Investigation and Analysis of Customer Complaints Handling System of the Companies in Turkey
Vedat ÇEKİCİ ve Oya Hacire YÜREGİR
- Endüstriyel Uygulamalarda Güneş Enerjisinden Termal Olarak Yararlanma..... 769**
Using Solar Thermal Energy in Industrial Applications
Burcu KOÇAK ve Halime PAKSOY
- Killi Zeminlerin Donma-Çözülme Davranışlarında Cam Atık Çamurunun Etkisi..... 783**
Effect of Glass Waste Sludge on the Freezing-Thawing Behavior of Clayey Soils
Barış MAHMUTLUOĞLU ve Baki BAĞRIAÇIK
- Simenit Gölü Kumunun Seramik Sırlarında Renklendirici Olarak Kullanımının Araştırılması 797**
The Investigation on the Possible Use of Simenit Lake Sand as Colorant in Ceramic Glazes
Didem ÖGE ve Ceren PEKŞEN
- Ag-Pt-W/TiO₂ Katalizörünün SCR Aktivitesinin Araştırılması 805**
Investigation on SCR Activity of Ag-Pt-W/TiO₂ Catalyst
Zeycan KESKİN

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Alternatif FML Kompozitler için Titanyum ve Elyaf/Epoksi Ara Yüzey Dayanımının İncelenmesi	813
<i>Investigating the Interfacial Strength of Titanium and Fiber/Epoxy for The Alternative FML Composites</i>	
Mete Han BOZTEPE, Melih BAYRAMOĞLU, Çağrı UZAY ve Necdet GEREN	
24 Ocak 2020 Elazığ Depreminin Kuvvetli Yer Hareketi Verilerinin Değerlendirilmesi	821
<i>Evaluation of Strong Ground Motion Records of January 24, 2020 Elazığ Earthquake</i>	
Abdullah Can ZÜLFİKAR	

Performance Evaluation of Various Regression Models and Features for Prediction of Ozone Concentration

Sezer DÜMEN¹, Ercan AVŞAR^{*1}, Ulus ÇEVİK¹

¹Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Adana

Geliş tarihi: 24.07.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Abstract

Air pollution caused by ozone is a problem which threaten human health. Therefore, prediction of O₃ concentration is important. In this work, O₃ concentration level for Adana, Turkey is predicted with support vector regression (SVR), multi-layer perceptron (MLP), gradient boosting decision trees (GBDT), K nearest neighbors (KNN), elastic net machine learning methods. Parameters utilized for this prediction are hourly measurement of pollutants like particular matter (PM10), sulfur dioxide (SO₂), nitrogen dioxide (NO₂), nitrogen oxides (NO_x), nitric oxide (NO) concentrations and also meteorological parameters like air temperature, wind speed, relative humidity, air pressure, wind direction. Additionally, hour, day and season information are used as features. It has been shown that SVR method achieves the best result with R² value of 0.9697. Furthermore, backward elimination method is implemented for feature selection process and according to the results, current O₃ concentration has the highest importance to predict the concentration for the next hour.

Keywords: Air quality, Ozone concentration, Machine learning, Regression

Ozon Konsantrasyonu Tahmininde Çeşitli Regresyon Modelleri ve Özniteliklerin Performans Değerlendirmesi

Öz

Ozondan kaynaklanan hava kirliliği insan sağlığını tehdit eden bir problemdir. Bu nedenle, O₃ konsantrasyonunun tahmini önemlidir. Bu çalışmada, Türkiye'nin Adana ili için O₃ konsantrasyon seviyesi, destek vektör regresyonu (DVR), çok katmanlı algılayıcı (ÇKA), gradyan artırılmış karar ağaçları (GAKA), K en yakın komşu (KEK) ve elastik net makinesi öğrenme yöntemleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Bu tahmin için kullanılan parametreler, partiküler madde (PM10), sülfür dioksit (SO₂), azot dioksit (NO₂), azot oksitler (NO_x), azot monoksit (NO) gibi kirleticilerin konsantrasyonları ve ayrıca hava sıcaklığı, rüzgâr hızı, bağıl nem, hava basıncı, rüzgâr yönü gibi meteorolojik parametrelerin saatlik ölçümleridir. Ek olarak saat, gün ve sezon bilgileri de parametre olarak kullanılmaktadır. DVR yöntemi ile elde edilen R² değeri 0,9697 olup diğer yöntemlerle elde edilen değerlerden yüksektir. Ayrıca öznitelik seçimi için geriye doğru eleme yöntemi uygulanmıştır ve sonuçlara göre bir sonraki saatin O₃ konsantrasyonunu tahmin etmek için şimdiki O₃ konsantrasyon seviyesinin en önemli öznitelik olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hava kalitesi, Ozon konsantrasyonu, Makine öğrenmesi, Regresyon

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ercan AVŞAR, ercanavsar@cu.edu.tr

1. INTRODUCTION

Tropospheric ozone (O_3) is an air pollutant that has negative effects on human health and climate change [1,2]. Since O_3 is not released directly into the air, it is considered as a secondary pollutant. With industrialization without emissions controls, the release of precursors to O_3 , such as nitrogen oxides (NO_x) and volatile organic compounds (VOCs), are gradually increasing [3]. In addition, O_3 formation is related with some meteorological parameters like temperature, wind speed, wind direction and rainfall. [4].

Negative effects of O_3 and the other air pollutants are admitted worldwide. Thus, limits for hazardous levels of these air pollutants are officially determined by the governments. In Turkey, these limits are set as $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for sulfur dioxide (SO_2), $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for nitrogen dioxide (NO_2), $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for O_3 . [5]. Besides, having high concentration of these gases in the air is dangerous for those people having health conditions like asthma or chronic obstructive pulmonary disease (COPD). Considering this information, determination of O_3 concentration in the atmosphere is an important problem not only for air pollution analysis, but also for medical purposes.

Various machine learning methods have been utilized in the literature for estimation of pollutant gas concentrations. For instance, in some of the previous works, threshold values or concentration ranges have been determined for air pollutants and air pollution estimation have been done with classification methods such as decision trees, random forest classification, and artificial neural networks (ANN) [6-8]. In addition, various regression methods were used for concentration estimates [9-13]. For instance, root mean square error (RMSE) values obtained through support vector regression (SVR), ANN and decision tree methods were compared in estimation of O_3 , SO_2 and NO_2 concentration levels [9]. It was shown that SVR produces the lowest RMSE value. In another study, regression models such as linear

regression, ridge regression, multilayer perceptron (MLP), Elman neural network were used for prediction of O_3 level [10]. Among these methods, the best RMSE result was obtained with the MLP method. Besides, the results of a study handled in Canada shown that extreme learning machine (ELM) method outperformed ANN and multiple linear regression (MLR) to predict O_3 , particular matter 2.5 micrometers or less in diameter (PM2.5) and NO_2 concentration levels [11]. In another comparative study, ANN was shown to be giving better results than MLR method in predicting the maximum hourly O_3 concentration for the next day [12]. On the other hand, algorithms utilizing deep learning methods are mentioned in more recent studies. For example, a new deep learning model to forecasting of O_3 concentration was proposed by researchers in Aarhus, Denmark [13]. According to the results of the study, this new method outperformed SVR, ANN and MLR methods.

Instead of predicting the parameters related with air pollution, it is also possible to analyze the correlation between the pollutant gases. For example, relationship of O_3 concentration with other gas concentrations and meteorological parameters are analyzed using ANN and support vector machines (SVM) methods [14]. It has been verified that the O_3 concentration was negatively correlated with carbon monoxide (CO), nitric oxide (NO) and NO_x as these pollutants are known precursors of O_3 .

In this study, O_3 concentration for Adana, Turkey is estimated using five different machine learning methods. These methods are SVR, MLP, gradient boosting decision tree (GBDT), K nearest neighbors (KNN), and elastic net. Measurements for various gases (particular matter 10 micrometers or less in diameter (PM10), SO_2 , NO_2 , NO_x , NO, O_3) and meteorological parameters together with temporal data are used as features. Additionally, backward feature elimination method is used for determining the most appropriate predictors for O_3 estimation and select a subset of features that are more useful in modeling O_3 level.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Machine Learning Methods

SVM is a supervised learning method used for binary classification problems [15]. In this method, a given dataset is non-linearly mapped to a higher dimensional feature space. For classification problems, in this feature space, data is separated by hyperplanes with the maximum margin between class boundary. SVM can also be used for regression (SVR) or multi-label classification problems.

The performance of an SVR model highly depends on choice of kernel function for mapping and parameters C and ϵ . In this work Gaussian kernel function is used. This kernel has only one parameter, γ , which is associated with the width of the Gaussian function. On the other hand, C and ϵ parameters control the tradeoff between the variance and bias in the training process. Therefore, careful selection of these parameters is important. For this purpose, best combination of these parameters is searched in a grid space. As a result, optimum parameters are found as 100 for C , 0.01 for γ and 0.1 for ϵ .

MLP is a feed-forward ANN [16]. MLP network consists of the input, hidden, and output layers with their nodes called neurons [17]. There can be multiple hidden layers between the input layer and the output layer. The inputs of each neuron are multiplied by a value called weight and all of them are summed up and passed through the activation function. Widely used activation functions are sigmoid, step, linear, hyperbolic tangent and rectified linear unit (ReLU). The output of this activation function is transferred to the next layer in the same way. Each node in one layer is connected to each node in the next layer. Also, back-propagation method is used for updating the weights and reduce the error. In this method, number of neurons in hidden layer can affect the performance of model. The network structure used in this work consist of one hidden layer containing 50 neurons.

Elastic net is a regularization and variable selection method. Elastic net regression is mixture of lasso and ridge regression models. This method is particularly useful when the number of features is much bigger than the number of data samples and when there are correlated features [18]. The formulation of the elastic net regression model is as where λ_1 and λ_2 are regularization parameters, X is sample matrix, y is response vector, β is weight vector (Equation 1).

$$\hat{\beta} = \operatorname{argmin}_{\beta} |y - X\beta|^2 + \lambda_2 |\beta|^2 + \lambda_1 |\beta| \quad (1)$$

For this method, parameter selection is applied to choose the best λ_1 and λ_2 parameters and optimum values of these parameters are found as 0,009 for λ_1 and 0,0005 for λ_2 .

GBDT is a machine learning method for regression and classification problems [19]. Considering decision trees as weak learners, GBDT algorithm is a strong learner created by combining many decision trees. A single decision tree tends to overfitting, while a GBDT reduces the risk of overfitting [20]. Each new decision tree in the gradient boosting algorithm is created using the residuals from the previous step.

Number of weak learners is the key parameter that affects the performance of the GBDT method. This parameter should be well adjusted in order to prevent overfitting. After trying several values, it has been determined that 200 is appropriate for this parameter.

KNN algorithm is another machine learning method used in this study. Due to its simplicity and straightforward idea, it is a very common method [21]. In this method, the distance values between a test sample and all training samples are calculated. The K nearest samples to the test sample is used for classification or regression. The key part in this algorithm is to choose the optimum value of K . For this study, models have been trained with K values between 1 and 5 and optimum K value is found as 4.

2.2. The Dataset

The dataset was obtained from the air monitoring database of the Republic of Turkey Ministry of Environment and Urbanization [22]. The download settings were adjusted to include hourly data for gas concentrations such as PM10, SO₂, NO₂, NO_x, NO, O₃ and meteorological parameters such as air temperature, wind speed, relative humidity, air pressure and wind direction. All data between the years 2016 and 2020 years were downloaded. However, the proportion of missing data was very high. After removing the samples containing missing data, total of 11 weeks of data was obtained which is used for prediction of O₃ concentration. Hourly change of the gas concentrations for one week for duration of the data is shown in Figure 1.

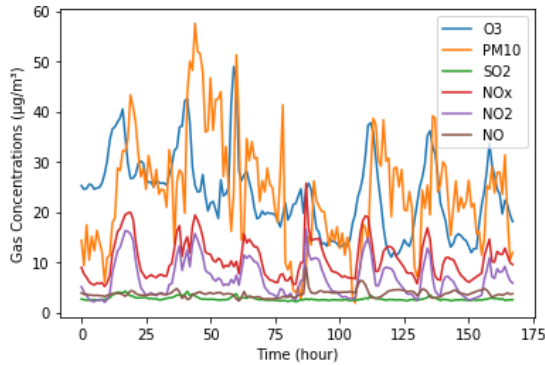


Figure 1. Hourly change of gas concentrations for one week of data

Since the pollutant gas concentrations vary with time, the involvement of temporal features to the dataset may have positive effect on the prediction performance. Therefore, three temporal information (day, hour and season information) were added as new features by using one hot encoding method. In one-hot encoding method, categorical variables are represented as vectors. The related element in the set of categorical variables is represented by 1 and other elements by 0. Hence, in this study, 24 new columns were added to represent “hour of day” information, 7 new columns were added to represent “day of week” information and 4 new columns were added

to represent “season of year” information. Using the timestamp of each row, the related hour, day and season column was set as 1 while other columns were assigned 0.

In addition to the temporal features, O₃ concentrations belonging to five different previous measurements were added as new features. These previous data are O₃ values for one week ago, one day ago, three hours ago, two hours ago and one hour ago of the O₃ concentration to be predicted. Eventually, a dataset containing 1848 rows and 51 columns was obtained.

2.3. Experiments

70% of the dataset was randomly selected as training set and the remaining part was left as test set. Since the continuous features in the dataset had been on different scales, these features were scaled through z-score normalization given by

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

where μ , σ are mean and standard deviation of the feature vector X , respectively (Equation 2).

In order to estimate O₃ concentration for the next hour, SVR, MLP, GBDT, KNN, elastic net models were trained with the optimum parameters given in section 0. In addition, R², RMSE, mean absolute error (MAE), mean absolute percentage error (MAPE) metrics were used for performance evaluation of the models.

In addition to estimation of O₃ concentration using all 50 features, a subset of features giving higher test performance was searched through backward feature elimination method. This method is a feature selection process where one feature is removed at every step [23]. The difference in test performance caused by individual removal of every single feature is observed and the feature whose removal generates the higher performance is discarded. These steps are then repeated for the remaining features until the desired number of

features is achieved or until the desired error rate is reached.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Prediction performances of the machine learning methods trained using all the features are given in Table 1. As can be seen in Table 1, the highest R^2 value is achieved by the SVR method followed by elastic net and GBDT methods, respectively (Figure 2). Additionally, the lowest RMSE, MAE and MAPE values are obtained by SVR as well. KNN and MLP methods have poor performance compared with the others for the problem in this study. While MLP has better performance than KNN in RMSE and R^2 metrics, KNN has better performance than MLP in MAE and MAPE metrics.

Table 1. Prediction results of the methods when all features are used

	RMSE	MAE	MAPE	R^2
SVR	4.8119	2.9961	7.8820	0.9697
GBDT	5.0216	3.2637	8.8934	0.9670
MLP	5.2853	3.6139	9.9880	0.9635
KNN	5.5198	3.5452	9.5762	0.9601
Elastic net	5.0178	3.2144	8.5179	0.9671

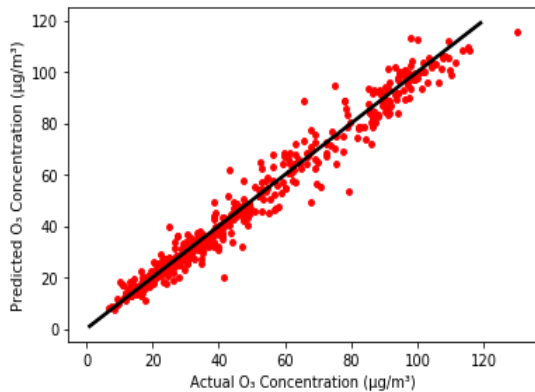


Figure 2. Predictions versus actual O_3 concentrations for SVR method

The R^2 values at every step of backward elimination for all of the methods are given in Table 2. For SVR method, removal of PM10 and relative humidity features does not affect the performance so these two features are considered to be redundant. Besides, removal of a feature does not necessarily cause a decrement in the performance. This is true when a feature does not represent the target value well. In other words, presence of such features makes it more complicated to model the data, hence causes low performance. Some examples of this situation can be seen in Table 2. For instance, performance of MLP method is increased when PM10 feature is removed. Similarly, for the same feature, higher R^2 values are obtained in GBDT and KNN methods. Furthermore, the same single feature, which is current O_3 concentration, has remained at the final step of the backward elimination in all of the methods. This means that the current O_3 concentration has the highest importance on prediction of the O_3 concentration for the next hour.

4. CONCLUSION

Air pollution has harmful impact on human health and environment. Estimation of air pollutants concentration is a major significance for any country. In this work, different machine learning methods are used for prediction of hourly O_3 concentration in Adana, Turkey. Although, the performance measures of all methods used in this study are satisfactory and their results are close each other, SVR outperformed other machine learning methods.

Furthermore, feature selection is implemented to find the best feature subsets and analyze the effect of features on the performance of models. The results indicate that the current O_3 concentration has the highest importance for predicting the O_3 concentration of the next hour. It has been observed that using only the current O_3 concentration as a single feature can yield R^2 values above 0.95.

Table 2. Feature selection results. (RH: Relative humidity, AP: Air pressure, WS: Wind speed, WD: Wind direction, T: Temperature, 1wpO₃: One week previous O₃, 1dpO₃: One day previous O₃, 2hpO₃: Two hour previous O₃, 1hpO₃: One hour previous O₃, Date: All temporal features generated via one hot encoding)

SVR		MLP		GBDT		KNN		Elastic net	
Removed feature	R ² after removed	Removed feature	R ² after removed	Removed feature	R ² after removed	Removed feature	R ² after removed	Removed feature	R ² after removed
PM10	0.9697	1wpO ₃	0.9690	1dpO ₃	0.9678	1hpO ₃	0.9604	SO ₂	0.9673
RH	0.9697	PM10	0.9705	NO _x	0.9675	PM10	0.9611	1wpO ₃	0.9673
AP	0.9695	RH	0.9712	RH	0.9678	SO ₂	0.9626	WS	0.9674
SO ₂	0.9693	AP	0.9717	WD	0.9681	1dpO ₃	0.9625	RH	0.9674
NO	0.9691	NO	0.9708	NO	0.9681	AP	0.9624	NO _x	0.9674
NO ₂	0.9690	SO ₂	0.9710	AP	0.9674	NO	0.9619	T	0.9674
WS	0.9687	2hpO ₃	0.9709	2hpO ₃	0.9678	T	0.9589	PM10	0.9673
1wpO ₃	0.9686	T	0.9724	1wpO ₃	0.9675	NO ₂	0.9583	NO	0.9673
NO _x	0.9685	Date	0.9694	PM10	0.9681	RH	0.9563	AP	0.9671
T	0.9683	WD	0.9680	1hpO ₃	0.9677	NO _x	0.9515	NO	0.9669
1hpO ₃	0.9677	WS	0.9675	WS	0.9658	2hpO ₃	0.9477	2hpO ₃	0.9667
WD	0.9670	NO _x	0.9677	SO ₂	0.9658	WD	0.9406	WD	0.9664
Date	0.9650	NO ₂	0.9653	NO ₂	0.9650	Date	0.9451	Date	0.9651
1dpO ₃	0.9604	1dpO ₃	0.9611	T	0.9644	WS	0.9459	1dpO ₃	0.9608
2hpO ₃	0.9534	1hpO ₃	0.9531	Date	0.9448	1wpO ₃	0.925	1hpO ₃	0.9532

Besides, PM10 and relative humidity are found to least important features as they are removed at initial steps of the backward elimination.

In addition, this work can be extended by using of parameters like solar radiation, rainfall, CO concentration and this may improve the performance of prediction models. Also, collection of more and clean data will definitely allow for deeper analysis.

5. REFERENCES

- Lippmann, M., 1989. Health Effects of Ozone a Critical Review. *Japca*, 39(5), 672-695.
- Manning, W.J., Tiedemann, A.V., 1995. Climate Change: Potential Effects of Increased Atmospheric Carbon Dioxide (CO₂), Ozone (O₃), and Ultraviolet-B (UV-B) Radiation on Plant Diseases. *Environmental Pollution*, 88(2), 219-245.
- Selin, N.E., Wu, S., Nam, K.M., Reilly, J.M., Paltsev, S., Prinn, R.G., Webster, M.D., 2009. Global Health and Economic Impacts of Future

Ozone Pollution. *Environmental Research Letters*, 4(4), 044014.

- Vukovich, F.M., Sherwell, J., 2003. An Examination of the Relationship Between Certain Meteorological Parameters and Surface Ozone Variations in the Baltimore–Washington Corridor. *Atmospheric Environment*, 37(7), 971-981.
- Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği. *Turkish Official Journal (Issue: 29940)*.
<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/06/20080606-6.htm>
- Yu, R., Yang, Y., Yang, L., Han, G., Move, O.A., 2016. RAQ–A Random Forest Approach for Predicting Air Quality in Urban Sensing Systems. *Sensors*, 16(1), 86.
- Corani, G., Scanagatta, M., 2016. Air Pollution Prediction Via Multi-label Classification. *Environmental Modelling & Software*, 80, 259-264.
- Rybarczyk, Y., Zalakeviciute, R., 2016. Machine Learning Approach to Forecasting Urban Pollution. In 2016 IEEE Ecuador

- Technical Chapters Meeting (ETCM) IEEE, 1-6.
9. Shaban, K.B., Kadri, A., Rezk, E., 2016. Urban Air Pollution Monitoring System with Forecasting Models. *IEEE Sensors Journal*, 16(8), 2598-2606.
 10. Salazar-Ruiz, E., Ordieres, J. B., Vergara, E.P., Capuz-Rizo, S.F., 2008. Development and Comparative Analysis of Tropospheric Ozone Prediction Models Using Linear and Artificial Intelligence-based Models in Mexicali, Baja California (Mexico) and Calexico, California (US). *Environmental Modelling & Software*, 23(8), 1056-1069.
 11. Peng, H., Lima, A.R., Teakles, A., Jin, J., Cannon, A.J., Hsieh, W.W., 2017. Evaluating Hourly Air Quality Forecasting in Canada with Nonlinear Updatable Machine Learning Methods. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10(2), 195-211.
 12. Chaloulakou, A., Saisana, M., Spyrellis, N., 2003. Comparative Assessment of Neural Networks and Regression Models for Forecasting Summertime Ozone in Athens. *Science of The Total Environment*, 313(1-3), 1-13. doi:10.1016/s0048-9697(03)00335-8
 13. Ghoneim, O.A., Manjunatha, B.R., 2017. Forecasting of Ozone Concentration in Smart City Using Deep Learning. In 2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI) (pp. 1320-1326). IEEE.
 14. Luna, A.S., Paredes, M.L.L., De Oliveira, G.C.G., Corrêa, S.M., 2014. Prediction of Ozone Concentration in Tropospheric Levels Using Artificial Neural Networks and Support Vector Machine at Rio de Janeiro, Brazil. *Atmospheric Environment*, 98, 98-104.
 15. Smola, A.J., Schölkopf, B., 2004. A Tutorial on Support Vector Regression. *Statistics and Computing*, 14(3), 199-222.
 16. Gardner, M., Dorling, S., 1998. Artificial Neural Networks (the multilayer perceptron)- a Review of Applications in the Atmospheric Sciences. *Atmospheric Environment*, 32(14-15), 2627-2636. doi:10.1016/s1352-2310(97)00447-0.
 17. Govindaraju, R.S., Rao, A.R. (Eds.). 2013. *Artificial Neural Networks in Hydrology* (Vol. 36). Springer Science & Business Media.
 18. Zou, H., Hastie, T., 2005. Regularization and Variable Selection Via the Elastic Net. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 67(2), 301-320.
 19. Friedman, J.H., 2001. Greedy Function Approximation: a Gradient Boosting Machine. *Annals of Statistics*, 1189-1232.
 20. Mohan, A., Chen, Z., Weinberger, K., 2011. Web-search Ranking with Initialized Gradient Boosted Regression Trees. In *Proceedings of the Learning to Rank Challenge*, 77-89.
 21. Wu, X., Kumar, V., Quinlan, J.R., Ghosh, J., Yang, Q., Motoda, H., Zhou, Z.H., 2008. Top 10 Algorithms in data Mining. *Knowledge and Information Systems*, 14(1), 1-37.
 22. Republic of Turkey Ministry of Environment and Urbanization National Air Quality Monitoring Network. <https://www.havaizleme.gov.tr/>
 23. Kohavi, R., John, G.H., 1997. Wrappers for Feature Subset Selection. *Artificial Intelligence*, 97(1-2), 273-324.

Aydınlatma Armatürleri için Soğutucu Modüllerinin Deneysel Değerlendirilmesi ve Yenilikçi Ürün Tasarımı

Ahmet FEYZİOĞLU*¹

¹Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul

Geliş tarihi: 28.07.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Enerji çağımızın en önemli konularından biri haline gelmiştir. Enerjinin verimli kullanılması hem devletler hem de şirketler açısından hayati bir önem taşımaktadır. LED teknolojisi aydınlatma cihazları içerisinde en verimli cihazlar olarak görülmektedir. LED aydınlatıcıların soğutulması, cihazın ömrü ve performansı açısından son derece önemlidir. Bu çalışmada alüminyum bloklara göre daha hafif ve modüler yapıda, aydınlatma armatürleri için yüksek ısı atma kapasitesine sahip soğutucu modülüne sahip alternatif çözümler değerlendirilmiş ve yenilikçi bir tasarım geliştirilmiştir. Prototip olarak üretilen soğutucu modülü üzerinde sıcaklık testleri yapılmış ve sportif aydınlatması kullanımında uygunluğu incelenmiştir. Testler sonucunda ısınma probleminin büyük ölçüde çözüldüğü gözlemlenmiştir. Modül içerisinde armatürleri soğutmak amacıyla kullanılan herhangi bir fan gücüne ihtiyaç duyulmadığı için fazladan enerji harcanmayarak ısı transferinin sağlandığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Enerji, Aydınlatma, LED, Isı transferi, Soğutma

Experimental Evaluation of Cooling Modules with High Heat Transfer Capacity for Illumination Armatures and Innovative Product Design

Abstract

Energy has become one of the most important subjects of our age. Efficient use of energy is vital for both the governments and the companies. LED technology is known as the most efficient device among lighting devices. The cooling of the LED illuminators is crucial for their lifetime and performance. In this study, alternative solutions that have a lighter and modular structure than aluminum blocks, with a high heat transfer capacity for illumination armatures, have been evaluated and an innovative design has been developed. Temperature tests were performed on the cooling module produced as a prototype and its suitability for street lighting use was examined. As a result of the tests, it was observed that the warming problem was largely solved. Since no extra fan power is needed to cool the luminaire in the module, it is seen that heat transfer is provided without extra energy.

Keywords: Energy, Illumination, LED, Heat transfer, Cooling

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ahmet FEYZİOĞLU, ahmet.feyzioglu@marmara.edu.tr

1. GİRİŞ

Yurtiçinde ve dünyada teknolojinin gelişimine paralel olarak ve aynı zamanda enerji tasarrufu sağlamak amacıyla artan LED'li aydınlatma cihaz kullanımı LED'li aydınlatma cihazlarının soğutulması gerekliliğini de beraberinde getirmektedir.

Gelişen bilim, teknoloji ve insanların enerji tasarruflu cihazlar kullanma bilinci doğrultusunda LED'ler, aydınlatma alanında oldukça geniş bir yer tutmaktadır [1]. LED'ler, kullanım alanlarında oldukça az yer kaplamaktadırlar ve buna rağmen oldukça yüksek verimlilik sağlamaktadırlar. Aydınlatmada özellikle de LED'lerde sürdürülebilirlik önem taşımaktadır [2]. Bilindiği üzere LED'ler ışık yayarken ısı üretmektedir. LED'lerde üretilen ısı hızlıca dışarı atılmadığı takdirde LED üzerinde bir ısı birikmesi olur ve bu durumda LED'in çalışma koşulları, verimliliği ve çalışma ömrü, önemli derecede etkilenerek çok daha kısa zamanda problem oluşmasına neden olmaktadır [3]. Bu durum LED'li armatürler için de geçerlidir. Armatürde kullanılan LED'ler belirli bir ısı üreterek çalışma ortamlarını, aynı sebepler dolayısıyla etkilemektedirler. LED'lerin ısınma problemini çözmek ve enerji verimliliğini arttırmak için yapılan çalışmaların çoğu geometrik şekilde değişiklikler aracılığıyla ısı kanatçıklarının termal performansının geliştirilmesi üzerinedir [4-9]. Dikdörtgen, trapez, kesikli dikdörtgen, hizalı dairesel ve zikzaklı dairesel gibi farklı geometrilerdeki kanatçık yapılarının, soğutucunun termal performansı üzerinde farklı etkileri olduğu bilinmektedir [10]. Daha önceki metotlarda, alüminyum bloklara bağlanan LED'lerin oluşturduğu ısı, alüminyum blok üzerinde şekillendirilmiş kanatçıklar vasıtasıyla dış ortama atılmaktadır. Burada LED'lerden çıkan ısı, alüminyuma temas ederek iletim yoluyla daha ince olan kanatlara, daha sonra da kanatlardan dış ortama atılmaktadır. Bu yöntem sadece düşük güçteki LED'ler için uygun olmaktadır [11]. Yüksek güçteki LED'ler için bu metot yeterli olmamakta, oluşan ısı alüminyum kontak noktasından kanatlara aktarılamamakta, kullanılan

kanat sayısı ve büyüklüğü yetmemekte ve ısı dış ortama atılamamaktadır [12].

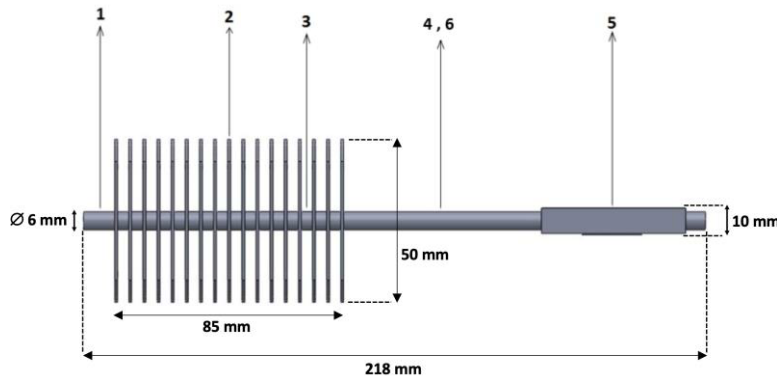
LED'ler belirli güç kapasitelerinde üretildiklerinden, kullanılacakları ortamlara göre güç kapasitesi bakımından farklılık göstermektedirler. IEC 61000-3-2 standardına göre aydınlatma sistemleri için kullanılan uygun güç 25 W'tır. Yüksek güç kapasitelerinde dış ortama daha fazla ısı enerjisi transfer edilmesi gerekmektedir. LED'lerin genel olarak çalışma sıcaklığı belirli sıcaklık değerleri arasında olduğundan dolayı bu limitlerin aşılması sağlanmalıdır. Geniş ve yüksek tavanlı mekânlarda daha iyi aydınlatma sağlanabilmesi amacıyla yüksek güç kapasitesine sahip LED'ler kullanıldığından dolayı bu LED'lerin daha iyi soğutulması gerekmektedir [13]. Daha iyi soğutma sağlayabilmek için ise soğutucu kanat yüzeylerinin artırılarak dış ortamla daha fazla temas etmesi sağlanmalıdır [14]. Bu durumda modül büyüklüğü sınırlandırılmıştır. Belirli büyüklük ve kanat yüzey alanından oluşan ısının tümü atılmadığında LED'in çalıştığı alanda bir ısı birikimi olur ve bu ortamda sıcaklık artışı meydana gelir. Bu durum da LED'lerin çalışma verimini ve ömrünü etkileyerek, LED'in daha verimsiz çalışmasına ve daha kısa sürede problem yaşamasına neden olmaktadır. Diğer ürünlerden farklı olarak bu çalışmada yapılan tasarım; armatürde bulunan boru, kanatçık, malzeme seçimi ve üretim gibi tüm işlemleri kapsamaktadır. Gerektiği soğutmanın yapılabilmesi için boru içinde kullanılan sıvının faz değişiminden faydalanılmıştır. Yapılan testler sonucunda diğer çalışmalarda kullanılan düşük akımlı (0-1A) LED'lerin aksine yüksek akımlarda çalışan LED'ler için de yeterli soğutmanın yapıldığı gözlemlenmiştir. Bir diğer karşılaşılan sorun ise, LED üzerinde oluşan ısıyı atarken büyük kütleler kullanıldığından dolayı LED'lerin takıldığı armatür ya da soğutucu- Printed Circuit Board (PCB-Baskılı Devre Kartı)-LED modülü ağır olmakta ve kullanıldığı yerde ağırlıktan kaynaklanan birtakım sorunlar teşkil etmektedir. Bu sorunlar; LED askı aparatlarının dayanım problemleri, asma tavanların ağırlık taşıma problemleri, insanların kullandığı alanlarda

lambaların dayanıksızlığından dolayı meydana gelebilecek güvenlik problemleri gibi problemlerdir. Bu çalışmada, bu problemler göz önünde bulundurularak soğutucu modül kütlemini minimum düzeyde tutacak şekilde tasarım yapılmıştır. Ayrıca modülün montajı modülün ağırlık merkezinden yapıldığından yük dengeli olarak dağılmıştır. Bu durum malzeme dayanım, ağırlık taşıma ve güvenlik problemlerine doğrudan etkisi olmuştur.

2. MATERYAL VE METOT

2.1 Soğutucu Modül Yapısı

Geliştirilen soğutucu modülü (Şekil 1); boru kapak tıpası (1), alüminyum kanatçıklar (2), alüminyum kanatçık boğazları (3), bakır boru (4), bakır taban parçası (5) ve sinter parçası (6)'ndan oluşmaktadır.



Şekil 1. Soğutma modülü parça analizi

Soğutucu modülü oluşturulurken boy optimizasyonu yapılmış, bakır borunun (4) çapı 6 mm ve boy uzunluğu 218 mm belirlenmiştir. Sportif aydınlatma ölçülendirilmesinde tanımlanan kompakt alan içerisinde hacim oluşturulmuştur. $65 \times 65 \times 230 \text{ mm}^3$ hacim ölçüsü doğrultusunda Şekil 1'de gösterildiği gibi uzunluklar belirlenmiştir. Bu oran korunarak soğutucu modülü ölçeklenebilir. Bakır malzemeden bakır boru (4) kesilerek iç çeperlerinde gözenekli ve boşluklu bir yapı yaratmak amacıyla bakır tozları ile bakır boru (4) iç çeperi doldurulduktan sonra bir fırın içerisine yerleştirilmiştir. Fırın sıcaklığı belirli sıcaklık kademelerine belirli zaman aralıklarında çıkarılarak bakır tozlarının sıcaklıkla bakır boruya (4) yapışması sağlanarak sinter parçası (6) oluşturulmaktadır. Sinter parçası (6) ile bakır boru (4) tek bir parça olacak şekilde mühürlendikten sonra bakır borunun (4) sabitlenmesi için bir tarafından taban parçasına (5) kaynak yöntemi ile sabitlenerek bakır borunun (4) bir tarafı kapatılmıştır. Daha sonra ısı transfer değerleri, kalınlık, boy, sertlik derecesi ve dizilecek kanatçık

(2) sayısı belirlenmiş ve optimize edilmiş alüminyum kanatçıklar (2) ortalarında bakır boru (4) çapından daha dar çapta bir delik bırakılarak presleme yöntemi ile bakır borunun (4) dış yüzeyine sıkı geçme yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Aynı zamanda alüminyum kanatçıkların (2) ortasındaki deliğin bakır borunun (4) dışına sıvanmasıyla alüminyum kanatçık boğazları (3) oluşturulmuştur. Bunun sebebi ısı transferinin bakır borudan (4) alüminyum kanatçıklara (2) daha hızlı ve daha büyük kapasitede transfer edilmesi sağlanmaktadır.

Bakır borunun (4) iç kısmında vakum ortamı yaratılarak akışkan bir sıvının buharlaşma ve yoğuşma yapması sağlanmıştır. Çevrimin gerçekleştirilmesi için bakır borunun (4) diğer ucu da boru kapak tıpası (1) ile kapatılarak bu parçanın bu kısma kaynak yapılması ile bakır borunun (4) her iki ucu da kapatılmış ve vakum için uygun duruma getirilmiş olmaktadır. Böylece soğutma modülü tamamlanmış olmaktadır.

2.1. Soğutucu Modül Çalışma Şekli

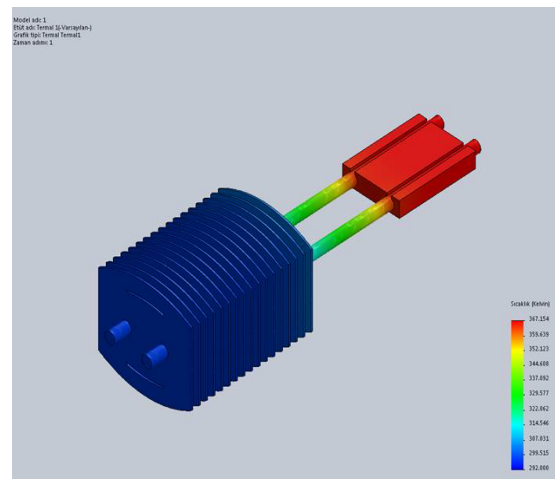
Aydınlatma armatürleri için yüksek ısı atma kapasitesine sahip soğutucu modülünün çalışma şekli olarak; ilk önce LED ve PCB konumlandırma yeri olan bakır taban parçasına (5) kullanılan bakır boru (4) boyu ve kanatçık sayısı, kalınlığı, yüzey alanı, birbirleri arasındaki mesafe sertliğine göre uygun güçte olan bir LED, PCB'si ile bağlanarak her ikisine de güç verilir. LED verilen gücün büyük bir kısmını ısı enerjisine çevirerek oluşan ısı PCB'ye ve oradan da sırasıyla bakır taban parçasına (5), bakır boruya (4), alüminyum kanatçık boğazlarına (3), alüminyum kanatçıklara (2) geçerek son olarak da dış ortama atılmaktadır. Çalışma esnasında soğutucu modülde bulunan bakır borunun (4) içi akışkan sıvı ile doldurulduktan sonra bir vakum pompası ile akışkan sıvının ısınmanın etkisi ile gerçekleşecek buharlaşma-yoğuşma çevrimi daha hızlı olması amacıyla vakum oluşturulmuştur. LED'in ürettiği ısı enerjisi vakumlu ortamda ısınarak buharlaştıktan sonra bakır borunun (4) üst kısımlarına doğru hareket eder. Hareket ederken ısı enerjisini alüminyum kanatçık boğazlarından (3) alüminyum kanatçıklara (2) aktarır ve hızlıca ısı kaybeder. Yoğuşma noktasına gelen yoğuşan kısım bakır borunun (4) iç çeperlerinde gözenekli olan sinter parçası kısmına (6) gelerek gözenekler vasıtasıyla kılcal etki yaratılıp LED in bulunduğu taban parçası (5) kısmına gelerek tekrar enerji kazanıp buharlaşarak tekrar yukarı hareket edip bir buhar-yoğuşma çevrimi gerçekleştirilmektedir.

2.3. Tasarım Gereksinimleri ve Çözümler

İmal edilmiş modülün kullanılmasıyla kapsamında mevcut LED soğutma modüllerinin belli başlı teknik sorunlarına çözüm getirilmiştir. Isı transferini sağlayan faz değişimi birbirine temas eden katı yüzey ile sıvı arasındaki sıcaklık farkı kabul edilebilir düzeyde olduğunda meydana gelir [15]. Burada önemli olan nokta boru çapının taşıyabileceği akışkan sıvı miktarıdır. Borunun dış çeperlerine belli aralıklarla dizilen kanatçıklar, akışkan sıvının taşıdığı ısı enerjisini aynı oranda alarak dış ortama atmaktadırlar. Bu homojen taşıma durumu tüm kanatçıkların maksimum performansta çalışmasını sağlayarak daha dar

yüzeylerden daha çok ısı enerjisi atılmasını sağlamaktadır. Ayrıca daha dar yüzeyler kullanıldığında normal olarak daha hafif bir soğutma modülü ortaya çıkmaktadır.

Bu modülün kullanılmasıyla elde edilen bir diğer önemli yenilikçi yön de kanatçıkların dizildiği borunun iç yüzeyinde bir kılcal boru etkisi oluşturularak buharlaşma enerjisini kanatçıklara aktaran akışkanın yoğunlaştıktan sonra kılcal etki ile çok hızlı bir biçimde geri dönmesi ve dolayısıyla bu hızlı çevrim sayesinde hızlı bir ısı transferi sağlanmaktadır. Bu durum borunun iç çeperlerine boru ile aynı malzemede olan metal tozunun yüksek sıcaklıkta yapıştırılması ve iç yüzeyde küçük delikli porozif ve geçirgen bir yapı oluşturularak kohezyon kuvveti meydana getirilmesini sağlamıştır. Kohezyon kuvveti etkisini artırmak için de boru iç yüzeyinde koniklik yaratılarak sıvı moleküllerinin konikliğin etkisi ile daha da hızlı çevrime girmesi gerçekleştirilmiştir. Bu buluşun içerisinde gerçekleştirilen kanatçık dizme çalışmalarında da boruya dizilecek kanatçıkların kalınlıkları, yüzey alanları, boğaz mesafeleri, sıkı geçme toleransları, birbiri arasındaki aralık mesafeleri ve ısı enerjisi atma kapasitesine göre kullanılacak kanatçık sayısı belirlenmiş ve bu alanda optimizasyonlar yapılmıştır. Solidworks platformunda tasarlanan prototip ürünün görseli Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir.



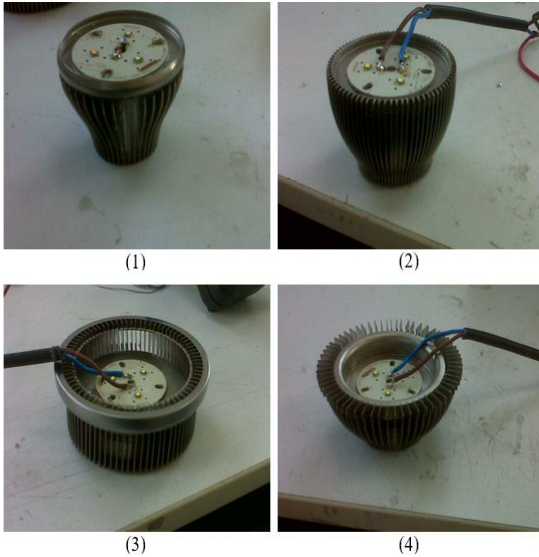
Şekil 2. Tasarlanan prototip ürün görüntüsü

Geliştirilen soğutma modülünde kullanılan borunun her iki tarafı da kaynak ile mühürlenerek kapatılmış ve bu sayede borunun iç kısmında bir vakum yaratılarak akışkan sıvı çevriminin daha hızlı gerçekleşmesi sağlanmıştır. Her iki tarafa yapılan kaynak ile mühürleme sayesinde vakum durumunda herhangi bir olumsuz durum yaşanmamakta ve modül daha uzun zaman çevrim yapmaya devam edebilmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

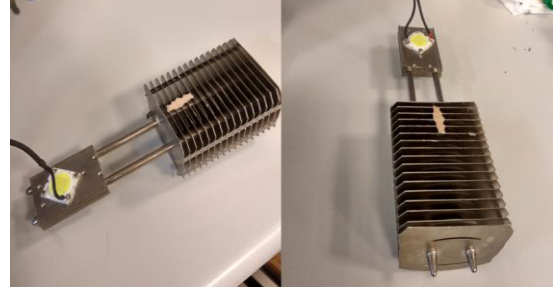
3.1. Performans Karşılaştırması

İmal edilen soğutucu modülünün performansını ölçmek amacıyla Şekil 3'te gösterilen piyasadaki hazır soğutucu modülleri incelenmiştir. Farklı geometrik şekillerde olan 4 adet soğutucu modül üzerinde 9 W 450 mA XP-G LED kullanılarak bağlantı noktası ve gövde sıcaklıkları ölçülmüştür.



Şekil 3. Farklı geometrik şekillerde soğutucu modülleri

Aynı özelliklere sahip LED kullanılarak Şekil 4'te bu çalışmada imal edilen soğutucu modülünün bağlantı noktası ve gövde sıcaklık değeri de ölçülmüştür.



Şekil 4. Bu çalışmada imal edilen soğutucu modül

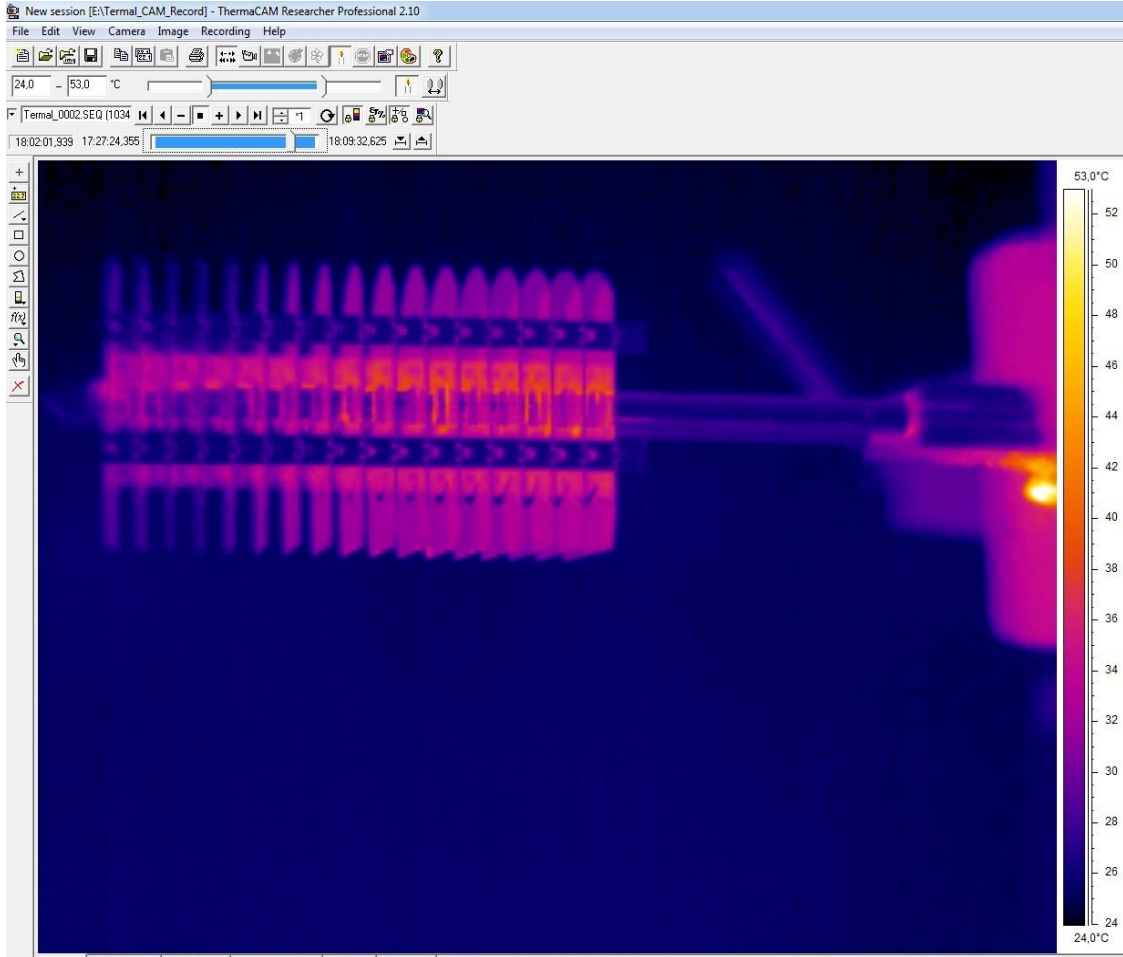
Sistemin enerjilendirilmesinden sonra ortalama 31 °C ortam sıcaklığında 60 dakika boyunca yapılan sıcaklık ölçümleri Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 1'de imal edilen soğutucu modülü bağlantı noktası ve gövde sıcaklık değerinin diğer modellere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu ölçümler sonucunda LED ısınma problemi için diğer modellere göre daha iyi soğutma sağlandığı kanıtlanmıştır.

Çizelge 1. Soğutucu modüllerin sıcaklık değerleri

	Ortam sıcaklığı (°C)	Bağlantı noktası sıcaklığı (°C)	Gövde Sıcaklığı (°C)
Model 1	33	50	50
Model 2	31	57	48
Model 3	32	49	39
Model 4	31	55	39
İmal edilen model	31	43	36

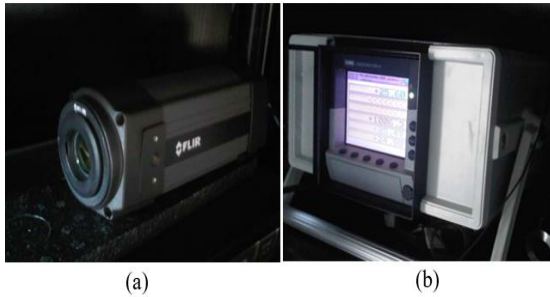
3.2. Sıcaklık Testi Çalışmaları

Üretilen prototipin termal kamera ile test edilmesi sırasında dışardan gelen ışıkların sıcaklık testlerinde doğru sonuçları vermeleri için karanlık test ünitesi oluşturulmuş ve Şekil 5'te görüldüğü gibi testlere tabi tutulmuştur. Bu bölümde 9 W Power LED daha yüksek güçte çalıştırılarak soğutucu modülün sportif ve otoyol aydınlatmalarında kullanımına uygun olup olmadığı incelenmiştir.



Şekil 5. Soğutucu modül termal kamera görüntüsü

Proje kapsamında alınan termal kamera ve Jumo test cihazı kullanılarak sıcaklıklar incelenmiştir (Şekil 6).



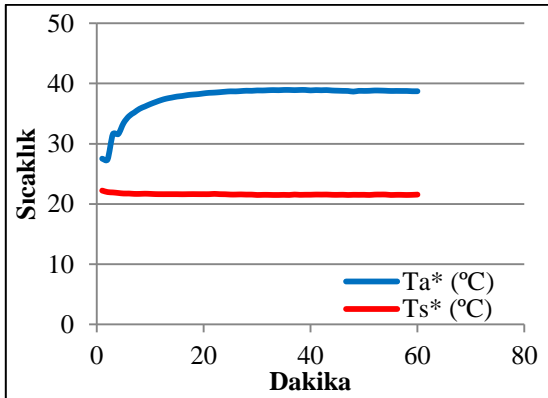
Şekil 6. Termal kamera (a) ve Jumo (b) cihazları

Oluşturulan mekanik soğutucu üzerine 9 W'lık Power LED bağlanarak, sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Bu incelemeler proje kapsamında alınan Jumo cihazı ve Termal Kamera ile ölçülerek kıyaslanmıştır. Jumo'ya 5 adet termokupl bağlanarak 5 farklı noktadan ölçümleri yapılmıştır. Dakika başına alınan değerler bilgisayar ortamına aktarılarak sıcaklık değişimleri incelenmiş ve her ayrı model ve LED özelliklerine göre sıcaklık zaman değişim grafikleri oluşturulmuştur. Termal kamera analizleri ve sonuçlarından oluşturulan test 1 ve test 2'nin sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir. Test 2'de hesaplanan güçteki 4,5 W'lık artış ile birlikte LED'in bağlantı noktası sıcaklığının 16 °C kadar arttığı görülmektedir.

Çizelge 2. Test 1 ve test 2 ölçüm değerleri

	Test 1	Test 2
Ölçülen Voltaj (V)	6,4	7,4
Ölçülen Akım (A)	1,7	2,1
Hesaplanan Güç (W)	11	15,5
Ts* (°C)	22	22
Ta* (°C)	38	47
Tj* (°C)	54	70
Test Süresi (saat)	1	1,5
*Ts: Ortam sıcaklığı		
* Ta: PCB montaj yüzey sıcaklığı		
* Tj: LED - Çip bağlantı noktası sıcaklığı		

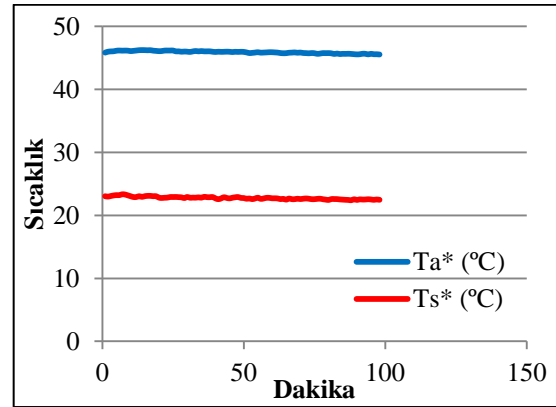
Oluşturulan prototiplerin termal kamera ile sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Sistem stabil hale geldiğinde boru üzerindeki ve bir alüminyum kapakçık üzerindeki sıcaklık değişimleri grafikleri oluşturulmuş ve sıcaklık farkları incelenmiştir. Şekil 7’de test 1 ve Şekil 8’de test 2’de ölçülen sıcaklık değerinin grafikleri verilmiştir. Şekil 8’deki grafiğe göre ortalama PCB montaj yüzey sıcaklığı 38 °C, ortam sıcaklığı 22 °C ve bağlantı noktası sıcaklığı 54 °C’dir.

**Şekil 7.** Test 1 sıcaklık grafiği

Şekil 8’deki grafiğe göre ise ortalama PCB montaj yüzey sıcaklığı 47 °C, ortam sıcaklığı 22 °C ve bağlantı noktası sıcaklığı 70 °C’dir. Kullanılan Power LED’in çalışması için maksimum bağlantı sıcaklığı 90 °C’dir. Her iki test sonucunda 22 °C ortam sıcaklığında kullanılan Power LED için yeterli soğutmayı sağladığı görülmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada soğutucu modül tasarımı geliştirilmiş ve imal edilmiştir. İmal edilen prototip üzerinde sıcaklık testleri yapılmış ve piyasadaki diğer soğutucu modüllerle karşılaştırması yapılarak performansı incelenmiştir. Sportif aydınlatmada ve otoyol aydınlatmalarında büyük ölçüde kullanılabilir olduğu görülmüştür.

**Şekil 8.** Test 2 sıcaklık grafiği

Geliştirilen soğutucu modül birçok yeniliğe ve avantaja sahiptir. Bu yeniliklerden biri geliştirilen buluş ile yüksek güce sahip LED’lerin büyük hacimli ve ağır kütleler kullanılmadan soğutulmasının gerçekleştirilmesidir. Kullanılan teknik ile ısı transferi daha hızlı yapılmakta ve bunun için büyük yüzeylere gerek duyulmadan çok daha küçük yüzeylerden büyük kapasitede ısı dışarıya atılmaktadır.

Geliştirilen soğutma modülünde ısı atma yüzeyleri ince bir alüminyum levha olarak üst üste dizildiğinden ve aynı zamanda ısı transferinin homojen ve çok hızlı bir şekilde yapılmasından dolayı büyük yüzey alanlarına sahip ağır alüminyum bloklar kullanılmasına gerek duyulmamaktadır.

Oluşturulan PCB-LED ve soğutucu yan yana getirilerek veya ayrı ayrı kullanılarak modüler bir yapı oluşturulabilmektedir. Geliştirilen modülde tek ve yüksek güç kapasitesine sahip LED’ler kullanılarak istenilen yerlere istenilen miktarda

PCB-LED ve soğutucudan oluşan modülleri yerleştirmek ve istenildiğinde yerlerini değiştirmek mümkün olmaktadır.

Modüler yapıya sahip LED-PCB ve soğutucudan oluşan modül her açıdan çalışabilir olacaktır. Bu nedenle ışık açısı ve gerekli yerlerde istenen aydınlatma şiddeti ayarlanabilir olmaktadır. Bu durum armatürlerde kullanılan lens ve reflektör tasarımına son derece fayda sağlayarak daha iyi bir aydınlatma ortamı oluşturulmasına katkıda bulunmaktadır.

5. KAYNAKLAR

1. Lenk, R., Lenk, C., 2016. Practical Lighting Design with LEDs, Wiley-IEEE Press, 1, 304-307.
2. Çelik, K., Ünver, F.R., 2019. Eğitim Yapılarında Sürdürülebilir Aydınlatma Tasarımı Yaklaşımı. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34(3), 49-63.
3. Badalan, N., Svasta, P., 2017. Fan vs. Passive Heat Sink with Heat Pipe in Cooling of High-Power LED, 2017 IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Constanta, 296-299.
4. Jang, D., Yook, S.J., Lee, K.S., 2014. Optimum Design of a Radial Heat Sink with a Fin-Height Profile for High-Power LED Lighting Applications. Applied Energy, 116, 260-268.
5. Jang, D., Yu, S.H., Lee K.S., 2012. Multidisciplinary Optimization of a Pin-Fin Radial Heat Sink for LED Lighting Applications, International Journal of Heat Mass Transfer, 55(4), 515-521.
6. Amini, M., Jani, S., Mahmoodi, M., Jam, J.M., 2014. Numerical Investigation of Natural Convection Heat Transfer in a Symmetrically Cooled Square Cavity with a Thin Fin on its Bottom Wall, Thermal Science, 18, 1119-1132.
7. Huang, Y., Shen, S., Li, H., Gu, Y., 2019. Numerical Analysis on the Thermal Performances of Different Types of Fin Heat Sink for High-Power Led Lamp Cooling, Thermal Science, 23(2), 625-636.
8. Huang, Y., Shen, S., Li, H., Gu, Y., 2016. Improved Thermal Design of Fin Heat Sink for High-Power LED Lamp Cooling, 2016 17th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), 1069-1074.
9. Karatekin, C., Kökkaya, O., 2018. Comparative Analysis of Different Cooling Fin Types for Countering LED Luminaires' Heat Problems, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 26, 454-466.
10. Laad, P., Akhare, B., Chaurasia, P., 2016. Thermal Analysis of Heat Sink with Fins of Different Configuration Using Ansys Workbench 14.0, International Journal of Engineering Sciences and Research Technology, 5(6), 82-93.
11. Zheng, J., Ge, D., Li, J., 2015. The Analysis of Heat Pipe Cooling in High Power LED Lighting System, 2015 16th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Changsha, 480-482.
12. Xiao, C., Liao, H., Wang, Y., Li, J., Zhu, W., 2017. A Novel Automated Heat-Pipe Cooling Device for High-Power LEDs, Applied Thermal Engineering, 111, 1320-1329.
13. Zheng, H., Xu, C., Liu, J., Chu, J., Liu, S., Zeng, X., Sun, R., 2017. A Novel Cooling Method for LED Filament Bulb Using Ionic Wind, 2017 16th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), Orlando, FL, 998-1003.
14. Çiçek, B., Şahin, N., 2020. Sokak Aydınlatmalarında Kullanılacak Yüksek Güçlü LED'lerin Termal Performansının Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Journal of Engineering Sciences and Design, 8(1), 185-197.
15. Karaçaylı, İ., Şimşek, E., Altay, L., Hepbaşlı, A., 2018. Experimental and Analytical Investigation of Heat Transfer Coefficient of a Water-Cooled Condenser for Different Water Flows and Condensation Pressures, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(2), 101-112.

True Variable-Depth Milling of Nickel-Based Alloy IN-718

Durul ULUTAN*¹

¹Kadir Has Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
Bölümü, İstanbul

Geliş tarihi: 14.07.2020

Kabul tarihi: 20.10.2020

Abstract

Rapid tool wear in machining causes increased process cost. While flank wear and crater wear have been investigated deeply by researchers, notch wear has been somewhat overlooked, despite the fact that it has an important role in the tool replacement decision. Notch wear happens due to impact forces at the depth of cut particularly during intermittent cutting. To avoid frequent tool change decisions, varying the depth of cut constantly during machining has been proposed as an alternative. In this study, milling experiments were conducted on the nickel-based alloy IN-718 where the depth of cut was varied throughout the cut. Results show favorable findings towards eliminating notch wear without compromising from machining efficiency.

Keywords: Milling, Variable depth milling, Tool wear, Nickel-based alloy, Notch wear

Nikel-Bazlı Alaşımlarda (IN-718) Gerçek Değişken-Derinlikli Frezeleme

Öz

Metal işleme sırasında takımın hızlı aşınması artan proses maliyetine neden olur. Kanat aşınması ve krater aşınması literatürde derinlemesine incelenirken, takım değiştirme kararında önemli bir rol oynayan çentik aşınması ikinci plana itilmiştir. Çentik aşınması, özellikle aralıklı kesim sırasında kesme derinliğindeki darbe kuvvetleri nedeniyle meydana gelir. Takımı sık değiştirmemek için alternatif olarak işleme sırasında kesme derinliğinin sürekli olarak değiştirilmesi önerilmiştir. Bu çalışmada, nikel-bazlı IN-718 alaşımında kesme derinliğinin kesim boyunca değiştiği frezeleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, işleme verimliliğinden ödün vermeden çentik aşınmasını ortadan kaldırmaya yönelik olumlu bulgular göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Frezeleme, Değişken-derinlikli frezeleme, Takım aşınması, Nikel-bazlı alaşımlar, Çentik aşınması

*Corresponding author (Sorumlu yazar): Durul ULUTAN, durul.ulutan@khas.edu.tr

1. INTRODUCTION

In milling processes, tool contacts the workpiece to remove material [1]. When the hard and sharp tool contacts the workpiece free surface that has lower hardness value, shearing mechanism is created and the workpiece is “torn apart” [2]. During this process, the workpiece is damaged evidently more due to the shearing motion, but the tool is also worn due to the contact [3]. The amount of wear that the tool experiences depends on the tool material, workpiece material, as well as the process parameters [4,5]. However, either slowly or rapidly, the tool experiences a nondecreasing wear that makes it go from its sharp (new/unworn) stage to worn [6]. Tool wear at mild amounts are not attributed to part quality issues [2]. However, when tool wear becomes significant (over a pre-determined threshold), it starts to affect the quality of the end product; hence the tool needs to be changed (tool failure) [4-7].

Tool can wear out (fail) in two distinct ways – either at the blink of an eye due to an extreme effect or gradually [8]. If the tool is worn with an impact, it is almost impossible to stop the process immediately. Hence, the part quality is always affected in such cases. Therefore, gradual tool wear is the preferred mode of tool failure [9]. There are also multiple modes of gradual tool wear such as crater wear, notch wear, flank wear, thermal and mechanical cracking, and nose wear [3]. Although all of these types of tool wear are important and therefore should be taken care of, some of them do not appear unless extreme conditions are used, or for special tool and workpiece materials. The remaining ones play an important role in reducing end product quality and should be monitored.

The most ideal mode of tool wear is flank wear, due to its gradual nature and relatively high predictability [10]. Many researchers studied the evolution of flank wear and the best methods to alleviate it [11-16]. In processes where the friction between tool and chip is significant compared to the shearing in the primary shear zone, crater wear also becomes a factor to be reckoned with [16-17]. Usually, relatively easy fixes such as chip breakers

and lubrication techniques are used to alleviate crater wear.

Notch wear is another mode of tool wear that requires attention, but receives little [4,6,7,9]. Particularly in intermittent cutting processes such as milling, due to the impact forces between the tool and the workpiece at every tooth contact, a notch occurs at the contact location (see figures 1 & 2). This notch can be characterized as flank wear that grows relatively more rapidly than other flank wear locations. Per ISO regulations, allowed flank wear width before tool is deemed failed is 300 μm . However, since notch wear happens more rapidly, ISO regulations allow up to 600 μm notch wear width [8]. At this threshold, tool is considered worn and needs to be changed. Usually, modifying machining parameters (cutting speed, feed, depth of cut, width of cut, lubrication, etc.) is the chosen way that has been used by researchers and machine operators alike [18-23]. It is an understandable route, since particularly regular flank wear can be reduced by using a different set of parameters. Also, if the depth of cut is altered, the location of the notch wear can be modified, hence being able to utilize the tool further.



Figure 1. Notch wear initiation and propagation [6]

However, this fix is more of a patch to the problem at hand than a solution. In many cases, notch wear can be more serious than flank wear because of higher wear rate [24]. Even with the “patches” suggested by many researchers, notch wear still

occurs and is detrimental to the part quality, and altering machining parameters manually at sporadic time intervals is neither automated nor practical [9]. Therefore, an automated, constant, and consistent way of altering the depth of cut without the need for an involvement of workers is needed [25]. In this study, a work towards the solution for this problem is presented.

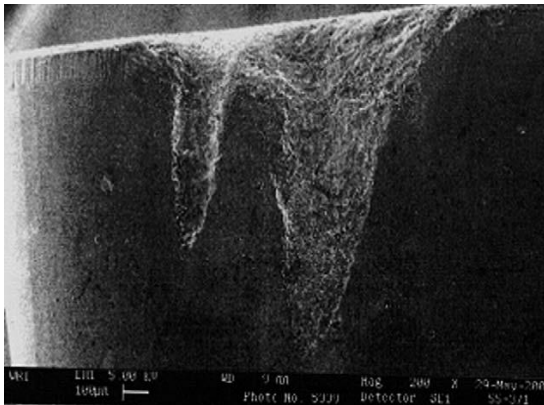


Figure 2. Notch wear [4].

In this work, first the studies relevant to the method presented here are discussed in Section 2. Then, experimental setup and the methodology are introduced in Section 3. Results are presented and discussed in Section 4, and concluding remarks and future directions are presented in Section 5.

2. LITERATURE REVIEW

Researchers have focused on flank wear and crater wear and did not pay sufficient attention to notch wear [3]. As a result, when a case occurs where the tool wears out rapidly, the knee-jerk reaction by researchers and machine operators alike is to modify cutting parameters of cutting speed and feed. It is accepted that by changing these two parameters, it is possible to reduce tool wear to acceptable levels [21,26,27]. The issue with this approach is that the reduced tool wear is on the flank or crater of the tool and the changes do not really affect notch wear [9]. The nature of notch wear states that as long as depth of cut stays constant, the impact forces keep developing the notch wear [7]. Varying the cutting speed and feed

may change the speed of notch wear evolution but does not fix the problem altogether.

Varying the depth of cut, on the other hand, changes the location of the notch wear thus starts over the evolution of notch wear. It is an effective way to fight notch wear development, but not an efficient one, since either the machine operator will need to stop the process arbitrarily, adjust the parameters and restart the process, or the programmer will need to include an arbitrary change of depth of cut without any information on how the notch wear will have progressed up until that point. Therefore, intermittent variation of depth of cut is an effective but not a practical way to combat notch wear.

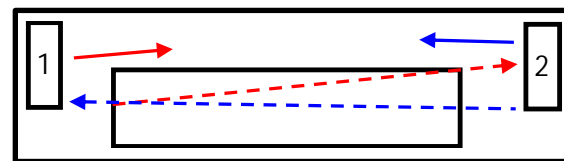
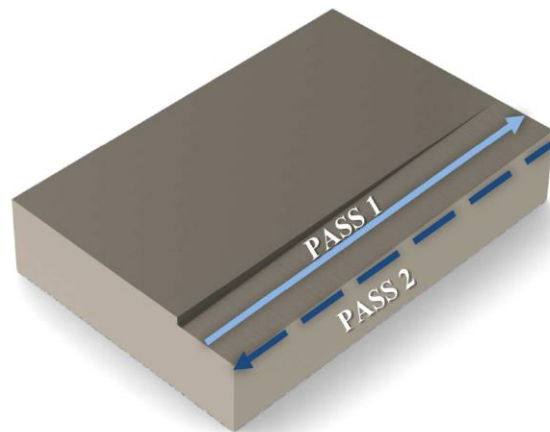


Figure 3. Tool path in regular variable-depth milling: (top) a 3D-illustration [5], (bottom) a 2D-illustration of tool path [9]

Another approach can be to constantly alter the depth of cut based on the amount of tool progress (see figure 3). This way, notch wear will not happen at a finite number of locations on the flank, but rather be distributed along the flank uniformly [5,9]. Hence, varying the depth of cut constantly throughout the cut can have the following benefits:

1. Notch wear will be distributed along the flank and not concentrated on one (or a finite number of) location(s). Therefore, crack initiation at the notch wear location will not be an issue.
2. If the depth of cut is constantly varying, then the impact forces will change location constantly as well. Therefore, reasons for crack propagation will also be minimized.

Varying the depth of cut (variable-depth milling, or VDM) arbitrarily may create issues with planning and programming of the process, as well as uniform distribution of notch wear. Researchers have worked on dividing a straight rectangular-prism cut into two triangles and machining a triangle per pass as shown in Figure 3 [5]. However, there are two major problems with this method. First, constantly decreasing the depth of cut from maximum to zero and repeating this cycle will reduce overall impact forces but the initial contact between the tool and the workpiece at the maximum depth of cut will still create impact forces and vibrations that may carry along throughout the cut. Therefore, it is critical to start at zero depth of cut and constantly and smoothly increase to maximum depth of cut throughout the pass. This way, initial high impact forces will be eliminated and instead the tool will feel the impact and vibration effects toward the end of the cut (after which there will be no tool-workpiece contact so no part quality effects).

Second problem with VDM is that since the tool axis is not orthogonal to the tool path, load of the cut is not distributed uniformly on the tool cutting face (see figure 4) [9]. This causes the tool to experience premature catastrophic failure, leaving the application of variable-depth milling (VDM) with no practical value. Therefore, it becomes important to orient the tool so that the tool axis is orthogonal to the tool path [9]. For this purpose, a true-VDM procedure has been proposed in a previous study, where the workpiece is constantly tilted at a certain angle and back to create the triangular paths without affecting the orthogonality between the tool axis and the tool path [9] (see figure 5). To accomplish the tilting of the workpiece, a 4- or 5-axis CNC can be utilized. Although theoretically manual tilting of the

workpiece in a knee-mill with the use of angled vices is possible as well, it would not be practical to do so because of the amount of time that would be required to constantly tilt the workpiece and back. A retrofit equipment can be used in a 3-axis CNC to accomplish the tilting, however programming the retrofit may create timing issues. Therefore, a 5-axis CNC was utilized in the previous study [9] as well as this one.

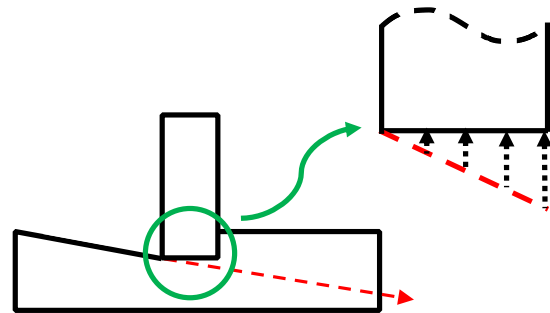


Figure 4. Illustration of cutting forces in VDM [9]

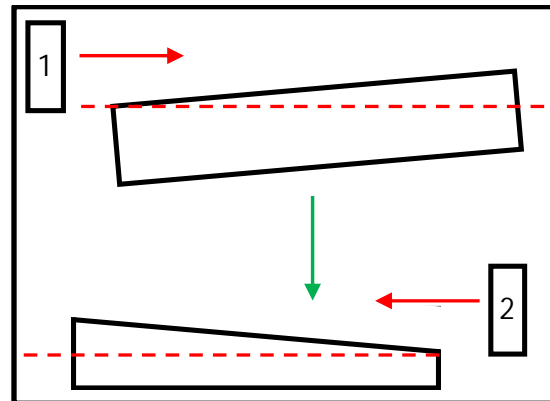


Figure 5. Tool path in true-VDM [9]

In the previous study [9], this method was coined and detailed. However, the method was only tested with an aluminum alloy (Al-6061). This alloy, however widely it may be used, has a low hardness value (HRB 60). Therefore, its machinability is very high and the effectiveness of the true-VDM method cannot be observed well with this material. Usually, materials that induce high tool wear are difficult-to-machine, high-hardness materials such as nickel-based alloys. These alloys have hardness value so high compared to aluminum alloys, their hardness values are not even measured using the

same hardness scale (Rockwell B). Because of this superior hardness property as well as roughly three-fold strength compared to aluminum alloy Al-6061, their tool wear-inducing characteristics are more observable. Therefore, the nickel-based alloy IN-718 is used in this study to reveal the effectiveness of true-VDM.

3. MATERIALS AND METHODS

3.1. Experimental Setup

Milling experiments were conducted in order to investigate the effectiveness of the method. Specimens of rectangular prism shape and roughly 75 mm in width, 150 mm in length and 75 mm in depth were used as the workpiece. A “pass” was characterized as a straight cut from one side of the specimen to the other (75 mm cutting length). In terms of the workpiece material, IN-718 was used (see table 1 for its chemical composition). A three-flute cutter from Sandvik (RA 390-019M19-11M) with suitable inserts (Sandvik R390-11 T3 08M-1130) were used to machine the workpiece. On each face, 8 rectangular slots were completed, then the part was faced again to reveal a new machinable surface. For each slot, fresh unworn set of inserts were used to be able to keep track of zero-to-worn inserts. To be able to accomplish the tilting motion required to achieve “true-VDM,” a 5-axis Haas CNC milling center was used.

3.2. Measurements

While machining, forces in three directions (cutting speed, feed, depth of cut) were measured using a Kistler 3-component dynamometer (9257BA). After machining was complete, inserts were inspected by the help of an Olympus optical microscope. The digital photos of the flank region were carefully measured for any signs of notch wear. For regular milling, maximum wear located at the depth of cut was taken as the notch wear. For true-VDM, the maximum width of the flank wear at any location was taken as the notch wear since no specific maximum wear width location existed. For regular end milling tests, average resultant force between 85% to 95% of the pass length was

taken as the indication of severity. For true-VDM, the maximum resultant force throughout the pass (which happens at the maximum depth of cut) was taken. Since the material removal rate (*MRR*) was similar at those times between end milling and true-VDM, the forces were expected to be similar.

Table 1. Chemical composition of IN-718

Element	Percentage (%)
IN-718	
Nickel	50-55
Chromium	17-21
Iron	17
Molybdenum	3
Niobium	5
Manganese	0.35
Silicon	0.35
Carbon	0.08
Phosphorus	0.01
Sulfur	0.01
Aluminum	0.6
Titanium	1
Cobalt	1
Boron	0.005
Copper	0.3
Tantalum	0.05

3.3. Experimental Design

In order to understand true-VDM and its effects, tests with the same parameter sets were repeated for both end milling and true-VDM. When comparing in terms of maximum force, this makes sense since the *MRR* at the measurement location (end of cut) is the same. However, using the same parameter would always favor true-VDM in terms of notch wear due to the lower overall *MRR* associated with the process. This will not be a fair comparison since the true-VDM method uses twice as much time to complete the same cut. Therefore, in terms of notch wear, the two methods are compared at the same material removal rate (*MRR*), which means either the feed, the cutting speed, or the depth of cut is doubled (1). In this equation, *MRR* is the Material Removal Rate, *w* is the width of cut, *a_p* is the depth of cut, *V_c* is the cutting speed, *D* is the diameter of cutter, and *f* is the feed per revolution of the cutter (Equation 1).

$$MRR = w_a p \left(\frac{V_c}{\pi D} f \right) \quad (1)$$

Experimental design for all tests is provided in Table 2, where the width of cut was 18.75 mm. All tests were replicated 3 times to alleviate the effect of any outliers. Test numbers in Table 2 are used to refer to the test (and is not an indication of the order of the tests being executed). Groupings in Table 2 refer to how tests are compared to each other based on having the same *MRR*. This is used when comparing end milling to true-VDM in terms of tool notch wear amount. Two of the tests (the mildest—test 1 – for true-VDM and the most severe—test 18—for end milling) cannot be compared to another test because their *MRR* values are unmatched. It must be noted that since *MRR* values here show the maximum *MRR* during true-VDM, the actual *MRR* during any true-VDM process is half of what is stated there. Due to this reason, any group with a letter assigned to it in end milling (e.g. Group B) is later compared to group of true-VDM tests with a letter that comes after the first one (e.g. Group C) so that the actual *MRRs* match.

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

Experiments defined in the previous section were completed with both end-milling and true-VDM methods. Measured resultant forces aligned in a similar fashion for all the experiments (see figure 6 for an illustration that shows the general trend). For end milling tests, since the depth of cut was constant throughout the cut, once full immersion of the cutter into the workpiece was achieved, a somewhat-constant resultant force was observed until the tool started leaving the workpiece. On the other hand, true-VDM tests showed that the forces increased from zero to maximum in a smooth manner, proportional to the depth of cut. The important comparison here is between the maximum value of the resultant force during true-VDM and the average value of the resultant force in end milling. In order to make a fair comparison, averages of the resultant force between 85% to 95% of the cutting length were taken as the force value for any specific test. These measurements are provided in Table 3, where $F_{R,end}$ is the average

resultant force between 85% to 95% of the cutting length during end milling, whereas $F_{R,tVDM}$ is the same for true-VDM.

Table 2. Experimental design for end milling and true-VDM tests

Test	Group	Cutting Speed	Feed	Depth of Cut	MRR
		V_c m/min	f mm/rev	a_p mm	
1	A	25	0.05	0.25	1.6
2	B	50			3.3
3	C	100			6.5
4	B	25	0.1		3.3
5	C	50			6.5
6	D	100			13.1
7	C	25	0.2		6.5
8	D	50			13.1
9	E	100			26.1
10	B	25	0.05	0.5	3.3
11	C	50			6.5
12	D	100			13.1
13	C	25	0.1		6.5
14	D	50			13.1
15	E	100			26.1
16	D	25	0.2		13.1
17	E	50			26.1
18	F	100			52.2

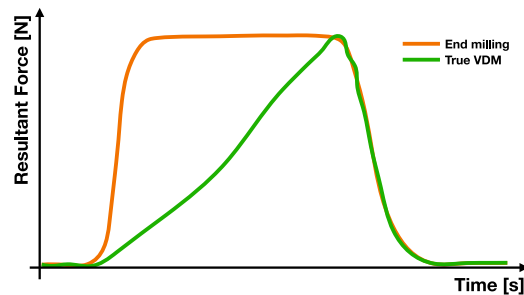


Figure 6. Illustration of resultant force development during end milling and true-VDM

At this point, it is important to remember that the resultant force measurements and comparison is only to affirm that the two processes, at their maximum depth of cut, are similar and that true-VDM can actually be confirmed as a division of

the regular end milling processes into two triangular pieces. Indeed, there was a 16% difference or less between the maximum resultant forces during end milling and true-VDM under the same conditions, except for test 18. That is because test 18 is the experiment with the most severe cutting conditions.

Table 3. Comparison of resultant forces

Test	$F_{R,end}$	$F_{R,tVDM}$	Difference (absolute)
	N	N	%
1	43	46	6
2	62	58	6
3	80	82	2
4	65	69	6
5	100	103	3
6	152	139	8
7	137	138	0
8	219	210	4
9	273	255	6
10	81	77	4
11	105	119	13
12	158	150	5
13	146	124	15
14	202	180	10
15	280	276	1
16	264	221	16
17	380	335	11
18	640	451	29

Due to the severity of machining parameters, the inserts exceeded the maximum allowed notch wear (600 μm) in all three replications—meaning they failed due to the severe cutting conditions. Even during that test, the difference between the resultant forces of the two methods happened to be 29%, and the average difference between forces in all of 18 tests was measured at 8%. To confirm, the measurements were subjected to a statistical significance test that is the t-test. The null hypothesis here is that the two set of samples come from the same distribution as depicted in (2), where H_0 and H_1 are the null and the alternate hypotheses, and μ_1 and μ_2 are the means of the two samples. Since the samples come from changing parameters, a two-tailed paired t-test was chosen. The result of $p=0.08$ shows that there is not a

statistically significant difference between the two result sets. Therefore, the two test methods can be said to result roughly in the same resultant force values in general since they represent the same process (Equation 2).

$$H_0: \mu_1 = \mu_2, \quad H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (2)$$

After showing that the resultant forces are not different between the two methods, it is essential to get to the main hypothesis of this article – that the true-VDM method results in significantly lower notch wear compared to end milling at the same *MRR*. To test the difference, results of notch wear (averages of measurements of three replications and for all experiments in the same group with the same *MRR*) are tabulated as shown in Table 4. In this scenario, the null hypothesis is that the notch wear during true-VDM is not lower than the notch wear during end milling, which means that the alternate hypothesis is that it is lower (3). In this equation, H_0 and H_1 are the null and alternate hypotheses, and μ_1 and μ_2 are the mean notch wear of true-VDM samples and end milling samples, respectively. Since it is claimed that the notch wear should be lower, a one-tailed t-test was chosen. Just like the previous test though, since the measurements come from changing parameters, a paired test should be applied. In sum, the one-tailed paired t-test between the results shown in Table 4 results in $p=0.041$ (Equation 3).

$$H_0: \mu_1 \geq \mu_2, \quad H_1: \mu_1 < \mu_2 \quad (3)$$

Since there are only 5 pairs of values to compare, the fact that $p < 0.05$ was found is even a stronger indication that the null hypothesis cannot be accepted. Therefore, it can be concluded that true-VDM method results in significantly lower notch wear compared to end milling even under the condition of same actual *MRR* (different parameters but same total time to remove the same volume of material). It was observed that true-VDM led to 25-48% less notch wear, an average of 37%. Taking that average as a reference, it can be claimed that after the volume of material machined with end milling when the inserts fail, roughly half

that amount of material could have been additionally machined if true-VDM was used.

Table 4. Comparison of notch wear

Note: *shows failed insert during test

Group	$VB_{N,end}$	Group	$VB_{N,VDM}$	Difference
	μm		μm	%
A	84	B	63	25
B	134	C	81	39
C	197	D	135	31
D	422	E	216	48
E	749*	F	421	43

5. CONCLUSIONS

In this work, a relatively new process called “true variable depth milling” (“true-VDM”) was investigated and compared to conventional end milling using the nickel-based alloy IN-718. Since the premise of true-VDM is lowering the amount of notch wear by uniformly distributing it along the flank face while not affecting the machining dynamics otherwise, resultant forces and notch wear incurred by the two methods were measured and compared.

The first comparison was made between resultant forces incurred by the two methods. This comparison showed that there is no significant difference between the resultant forces ($p=0.08$), measured at their maximum values (to prevent bias toward true-VDM). Therefore, it was concluded that the machine dynamics are not different for the true-VDM method compared to end milling. The second comparison was made between the notch wear incurred by the two methods. This comparison showed that the notch wear caused by true-VDM is significantly less than that of end milling ($p=0.041$). Therefore, it was concluded that the tool can be used roughly 50% more with true-VDM, which can lead to a significant decrease in machining costs.

The main hurdle with the application of the true-VDM technique is that it requires a mechanism of sorts to constantly tilt the workpiece and back. Therefore, this method can be more suitable to industries and companies with relatively large

already-established machining volumes – since those would be the prime suspects for having or acquiring 4- or 5-axis CNC machines. In smaller size industries, depending on how frequently the design of the cut is altered, retrofit techniques can be developed so that purchasing of expensive machinery that is the 5-axis CNC may not be necessary.

6. REFERENCES

1. Ulutan, D., Özel, T., 2011. Machining Induced Surface Integrity in Titanium and Nickel Alloys: A Review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(3), 250-80.
2. Özel, T., Ulutan, D., 2014. Effects of Machining Parameters and Tool Geometry on Serrated Chip Formation, Specific Forces and Energies in Orthogonal Cutting of Nickel-based Super Alloy Inconel 100. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 228(7), 673-86.
3. Özdemir, U., Erten, M., 2003. Talaşlı Imalat Sırasında Kesici Takımda Meydana Gelen Hasar Mekanizmaları ve Takım Hasarını Azaltma Yöntemleri. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 1(1), 37-50.
4. Kumar, A.S., Durai, A.R., Sornakumar, T., 2006. The Effect of Tool Wear on Tool Life of Alumina-based Ceramic Cutting Tools While Machining Hardened Martensitic Stainless Steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 173(2), 151-6.
5. Pleta, A., Ulutan, D., Mears, L., 2015. An Investigation of Alternative Path Planning Strategies for Machining of Nickel-based Superalloys. *Procedia Manufacturing*, 1, 556-66.
6. Thamizhmanii, S., Hasan, S., 2006. Analyses of Roughness, Forces and Wear in Turning Gray Cast Iron. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 17(1-2), 401-4.
7. Chandrasekaran, H., Johansson, J.O., 1994. Chip Flow and Notch Wear Mechanisms

- During the Machining of High Austenitic Stainless Steels. *CIRP Annals*, 43(1), 101-5.
8. ISO 3685, 1993. Tool-life Testing with Single-point Turning Tools.
 9. Ulutan, D., 2020. True Variable-depth Milling. *Procedia Manufacturing*, 48, 593-597.
 10. Cerce, L., Pusavec, F., Kopac, J., 2015. 3D Cutting Tool-wear Monitoring in the Process. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(9), 3885-95.
 11. Li, X., 2002. A Brief Review: Acoustic Emission Method for Tool Wear Monitoring During Turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42, 157-65.
 12. Akhavan Niaki, F., Ulutan, D., Mears, L., 2015. Parameter Estimation using Markov Chain Monte Carlo Method in Mechanistic Modeling of Tool Wear During Milling. *Proceedings of the ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC 2015)*, Charlotte, NC, USA.
 13. Alonso, F.J., Salgado, D.R., 2015. Application of Singular Spectrum Analysis to Tool Wear Detection Using Sound Signals. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 219(9), 703-10.
 14. Sharma, V.S., Sharma, S.K., Sharma, A.K., 2008. Cutting Tool Wear Estimation for Turning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19, 99-108.
 15. Akhavan Niaki, F., Feng, L., Ulutan, D., Mears, L., 2016. A Wavelet-based Data-driven Modeling for Tool Wear Assessment of Difficult to Machine Materials. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 9(2), 97-121.
 16. Zhang, S., Li, J.F., Sun, J., Jiang, F., 2010. Tool Wear and Cutting Forces Variation in High-speed End-milling Ti-6Al-4V Alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46, 69-78.
 17. Hatt, O., Crawforth, P., Jackson, M., 2017. On the Mechanism of Tool Crater Wear During Titanium Alloy Machining. *Wear*, 374-375, 15-20.
 18. Yıldırım, Ç.V., Kivak, T., Erzincanlı, F., 2019. Tool Wear and Surface Roughness Analysis in Milling with Ceramic Tools of Waspaloy: A Comparison of Machining Performance with Different Cooling Methods. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(2), 83.
 19. Yalçın, B., Özgür, A.E., Koru, M., 2009. The Effects of Various Cooling Strategies on Surface Roughness and Tool Wear During Soft Materials Milling. *Materials & Design*, 30(3), 896-9.
 20. Kuram, E., Özçelik, B., 2016. Effects of Tool Paths and Machining Parameters on the Performance in Micro-milling of Ti6Al4V Titanium with High-speed Spindle Attachment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 84(1-4), 691-703.
 21. Bhushan, R.K., Kumar, S., Das, S., 2010. Effect of Machining Parameters on Surface Roughness and Tool Wear for 7075 Al Alloy SiC Composite. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50 (5-8), 459-69.
 22. Sivasakthivel, P.S., Velmurugan, V., Sudhakaran, R., 2011. Prediction of Vibration Amplitude from Machining Parameters by Response Surface Methodology in End Milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(5-8), 453-61.
 23. Özel, T., Thepsonthi, T., Ulutan, D., Kaftanoğlu, B., 2011. Experiments and Finite Element Simulations on Micro-milling of Ti-6Al-4V Alloy with Uncoated and cBN Coated Micro-tools. *CIRP Annals*, 60(1), 85-8.
 24. Maohua, X., Ning, H.E., Liang, L.I., 2010. Modeling Notch Wear of Ceramic Tool in High Speed Machining of Nickel-based Superalloy. *Journal of Wuhan University of Technology – Materials Science Edition*, 25(1), 78-83.
 25. Zeng, H., Yan, R., Du, P., Zhang, M., Peng, F., 2018. Notch Wear Prediction Model in High Speed Milling of AerMet100 Steel with Bull-nose Tool Considering the Influence of Stress Concentration. *Wear*, 408-409, 228-37.
 26. Astakhov, V.P., 2007. Effects of the Cutting Feed, Depth of Cut, and Workpiece (bore) Diameter on the Tool Wear Rate. *The*

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 34(7-8), 631-40.
27. Altın, A., Nalbant, M., Taşkesen, A., 2007. The Effects of Cutting Speed on Tool Wear and Tool Life When Machining Inconel 718 with Ceramic Tools. *Materials & Design*, 28(9), 2518-22.

Çan Linyitlerinin Kendiliğinden Yanma Yatkinlıklarının Araştırılması

Cem ŞENSÖĞÜT^{*1}, Özer ÖREN¹

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü,
Kütahya

Geliş tarihi: 25.07.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Yapılan bu çalışmada, Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) bünyesinde faaliyet gösteren Çan Linyitleri İşletme Müdürlüğü (ÇLİ) açık ocak ve stoklarından temin edilen kömür numunelerinin kendiliğinden yanma karakteristikleri kesişim noktası metodu ile belirlenmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlarda, kömürlerin ortalama sıcaklık artışlarının (OSA) 0,92-3,93 °C dk⁻¹; tutuşma ya da kesişim noktası sıcaklıklarının (KNS) 150-182 °C; yatkinlık indeksi (IFCC) değerlerinin ise 5,04-33,33 dk⁻¹ arasında değiştiği yapılan deneylerde tespit edilmiştir. Sonuç olarak; 21 adet kömür örneğinin kendiliğinden yanmaya yatkinlıklarının “orta-yüksek” risk kategorisinde yer aldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çan Linyitleri İşletmesi, Kesişim noktası metodu, Kömürlerde kendiliğinden yanma, Linyit

Investigation of Spontaneous Combustion Tendency of Çan Lignites

Abstract

In this study, the spontaneous combustion characteristics of coal samples obtained from Çan Lignite Corporation's (ÇLC) open pit and stockpiles were determined by the crossing point temperature method. Accordingly, it was determined in the experiments that the average heating rates (AHR) of coals ranged from 0.92 to 3.93 °C min⁻¹; ignition or crossing point temperatures (CPT) from 150 to 182 °C and susceptibility index (IFCC) from 5.04 to 33.33 min⁻¹. As a result, the liability of 21 coal samples to spontaneous combustion tendency was determined to be in the “medium-high” risk category.

Keywords: Çan Lignite Corporation, Crossing point temperature method, Spontaneous combustion of coal, Lignite

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Cem ŞENSÖĞÜT, cem.sensogut@dpu.edu.tr

1. GİRİŞ

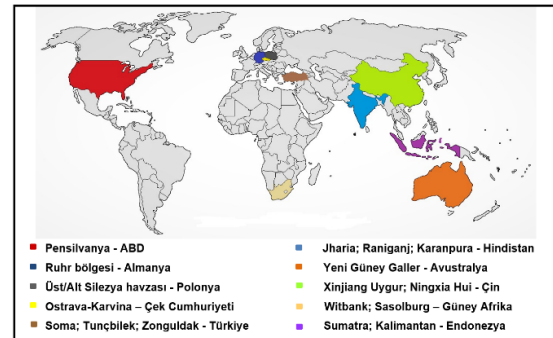
Dünya genelinde kömüre dayalı enerji teknolojilerinin yoğun bir şekilde kullanılması ve özellikle son yıllarda dünyanın en önemli gündem maddesi haline gelmiş olan küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi konuların merkezini oluşturması, sera gazı yayılımı, iş sağlığı ve güvenliği konusundaki bilincin gün geçtikçe artması gibi nedenlerden dolayı kömürün kendiliğinden yanması konusu halen araştırmacıların yoğun ilgisi ile karşı karşıyadır. Kendiliğinden yanma özellikle madencilik alanında can ve mal kaybına sebebiyet vermesinin yanında sera gazı emisyonu ile tehlikeli eser elementler gibi çevresel felaketlere neden olan bir doğa olayıdır [1,2]. Kömür stokları da dahil olmak üzere termal güç istasyonlarında uzun süreli depolamalarda, açık işletmelerde, yeraltındaki eski üretim bölgelerinde, döküm sahalarında ve hatta uzun mesafeli kargo gemisi ya da tren gibi nakliye koşullarında dahi bu sorun ile karşılaşılabilir [3-5].

Kendiliğinden yanma kaynaklı ocak yangınları; özellikle Çin, Amerika, Hindistan, Avustralya ve Almanya gibi kömür üreticisi ülkelerde başlıca sorun olarak göze çarpmaktadır [6]. Dünya üzerinde kendiliğinden yanma kaynaklı birçok yangın vakası envantere girmiştir. Polonya'da 1947-1966 yılları arasında kömür ocaklarında meydana gelen yangınların %80'i kendiliğinden yanma sonucu gerçekleşmiştir [7]. Çin'deki maden ocaklarında gaz emisyonlarının %40-60'ı ile yeraltı yangınlarının %60'tan fazlası kendiliğinden yanma sonucunda oluşmaktadır [8]. Çin'de bulunan kömür madenlerinin %56'sının kendiliğinden yanma riski taşıdığı ifade edilirken, bu yangınlar neticesinde her yıl 20 milyon ton kömür yok olmaktadır [9]. Aynı şekilde Almanya'nın Ruhr havzasında yılda 10'dan fazla yangının kendiliğinden yanma kaynaklı çıktığı belirtilmiştir [10].

Hindistan'daki kömür yangınlarının ana merkezleri olan Jharia, Raniganj, Karanpura, Bokaro, Ibvalley, Talcher, Chirimiri, Singrauli and Singareni gibi kömür sahalarından özellikle Jharia ve

Raniganj bölgesindeki yangınların yaklaşık olarak %70'inin kendiliğinden yanma merkezli olduğu rapor edilmiştir [11,12]. Avustralya'da sadece New South Wales bölgesinde 1960-1991 yılları arasında 125 kendiliğinden yanma olayı meydana gelmiştir [13]. 1970-1990 arası dönemde Güney Afrika'da rapor edilen 254 yangının üçte birinin kendiliğinden yanmadan kaynaklandığı öne sürülmüştür [14]. Özellikle Witbank ve Sasolburg kömür sahalarının kendiliğinden yanmaya yatkın oldukları dile getirilmiştir [5,15].

Azalan kömür madencilik faaliyetlerine rağmen Çek Cumhuriyeti'nin Ostrava-Karvina kömür maden sahasında 1995-2002 yılları arasındaki periyotlarda kendiliğinden yanma sonucu oluşan 105, 2004-2006 arasında ise 54 olay kayıtlara geçmiştir [16,17]. Dünyanın en büyük kömür üreticilerinden biri olan Amerika'da, 1990-1999 yıllarında açık işletme, yeraltı ve kömür hazırlama tesislerinde kendiliğinden yanma sonucu toplam 71 yangın meydana gelmiştir. Bu değer o yıllar arasında meydana gelen tüm ocak yangınlarının %16'sını oluşturmaktadır [18].



Şekil 1. Kendiliğinden yanma problemi ile karşılaşmış ülkeler ve yangın bölgeleri

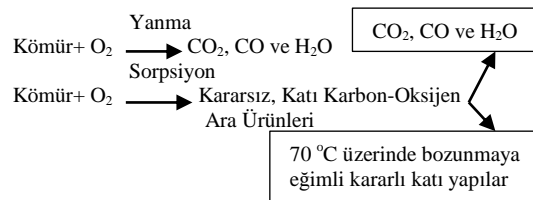
Endonezya'da 1997 yılında turba depolarında gerçekleşen kendiliğinden yanma olayı, geniş ölçekte orman yangınlarına sebebiyet vermiştir [19]. Yıllık 35000 ton katı atık depolayan İsveç'te [20] 1988-1989 yılları arasında 217 kendiliğinden yanma kaynaklı yangın rapor edilmiştir [21]. Dünya genelinde kendiliğinden yanma problemi ile karşılaşmış belli başlı ülkeler ve bu ülkelere ait yanma bölgeleri Şekil 1'de verilmiştir.

Genel olarak bakıldığında, ocak yangınları kişisel hatalar dışında kömürün kendi doğal mekanizması sonucunda oluşmaktadır. Kömür, havanın oksijeni ile temasa geçtiğinde okside olmakta ve bu oksitlenme sonucu ısıveren bir reaksiyon oluşmaktadır. Eğer reaksiyon sonucu açığa çıkan ısı, bulunan ortamdan uzaklaştırılabilirse bu durum “düşük sıcaklık oksidasyonu” olarak adlandırılmaktadır. Fakat ısı dağıtılamaz ya da uzaklaştırılmazsa “kendiliğinden ısınma (self-heating)” adı verilen aşama gerçekleşmektedir [22]. Bu aşamada ortam ısı giderek yükselmekte ve buna paralel olarak kömürün sıcaklığı artmaya devam etmektedir. Kömürün eşik değerinin aşılmasıyla da kendiliğinden yanma olayı ortaya çıkmaktadır [23]. Geçmişten günümüze kadar maddi ve manevi kayıplara yol açan, çok sayıda insanın ölümüne sebep olan kendiliğinden yanma olayının ve kömür oksidasyonunun nedenlerinin kesin bir şekilde ortaya konulması, yanma mekanizmasının aydınlatılması ve kendiliğinden yanmanın doğabilecek her türlü olumsuz sonucunun iyi bir şekilde kestirilerek gerekli önlem ve tedbirlerin alınması hayati önem taşımaktadır. Bu amaçla çalışma kapsamında literatürde daha önce kendiliğinden yanma yatkinlikleri belirlenmemiş olduğu tespit edilen TKİ Çan Linyitleri İşletmesi Müdürlüğü’ne ait IR:3378 ruhsat numaralı açık ocak işletmesi kömür sahasının ve kömür stoklarının kendiliğinden yanma yatkinlikleri “kesişim noktası metodu” kullanılarak belirlenmiştir.

2. KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMA MEKANİZMASI

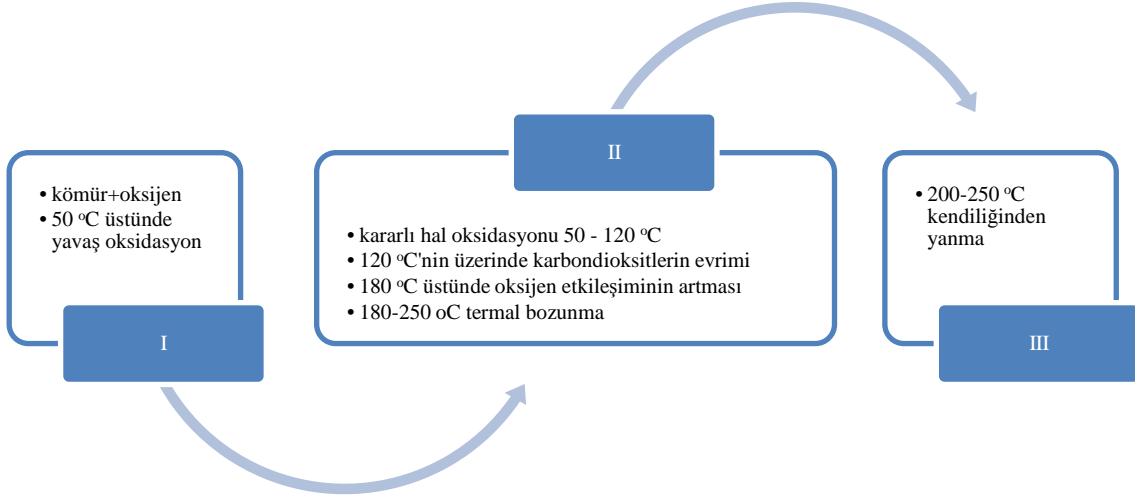
Kömürlerin kendiliğinden yanma mekanizmaları üzerinde 17. yüzyıldan beri çalışmalar yapılmaktadır. Bu olayı açıklamak üzerine birbirinden farklı teoriler geliştirilmiştir. Bu teorilerden bazıları; pirit teorisi, bakteri teorisi, fenil reaksiyonu, serbest radikal reaksiyonu, hidrojen reaksiyonu, aktivasyon grup reaksiyonu ve kömür-oksijen etkileşimi teorisi. Bu teoriler arasında araştırmacılar tarafından en çok kabul gören yaklaşım kömür-oksijen etkileşimi teorisi [24].

Bu teoriye göre kömür ve oksijen arasında gelişen reaksiyonlar “direk yanma” ve “kemisorpsiyon” olmak üzere 2 ana aşamada gerçekleşmektedir. “Direk yanma” adı verilen bu aşamada; kömür oksijen arasında gerçekleşen reaksiyon neticesinde CO, CO₂ ve H₂O gibi oksidasyon ürünleri açığa çıkmaktadır [25,26]. “Kemisorpsiyon” aşaması ise; birbirini izleyen 4 alt aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar şu şekilde özetlenebilir: 1) oksijenin fiziksel adsorpsiyonu, sıcaklıkta artış; 2) kimyasal adsorpsiyon (50 °C üzeri), oksijenetik hidrokarbonların ya da peroksi bileşiklerin üretimi; 3) altere olmamış kömürün eş zamanlı oksidasyonu ile birlikte kendiliğinden yanma sıcaklığına ulaşıldığında (70 °C üzeri) oksijenetik hidrokarbonların bozulması; ve 4) ilk üç maddedeki işlemlerin tümü, tipik olarak tutuşma eşiği olarak tanımlanan 150 °C’den yüksek sıcaklıklara neden olması durumunda kendiliğinden yanma adı verilen olayın ortaya çıkması [27]. Söz konusu tutuşma eşiği kömürün rankına bağlı olarak en düşük ranktaki kömür için 130 °C gibi bir değerde olabildiği gibi turba için daha düşük değerlerde bile izlenebilir. Bu bağlamda, 60-80 °C aralığı kritik olarak kabul edilmektedir [28]. Şekil 2’de kömür oksidasyonunda gerçekleşen genel reaksiyon aşamaları görülmektedir [29].



Şekil 2. Kömür oksidasyonunda gerçekleşen reaksiyon aşamaları

Kömür oksidasyonunun ilk aşaması kömür yüzeyindeki aktif bölgelerdeki oksijenin kimyasal olarak tutunması (kemisorpsiyon) ile meydana gelmektedir. 40 °C’nin altında gerçekleşen bu reaksiyon aşamasında kömür ve oksijen molekülleri arasındaki etkileşim kömür gözenekleri içindeki oksijenin fiziksel adsorpsiyonundan kaynaklanmaktadır [30].



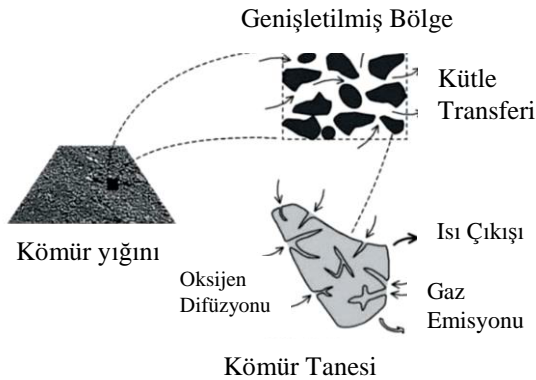
Şekil 3. Sıcaklığa bağlı olarak kömür oksidasyonunda meydana gelen değişimler

Şekil 3'te sıcaklığa bağlı olarak kömür oksidasyonunda meydana gelen değişim aşamaları gösterilmektedir [31].

Kömür ve oksijen molekülleri arasındaki reaksiyon dizileri sürecin genelinde endotermik bir nitelik gösterse de, düşük sıcaklıklarda ekzotermik karakterdedir [32]. Bu reaksiyon aşamaları neticesinde farklı özelliklere sahip karbon-oksijen bileşikleri oluşmaktadır. Bu bileşikler “kararsız”, “kararlı” ve “reaktif olmayan” olmak üzere üç sınıfa ayrılabilir. Peroksijen, hidroperoksit ve hidroksil türleri kararsız bileşikler oluştururken; kararlı bileşikler karbonil ya da karboksil içeren türler temsil etmektedir.

Reaktif olmayan bileşikler ya da diğer adı ile hümitik asitler; anhidritler, etherler ya da esterler olarak tanımlanmaktadır. Sonraki aşamalarda bahsedilen kararsız oksijenli bileşikler ayrılarak gaz ürünlerine ve kararlı bileşiklere dönüşmektedir. Kararlı bileşiklerin de bozulmasıyla birlikte oksidasyon için yeni aktif bölgeler oluşmaktadır [33]. Şekil 4'te kömür parçasına oksijen difüzyonu ve sonrasında gerçekleşen olaylar görülmektedir [34].

3. KÖMÜRÜN KENDİLİĞİNDEN YANMASINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER



Şekil 4. Kömür oksidasyonunda gelişen olaylar

Kömürün karmaşık fiziko-kimyasal bir yapıya sahip olması, aynı damara ait kömür numunelerinin bile zamanı geldiğinde farklı özellikler içermesi, kendiliğinden yanma olayının farklı açılardan ele alınması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Kömürün birden çok özelliğinin farklı şekillerde etkilediği kendiliğinden yanma prosesinde etkili olan parametreler, genel olarak iç (endojen) ve dış (ekzojen) faktörler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [35-39]. Çizelge 1'de kendiliğinden yanmada etkili olan parametreler ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 1. Kömürün kendiliğinden yanmasında etkili olan parametreler

İç (endojen) faktörler		Dış (ekzojen) faktörler	
Kömür özellikleri	Jeolojik özellikler	Atmosferik koşullar	Madencilik ile ilgili faktörler
Kömürleşme derecesi Petrografik yapı Nem içeriği Mineral madde içeriği Tane boyutu Pirit içeriği Fiziksel özellikler Bakteriler	Damar kalınlığı Damar eğimi Göçme özelliği Fay ve arızalar Derinlik Jeotermik gradyan	Sıcaklık Nem Oksijen derişimi	Üretim yöntemi İlerleme hızı Topuk koşulları Tavan koşulları Taban yolu koşulları Hava kaçakları Kömür kayıpları Çalışılmış sahalar Dolgu Havalandırma basıncı Hava nemliliği

3.1. Kömürleşme Derecesi

Kömürün rankı; turbadan meta-antrasite kadar kömürdeki organik metamorfizma derecesi olarak tanımlanmaktadır ve kömürün sınıflandırılmasında ayırt edici bir rol oynamaktadır. Genel olarak bakıldığında; düşük ranklı kömürler daha fazla reaktif nem, oksijen ve uçucu madde içerdiklerinden dolayı, yüksek ranklı kömürlere oranla kendiliğinden yanmaya daha yatkındırlar [40]. Kömürleşmenin ilerlemesi ile birlikte, kömür yapısındaki aromatikliğin artması ve fonksiyonel grupların azalması ile bu az sayıdaki fonksiyonel grupların ancak yüksek enerjilerde oksitlenebilmesi de ayrı bir etken olarak gösterilmektedir [41]. Literatürde artan kömürleşme derecesi ile birlikte kömürün oksijen tüketiminin azaldığı belirtilmiştir [33,42]. Bunun dışında, düşük ranklı kömürlerde kömür yapısındaki gözeneklerin artması ve buna bağlı olarak da oksijen moleküllerinin bağlanmak için daha rahat yüzeyler bulması da bir etken olarak gösterilmektedir [43].

3.2. Nem İçeriği

Kömürler, kömürleşme derecelerine göre farklı oranlarda nem içerebilmektedirler. Turbalar %80-90 oranında nem içerebilirken; linyit ve kahverengi kömür gibi düşük ranklı kömürler %30-70 ve sert ya da bitümlü kömürler ise %10 ve

daha az oranlarda neme sahiptirler [44]. Kömürdeki nem, suyun bulunuş şekline göre yüzey nemi ve iç nem olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Yüzey nemi; adhezyon nemi, taneler arası nem ve adsorpsiyon nemi olarak alt sınıflara ayrılabilir [45]. Yüzey nemi; kömürle birlikte doğal olarak bulunmayan, kömüre yapısındaki kırık ve çatlaklar aracılığı ile girmiş olan nemi ifade eder [37]. Kömürdeki nem içeriğinin oksidasyona ve kendiliğinden yanmaya etkileri üzerinde farklı görüşler ileri sürülmektedir. Genel olarak araştırmacılar tarafından kömürün oksijen tüketiminin maksimum olduğu değer için kritik bir nem aralık değerinin var olduğu; bu nem aralığının aşağısında ya da yukarısında olan kömürler için oksijen tüketim oranlarının azaldığı ifade edilmiştir [33]. Bu teoriye karşı çıkan ve söz konusu testlerin altere olmuş kömürler üzerinde gerçekleştiğini iddia eden çalışmalarda bulunmaktadır [46]. Panaseiko [47], nem içeriğinin %5-10 arasında olduğu durumlarda oksidasyonun en hızlı seviyeye ulaştığını belirtmiştir. Yeni Zelanda alt bitümlü kömürleri üzerinde yapılan bir diğer çalışmada, oksidasyonun maksimuma ulaştığı nem sınırı %7-17 olarak araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir [48]. Kadioglu ve Varamaz [49], 96 saat boyunca farklı derecelerde nemlendirilen ve atmosferik ortamda kurutulan numuneler üzerinde kesişim noktası metodunu kullanarak, kendiliğinden yanma yatkınlık ölçümleri yapmışlar ve artan nemin tutuşma

sıcaklığı değerlerini yükselttiğini, kendiliğinden yanma riskini azalttığını vurgulamışlardır.

3.3. Tane Boyutu

Kömür oksidasyonu ve bunun sonucunda meydana gelen kendiliğinden yanma prosesi genel olarak düşünüldüğünde kömürün yüzeyinde ve gözeneklerinde gerçekleşen bir olaydır. Günümüze kadar yapılan araştırmalarda; kömürün tane boyutunun küçülmesi sonucu yüzey alanının arttığı ve oksijen ile temas edecek ek yüzeylerin oluşmasına fırsat vermesinden dolayı kendiliğinden yanmayı artırıcı rol üstlendiği ifade edilmiştir [50,51]. Küçük ve arkadaşları [52] Aşkale linyitlerinin kendiliğinden yanma karakteristikleri üzerine yaptıkları çalışmada; üç farklı tane boyutuna sahip (-125 µm/125 µm-250 µm/250 µm-850 µm) linyit örnekleri arasında en düşük tutuşma sıcaklığı değerinin -125 µm tane boyutuna sahip numune olduğunu ve aynı tane boyutunda oksijen fonksiyonel grupların arttığını ispatlamışlardır.

3.4. Mineral Madde İçeriği

Kömürün mineral içeriği, kendi organik yapısının dışında kalan elementlerin toplamı olarak ifade edilmektedir. Kömürün içerdiği mineraller genel olarak “bünye mineral maddesi” ve “dış mineral madde” olarak ikiye ayrılmaktadır. Bünye mineralleri kömürün inorganik yapısında bulunan ve kömürden uzaklaştırılmayan minerallerdir. Dış mineraller ise, kömürün oluşumundan sonra kömüre katılan, kömürden cevher zenginleştirme yöntemleriyle ayrılabilen minerallerdir. Majör mineraller olarak adlandırılan bu mineralleri; illit, kaolinit, montmorillonit, kalsit, siderit, dolomit, ankerit, kalsiyum, demir, magnezyum, pirit mineralleri ve kuvars olarak sıralamak mümkündür [37].

Genel olarak kömürde mineral maddenin artması yapısındaki karbon miktarını azaltacağından yüksek mineral madde içeriğinin kömürün kendiliğinden yanmasını azaltacağını söylemek mümkündür. Bunun haricinde geçmişte yapılan çalışmalarda, kömür bünyesinde bulunan kireç, soda ve demir bileşiklerinin oksidasyonu

hızlandırıcı; alüminyum, silis gibi minerallerin ise süreci yavaşlatan etkiye sahip oldukları belirtilmiştir [53].

3.5. Pirit İçeriği

Kömür yapısında bulunan piritin (FeS_2) oksidasyonda katalizör etkisi yarattığı ve kendiliğinden yanma üzerinde hızlandırıcı etkisinin olduğu daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir [54,55]. Ayrıca kömür bünyesindeki piritin oksidasyon sonucu şişmeye maruz kaldığı ve bu şişme sonucunda oluşan iç kırılmaların kömür yüzeyinde yeni reaktif yüzeyler yarattığı tespit edilmiştir [56]. Literatürde piritin kendiliğinden yanmada etkin bir rol oynayabilmesi için bu oranın %2'nin üzerinde olması gerektiği ifade edilmiştir [57]. Bu görüşün aksine piritin kendi başına bir şey ifade etmediği ve oksidasyonda katalizör görevini yerine getirmesi için belli bir oranda neme ihtiyaç duyduğunu, kuru numuneler üzerinde yapılan testlerde piritin tek başına oksidasyona katkı sağlamadığını öne süren çalışmalar da bulunmaktadır [58].

3.6. Petrografik Yapı

Yapısı itibarıyla heterojen bir madde olan kömürde, metamorfizma sonucu farklı yapıda oluşumlar meydana gelmektedir. Oluşan bu bant görünümündeki yapılara “litotip”, litotipleri oluşturan ve sadece mikroskobik yollarla görülebilen mikro ölçekteki yapılara ise “maseral” adı verilmektedir.

Kömür petrografisinin kendiliğinden yanma üzerinde etkileri de literatürde araştırmacıların ilgisini çeken konular arasında yer almaktadır. Liptinit ve vitrinit gibi reaktivitesi yüksek maserallere sahip kömürlerin kendiliğinden yanmaya yatkın oldukları genel olarak kabul edilmektedir [59]. Vitrinitin moleküler yapısında inertitten çok daha fazla aromatik olmayan bileşikler bulunmaktadır. Ayrıca vitrinit, inertite göre daha düşük aktivasyon enerjisine sahip olup birim alanı başına yüksek miktarlardaki oksijeni, oksidasyonun düşük sıcaklıktaki aşamalarında daha hızlı ve kolay bir şekilde adsorbe edebilmektedir [60]. Yapılan araştırmalarda;

vitritinin kömürün rankından bağımsız olarak kendiliğinden yanma açısından en reaktif maseral olduğu ifade edilmiştir [61-63].

3.7. Uçucu Madde İçeriği

Kömürdeki uçucu madde; kömürün oksijensiz ortamda ısıtıldıktan sonra yapısından çıkan hidrojen, karbonmonoksit, metan ve hidrokarbonlar, katran buharları, karbondioksit ve su buharı gibi gazların tümü olarak ifade edilebilir [36]. Schmidt & Elder [64] oksidasyon üzerinde uçucu maddenin etkisini belirlemek amacı ile farklı uçucu madde oranlarına sahip 8 adet kömür örneği üstünde 100 °C'nin altında deneyler gerçekleştirmişlerdir. Artan uçucu madde oranı ile birlikte kömür oksidasyonunun arttığını, %38 uçucu maddeye sahip kömürün %18 uçuculu kömüre göre 3 kat daha hızlı oksitlendiğini tespit etmişlerdir.

3.8. Kömür Sıcaklığı

Kömür havanın oksijeni ile temasa geçtiği anda kendiliğinden yanmanın ilk aşaması olan fiziksel adsorpsiyon işlemi başlamakta ve kömürün sıcaklığı reaksiyon rejimine paralel olarak artmaya devam etmektedir. Yapılan çalışmalarda, artan kömür sıcaklığı ile birlikte oksijen tüketim oranının arttığı ve kendiliğinden yanma sürecini hızlandırıcı bir etkiye yol açtığı ifade edilmiştir. Chamberlain ve arkadaşları [65,66] yaptıkları incelemelerde; oksidasyon işleminin kritik sıcaklık adı verilen sıcaklığa kadar yavaş bir seyirde devam ettiğini, bu değerini aşılması ile birlikte kömürden çıkan gaz artış hızının yükseldiğini belirtmişlerdir. Bahsedilen kritik sıcaklık değerinin kömürleşme derecesine bağlı olarak 30-70°C arasında değiştiği araştırmacılar tarafından elde edilen bulgular arasındadır.

3.9. Dış Faktörler

Kömürlerin oksidasyonunda ve buna bağlı olarak meydana gelen kendiliğinden yanma davranışında sadece kömürün bünye özellikleri etkili olmamaktadır. Kömür oksidasyonu, kömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri ile birlikte atmosferik koşullardan başlayan ve kömürün

üretim yöntemine göre çeşitlenebilen çok geniş yelpazeli ekzotermik bir reaksiyondur. Şüphesiz ki kömürün kendiliğinden yanmasında en önemli etkenlerden bir tanesi kömürün olduğu havza itibari ile gösterdiği jeolojik yapı değişikliğidir. Bazı durumlarda aynı kömür damarına mensup fakat farklı damar kalınlığındaki kömürler arasında dahi kendiliğinden yanma süreci farklı bir aşamada ilerleyebilmektedir. Genel olarak kömür damarının kalınlığı arttıkça kömürün ısı iletkenliği azalmakta ve kömürdeki ısı birikimi fazlalaşabilmektedir. Kalın kömür damarlarının kazısında sıkça uygulanan blok göçertmeli yöntemlerde, göçük kısmında üretilmeden terk edilmiş kırıklı yapıya sahip kömür parçaları kendiliğinden yanmaya zemin hazırlamaktadır [67-69]. Literatürde 5 m'den fazla kalınlığa sahip kömür yataklarının kendiliğinden yanmaya daha yatkın olduğu ifade edilmiştir [70]. Artan derinlikle birlikte kömürün kendiliğinden yanma riski de paralel şekilde artmaktadır. Derin ocaklarda kömür üzerine binen kaya basıncı, bırakılan topukların ve özellikle kazı arınındaki kömür parçalarının kırılmasına ve çatlamasına yol açmaktadır. Bu kırık ve çatlaklar kömürün oksijen ile teması için serbest yüzeyler oluşturmaktadır [71].

Bunun dışında derinliğin artması sonucunda jeotermal gradyanın da buna bağlı olarak artacağı, bu artış neticesinde kömür ve çevre kayaçların ısısının fazlalaşacağı ve bunun da kendiliğinden yanma için uygun bir ortam hazırlayacağı literatürde belirtilmiştir [53]. Genel olarak, 30-100 °C arasındaki sıcaklıklarda her 10 °C'lik sıcaklık artışı neticesinde kömürün oksidasyon hızı ortalama 2,2 kat artmaktadır [72]. Ocak içerisindeki atmosferik koşullar açısından incelendiğinde, kendiliğinden yanma üzerinde havadaki nem miktarının etkisi de kendiliğinden yanmayı etkileyen parametreler arasında gösterilmektedir. Kömür yüzeyine etkiyen nemli havanın kuru havadan 2,5 kat daha fazla ısı ürettiği ifade edilmiştir [73]. Havadaki nemin kısmi basıncının yüksek olması durumunda kömür ve atmosferik hava arasında nem alışverişi olmakta ve yoğunlaşma sırasında açığa çıkan ısı kömürün sıcaklığının artmasına ve kendiliğinden yanma riskinin yükselmesine neden olabilmektedir [37]. Ayrıca havadaki nemin %10-40 arasında olduğu

koşulda oksijen moleküllerinin kömüre tutunma oranının en düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir [52].

Kendiliğinden yanma sonuç olarak, kömürün hava ile temas etmesi neticesinde oluşan bir reaksiyondur. Bundan dolayı ocak içerisine gönderilen hava miktarı kendiliğinden yanma davranışı ve seyri açısından hayati bir öneme sahiptir. Rus araştırmacılar %17'den fazla oksijen derişimine sahip 0,1-0,9 m/dk akış oranındaki havalandırmanın riskli olduğunu ifade etmişlerdir [70].

İlerletimli uzunayak yöntemi göçük arkasında kalan kömürlerin sürekli hava akımına maruz kalmasından dolayı geri dönüşlü yöntemle kıyasla kendiliğinden yanma açısından daha tehlikeli bir yöntemdir. Geri dönüşlü yöntemde taban yolları kömürün içerisinde olduğundan hava kaçacak herhangi bir yol bulamamakta ve böylece hava kaçakları minimuma indirgenebilmektedir. Topuklu yöntem uygulanan kömür ocaklarında ise, topukların tavan basıncına dayanamayarak kırık ve çatlaklar oluşturması kendiliğinden yanma için uygun zeminin oluşmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı fizibilite aşamasında bırakılacak topuk boyutları ve geometrisinin dikkatli bir çalışma yapılarak seçilmesi gerekir [37,74].

4. ÇAN LİNYİTLERİ İŞLETME MÜDÜRLÜĞÜNE AİT KÖMÜRLERİN KENDİLİĞİNDEN YANMAYA YATKINLIKLARININ BELİRLENMESİ

4.1. Çan Linyitleri İşletme Müdürlüğü (ÇLI)

Çan Linyitleri İşletme Müdürlüğü IR:3378 no'lu ruhsat ile Çanakkale ili, Çan ilçesi bölgesinde TKİ'ye bağlı olarak linyit işletmeciliği yapmaktadır.

Açık işletme tekniği ile üretim yapılan sahada bir adet pasa döküm alanı bulunmaktadır. İşletme 2018 yılı itibariyle 2.881.920 ton tüvenan kömür

üretirken 30.863.003 ton pasa üretmektedir. Ayrıca işletmede iki ayrı kömür stok sahası bulunmakta ve bu stok sahalarında 700.570 ton kömür depo edilmektedir [75].

4.2. Örneklerin Temin Edilmesi

Çalışma kapsamında Çan Linyitleri İşletme Müdürlüğü IR:3378 ruhsat no'lu sahasında bulunan açık işletme ve stok sahasında örnekleme çalışmaları yapılmıştır. Örnekleme aşamasında işletmeye ait delik makinesinden yararlanılmış olup, kömür damarının farklı derinliklerinden ve stoktan numuneler alınmıştır. Delik makinesi ile açılan deliklerin yüzeyde toplanan kırıntı ve parçalarından konileme-dörtleme yöntemi ile numune azaltılmış ve kömür örnekleri deneylerde kullanılmak üzere çuvallara konularak KDPÜ Maden Mühendisleri Laboratuvarına getirilmiştir (Şekil 5a ve 5b). Örneklerin alındığı noktalar Şekil 6'da verilen harita üzerinde işaretlenmiştir.



Şekil 5. Kömür sahasından numune alma (a) ve azaltma işlemi (b)



Şekil 6. Örnekleme yapılan noktalar

4.3. Deneysel Çalışmalar

KDPÜ Maden Mühendisliği Kendiliğinden Yanma Laboratuvarına getirilen örnekler, çeneli kırıcı ve halkalı değirmenden geçirilerek boyut küçültme işlemine tabi tutulmuş ve ardından tüm örnekler-75 µm boyutuna indirilerek deneylere hazır hale getirilmiştir. Deneysel sürecin başlamasına kadar ki olan periyotta numuneler, oksitlenmeyi engellemek için kilitli poşetlere konularak derin dondurucuda muhafaza edilmiştir. -75 µm

boyutuna indirgenen 21 adet kömür örneği, karelej yöntemi ile her biri yaklaşık 400 gr olacak şekilde azaltılmış ve her numuneden yaklaşık 10 gr'lık bir kısım da örneklerin kısa ve elementel analizlerinin gerçekleştirilmesi için ayrılmıştır. Söz konusu analizler AB-0097-T no'lu akreditasyon sertifikasına sahip TKİ Garp Linyitleri İşletme Müdürlüğü Kömür Analiz Laboratuvarlarında yapılmıştır. Numunelere ait kısa ve elementel analiz sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

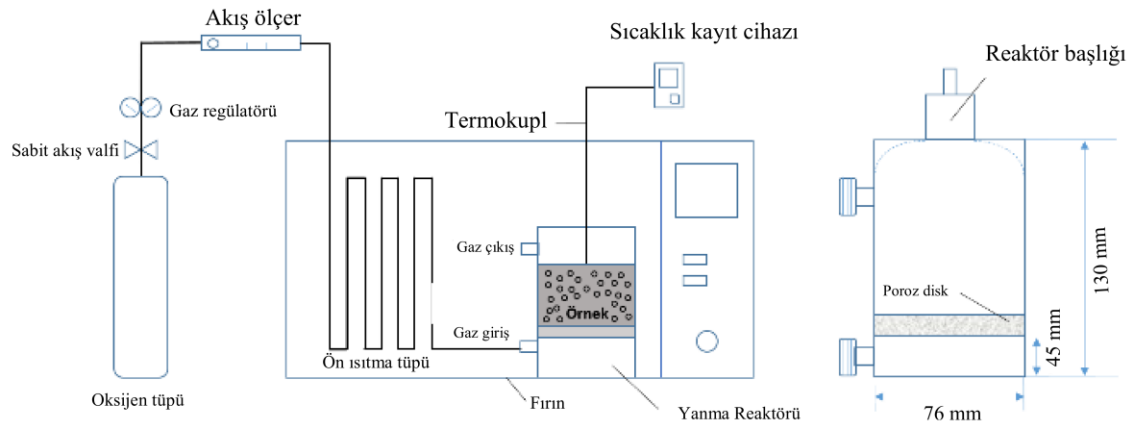
Çizelge 2. Kömür numunelerine ait kısa ve elementel analiz değerleri

Numune	Kısa Analiz							Elementel Analiz			
	Nem (%)	Kül (%)	Uçucu Madde (%)	Sabit Karbon (%)	Alt Kalori (cal/g)	Üst Kalori (cal/g)	Toplam Kükürt (%)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)
	ISO 589 Metot B2	ASTM D7582	ASTM D7582	ASTM D3172	TS EN ISO 1928	ASTM D5865	ASTM D4239	ASTM D5373	ASTM D5373	ASTM D5373	ASTM D3176
K-01	23,53	24,42	28,59	23,46	3123	3394	5,70	35,37	4,93	1,08	28,51
K-02	19,61	30,92	27,73	21,75	2751	2987	7,27	31,08	5,53	1,02	24,18
K-03	20	30,81	27,52	21,67	2809	3049	6,57	32,60	4,10	1,01	24,91
K-04	19,19	25,03	31,13	24,65	3364	3622	6,24	38,80	4,68	1,13	24,11
K-05	18,18	29,59	33,15	19,07	3195	3453	6,82	37,20	5,75	1,01	19,63
K-06	17,69	37,38	28,41	16,52	2567	2794	5,84	30,54	4,94	0,96	20,34
K-07	16,04	35,83	28,45	19,68	2674	2891	6,61	31,64	5,16	0,93	19,83
K-08	12,57	56,26	20,97	10,20	1317	1465	3,76	16,53	3,54	0,93	18,99
K-09	14,19	50,26	22,44	13,11	1638	1805	4,57	20,65	4,12	0,80	19,60
K-10	10	68,26	18,18	3,56	512	620	1,55	8,91	2,57	0,88	17,84
K-11	13,94	59,11	20,16	6,78	938	1084	2,79	13,88	3,43	0,80	19,99
K-12	15,71	50,60	23,23	10,46	1570	1749	4,47	19,27	3,94	0,87	20,84
K-13	19,69	27,72	29,40	23,19	2972	3218	8,21	34,34	5,80	0,94	22,99
K-14	11,48	70,38	17,20	0,94	217	325	3,83	4,66	2,25	0,76	18,12
K-15	19,69	24,21	30,73	25,36	3249	3504	8,34	37,91	5,97	1,07	22,49
K-16	17,81	24,51	31,31	26,37	3475	3727	7,36	39,65	5,85	1,08	21,56
K-17	14,96	38,06	27,93	19,05	2463	2666	8,84	29,36	4,74	1,06	17,93
K-18	14,93	53,96	20,81	10,30	1299	1459	3,64	17,15	3,79	0,95	20,51
K-19	17,78	28,69	29,41	24,12	3090	3327	7,40	35,78	5,64	1,07	21,41
K-20	14,01	53,75	21,94	10,29	1265	1421	7,85	15,59	3,65	0,91	18,25
K-21	11,46	19,53	37,59	31,42	4169	4415	3,27	50,55	6,24	1,24	19,17

4.3.1. Kendiliğinden Yanmaya Yatıklık Testleri

Çalışma kapsamında temin edilen 21 adet örneğin kendiliğinden yanmaya yatıklıklarının belirlenmesi işlemi, literatürde “kesişim noktası

metodu (crossing point temperature method)” adı verilen ve KDPÜ Maden Mühendisliği Bölümü Kendiliğinden Yanma Laboratuvarında hali hazırda faaliyette olan deney seti vasıtası ile gerçekleştirilmiştir. Söz konusu deney setine ait şematik gösterim Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Kendiliğinden yanma deney seti

Kendiliğinden yanma deney seti; program ve rampa ayarlı bir etüv (Carbolite PF120, UK), akış ölçer (Cole Parmer, USA), sıcaklık kaydedici (Testo 175-T3, DE), oksijen ve azot tüpü ile krom-nikel alaşımlı bir kömür reaktöründen meydana gelmektedir. Deneylerde yaklaşık 35 gr'lık kömür örneği kömür reaktörüne yerleştirilmekte ve gaz giriş ve çıkış bağlantıları yapıldıktan sonra rampa ayarlı etüv çalıştırılmaktadır. Etüv ve kömür örneğinin sıcaklıkları 30 °C'de eşitleninceye kadar (stabilizasyon zamanı) reaktöre oksijen verilmemektedir. Kömür örneği 30 °C'ye ulaştığı anda reaktöre 100 cc/dk'lık oksijen verilerek deney başlatılmakta ve etüv ile kömür örneğinin zamana bağlı sıcaklık değişimleri takip edilmektedir.

Deney sırasında elde edilen verilerden hareketle literatürde Feng, Chakravorty & Cochrane adı verilen bir indeks yardımıyla kömürün kendiliğinden yanmaya yakınlığı tespit edilmektedir [76].

Bahsi geçen indekse ait formülasyon ve formülasyon içinde kullanılan değişkenlere ait açıklamalar aşağıda verilmiştir [77] (Eşitlik 1).

$$I_{FCC} = \frac{\text{Ortalama Sıcaklık Artışı (OSA)}}{\text{Tutuşma Sıcaklığı}} \times 1000 \quad (1)$$

Burada;

I_{FCC} : Feng, Chakravorty, Cochrane indeksi, dk^{-1}
 OSA : 110 – 220°C arasındaki ortalama sıcaklık artışı, °C dk^{-1}

Ortalama sıcaklık artışı (OSA) ise (Eşitlik 2);

$$OSA = \frac{110}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Bu denklemde;

t_2 : Kömür numunesinin 220 °C sıcaklığa ulaştığı zaman dakikası;

t_1 : Kömür numunesinin 110 °C sıcaklığa ulaştığı zaman dakikasını ifade etmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma, Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) Çan Linyitleri İşletme Müdürlüğü (ÇLİ), Çanakkale ili, Çan ilçesi, IR:3378 ruhsat numaralı saha açık ocak işletmesine ait kömür üretim sahası ve kömür stoklarındaki kömürlerin kendiliğinden yanmaya yakınlıklarının belirlenmesine yönelik olarak yürütülmüş olup kendiliğinden yanma deney sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir. Buna göre çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- 1- Çalışma kapsamında A panosundan "16", hazırlık aşamasında olan B panosundan "1" ve iki ayrı stok sahasından "4" adet kömür numunesi temin edilmiş ve toplamda 21 adet örneğin kendiliğinden yanma yakınlıkları kesişim noktası metodu ile belirlenmiştir. Buna göre kömürlerin ortalama sıcaklık artışları 0,92-3,93 °C/dk arasında değişmektedir.
- 2- Söz konusu örneklerin tutuşma sıcaklıkları 150-182 °C arasında değişirken, en düşük tutuşma sıcaklığına sahip yani kendiliğinden yanma açısından en yüksek risk içeren örnek K-04 olurken, en yüksek tutuşma sıcaklığına sahip yani kendiliğinden yanma açısından en az riske sahip örnek K-14 numunesi olmuştur.
- 3- Kendiliğinden yanma risk indeksinin hesaplanmasında Feng, Chakravorty & Cochrane indeksi (I_{FCC}) kullanılmıştır. Bu indeks değerine göre elde edilen sonuçlardan kömürler "orta-yüksek" risk kategorisi altında farklı değerler almıştır. En yüksek risk değerine 33,33 1/dk değeri ile K-04 örneği sahip olurken, en az risk değeri 5,04 1/dk değeri ile K-14 örneğine aittir.

Elde edilen sonuçlardan hareketle; Türkiye Kömür İşletmeleri Çan Linyitleri İşletmesi Müdürlüğü Çanakkale İli, Çan İlçesi, IR:3378 ruhsat numaralı saha açık ocak işletmesine ait kömür üretim sahası ve kömür stoklarından temin edilen 21 adet kömür örneğinin kendiliğinden yanmaya yakınlıklarının "orta-yüksek" risk kategorisinde yer aldığı belirlenmiştir.

Çizelge 3. Tüm örneklerle ait kendiliğinden yanma deney sonuçları

Numune	Ortalama Sıcaklık Artışı (OSA) ($^{\circ}\text{C dk}^{-1}$)	Kesişim Noktası Sıcaklığı (KNS) ($^{\circ}\text{C}$)	Yatkınlık İndeksi (I_{FCC}) (dk^{-1})	Yanma Riski	Numune	Ortalama Sıcaklık Artışı (OSA) ($^{\circ}\text{C dk}^{-1}$)	Kesişim Noktası Sıcaklığı (KNS) ($^{\circ}\text{C}$)	Yatkınlık İndeksi (I_{FCC}) (dk^{-1})	Yanma Riski
K-01	1,527777778	153	9,985475672	orta	K-11	1,692307692	160	10,57692308	yüksek
K-02	3,333333333	151	22,07505519	yüksek	K-12	2,558139535	156	16,39833035	yüksek
K-03	3,793103448	151	25,11989039	yüksek	K-13	3,142857143	151	20,81362346	yüksek
K-04	5	150	33,33333333	yüksek	K-14	0,916666667	182	5,036630037	orta
K-05	1,358024691	154	8,818342152	orta	K-15	3,235294118	154	21,00840336	yüksek
K-06	3,055555556	155	19,71326165	yüksek	K-16	3,142857143	153	20,54154995	yüksek
K-07	3,928571429	153	25,67693744	yüksek	K-17	2,444444444	151	16,1883738	yüksek
K-08	1,896551724	155	12,23581758	yüksek	K-18	2,075471698	156	13,30430576	yüksek
K-09	2,291666667	152	15,07675439	yüksek	K-19	3,548387097	152	23,34465195	yüksek
K-10	0,982142857	170	5,777310924	orta	K-20	2,340425532	156	15,00272777	yüksek
					K-21	2,682926829	151	17,76772735	yüksek

6. TEŞEKKÜR

Yazarlar yapılan çalışmada gösterdikleri yardım ve desteklerden dolayı Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğü ve Çan Linyitleri İşletmesi Müdürlüğü yetkililerine sonsuz teşekkürlerini sunar.

7. KAYNAKLAR

1. Carras, J. N., Day, S. J., Saghafi, A., Williams, D.J., 2009. Greenhouse Gas Emissions from Low-Temperature Oxidation and Spontaneous Combustion at Open-Cut Coal Mines in Australia. *International Journal of Coal Geology*, 78(2), 161-168.
2. Wang, H., Chen, C., 2015. Experimental Study on Greenhouse Gas Emissions Caused By Spontaneous Coal Combustion. *Energy and Fuels*, 29(8), 5213-5221.
3. Fierro, V., Miranda, J.L., Romero, C., Andrés, J.M., Arriaga, A., Schmal, D., Visser, G.H., 1999. Prevention of Spontaneous Combustion in Coal Stockpiles: Experimental Results in Coal Storage Yard. *Fuel Processing Technology*, 59(1), 23-24.
4. Arisoy, A., Beamish, B., Çetegen, E., 2006. Modelling Spontaneous Combustion of Coal. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 30, 193-201.
5. Pone, J.D.N., Hein, K.A.A., Stracher, G.B., Annegarn, H.J., Finkleman, R.B., Blake, D.R., McCormack, J.K., Schroeder, P., 2007. The Spontaneous Combustion of Coal and its By-Products in the Witbank and Sasolburg

Coalfields of South Africa. *International Journal of Coal Geology*, 72(2), 124-140.

6. Muduli, L., Jana, P.K., Mishra, D.P., 2018. Wireless Sensor Network Based Fire Monitoring in Underground Coal Mines: A Fuzzy Logic Approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 113, 435-447.
7. Wachowicz, J., 2008. Analysis of Underground Fires in Polish Hard Coal Mines. *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(3), 332-336.
8. Xia, T., Zhou, F., Wang, X., Zhang, Y., Li, Y., Kang, J., Liu, J., 2016. Controlling Factors of Symbiotic Disaster Between Coal Gas and Spontaneous Combustion in Longwall Mining Gobs. *Fuel*, 182, 886-896.
9. Kong, B., Li, Z., Yang, Y., Liu, Z., Yan, D., 2017. A Review on the Mechanism, Risk Evaluation, and Prevention of Coal Spontaneous Combustion in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(30), 23453-23470.
10. Singh, R.V.K., 2013. Spontaneous Heating and Fire in Coal Mines. *Procedia Engineering*, 62, 78-90.
11. Mohalik, N.K., Lester, E., Lowndes, I.S., Singh, V.K., 2016. Estimation of Greenhouse Gas Emissions from Spontaneous Combustion/Fire of Coal in Opencast Mines-Indian Context. *Carbon Management*, 7(5-6), 317-332.
12. Nimaje, D.S., Tripathy, D.P., 2016. Characterization of Some Indian Coals to Assess Their Liability to Spontaneous Combustion. *Fuel*, 163, 139-147.
13. Wang, L., Ren, T., Nie, B., Chen, Y., Lv, C.,

- Tang, H., Zhang, J., 2015a. Development of a Spontaneous Combustion Tarps System Based On BP Neural Network. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(5), 803-810.
14. Liang, Y., Zhang, J., Ren, T., Wang, Z., Song, S., 2018. Application of Ventilation Simulation to Spontaneous Combustion Control in Underground Coal Mine: A Case Study From Bulianta Colliery. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28, 231-242.
 15. Onifade, M., Genc, B., 2019. A Review of Spontaneous Combustion Studies-South African Context. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 33(8), 527-547.
 16. Taraba, B., Michalec, Z., 2011. Effect of Longwall Face Advance Rate on Spontaneous Heating Process in the Gob Area-CFD Modelling. *Fuel*, 90(8), 2790-2797.
 17. Taraba, B., Michalec, Z., Michalcová, V., Blejchař, T., Bojko, M., Kozubková, M., 2014. CFD Simulations of the Effect of Wind on the Spontaneous Heating of Coal Stockpiles. *Fuel*, 118, 107-112.
 18. De Rosa, M. I., 2004. Analysis of Mine Fires for All USA Underground and Surface Coal Mining Categories:1990-1999. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety And Health (NIOSH), Pittsburgh Research Laboratory Pittsburgh, PA, 35 s.
 19. Nugroho, Y.S., McIntosh, A.C., Gibbs, B.M., 1998. Using the Crossing Point Method to Assess the Self-Heating Behavior of Indonesian Coals. Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, 27(2), 2981-2989.
 20. Hogland, W., Bramryd, T., Persson, I., 1996. Physical, Biological and Chemical Effects of Unsorted Fractions of Industrial Solid Waste in Waste Fuel Storage. *Waste Management & Research*, 14, 197-210.
 21. Hogland, W., Marques, M., 2003. Physical, Biological and Chemical Processes During Storage and Spontaneous Combustion of Waste Fuel. *Resources, Conservation and Recycling*, 40(1), 53-69.
 22. Pis, J., de la Puente, G., Fuente, E., Morán, A., Rubiera, F., 1996. A Study of the Self-Heating of Fresh and Oxidized Coals by Differential Thermal Analysis. *Thermochemica Acta*, 279, 93-101.
 23. Zhu, H., Song, Z., Tan, B., Hao, Y., 2013. Numerical Investigation and Theoretical Prediction of Self-Ignition Characteristics of Coarse Coal Stockpiles. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(1), 236-244.
 24. Qi, X., Wang, D., Zhong, X., Gu, J., Xu, T., 2010. Characteristics of Oxygen Consumption of Coal at Programmed Temperatures. *Mining Science and Technology (China)*, 20(3), 372-377.
 25. Carras, J.N., Young, B.C., 1994. Self-Heating of Coal and Related Materials: Models, Application and Test Methods. *Progress in Energy and Combustion Science*, 20(1), 1-15.
 26. Wang, H., Dlugogorski, B.Z., Kennedy, E.M., 2003b. Pathways for Production of CO₂ & CO in Low-Temperature Oxidation of Coal. *Energy & Fuels*, 17(1), 150-158.
 27. Gürdal, G., Hoşgörmez, H., Özcan, D., Li, X., Liu, H., Song, W., 2015. The Properties of Çan Basin Coals (Çanakkale-Turkey): Spontaneous Combustion and Combustion By-Products. *International Journal of Coal Geology*, 138, 1-15.
 28. Wang, Y., Shi, G., Guo, Z., 2015b. Coupled Multi-Stage Oxidation and Thermodynamic Process in Coal-Bearing Strata Under Spontaneous Combustion Condition. *International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer*, Rutgers University, Piscataway, NJ, USA, 1-12.
 29. Wang, H., Dlugogorski, B.Z., Kennedy, E.M., 2003a. Coal Oxidation at Low Temperatures: Oxygen Consumption, Oxidation Products, Reaction Mechanism and Kinetic Modelling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(6), 487-513.
 30. Nelson, M., Chen, X.D., 2007. Survey of Experimental Work on the Self-Heating and Spontaneous Combustion of Coal. *Geology of Coal Fires: Case Studies From Around the World: Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, XVIII, 31-83.
 31. Nalbandian, H., 2010. Propensity of Coal to Self-Heat. *International Energy Agency, Clean Coal*

- Centre, 45.
32. Shi, T., Wang, X., Deng, J., Wen, Z., 2005. The Mechanism at the Initial Stage of the Room-Temperature Oxidation of Coal. *Combustion and Flame*, 140(4), 332-345.
 33. Wang, H., Dlugogorski, B.Z., Kennedy, E.M., 2003. Analysis of the Mechanism of the Low-Temperature Oxidation of Coal. *Combustion and Flame*, 134(1-2), 107-117.
 34. İnal, S., Aydın, K., 2019. Kömürün Kendiliğinden Yanması ve Etkileyen Faktörler. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 58(2), 145-165.
 35. Güney, M., 1968. Certain Factors Affecting the Oxidation and Spontaneous Combustion of Coal. *University of Nottingham, Mining Department Magazine*, 20, 71 - 80.
 36. Kural, O., 1991. Kömür, Kurtiş Matbaası. 976s.
 37. Kural, O., 1998. Kömür Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri. *Özgün Ofset Matbaacılık A.Ş.*, 785.
 38. Uludağ, S., 2001. Assessing Spontaneous Combustion Risk in South African Coal Mines Using a GIS Tool. M.Sc Dissertation, University of Witwatersrand, South Africa.
 39. Kaymakçı, E., Didari, V., 2002. Relations Between Coal Properties and Spontaneous Combustion Parameters. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 26(1), 59-64.
 40. Ramlu, M.A., 1991. *Mine Disasters and Mine Rescue*. A.A. Balkema, Rotterdam, 397.
 41. Önal, G., Ateşok, G., Perek, K.T., 2014. *Cevher Hazırlama El Kitabı*. Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı Yayınları, İstanbul.
 42. Coward, H.F., 1957. *Research on Spontaneous Combustion of Coal in Mines-a Review*. Research Report 142, Great Britain: Safety in Mines Research Establishment.
 43. Chamberlain, E.A.C., Hall, D.A., 1973. The Liability of Coals to Spontaneous Combustion. *Colliery Guardian*, 65-72.
 44. Allardice, D.J. Evans, D.G., 1978. Moisture in Coal, in C. Karr, Jr_ (Ed.), *Analytical Methods for Coal and Coal Products*. Vol 1, Academic Press, New York, 247-262.
 45. Kemal, M., Arslan, V., 2010. Kömür Teknolojisi. Genişletilmiş 5.baskı, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 033, İzmir.
 46. Beamish, B.B., Hamilton, G.R., 2005. Effect of Moisture Content on the R70 Self-Heating Rate of Callide Coal. *International Journal of Coal Geology*, 64, 133-138.
 47. Panaseiko, N.P., 1974. Influence of Moisture on the Low Temperature Oxidation of Coals. *Solid Fuel Chemistry*, 8, 21-24.
 48. Chen, X.D., Stott, J.B., 1993. The Effect of Moisture Content on the Oxidation Rate of Coal During Near-Equilibrium Drying and Wetting at 50 °C. *Fuel*, 72, 787-792.
 49. Kadioğlu, Y., Varamaz, M., 2003. The Effect of Moisture Content and Air-Drying on Spontaneous Combustion Characteristics of Two Turkish Lignites. *Fuel*, 82, 1685-1693.
 50. Akgün, F., Arisoy, A., 1994. Effect of Particle Size on the Spontaneous Heating of a Coal Stockpile. *Combustion and Flame*, 99(1), 137-146.
 51. Ren, T.X., Edwards, J.S., Clarke, D., 1999. Adiabatic Oxidation Study on the Propensity of Pulverised Coals to Spontaneous Combustion. *Fuel*, 78(14), 1611-1620.
 52. Küçük, A., Kadioğlu, Y., Gülaboğlu, M.Ş., 2003. A Study of Spontaneous Combustion Characteristics of a Turkish Lignite: Particle Size, Moisture of Coal, Humidity of Air. *Combustion and Flame*, 133, 255-261.
 53. Didari, V., 1986. *Yeraltı Ocaklarında Kömürün Kendiliğinden Yanması ve Risk İndeksleri*. Madencilik Dergisi, 25, 4.
 54. Jena, S.S., 2011. Investigation in to Spontaneous Combustion Characteristics of Some Indian Coals and Correlation Study with Their Intrinsic Properties. Bachelor Degree, Department of Mining Engineering National Institute of Technology Rourkela.
 55. Barış, K., 2010. Farklı Kömürleşme Derecesine Sahip Kömürlerde Düşük Sıcaklık Oksidasyonu. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak.
 56. Durucan, Ş., Güyagüler, T., 1985. *Yeraltı Madenciliğinde Çevre Sorunları ve Kontrol Yöntemleri*. Genel Maden İşçileri Yayını.
 57. Arisoy, A., Beamish, B., 2015. Mutual Effects of Pyrite and Moisture on Coal Self-Heating Rates and Reaction Rate Data for Pyrite Oxidation. *Fuel*, 139, 107-114.
 58. Beamish, B., Lin, Z., Beamish, R., 2012. Investigating the Influence of Reactive Pyrite on

- Coal Self-Heating. Proceedings of the Twelfth Coal Operators Conference, Wollongong, 294-299.
59. Stracher, G.B., Prakash, A., Ellina, V.S., 2010. Coal and Peat Fires - a Global Perspective. vol.I: coal, geology and combustion, 343s.
60. Falcon, R.M., 1986. Spontaneous Combustion of The Organic Matter in Discards from the Witbank Coalfield. Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, 86, 243-250.
61. Barış, K., Kızgut, S., Didari, V., 2012. Low-Temperature Oxidation of Some Turkish Coals. Fuel, 93, 423-432.
62. Özdeniz, A.H., 2003. Kömür Stoklarındaki Kendiliğinden Yanma Olayının İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya.
63. Sen, R., Srivastava, S.K., Singh, M.M., 2009. Aerial Oxidation of Coal-Analytical Methods, Instrumental Techniques and Test Methods: A Survey. Indian Journal of Chemical Technology, 16, 103-135.
64. Schmidt, L.D., Elder, J.L., 1940. Atmospheric Oxidation of Coal at Moderate Temperatures-Rates of the Oxidation Reaction for Representative Coking Coals. Industrial and Engineering Chemistry, 32(2), 249-256.
65. Chamberlain, E.A., Hall, D.A., Thirlaway, J.T., 1970. The Ambient Temperature Oxidation of Coal in Relation to the Early Detection of Spontaneous Heating. Mining Engineer, 130, 1-16.
66. Chamberlain, E.A., Barrass, G., Thirlaway, J.T., 1976. Gases Evolved and Possible Reactions During Low Temperature Oxidation of Coal. Fuel, 55, 217-222.
67. Gill, F., Browning, E., 1971. Spontaneous Combustion in Coal Mines. Colliery Guardian, 219, 79-85.
68. Mahadevan, V., Ramlu, M., 1985. Fire Risk Rating of Coal Mines due to Spontaneous Heating. Journal of Mines, Metals and Fuels, 33, 357-362.
69. Morris, R., Atkinson, T., 1986. Geological and Mining Factors Affecting Spontaneous Heating of Coal. Mining Science and Technology, 3, 217-231.
70. Banerjee, S.C., 1985. Spontaneous Combustion of Coal and Mine Fires. A.A. Balkema/ Rotterdam, 167.
71. Kural, O., 1988. Kömür Kimyası ve Teknolojisi. 657.
72. Erkan, H., 1964. Kömürün Depolanması. Madencilik, 3, 12-13.
73. Karpuz, C., Güyagüler, T., Bağcı, S., Bozdağ, T., Başarı, H., Keskin, S., 2000. Linyitlerin Kendiliğinden Yanmaya Yatkınlık Derecelerinin Tespiti: Bölüm I - Risk Sınıflaması Derlemesi. Madencilik Dergisi, Eylül/Aralık, 3-13.
74. Yılmaz, A.İ., 2002. Eyz Yeraltı Ocağı Havalandırma Sisteminin Ocak Yangınlarına Etkisi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
75. www.cli.gov.tr
76. Feng, K.K., Chakravorty, R.N., Cochrane, T.S., 1973. Spontaneous Combustion-a Coal Mining Hazard. The Canadian Mining and Metallurgical Journal.
77. Ören, Ö., Şensöğüt, C., 2007. Kütahya Bölgesi Linyitlerinin Kendiliğinden Yanmaya Yatkınlıklarının Araştırılması. Madencilik, 46(1), 15-23.

Basit Mesnetli Köprülerde Hareketli Yük Dağılım Faktörleri Denklemlerinin Yapay Sinir Ağları ile Elde Edilmesi

Ö. Fatih YALÇIN*¹

¹*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
İstanbul*

Geliş tarihi: 17.04.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Yapay zekâ konusunda kaydedilen ilerlemeler günümüzde her alanda çok önemli dönüşümlere neden olmaktadır. İnşaat mühendisliği alanında da yapay zekâ, makine öğrenmesi ve yapay sinir ağları uygulamaları ve kullanımı her geçen gün artmakta ve çeşitlenmektedir. Bu gelişmelere paralel olarak, bu çalışmada, yapay sinir ağları kullanılarak köprü tasarımında kullanılan hareketli yüklerin köprü kirişlerine dağılımı için kapalı formüller elde edilmiştir. Bu formüllerde, farklı yapısal köprü parametrelerinin yanı sıra, AASHTO LRFD’de verilen denklemlerde dahil edilmemiş olan kiriş sayısı parametresi de eklenmiştir. Bu amaçla, birçok verevsiz basit mesnetli köprü modeli hazırlanarak olası tüm kamyon yükleri altında sonlu elemanlar analizleri yapılmış ve hareketli yük dağılım katsayıları elde edilmiştir. Yapay sinir ağları ile elde edilen hareketli yük dağılım faktörleri, sonlu elemanlar analiz sonuçları ile ve AASHTO LRFD’de verilmiş olan hareketli yük dağılım katsayıları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar göstermektedir ki, sinir ağları ile elde edilen formüller dağılım faktörlerini oldukça iyi tahmin edebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yapay zekâ, Yapay sinir ağları, Köprüler, Hareketli yük, Dağılım faktörleri

Obtaining Live Load Distribution Factors Equations for Simply Supported Bridges Using Neural Networks

Abstract

Advancements in artificial intelligence have caused important transformations in many areas. Research on applications of artificial intelligence, machine-learning and neural networks in civil engineering has been growing recently. Parallel to this progress, in this study, closed-form formulas for distribution of live load among the bridge girders are obtained using artificial neural networks. In these formulas, the number of girders is also incorporated as a new parameter, which is not included in AASHTO LRFD live load distribution equations. For this purpose, numerous straight, simply supported bridge models are analyzed using the finite element method and subsequently live load distribution factors are calculated. Live load distribution factors obtained through neural networks are compared with those from finite element analyses and AASHTO LRFD formulas. These comparisons reveal that closed-form formulas can predict live load distribution factors accurately.

Keywords: Artificial intelligence, Neural networks, Bridges, Live load, Load distribution

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ö. Fatih YALÇIN, fyalcin@gmail.com

1. GİRİŞ

Yapay zekâ örüntüleri tanımlamak, regresyon, kümeleme ve sınıflandırma gibi işlemleri yapmak için tasarlanmış bir tür hesaplama algoritmasıdır. Bu algoritma “nöron” olarak adlandırılan biyolojik sistemlerden esinlenilerek geliştirilmiştir ve biyolojik sistemlerden ayrıştırmak için “Yapay Sinir Ağları” (YSA) olarak adlandırılmıştır. Bu algoritmalar kullanılarak konuşma tanımlama, görsel cisim tanımlama ve cisim algılama gibi ileri teknoloji alanlarında çok önemli gelişmeler kaydedilmiştir [1]. Bunların yanı sıra, yapay zekâ uygulamaları bir takım mühendislik problemlerinin çözümünde insan algılamasını simüle edebilme imkânı ile klasik mühendislik yöntemlerine meydan okumaktadır. Hatta uygulamalar o kadar ileri gitmiştir ki, Tshitoyan ve arkadaşları [2] malzeme bilimi konusundaki literatürde yapılan tüm çalışmaları sadece dili kullanarak tarayabilen bir yapay zekâ uygulaması geliştirmişlerdir. Bu uygulama aracılığı ile milyonlarca bilimsel makale özeti taranarak kelimeler incelenmiş ve malzemelerin farklı özellikleri ile ilgili araştırmacıların henüz bulamadığı gizli kalmış ilişkiler yakalanmış ve yeni buluşlar yapılmıştır.

Yapay zekâ yöntemleri tüm mühendislik alanlarında olduğu gibi inşaat mühendisliği alanında da önemli uygulama alanları bulmaya devam etmektedir. Örneğin, geoteknik mühendisliği alanı, toprak kaya gibi davranışı çok kesin olmayan ve klasik fiziksel modelleme yöntemlerini zorlayan malzeme davranışı ile ilgilidir. Yapay zekâ yöntemleri de bu tür karmaşık ilişki ağlarını çözmeye çok uygun olduğu için, sıvılaşmadan kazıklara, barajlardan tünellere kadar geotekniğin her alanında uygulama alanı bulmuştur [3,4]. Yapı mühendisliği alanı da yapay zekânın en geniş kapsamda yer bulduğu alanlardan birisidir [5], özellikle de yapı sağlığı izlemesi [6], yapı davranışı [7,8], betonun karakterizasyonu [9,10] ve deprem mühendisliği [11] konularına araştırmacılar yoğunlaşmışlardır.

İnşaat mühendisliğindeki çok güçlü tasarım pratiklerinin uygulandığı köprü mühendisliğinde de yapay zekâ uygulamaları yer edinmiştir. Özellikle köprü sağlığı izleme [12], köprü muayenesi [13], köprü bileşenlerinin davranışı [14] ve tasarımı [15,16] alanlarında bu uygulamalar görülebilir.

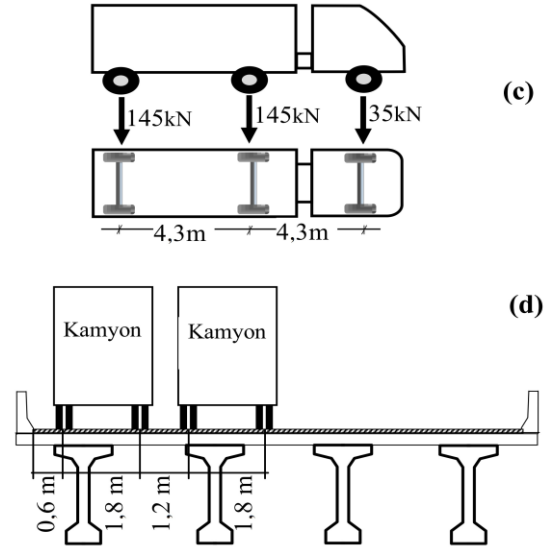
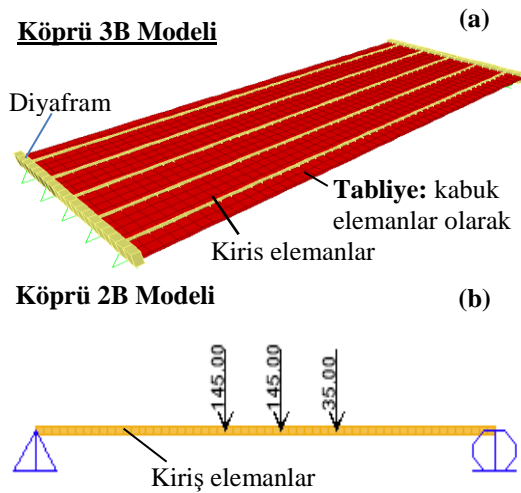
Bu çalışmada da köprülerdeki kamyon yüklerinin kirişler üzerindeki etkileri, hareketli yük analizleri ve yapay sinir ağları kullanılarak formüle edilecektir. Karayolu köprülerinin karmaşık 3-Boyutlu (3B) sonlu elemanlar modelleri ile analizi mümkün olmakla birlikte, tasarım ofislerinde bu modelleri her köprü için yeniden oluşturmak ve tüm yükleme kombinasyonlarını hazırlamak zaman alıcı olacaktır. Bu nedenle tasarım mühendisleri, 3B modeller yerine AASHTO LRFD [17] yönetmeliğinde ve diğer yabancı ülkelerin yönetmeliklerinde verilen Hareketli Yük Dağılım Katsayılarını (HYDK) ve 2-Boyutlu (2B) yapısal modelleri kullanmaktadırlar. HYDK kullanılarak, hareketli yükler altında köprü kirişlerindeki maksimum moment veya kesme, tek kamyon yükü altında 2B modelden elde edilen maksimum moment veya kesmenin HYDK ile çarpılması ile bulunabilir.

AASHTO LRFD yönetmeliğinde tanımlanan bu faktörlere ait denklemler, köprünün yapısal özelliklerine bağlı olarak formüle edilmişlerdir. Bahsi geçen denklemler Zokai ve arkadaşları [18] tarafından NCHRP 12-26 projesi altında geliştirilirken, bu karakteristik özelliklerin içerisinde köprü genişliğini etkileyen kiriş sayısı (Nb) ise dahil edilmemiştir. Ancak Yalcin ve Dicleli [19] yaptıkları çalışmalarda kiriş sayısının HYDK’yi yaklaşık %5 oranında etkilediklerini bulmuşlardır. Bu nedenle bu çalışmada yapay sinir ağları kullanılarak, AASHTO LRFD’de verilen HYDK denklemlerinin köprüdeki kiriş sayısı (Nb) parametresi de dahil edilerek kapalı formda ifadeleri elde edilmiştir. Literatürde köprülerdeki hareketli yük etkilerinin yapay zekâ kullanılarak tahmini ile ilgili çalışmalara rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu çalışma özgün ve güncel niteliklere sahiptir.

2. BASİT MESNETLİ KÖPRÜLER

Çalışma kapsamında farklı yapısal parametrelere sahip birçok basit mesnetli köprü modeli SAP2000 [20] sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Hareketli yük dağılım faktörlerini elde edebilmek için bu köprülerin hem 3 boyutlu (3B) (Şekil 1a) hem de 2 boyutlu (2B) (Şekil 1b) modelleri oluşturulmuş ve farklı kamyon yükleme yerleşimleri ve kombinasyonları altında analizler gerçekleştirilmiştir.

Ele alınan köprüler tek açıklıklı, verevsiz, simetrik ve kiriş üzerine yerleştirilen tabliye şeklindeki köprülerdir. Köprü kirişlerinin AASHTO tipi (Kiriş Tipi II-V) öngermeli beton kirişler olduğu varsayılmıştır. 3B modelde tabliye kabuk elemanlar olarak ve kirişler kiriş eleman olarak modellenmiştir. Kamyon tekerlek yüklerinin otomatik yerleştirilmesini kolaylaştırmak amacıyla tabliye 0,6 m kenar uzunluğuna sahip kare elemanlara bölünmüştür. Tabliyenin mesnetlere oturduğu uçlara çerçeve eleman olarak modellenmiş diyaframlar eklenmiştir. Her 3B modelde karşılık gelen 2B model ise basit mesnetli ve tek kirişli bir yapı olarak modellenmiştir (Şekil 1b). 2B modelde, kirişin üzerine tabliyeyi temsil etmesi bakımından, kiriş aralığı kadar genişliğe sahip bir tabliye şeridi göz önüne alınmıştır. Tüm yapısal modellerde kiriş ve tabliyenin kompozit olarak davrandıkları varsayılmıştır.



Şekil 1. (a) Basit mesnetli köprünün 3B sonlu elemanlar modeli (b) 2B sonlu elemanlar modeli (c) AASHTO LRFD, HL-93 tasarım kamyon yükü (d) Köprü üzerinde yan yana yerleştirilmiş kamyonlar için minimum mesafeler

2.1. Hareketli Yük Modeli

Oluşturulan 3B ve 2B yapısal modellerin sonlu elemanlar analizleri AASHTO LRFD [17] tasarım hareketli yükü olan HL-93 yükü altında gerçekleştirilmiştir. HL-93 yükü tandem ve kamyon yüklerinin kombinasyonundan oluşmaktadır, ancak HYDK denklemlerinin geliştirilmesinde sadece kamyon yükleri ele alındığı için, bu çalışmada tandem yükler göz ardı edilmiştir.

Köprü bileşenleri üzerinde oluşan maksimum etkiler (moment veya kesme), tasarım kamyonunun köprü üzerinde hem enine hem de dikine yönde konumuna; yüklü olan şerit adedine ve çoklu kamyon yükleme çarpanına bağlıdır. HL-93 yüklemeinde ele alınan kamyon dingil yükleri ve çoklu kamyon yerleştirilmesi durumunda göz önüne alınacak açıklıklar Şekil 1c ve 1d'de sırasıyla gösterilmiştir. Uzunlamasına yönde maksimum etkileri oluşturan kamyon yerleşimi, basit mesnetli bir kirişin tesir çizgisi analizleri sonucu elde edilen lokasyonuna yakın

çıkılmaktadır. Ancak köprünün enine yönünde maksimum etkileri bulmak için bir veya birden fazla kamyonun köprü eni doğrultusunda tüm olası konumlarını incelemek gerekmektedir. Bu işlem el ile yapıldığı takdirde çok yorucu ve zaman alıcı olacaktır. Bu nedenle, tüm yükleme kombinasyonları, SAP2000 OAPI (uygulama programlama arayüzü) kullanılarak yapılmıştır.

AASHTO LRFD'de HYDK denklemleri iç ve dış kirişler için ve bir kamyon veya birden fazla kamyon yükleme durumları için ayrı ayrı verilmiştir (Çizelge 1). Sonlu elemanlar analizlerinden HYDK'yı bulmak için, 3B modeller üzerinde bir kamyon veya birden fazla kamyon (2, 3, 4 kamyon vs.) yükü altında, 2B modellerde de ise tek kamyon yüklemesi altında maksimum moment veya kesme etkileri bulunur. Dağılım katsayıları da Eşitlik 1'de moment etkisi için gösterildiği gibi, 3B detaylı analizden elde edilen maksimum etkilerin 2B analizden elde edilenlere bölünmesi sonucunda bulunur:

$$HYDK = M_{3B} / M_{2B} \quad (1)$$

Çizelge 1. AASHTO LRFD hareketli yük dağılım denklemleri

	İç Kiriş	Dış Kiriş
Moment (Bir Şerit)	$0.06 + \left(\frac{S}{4300}\right)^{0.4} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.3} \left(\frac{K_g}{Lt_s^3}\right)^{0.1}$	Kaldıraç Kuralı
Moment (İki veya daha fazla şerit)	$0.075 + \left(\frac{S}{2900}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{Lt_s^3}\right)^0$	$g = e g_{if}$ $e = 0.77 + \frac{d_e}{2800}$
Kesme (Bir Şerit)	$0.36 + \frac{S}{7600}$	Kaldıraç Kuralı
Kesme (İki veya daha fazla şerit)	$0.2 + \frac{S}{3600} - \left(\frac{S}{10700}\right)^{0.2}$	$g = e g_{if}$ $e = 0.6 + \frac{d_e}{3000}$

2.2. Köprü Parametreleri

Köprü kirişlerinin HYDK'yi etkileyen parametreleri şu şekilde sıralanabilir: kiriş sayısı (Nb), köprü uzunluğu (L), tabliye kalınlığı (ts),

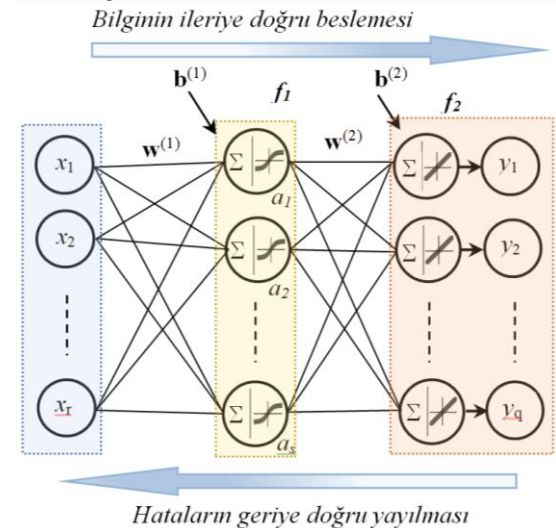
kirişler arasındaki açıklık (S) ve kiriş tipi (GT). Köprülerde konsol uzunluğu (de) sabit ve 0,3 m olarak alınmıştır. Öngermeli kirişlerin dayanımı 50 MPa ve tabliye betonunun dayanımı da 30 MPa olarak alınmıştır. Ele alınan köprü parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelgede gösterilen parametreler kullanılarak oluşturulan 3B ve 2B köprülerin tüm gerekli yükleme durumları altında analizleri yapılmış ve elde edilen iç ve dış kirişlere ait momentler ve kesme kuvvetleri için HYDK elde edilmiştir.

3. YAPAY SİNİR AĞLARI

Bir yapay sinir ağı insan nöronlarının davranışına benzetilmiş bir makine öğrenmesi (machine learning) algoritması olarak da tarif edilebilir.

Çizelge 2. Analizlerde kullanılan köprülere ait parametreler

N _b	L (m)	GT	t _s (m)	S (m)
4, 5, 6, 7, 8	10, 20, 30, 40	IV	0,20	2,4
4, 5, 6, 7, 8	30	II, III, IV, V	0,20	2,4
4, 5, 6, 7, 8	30	IV	0,15, 0,20, 0,25, 0,30	2,4
4, 5, 6, 7, 8	30	IV	0,20	1,2, 2,4, 3,6, 4,8



Şekil 2. Yapay sinir ağı modeli

Hem sinir ağları hem de makine öğrenmesi yöntemleri yapay zekâ ekosisteminin alt alanlarıdır. Derin öğrenme (deep learning) birkaç gizli katmandan oluşan sinir ağlarına verilen isimdir. Bu nedenle tek gizli katmana sahip olan sinir ağlarına “Sığ Sinir Ağları” da denilmektedir [21].

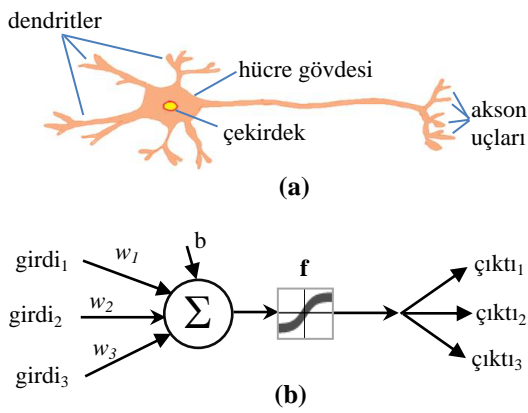
Sığ sinir ağları genellikle girdi katmanı, gizli katman ve çıktı katmanı olmak üzere 3 katmandan oluşur (Şekil 2). Her bir katmanın içerisinde insan beynindeki nöronlardan esinlenilmiş düğüm olarak adlandırabileceğimiz noktalarda hesaplamalar yapılmaktadır. Girdi katmanı sinir ağının başlangıç katmanıdır ve burada dış dünyadaki bilgileri içeren girdi düğümleri bulunur. Bu katmandaki düğümler pasif düğümlerdir ve girdi bilgilerini üzerinde herhangi bir işlem yapmadan gizli katmana gönderir. Gizli katmanın dış dünya ile bir bağlantısı yoktur ve sinir ağına özel bir katmandır. Gizli katmandaki her bir düğümde tüm girdilerin belirli ağırlık katsayılarıyla çarpımlarının toplamına yanlılık değerleri eklenir ve bir aktivasyon fonksiyonu aracılığı ile tek bir sayıya dönüştürülerek çıktı katmanına gönderilir. Çıktı katmanı gizli katmandaki tüm düğümlerden değerleri alır ve bunların yeniden ağırlık katsayıları ile çarpımlarının toplamına yanlılık değerleri eklenir yeniden bir aktivasyon fonksiyonu ile çıktıları üretir. Çıktı katmanında yapay sinir ağı modelinin kaç çıktısı varsa o kadar düğüm bulunur. Gizli katman aslında girdiler ve çıktılar arasındaki bağlantıyı kuran katman gibi görünse de girdi ve çıktı arasındaki ilişkileri açık olarak görebilmek mümkün olmadığı için bazen kara kutu olarak da nitelendirilir. Gizli katmandaki düğüm sayısı deneme yanılma yoluyla, oluşan hataları minimize edecek şekilde belirlenebilir.

Sinir ağları mimarisindeki girdilerden çıktıları doğru yönelen ilerleme “ileri doğru besleme”, diğer bir ifade ile ağ içinde doğru bilginin ileri beslenmesi, olarak adlandırılır (Şekil 2). Sinir ağının öğrenmesinin gerçekleştiği mekanizma ise “geriye doğru yayılma” olarak isimlendirilir. Bu yayılmada sinir ağının yaptığı tahminle gerçek değer arasındaki farkın bir fonksiyonu olan hata geriye doğru aktarılır. Bu aktarılan bilgi kullanılarak gizli katmanda ve çıktı katmanında

bulunan düğümlerde kullanılan ağırlıklar ve yanlılık yeniden değerlendirilerek sinir ağının daha iyi bir tahmin yapmasına olanak sağlanır. Bu şekilde yapay sinir ağının, ileri ve geri doğru tekrar tekrar işlemesiyle hatanın minimize edilmesi sağlanarak, girdi ve çıktılar arasındaki bağlantıları öğrenilmesi gerçekleşir. Tüm girdilerin işlenmesiyle gerçekleşen her bir ileri-geri işlem adımı dönem (epoch) olarak adlandırılır. Her bir adımda ağırlıklar değişeceği için hata da değişecektir. Oluşan hatalar “kayıp fonksiyonu” olarak bilinir ve bu hatayı hesaplamak için farklı yöntemler vardır (hataların karesinin ortalaması (MSE), ortalama mutlak hata (MAE), vs.). Hatanın azaltılmasını sağlayacak şekilde parametrelerin değişimi ise optimizasyon yöntemleri (gradyan inişi, Levenberg-Marquardt yöntemi, Bayesian düzenlemesi, Newton yöntemi vs.) kullanılarak gerçekleştirilir. Bu yöntemler hata fonksiyonunun minimumunu bulmaya çalışan yöntemlerdir. Bu çalışmada “Bayesian düzenlemesi” geriye yayılma öğrenme fonksiyonu kullanılmıştır.

Öğrenme süreci, düğüm noktası girdi verilerini bir takım ağırlık katsayıları ile bu girdinin etkisini artıracak veya azaltacak şekilde derecelendirerek ilişkilendirir. Böylelikle bu girdinin önemi belirlenmiş olur. Daha sonra tüm girdiler ilgili ağırlık katsayıları ile çarpılarak toplanır ve bir aktivasyon fonksiyonuna gönderilerek bu düğümdeki sinyalin ne ölçüde çıktı vereceği belirlenir. Şekil 3a'dan da görüleceği üzere bir insan sinir hücresindeki (nöron) dendrit denilen filamentler hücreye gelen sinyalleri almakta, hücre gövdesi (soma) alınan sinyalleri işleyerek aksom denilen filamentler aracılığı ile oluşturduğu sinyalleri başka sinir hücrelerinin dendritlerine veya bir olay gerçekleştirecek olan kas veya salgı hücreleri gibi diğer hücrelere aktarmaktadır. Şekil 3b'den de görüleceği üzere, biyolojik sinir hücreleri ile yapı yapay sinir ağları birçok bakımdan birbirlerine benzemektedir. Dendritler girdileri, aksom uçları çıktıları ve hücre gövdesi de girdilerin ağırlıklarla çarpılarak toplamını ve aktivasyon fonksiyonunu temsil etmektedir. Ancak iki yapı arasındaki önemli farklar da vardır. Örneğin, yapay sinir ağları aldığı girdilere herhangi bir ağırlıkta tepki verebilirken, biyolojik sinir hücreleri aldığı sinyallere ya tepki verir ya da

hiç tepki vermez. Bunun yanında, biyolojik sinir hücrelerinin tepki süresi 10^{-3} s iken, bir silikon devrenin tepki süresi ise 10^{-9} s gibi çok daha kısa bir sürede gerçekleşir. Yapay sinir hücrelerinin bu hızına karşılık biyolojik sistemler çok daha fazla sinir hücrelerine ve bağlantılarına sahiptir. İnsan beyni yaklaşık 86 milyar nöron içermektedir. Her bir nöronun diğer nöronlara ortalama 7000 sinaptik bağlantısı vardır. 3 yaşındaki bir çocuğun $1 \cdot 10^{15}$ sinaptik bağlantısı olduğu tahmin edilmektedir [22].



Şekil 3. (a) Biyolojik sinir hücresi (b) yapay sinir hücresi modeli

Sığ yapay sinir ağları modellerinde genelde tek gizli katman olur. Gizli katman sayısının artırılması sinir ağının tahmin gücünü artırabilir. Ancak bu durumda da aşırı uyum (overfit) oluşabilir. Aşırı uyum sinir ağının girdiler ve çıktılar arasındaki genel yapıyı anlamaktan ziyade çok detaylı olarak ilişkileri öğrenmesinden kaynaklanır. Bu durumun genellikle eğitim verilerinin sayısının sinir ağı modelinin karmaşıklığı yanında az olmasından kaynaklandığı tahmin edilebilir.

3.1. HYDK Denklemlerini Bulmak İçin Kullanılan Sinir Ağları Mimarisi

Bu çalışmada, elimizdeki problemin girdi, çıktı verileri ve karakteristik yapısı dikkate alındığında tek gizli katman kullanılmasının yeterli olacağı düşünülmektedir. Böylelikle, kullanılacak sinir ağı modeli girdi ve çıktı katmanları ile birlikte üç

katmandan oluşacaktır (Şekil 4). Şekilden de görüleceği üzere, yapay sinir ağı modeli girdilerin ileriye doğru beslenmesini ve hataların geriye doğru yayılması ile öğrenmektedir. Hedef (gerçek) değer ile sinir ağının çıktısı (tahmini) arasındaki fark hatayı ifade etmektedir. Optimizasyon ve sinir ağları modellerinde birçok kayıp fonksiyonu kullanılsa da, yaygın olarak hataların karesinin ortalaması (MSE) kullanılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada da aşağıdaki gibi bir hataların karesinin ortalaması fonksiyonu (MSE) minimize edilmektedir (Eşitlik 2):

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

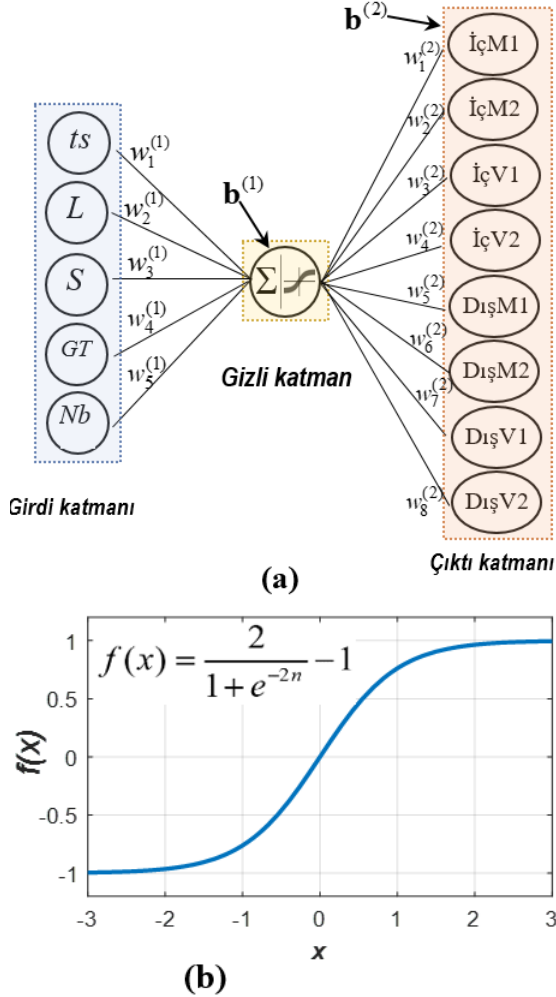
Bu eşitlikteki y_i tahmin edilen değerleri ve \hat{y}_i de hedef değerleri ifade etmektedir. Çıktı katmanındaki çıktıları (y_i) hesaplamak için önce gizli katmandaki her bir düğümde oluşan değerler (a_k) hesaplanır (Eşitlik 3).

$$a_k = f_1 \left(\sum_{j=1}^r w_{kj}^{(1)} \cdot x_j + b^{(1)} \right) \quad (3)$$

Buradaki $w_{kj}^{(1)}$ girdi katmanındaki ağırlıkları; x_j girdileri; $b^{(1)}$ yanlılık değerlerini (bias) ve $f_1(\cdot)$ gizli katmandaki aktivasyon fonksiyonunu (Şekil 4b) ifade eder. Elde edilen a_k değerleri kullanılarak Eşitlik 4 aracılığı ile de çıktılar (y_i) hesaplanır. Bu çalışmada tek bir nöron kullanıldığı için k indisi sadece bir olacaktır. Ayrıca, tek bir nöron kullanıldığı için her bir çıktı için (İçM1, İçM2 vs.) sinir ağı ayrı ayrı çalıştırılmıştır (Eşitlik 4).

$$y_i = f_2 \left[\sum_{k=1}^s w_{ik}^{(2)} \cdot a_k + b^{(2)} \right] \quad (4)$$

Bu eşitlikteki a_k gizli katmandaki her bir düğümde oluşan değerleri; $w_j^{(2)}$ girdi katmanındaki ağırlıkları; $b^{(2)}$ yanlılık değerlerini ve $f_2(\cdot)$ gizli katmandaki aktivasyon fonksiyonunu temsil eder. Sinir ağı eğitilirken, her bir işlem adımında (epoch) tüm ağırlıklar ve yanlılık değerleri kayıp fonksiyonunu minimize etmek için güncellenir.



Şekil 4. (a) Kullanılan yapay sinir ağı mimarisi (b) Tansig fonksiyonu

Aktivasyon fonksiyonları göz önüne alınan problemin niteliğine (regresyon, sınıflandırma vs.) göre seçilebilir. Derin öğrenme yöntemlerinde ReLU (Rectified Linear Unit) fonksiyonu birden fazla gizli katmandan oluşan sinir ağının daha iyi öğrenmesini sağlasa da sığ sinir ağlarında genellikle tercih edilen fonksiyonlar doğrusal, sigmoid veya hiperbolik tanjant fonksiyonlarıdır [1]. Bu çalışmada da hassasiyet analizleri yapılarak sigmoid veya hiperbolik tanjant fonksiyonları arasında önemli bir fark oluşmadığı görülmüştür. Bu nedenle gizli katmanda hiperbolik tanjant (tansig) fonksiyonu ve çıktı katmanında da

doğrusal (purelin) fonksiyonu kullanılmıştır (Şekil 2).

Bu çalışmada eğitim algoritması olarak “Bayesian Regularization” algoritması diğer yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiği için tercih edilmiştir. Bu algoritmanın daha güçlü olması ve doğrulama adımına gerek duymaması özelliklerinden dolayı da diğer araştırmacıların tercihi olmaktadır [23].

Çizelge 3’te bu çalışma için oluşturulan sinir ağı mimarisine ait parametrelerin değerleri verilmiştir. Yapay sinir ağına ele alınan girdiler Çizelge 2’de verilen üstyapı özellikleridir: tabliye kalınlığı (ts), köprü uzunluğu (L), kirişler arasındaki açıklık (S), kiriş tipi (GT) ve kiriş sayısı (Nb). Çizelge 2’den de görülebileceği gibi, her bir hareketli yük dağılım katsayısı türü için 65 adet birbirinden farklı girdi verisi bulunmaktadır. Bu 65 veri setinin 56 tanesi sinir ağının eğitimi için ve 9 tanesi de sinir ağının test edilmesi için kullanılmıştır.

Sinir ağının tahmin edeceği çıktılar ise bir veya birden daha fazla kamyon yükleri altında iç kirişlerde oluşan hareketli yük dağılım katsayılarıdır (İçM1, İç M2, İçV1, İçV2, DışM1, DışM2, DışV1, DışV2). Bu katsayıları ifade eden kısaltmalardaki “İç” ifadesi iç kirişi, Dış ifadesi dış kirişi, M ve V harfleri moment ve kesme kuvvetini, 1 ve 2 rakamları ise yüklemeye kullanılan kamyonların 1 veya 1’den fazla olması durumunu ifade etmektedir. Her bir girdi verisi seti 5 parametreye sahiptir ve her girdi setine karşılık 8 adet hareketli yük dağılım katsayısı içeren bir çıktı verisi seti bulunmaktadır.

Çizelge 3. YSA’nın mimari parametreleri

Parametreler	Değerler
Girdiler	ts, L, S, GT, Nb
Çıktılar	İçM1, İçM2, İçV1, İçV2 DışM1, DışM2, DışV1, DışV2
Kayıp fonksiyonu	MSE
Gizli Katman aktivasyon fonksiyonu	Tansig
Çıktı Katmanı aktivasyon fonksiyonu	Purelin
Optimizasyon yöntemi	Bayesian regularization

4. ANALİZ SONUÇLARI

Çalışma kapsamında oluşturulan yapay sinir ağı 65 adet farklı özelliklere sahip basit mesnetli köprü için HYDK'yi tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu köprülerden 56 tanesi sinir ağını eğitmek için kullanılmış ve 9 tanesi de test için kullanılmıştır. Çizelge 4'te bu köprülere ait parametreler ve analiz sonuçlarından elde edilen HYDK verilmiştir. Yapay sinir ağının eğitim ve test aşamasındaki performansı kayıp fonksiyonu olan hataların karesinin ortalaması (MSE) cinsinden Çizelge 5'te verilmiştir. Çizelgeden de görüleceği gibi hatayı minimize etmek için farklı bileşenler için dönem sayıları 18-30 arasında değişmektedir. En büyük hata değerleri ise $3,35e-5$ - $3,69e-4$ arasında oluşmaktadır ve bu da göstermektedir ki sinir ağı modeli oldukça iyi tahminler yapabilmektedir. Bunun yanı sıra, sinir ağının test ve eğitim performansları arasında belirgin bir farklılık gözlenmemektedir.

Yapay sinir ağının HYDK için yaptığı tahminler ve sonlu elemanlar sonuçları tüm bileşenler için, Şekil 5 ve Şekil 6'da eğitim ve test değerleri için sırasıyla gösterilmiştir. Şekillerdeki HYDK-Hedef eksenini sonlu eleman sonuçlarını; HYDK-Tahmin eksenini ise sinir ağının tahminini temsil etmektedir. Şekillerden de görüleceği gibi, sinir ağı modeli hem eğitim aşamasında hem de test aşamasında hedef olan sonlu elemanlar sonuçlarını kabul

edilebilir düzeyde iyi tahmin edebilmiştir. Özellikle Şekil 4'deki test verilerinin karşılaştırması önemlidir, çünkü buradaki girdi verileri ile sinir ağı modeli hiç karşılaşmamıştır. Bu yeni girdi verilerinin sonuçlarının tahmini de oldukça iyi gerçekleştirilmiştir.

Bunlara ilave olarak, şekillerin içerisinde sonlu elemanlar sonuçlarının sinir ağı tahmin sonuçlarına oranı ile ilgili niceliksel ölçüt olarak bu oranların ortalaması (Mean) ve sonuçlar arasındaki ilişkiyi temsilen korelasyon katsayısı (R) gösterilmiştir. Oranların ortalamasını incelediğimizde değerlerin eğitim verileri için 0,9998 1,0002 aralığında, test verileri içinse 0,9896-1,0095 aralığında olduğu görülmektedir. Korelasyon katsayısı değerleri açısından, eğitim verileri için en kötü ilişki 0,9808 ile DışM2 bileşeninde, en iyi ilişki ise 0,9984 ile İçV2 bileşeninde görülmektedir. Test verileri arasındaki en kötü korelasyon 0,9870 ile IntM2'de, en iyi korelasyon ise 0,9996 ile IntV2 bileşeninde oluşmaktadır. Test verileri için korelasyon değerlerinde eğitim verilerine göre önemli bir fark görünmemektedir. Ancak, oranların ortalaması değerlerinin test verilerinde, eğitim verilerine göre, 1,0000 değerinden daha fazla saptığı gözlenmektedir. Bunun nedeni ise sinir ağı modeli test verileri ile ilk defa karşılaşmıştır. Tüm girdi değerleri için eğitim ve test verilerinin tamamı Çizelge 6'da AASHTO LRFD sonuçları ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4. Köprü parametreleri ve hareketli yük dağılım katsayıları

						Sonlu elemanlar analizi ile bulunan HYDK							
<i>ts</i>	<i>L</i>		<i>S</i>	<i>GT</i>	<i>Nb</i>	<i>İçM1</i>	<i>İçM2</i>	<i>İçV1</i>	<i>İçV2</i>	<i>DışM1</i>	<i>DışM2</i>	<i>DışV1</i>	<i>DışV2</i>
0,15	30		2,4	4	4	0,482	0,660	0,594	0,700	0,554	0,571	0,533	0,467
0,15	30		2,4	4	5	0,476	0,651	0,593	0,698	0,551	0,570	0,533	0,467
0,15	30		2,4	4	6	0,475	0,648	0,593	0,697	0,551	0,570	0,533	0,467
0,15	30		2,4	4	7	0,474	0,647	0,593	0,697	0,551	0,570	0,533	0,467
0,15	30		2,4	4	8	0,474	0,647	0,593	0,697	0,551	0,570	0,533	0,467
0,2	30		2,4	4	4	0,454	0,636	0,573	0,686	0,550	0,586	0,531	0,471
0,2	30		2,4	4	5	0,446	0,625	0,572	0,683	0,544	0,586	0,529	0,471
0,2	30		2,4	4	6	0,443	0,620	0,571	0,682	0,542	0,584	0,529	0,471
0,2	30		2,4	4	7	0,442	0,618	0,571	0,681	0,541	0,583	0,529	0,471
0,2	30		2,4	4	8	0,442	0,618	0,571	0,681	0,541	0,583	0,529	0,471
0,25	30		2,4	4	4	0,434	0,618	0,551	0,671	0,544	0,595	0,527	0,474
0,25	30		2,4	4	5	0,427	0,605	0,549	0,666	0,533	0,596	0,525	0,475

0,25	30		2,4	4	6	0,423	0,599	0,548	0,665	0,529	0,592	0,524	0,474
0,25	30		2,4	4	7	0,421	0,596	0,548	0,664	0,528	0,590	0,523	0,474
0,25	30		2,4	4	8	0,420	0,595	0,548	0,664	0,528	0,589	0,523	0,474
0,3	30		2,4	4	4	0,423	0,605	0,529	0,654	0,534	0,597	0,523	0,477
0,3	30		2,4	4	5	0,416	0,589	0,527	0,649	0,522	0,599	0,520	0,478
0,3	30		2,4	4	6	0,410	0,584	0,525	0,646	0,515	0,594	0,518	0,477
0,3	30		2,4	4	7	0,407	0,581	0,524	0,645	0,512	0,591	0,517	0,476
0,3	30		2,4	4	8	0,406	0,579	0,524	0,645	0,511	0,590	0,517	0,476
0,2	10		2,4	4	4	0,756	0,825	0,640	0,713	0,591	0,489	0,514	0,422
0,2	10		2,4	4	5	0,756	0,826	0,640	0,714	0,591	0,489	0,514	0,422
0,2	10		2,4	4	6	0,756	0,826	0,640	0,714	0,591	0,489	0,514	0,422
0,2	10		2,4	4	7	0,756	0,826	0,640	0,714	0,591	0,489	0,514	0,422
0,2	10		2,4	4	8	0,756	0,826	0,640	0,714	0,591	0,489	0,514	0,422
0,2	20		2,4	4	4	0,542	0,712	0,589	0,699	0,585	0,554	0,532	0,458
0,2	20		2,4	4	5	0,538	0,706	0,588	0,697	0,584	0,554	0,532	0,458
0,2	20		2,4	4	6	0,537	0,704	0,588	0,697	0,584	0,554	0,532	0,458
0,2	20		2,4	4	7	0,537	0,704	0,588	0,697	0,584	0,554	0,532	0,458
0,2	20		2,4	4	8	0,537	0,704	0,588	0,697	0,584	0,554	0,532	0,458
0,2	40		2,4	4	4	0,421	0,605	0,565	0,681	0,515	0,585	0,528	0,474
0,2	40		2,4	4	5	0,413	0,586	0,563	0,676	0,505	0,585	0,526	0,475
0,2	40		2,4	4	6	0,408	0,581	0,562	0,674	0,499	0,580	0,525	0,474
0,2	40		2,4	4	7	0,406	0,578	0,562	0,674	0,497	0,577	0,524	0,474
0,2	40		2,4	4	8	0,405	0,576	0,562	0,673	0,496	0,576	0,524	0,473
0,2	30		2,4	2	4	0,414	0,597	0,532	0,654	0,520	0,594	0,525	0,481
0,2	30		2,4	2	5	0,406	0,577	0,530	0,647	0,509	0,594	0,522	0,482
0,2	30		2,4	2	6	0,400	0,576	0,527	0,645	0,502	0,589	0,520	0,481
0,2	30		2,4	2	7	0,397	0,573	0,526	0,645	0,499	0,586	0,519	0,481
0,2	30		2,4	2	8	0,396	0,571	0,526	0,644	0,498	0,584	0,519	0,480
0,2	30		2,4	3	4	0,433	0,618	0,557	0,673	0,540	0,593	0,529	0,475
0,2	30		2,4	3	5	0,426	0,604	0,555	0,669	0,531	0,593	0,527	0,476
0,2	30		2,4	3	6	0,421	0,598	0,553	0,668	0,527	0,589	0,525	0,475
0,2	30		2,4	3	7	0,419	0,594	0,552	0,667	0,525	0,588	0,525	0,475
0,2	30		2,4	3	8	0,419	0,593	0,552	0,666	0,525	0,587	0,525	0,474
0,2	30		2,4	5	4	0,474	0,654	0,586	0,696	0,568	0,584	0,535	0,468
0,2	30		2,4	5	5	0,467	0,645	0,584	0,694	0,563	0,584	0,534	0,468
0,2	30		2,4	5	6	0,465	0,641	0,580	0,693	0,562	0,582	0,533	0,468
0,2	30		2,4	5	7	0,464	0,640	0,580	0,692	0,562	0,582	0,533	0,468
0,2	30		2,4	5	8	0,464	0,640	0,580	0,692	0,562	0,582	0,533	0,468
0,2	30		1,2	4	4	0,322	0,000	0,414	0,000	0,376	0,000	0,394	0,000
0,2	30		1,2	4	5	0,300	0,000	0,407	0,000	0,368	0,000	0,393	0,000
0,2	30		1,2	4	6	0,294	0,353	0,404	0,414	0,363	0,364	0,392	0,336
0,2	30		1,2	4	7	0,290	0,340	0,403	0,411	0,360	0,369	0,392	0,338
0,2	30		1,2	4	8	0,289	0,336	0,403	0,411	0,358	0,370	0,391	0,338
0,2	30		3,6	4	4	0,573	0,905	0,719	0,926	0,680	0,759	0,648	0,600
0,2	30		3,6	4	5	0,567	0,894	0,718	0,924	0,678	0,757	0,647	0,599

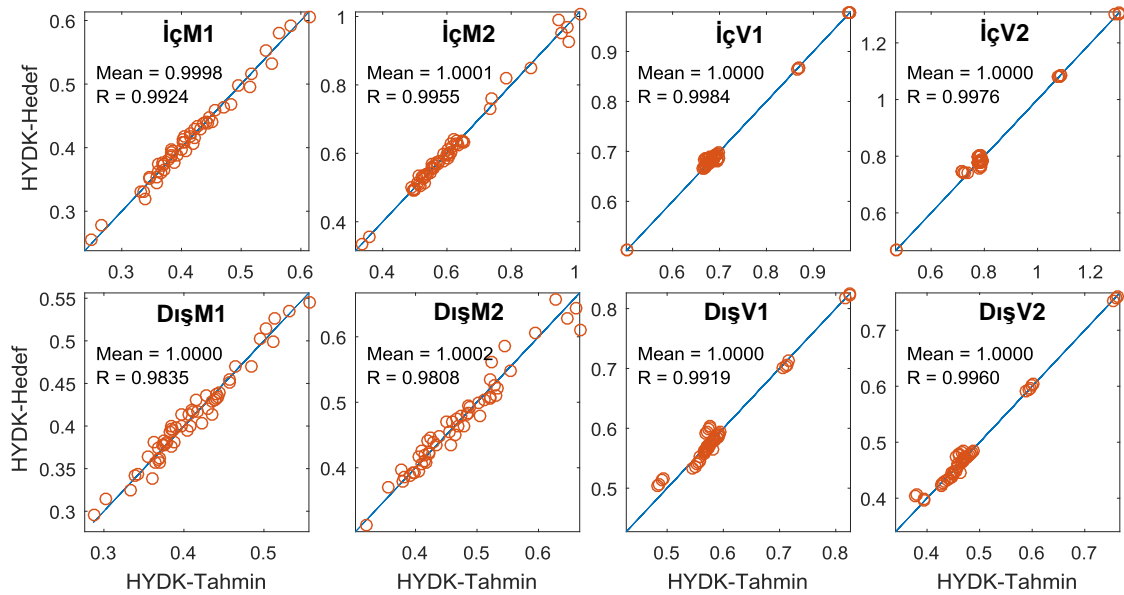
0,2	30		3,6	4	6	0,566	0,891	0,718	0,923	0,678	0,757	0,647	0,599
0,2	30		3,6	4	7	0,566	0,891	0,718	0,923	0,678	0,757	0,647	0,599
0,2	30		3,6	4	8	0,566	0,891	0,718	0,923	0,678	0,757	0,647	0,599
0,2	30		4,8	4	4	0,691	1,157	0,826	1,119	0,780	0,908	0,734	0,738
0,2	30		4,8	4	5	0,687	1,150	0,825	1,117	0,780	0,907	0,734	0,738
0,2	30		4,8	4	6	0,687	1,150	0,825	1,117	0,780	0,907	0,734	0,738
0,2	30		4,8	4	7	0,687	1,149	0,825	1,117	0,780	0,907	0,734	0,738
0,2	30		4,8	4	8	0,687	1,149	0,825	1,117	0,780	0,907	0,734	0,738

Çizelge 5. Eğitim ve test performansları

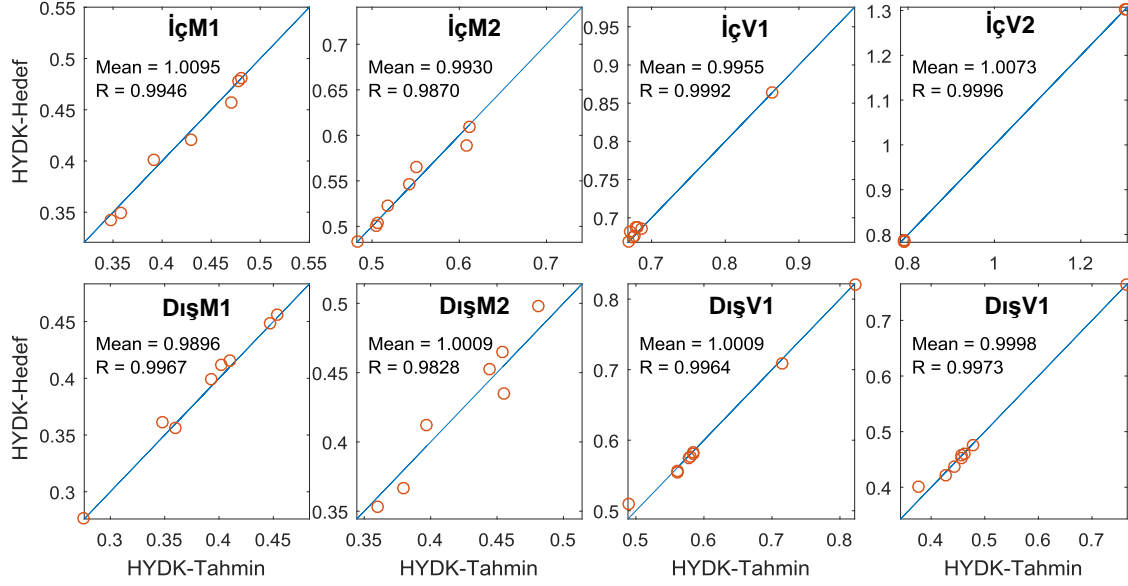
Bileşen	Eğitim Performansı (MSE)	Test Performansı (MSE)	Dönem Sayısı (epoch)
İçM1	8,51E-05	1,02E-04	30
İçM2	1,95E-04	3,69E-04	22
İçV1	3,35E-05	2,82E-05	30
İçV2	9,84E-04	7,25E-05	18
DışM1	9,84E-05	4,06E-05	22
DışM2	2,59E-04	1,67E-04	19
DışV1	1,23E-04	7,01E-05	24
DışV2	7,05E-05	6,97E-05	22

4.1 Kapalı Formda HYDK Formülleri

Bu bölümde hem iç hem de dış kirişlerdeki eğilme momenti ve kesme kuvveti denklemleri kapalı formda elde edilecektir. Denklemlerin basit formda kalmaları için gizli katmanda tek bir düğüm alınmıştır. Ancak, tek bir düğüm alınmasına rağmen, Çizelge 5'te de görüleceği gibi hatalar oldukça düşük kalmaktadır. Sinir ağının eğitilmesinin ardından oluşan ağırlıklar ve yanlılık katsayıları aktivasyon fonksiyonu içerisine yazılarak kapalı formda eğilme momenti ve kesme kuvveti için HYDK'yı veren denklemler Eşitlik 5'te gösterildiği şekilde elde edilmişlerdir.



Şekil 5. Eğitim için kullanılan tahmin edilen ve sonlu eleman analizi ile elde edilen HYDK'nın karşılaştırılması



Şekil 6. Test için kullanılan tahmin edilen ve sonlu eleman analizi ile elde edilen HYDK'nın karşılaştırılması

$$\begin{aligned}
 \text{İçM1} &= \left[\frac{2}{1 + e^{(-2(0,8722 \, ts + 0,0066 \, L - 0,1854 \, S - 0,0097 \, GT + 0,415 \, Nb - 0,4872))}} - 1 \right] (-0,5631) + 0,2073 \\
 \text{İçM2} &= \left[\frac{2}{1 + e^{(-2(0,3239 \, ts + 0,0004 \, L - 0,3653 \, S - 0,0127 \, GT + 0,0612 \, Nb - 0,5058))}} - 1 \right] (-0,5348) + 0,6295 \\
 \text{İçV1} &= \left[\frac{2}{1 + e^{(-2(0,4457 \, ts - 0,0004 \, L - 0,4325 \, S - 0,0167 \, GT - 0,0035 \, Nb + 1,0228))}} - 1 \right] (-0,3836) + 0,6757 \sum \\
 \text{İçV2} &= \left[\frac{2}{1 + e^{(-2(-0,0144 \, ts - 0,0023 \, L - 0,3166 \, S + 0,0008 \, GT - 0,0021 \, Nb + 0,7739))}} - 1 \right] (-0,8518) + 0,7252 \\
 \text{DışM1} &= \left[\frac{2}{1 + e^{(-2(-0,1567 \, ts + 0,0063 \, L + 0,2531 \, S - 0,0795 \, GT - 0,0693 \, Nb + 0,1883))}} - 1 \right] (-0,2776) + 0,3371 \\
 \text{DışM2} &= \left[\frac{2}{1 + e^{(-2(-0,2869 \, ts - 0,0075 \, L - 0,3835 \, S + 0,0914 \, GT + 0,1109 \, Nb + 0,2259))}} - 1 \right] (-0,2642) + 0,4591 \\
 \text{DışV1} &= \left[\frac{2}{1 + e^{(-2(+0,2140 \, ts + 0,0044 \, L + 0,1828 \, S - 0,0146 \, GT + 0,0049 \, Nb - 0,4))}} - 1 \right] (0,6880) + 0,4444 \\
 \text{DışV1} &= \left[\frac{2}{1 + e^{(-2(+0,3911 \, ts + 0,0050 \, L + 0,2035 \, S - 0,0246 \, GT + 0,0051 \, Nb - 1,1458))}} - 1 \right] (0,6832) + 0,7655
 \end{aligned} \tag{5}$$

AASHTO LRFD’de basit mesnetli köprüler için hareketli yük denklemleri elde edilirken veya Dicleli ve Erhan’ın [24] integral köprüler için hazırladıkları hareketli yük denklemlerinde, parametrelerin formül içerisinde oluşturdukları form için bazı eğilim ve hassasiyet analizleri yapılması gerekmektedir. Ancak bu çalışmada elde

edilen denklemler için böyle bir hazırlığa gerek kalmamıştır. Ayrıca, bu çalışmada elde edilen denklemlerin yapısında bulunan ağırlık çarpanları incelenerek hangi parametrenin hangi bileşen için ne kadar etkili olduğu doğrudan gözlenebilmektedir.

Çizelge 6. İç kirişler için yapay sinir ağından elde edilen moment ve kesme kuvveti hareketli yük dağılım katsayılarının hedef verilerle (sonlu elemanlar analiz sonuçları)ve AASHTO denklemleri sonuçları ile karşılaştırılması

İçM1	YSA	0,3417	0,4018	0,5663	0,4208	0,3078	0,3494	0,4573	0,4813	0,4778
	SEA	0,3481	0,3920	0,5502	0,4302	0,3207	0,3583	0,4708	0,4812	0,4782
	AASHTO	0,4230	0,4858	0,7217	0,6921	0,4239	0,4414	0,5020	0,6010	0,6921
İçM2	YSA	0,7922	0,5232	0,5656	0,5892	0,5003	0,5044	0,4841	0,5465	0,6094
	SEA	0,7408	0,5176	0,5507	0,6081	0,5050	0,5071	0,4826	0,5422	0,6117
	AASHTO	0,8925	0,6303	0,7425	0,6928	0,6660	0,8968	0,6031	0,6031	0,5863
İçV1	YSA	0,6884	0,6855	0,6743	0,6765	0,9771	0,6684	0,8642	0,6870	0,6811
	SEA	0,6798	0,6865	0,6740	0,6775	0,9757	0,6679	0,8633	0,6784	0,6711
	AASHTO	0,6758	0,6758	0,6758	0,6758	0,9916	0,6758	0,8337	0,6758	0,6758
İçV2	YSA	0,7789	0,7825	0,7622	1,3038	0,7855	1,3019	0,7825	0,7863	0,7838
	SEA	0,7826	0,7883	0,7848	1,3075	0,7893	1,3023	0,7841	0,7910	0,7902
	AASHTO	0,8164	0,8164	0,8164	1,3321	0,8164	1,3321	0,8164	0,8164	0,8164
DışM1	YSA	0,4481	0,3616	0,4156	0,4115	0,3996	0,3557	0,2767	0,4850	0,4555
	SEA	0,4476	0,3485	0,4095	0,4025	0,3923	0,3592	0,2760	0,4832	0,4530
	AASHTO	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,4500	0,7500	0,7500
DışM2	YSA	0,4124	0,3664	0,3342	0,3529	0,4526	0,5215	0,4982	0,4649	0,4346
	SEA	0,3972	0,3795	0,3444	0,3605	0,4441	0,5141	0,4811	0,4545	0,4547
	AASHTO	0,6283	0,5842	0,3635	0,7866	0,5290	0,5142	0,5512	0,5413	0,7866
DışV1	YSA	0,5103	0,5561	0,5817	0,8209	0,5818	0,5554	0,5767	0,5754	0,7095
	SEA	0,4883	0,5622	0,5852	0,8216	0,5834	0,5616	0,5800	0,5780	0,7159
	AASHTO	0,6000	0,6000	0,6000	0,9000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,7500
DışV2	YSA	0,4004	0,7641	0,4521	0,4600	0,4577	0,3400	0,4763	0,4363	0,4204
	SEA	0,3777	0,7656	0,4554	0,4612	0,4568	0,3430	0,4792	0,4425	0,4267
	AASHTO	0,5714	0,9325	0,5714	0,5714	0,5714	0,3645	0,5714	0,5714	0,5714

Sinir ağının öğrenmesi sonucu bulunan kapalı formda elde edilen denklemler, AASHTO LRFD’de verilen denklemlerle test için kullanılan girdiler (9 adet) kullanılarak karşılaştırılmış ve Çizelge 6’da verilmiştir. Çizelgede ayrıca, hedef çıktı olarak kullanılan sonlu elemanlar sonuçları da gösterilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında sinir ağının oldukça iyi tahminler yaptığı görülmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada yapay sinir ağları kullanılarak hareketli yüklerin yarattığı moment ve kesme kuvveti etkilerinin basit mesnetli köprü kirişleri

üzerindeki dağılımını temsil eden denklemler elde edilmiştir. Bu amaçla ilk olarak farklı yapısal parametrelere sahip 65 farklı köprü için HYDK sonlu eleman analizleri ile elde edilmiştir. Akabinde, kurulan bir yapay sinir ağına yapısal parametreler girdi olarak, HYDK da hedef veriler olarak girilmiş ve sinir ağı eğitilerek ağırlık ve yanlılık katsayıları elde edilmiştir. Sinir ağının sonuçları incelendiğinde hem eğitim hem de test verileri için tahmin edilen HYDK’nın sonlu elemanlar analiz sonuçlarına oldukça yakın olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, tahmin edilen HYDK’nın hedef HYDK’na oranlarının ortalaması ve tahmin ile hedef değerler arasındaki korelasyon

katsayıları da iç ve dış kirişlerdeki kesme ve moment HYDK için incelenmiştir. Bulunan ortalama değerlerinin ve korelasyon katsayılarının birim değere çok yakın olması sinir ağının köprü parametreleri arasındaki ilişkiyi çok iyi öğrendiğini göstermektedir. Ayrıca sinir ağının eğitimi esnasındaki performansını gösteren kayıp fonksiyonunun da çok küçük değerlere sahip olması sinir ağının yapacağı tahminlerin doğruluğunun göstergesidir. Bunlara ilave olarak, sinir ağının tahminleri ile AASHTO sonuçları karşılaştırıldığında yakın sonuçlar bulunmuştur. Elde edilen ağırlık katsayıları ve yanlılık değerleri aktivasyon fonksiyonu olarak kullanılan tanisig fonksiyonuna konularak kapalı formda hareketli yük dağılımı denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemler, köprü tasarım mühendislerine hareketli yük dağılım katsayılarını bulmak için kullanabilecekleri, köprü kiriş sayısını da (Nb) içeren, en güncel formülleri sunmaktadır. Ayrıca, bu çalışma göstermiştir ki, yapay sinir ağları köprülerdeki hareketli yük etkilerini tahmin etmek için kullanılabilir uygun bir yöntemdir ve farklı türdeki köprüler için de kullanılabilir.

6. KAYNAKLAR

1. LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G., 2015. Deep Learning. *Nature*, 521(7553), 436-444.
2. Tshitoyan, V., Dagdelen, J., Weston, L., Dunn, A., Rong, Z., Kononova, O., Jain, A., 2019. Unsupervised Word Embeddings Capture Latent Knowledge from Materials Science Literature. *Nature*, 571(7763), 95-98.
3. Moayed, H., Mosallanezhad, M., Rashid, A.S.A., Jusoh, W.A.W., Muazu, M.A., 2018. A Systematic Review and Meta-Analysis of Artificial Neural Network Application in Geotechnical Engineering: Theory and Applications. *Neural Computing and Applications*, 1-24.
4. Shahin, M.A., Jaksa, M.B., Maier, H.R., 2001. Artificial Neural Network Applications in Geotechnical Engineering. *Australian Geomechanics*, 36(1), 49-62.
5. Salehi, H., Burgueno, R., 2018. Emerging Artificial Intelligence Methods in Structural Engineering. *Engineering Structures*, 171, 170-189.
6. Ng C-T., 2014. On the Selection of Advanced Signal Processing Techniques for Guided Wave Damage Identification Using a Statistical Approach. *Engineering Structures*, 67, 50-60.
7. Akbas, B., Doran, B., Alacali, S., Akşar, B., 2016. Estimating Stiffness Modification Factor for the Coupling Beam of Coupled Shear Walls Using a Neural Network Model. *Karaelmas Science & Engineering Journal*, 6(2), 273-282.
8. Chen, G., Li, T., Chen, Q., Ren, S., Wang, C., Li, S., 2019. Application of Deep Learning Neural Network to Identify Collision Load Conditions Based on Permanent Plastic Deformation of Shell Structures. *Computational Mechanics*, 64(2), 435-449.
9. Mazanoğlu, K., Kandemir-Mazanoğlu, E.Ç., 2017. Çatlaklı Kirişlerin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(3), 1129-1135.
10. Mansour, M.Y., Dicleli, M., Lee, J.Y., Zhang, J., 2004. Predicting the Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Using Artificial Neural Networks. *Engineering Structures*, 26(6), 781-799.
11. Falcone, R., Lima, C., Martinelli, E., 2020. Soft Computing Techniques in Structural and Earthquake Engineering: a Literature Review. *Engineering Structures*, 207, 110269.
12. Xiao, F., Fan, J., Chen, G.S., Hulsey, J.L., 2019. Bridge Health Monitoring and Damage Identification of Truss Bridge Using Strain Measurements. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(3), 1687814019832216.
13. Salomon, A.L., Wells, J., 2018. Exploiting Imagery Data Collected with Unmanned Aircraft Systems (UAS) for Bridge Inspections (No. 18-03134).
14. Gupta, R.K., Kumar, S., Patel, K.A., Chaudhary, S., Nagpal, A.K., 2015. Rapid Prediction of Deflections in Multi-span Continuous Composite Bridges Using Neural Networks. *International Journal of Steel Structures*, 15(4), 893-909.
15. Fahmy, A.S., El-Madawy, M. E. T., Gobran, Y. A., 2016. Using Artificial Neural Networks in the Design of Orthotropic Bridge Decks.

- Alexandria Engineering Journal, 55(4), 3195-3203.
16. Xu, G., Chen, Q., Chen, J., 2018. Prediction of Solitary Wave Forces on Coastal Bridge Decks Using Artificial Neural Networks. Journal of Bridge Engineering, 23(5), 04018023.
 17. AASHTO LRFD, 2017. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 8th ed. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
 18. Zokaie, T., Osterkamp, T.A., Imbsen, R.A., 1991. Distribution of Wheel Loads on Highway Bridges, NCHRP 12-26 Final Rep., National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C.
 19. Yalcin, O.F., Dicleli, M., 2013. Comparative Study on the Effect of Number of Girders on Live Load Distribution in Integral Abutment and Simply Supported Bridge Girders. Advances in Structural Engineering, 16(6), 1011-1034.
 20. SAP2000, 2016. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures Inc., Berkeley, CA, USA.
 21. Kim, P., 2017. Matlab Deep Learning with Machine Learning, Neural Networks and Artificial Intelligence, Apress, Berkeley.
 22. Cooper, D.C., 2011. Introduction to Neuroscience. Donald C. Cooper Ph. D..
 23. Burden, F., Winkler D., 2008. Bayesian Regularization of Neural Networks. in: Livingstone D.J. (eds) Artificial Neural Networks. Methods in Molecular Biology, vol 458. Humana Press.
 24. Dicleli, M., Erhan, S., 2009. Live Load Distribution Formulas for Single-Span Prestressed Concrete Integral Abutment Bridge Girders. Journal of Bridge Engineering, 14(6), 472-486.

Fotovoltaik Paneller için Parametre Kestirim Sistemi

**Kübra ÖZCAN¹, Zehan KESİLMİŞ^{*2}, Murat AKSOY³,
M. Alpaslan KARABACAK⁴, Bülent BÜYÜKGÜZEL³**

¹*Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Osmaniye*

²*Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Adana*

³*Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Adana*

⁴*Beykent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, İstanbul*

Geliş tarihi: 10.08.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Fotovoltaik (FV) sistemlerin modellenmesinde panel parametrelerin doğruluğu büyük önem teşkil etmektedir. Bu çalışmada, FV panellerin parametrelerinin deneysel yolla belirlenmesini hedefleyen bir sistem geliştirilmiştir. FV panellerin karakteristik eğrileri önerilen sistem ile örneklenmiş ve geliştirilen MATLAB yazılımına aktarılmıştır. MATLAB yazılımında, parametre tespiti için Newton Raphson, Secant, Bisection ve Regula Falsi yöntemleri uygulanmıştır. Kullanılan tüm kök bulma yöntemlerinin yüksek başarıyla parametre tespiti yapmasının yanında Secant yönteminin en hızlı yöntem olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik panel, I/V eğrisi, Parametre tespiti

Parameter Estimation System for Photovoltaic Panels

Abstract

When modeling photovoltaic (PV) systems, accuracy of panel parameters is of great importance. In this study, a system which aims to determine the parameters of PV panels by experimental way has been developed. The characteristic curves of the FV panels are sampled with the proposed system and transferred to the developed MATLAB software. In the MATLAB software, Newton Raphson, Secant, Bisection and Regula Falsi methods are applied for parameter determination. It has been observed that Secant method is the fastest method, besides all root detection methods used to determine parameters with high success.

Keywords: Photovoltaic panel, I/V curve, Parameter estimation

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Zehan KESİLMİŞ, zkesilmis@atu.edu.tr

1. GİRİŞ

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de enerji üretiminde dışa bağımlılığı azaltmak amacıyla kaynak çeşitliliğine gidilmektedir. Yıllar içerisinde Fotovoltaik (FV) sistemlerin birim maliyetlerinin düşmesi ve devletlerin yenilenebilir enerji kaynaklarına uyguladıkları teşvikler yatırımcıları bu sektöre yönlendirmektedir. Bunlara ek olarak, ülkemizin güneş ışması açısından önemli bir avantaja sahip olması da FV sistemlerin ülkemiz için önemini arttırmaktadır [1].

FV sistemlerin en temel yapı taşı olan FV hücreler yarı iletken elemanlardır. Bu yüzden de akım-gerilim (I/V) karakteristikleri doğrusal değildir. FV hücrelerin seri bağlanmasıyla FV paneller elde edilmektedir. FV sistemlerde istenilen gerilim seviyelerine ulaşmak için FV paneller seri, gerekli akım seviyelerine ulaşmak için ise paralel olarak bağlanır.

FV panel üreticileri, FV panellerin önemli parametrelerini katalog bilgisi olarak son tüketiciye sunmaktadırlar. Bu parametreler yardımıyla FV panellerin bilgisayar modellemeleri yapılabilmektedir. Fakat zaman içerisinde yıpranma ve mikro kırıklar gibi dış etkenler bazı hücrelerin diğer hücrelere göre farklı karakter göstermesine neden olabilmektedir. Bunun yanında, parametreler bazen üreticiler tarafından verilmemekte veya yanlış verilmektedir. Doğruluğu şüpheli parametrelerle yapılacak tasarım ve bilgisayar benzetimleri de yanlış sonuçlar doğurmaktadır. Bu yüzden, FV hücrelerin ve panellerin parametrelerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Literatürde, FV panellerin parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılmış çalışmaların başlıcaları ilerleyen bölümde sunulmuştur.

Tutkun ve arkadaşları melez genetik algoritma kullanarak FV panelin ideallik faktörü ve R_s parametrelerini tespit etmişlerdir [2]. Jain ve Kapoor FV panelin R_s ve R_{sh} değerlerini hesaplamak için Lambert W fonksiyonu kullanarak Mapple yazılımıyla bir çalışma yapmışlardır [3]. Cubas ve arkadaşları Lambert W fonksiyonu ile R_s

değerini analitik formülasyona dönüştürmüşlerdir. Bu yöntem farklı atmosferik şartlar için FV sistemin performans incelemesinde kullanılmıştır [4]. Batzeli ve arkadaşları ise çalışmalarında panel gerilimini panel akımına göre ifade eden Lambert W temelli bir yaklaşıma yer vermişlerdir. Bu çalışmada, işlem sadeliği için bazı parametreler yok sayılmıştır. Bu ihmaller parametre tahmin başarısını düşürmüştür [5]. Rodriguez ve arkadaşları ise parametre tespitinde genetik algoritma kullanmışlardır [6]. Ünlü ve ark. ise FV panelin katalog verilerinden faydalanan bir model oluşturmuşlardır. Bu çalışmada, FV hücrenin akım gerilim eğrileri üzerinden Newton Raphson yöntemi yardımıyla parametreler hesaplanmıştır [7]. Adamo ve arkadaşları ise FV panelin I/V eğrilerini farklı atmosferik şartlar için hesaplayabilen bir yazılım geliştirmişlerdir. FV panelin I/V eğrisi, bilgisayar benzetimi ile bilinen parametreler kullanılarak üretilmiştir. I/V eğrisine en iyi yaklaşım sağlayan R_s ve R_{sh} dirençleri tahmin edilmiştir [8]. Mahmoud ve ark. çalışmalarında $I_{ph}=I_{sc}$ yaklaşımını benimsemişler ve FV panelin R_{sh} direncini ihmal etmişlerdir [9]. Villalva ve ark. ise diyot ideallik faktörünü hesaplamalar boyunca sabit bir değer olarak kabul etmişlerdir [10].

Literatürde FV panellerin modellenmesi ve parametrelerinin tespiti için önerilen yöntemler genellikle analitik, dögüsel ve evrimsel algoritmalar temelli yöntemlerdir [11]. FV panellerin parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmaların çoğunda I/V eğrileri veri olarak kullanılıp çeşitli matematiksel yaklaşımlar uygulanmıştır. I/V eğrilerini kullanmayan çalışmalar göreceli olarak hızlı sonuç verse de parametre kestirim başarısı sınırlı olmaktadır.

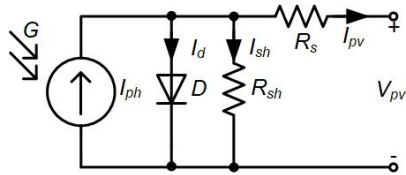
Bu çalışmada, parametreleri bilinmeyen bir FV panelin parametreleri geliştirilen donanım ve yazılımla referans [10]'daki matematiksel yaklaşımlar ışığında hesaplanmıştır. Bu hesaplamaları bir parametre tespit sistemi haline getirmek için ise iki aşamalı bir çalışma yapılmıştır. İlk aşamada FV panelin I/V eğrisi, geliştirilen DC yük donanımı ile örneklenmiştir. İkinci aşamada ise bu eğriler geliştirilen MATLAB yazılımında parametre tespiti için veri olarak

kullanılmıştır. MATLAB ortamında, R_s değeri dögüsel olarak arttırılarak deney verileriyle örtüşecek FV panel parametreleri hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında referans [10]'da verilen denklem takımlarının çözümü için Newton Raphson, Regula Falsi, Bisection ve Secant yöntemleri kullanılmıştır. Yapılan inceleme sonucunda yukarıda sayılan yöntemlerin birbirine yakın hata oranları ile FV panel parametrelerini tespit ettiği gözlemlenmiştir. Bu yüzden söz konusu yöntemler işlem süreleri ve kodlama zorluğu açısından birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Secant yöntemi işlem süresinin kısalığı ve uygulama kolaylığı ile diğer yöntemlerin önüne geçmektedir.

Bu çalışma 5 bölümden oluşmaktadır. 1. bölümde önceki çalışmalara, 2. bölümde FV hücre modeline, 3. bölümde ise bu çalışmada tasarlanan deney düzeneğine ve parametre kestirimi için kullanılan yöntemlere yer verilmiştir. 4. Bölümde bulgulara yer verilmiştir. 5. bölümde ise sonuçlara yer verilmiştir.

2. FV HÜCRE MODELİ

Tek diyot modeli olarak da bilinen FV hücre modeli: ışımaya bağlı akım kaynağı, diyot ve iki dirençten oluşmaktadır [12]. Bu model Şekil 1'de verilmiştir. Bu modelde kullanılan parametreler I_{ph} , I_0 , R_s , R_{sh} ve a 'dır. Bu 5 parametre ilerleyen kısımda detaylı olarak ele alınacaktır.



Şekil 1. 1M5P modeli

Şekil 1'de verilen FV hücre modelinin çıkış akımı (I_{pv}) Eşitlik 1'de sunulmuştur.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

Eşitlik 1'de verilen I_{pv} , FV hücrenin akımını, I_{ph} güneş ışımaya bağlı akımını, I_D FV hücrenin yapısal diyot akımını, I_{sh} paralel direnç akımını

göstermektedir. FV hücrenin yapısal diyot akımı (I_D) Eşitlik 2'de verilmiştir.

$$I_D = I_0 \left[e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{aKT}} - 1 \right] \quad (2)$$

Eşitlik 2'de verilen I_0 , diyot doyum akımını, q elektron yükünü, V_{pv} panel gerilimini, R_s seri direnci, K Boltzmann sabitini, a diyot ideallik faktörünü, T ise sıcaklığı temsil etmektedir. R_{sh} direnci üzerinden geçen akım Eşitlik 3'deki gibi ifade edilebilir.

$$I_{sh} = \frac{(V_{pv} + R_s I_{pv})}{R_{sh}} \quad (3)$$

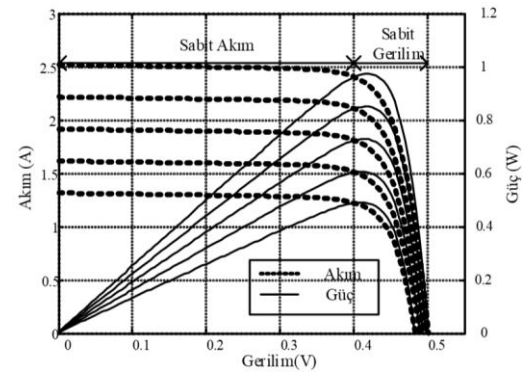
Eşitlik 2 ve 3'ün Eşitlik 1'deki yerlerine yazılması ile Eşitlik 4 elde edilir.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{aKT}} - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{R_{sh}} \quad (4)$$

FV hücrenin karakteristiğine sıcaklığının ve ışınım değerinin etkisi Eşitlik 5 ile ifade edilebilir.

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - 298)] \frac{\beta}{\beta_r} \quad (5)$$

Eşitlik 5'de verilen K_i ($A/^\circ C$) sıcaklık sabitini, I_{sc} kısa devre akımını, β (W/m^2) güneş ışımalarını, β_r ise referans ışımayı ($1000 W/m^2$) göstermektedir. Eşitlik 5'deki ışımaya değerinin (β) farklı değerlerinin Eşitlik 4'e uygulanmasıyla elde edilen I/V ve güç-gerilim (P/V) eğrileri Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Farklı ışınım için I/V ve P/V eğrileri

Eşitlik 4 verilen I_{ph} akımı, panel terminalleri kısa devre ($V_{pv}=0$) edildiğinde Eşitlik 6 gibi olacaktır.

$$I_{ph} = \frac{I_{sc}(R_{sh}+R_s)}{R_{sh}} + I_0 \left(e^{\frac{qI_{sc}R_s}{aKT}} - 1 \right) \quad (6)$$

Eşitlik 6'da verilen diyot akımı, ilk terime göre oldukça küçük bir değere sahiptir. Bundan dolayı da belli şartlar altında ihmal edilebilir. Böylece I_{ph} ifadesi Eşitlik 7 gibi tekrar tanımlanabilir.

$$I_{ph} \cong \frac{I_{sc}(R_{sh}+R_s)}{R_{sh}} \quad (7)$$

Eşitlik 4'de açık devre çalışma durumu ($V_{pv}=V_{oc}$ ve $I_{pv}=0$) göz önüne alındığında I_{ph} ifadesi Eşitlik 8 gibi olacaktır.

$$I_{ph} = I_0 \left(e^{\frac{qV_{oc}}{aKT}} - 1 \right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (8)$$

Eşitlik 7, Eşitlik 8'de yerine yazıldığında I_0 değeri Eşitlik 9'daki gibi elde edilir.

$$I_0 \cong \frac{I_{sc}(R_{sh}+R_s) - V_{oc}}{R_{sh}} e^{\frac{qV_{oc}}{aKT}} \quad (9)$$

Eşitlik 4'deki R_{sh} ve R_s değerleri bilinmeyen büyüklüklerdir. Bu parametrelerin bulunması için izlenecek yöntem şu şekildedir: Eşitlik 4'deki I_{pv} ve V_{pv} değerleri maksimum güç noktasındaki değerler olan I_{mp} , V_{mp} değerleri ile değiştirilirse Eşitlik 10 elde edilir [10].

$$P_{max,m} = P_{max,e} = V_{mp} \left\{ I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V_{mp}+R_s I_{mp})}{aKT}} - 1 \right) - \frac{V_{mp}+R_s I_{mp}}{R_{sh}} \right\} \quad (10)$$

Eşitlik 10'da I_{mp} FV panelin maksimum güç noktasındaki akımını, V_{mp} maksimum güç noktasındaki gerilimini, $P_{max,m}$ hesaplanan maksimum güç değerini, $P_{max,e}$ ise deney ile tespit edilen maksimum güç değerini belirtmektedir.

Bu çalışmada, $P_{max,m} = P_{max,e} = V_{mp} \cdot I_{mp}$ durumunu sağlayacak tek bir R_{sh} ve R_s takımı olduğu yaklaşımı üzerinden R_{sh} ve R_s değerleri hesaplanmıştır. Eşitlik 10'dan türetilen R_{sh} ifadesi Eşitlik 11 verilmiştir [10].

$$R_{sh} = \frac{V_{mp}(V_{mp}+I_{mp}R_s)}{\left\{ V_{mp}I_{ph} - V_{mp}I_0 e^{\frac{q(V_{mp}+R_s I_{mp})}{aKT}} + V_{mp}I_0 - P_{max,e} \right\}} \quad (11)$$

Eşitlik 11'e dışarıdan girilecek R_s değeri için R_{sh} hesaplanabilmektedir.

3. MATERYAL VE METOD

Bu çalışma kapsamında geliştirilen donanım ve yazılımın detayları ilerleyen bölümde sunulmuştur.

3.1. FV Panel Parametre Kestirim Donanımı

Parametre tespiti amacıyla imal edilen deney düzeneğinin görseli Şekil 3'de sunulmuştur. Deney düzeneğini şu bileşenlerden oluşmaktadır:

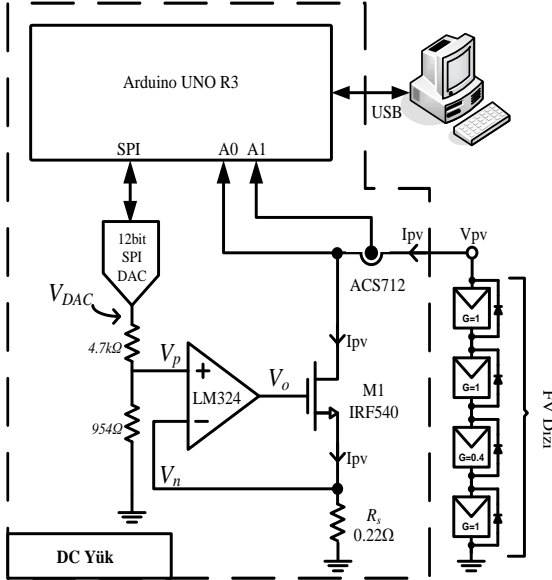
- Parametreleri bilinmeyen FV panel,
- Sabit akım DC yük,
- Spot lamba ve
- solar watt metre.

FV panel, spot ile $1000W/m^2$ değerinde aydınlatılmakta ve bu sırada panelin I/V eğrisi DC yük ile bilgisayara aktarılmaktadır. Daha sonra bu eğri geliştirilen yazılımla işlenmekte ve parametre kestirimi yapılmaktadır.



Şekil 3. Deney düzeneği

Sabit akım DC yükler, akülerin ve güç kaynaklarının testlerinde kullanılan deney ekipmanlarıdır. Bu çalışmada, DC yükün görevi, FV panelin I/V eğrisini örnekleyip PC'ye aktarmaktır. Tasarlanan deney düzeneğinin blok şeması Şekil 4'de sunulmuştur.



Şekil 4. Deney düzeneği blok şeması

Şekil 4’de verilen DC yük, MOSFET, OPAMP, R_s direnci, Sayısal-Analog dönüştürücü (DAC) ve ATmega328p içeren Arduino modülünden oluşmaktadır. Tasarlanan DC yükün görevi panel akımının $0-I_{sc}$ arasında değiştirirken I_{pv} ve V_{pv} değerlerini örneklemektir.

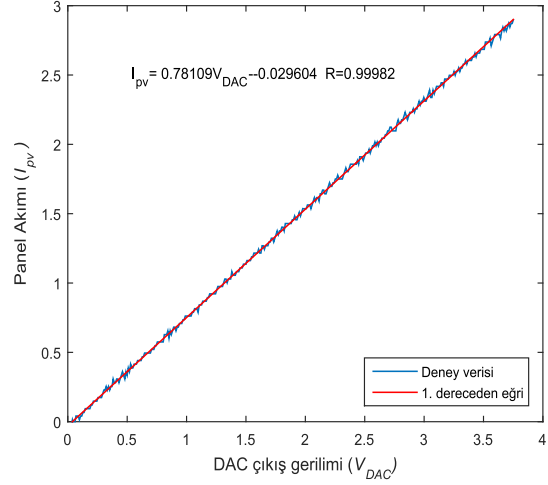
OPAMP negatif geri besleme modunda çalıştığından $V_n=V_p$ olacaktır. DAC gerilimi (V_{DAC}) ile V_n gerilimleri arasındaki ilişki Eşitlik 13’de, V_n ile I_{pv} arasındaki ilişki ise Eşitlik 14’de sunulmuştur. V_{DAC} ile I_{pv} arasındaki doğrusal ilişki Eşitlik 15’de sunulmuştur.

$$V_n=V_p=\frac{V_{DAC}}{5,65k\Omega} \times 954\Omega=V_{DAC} \times 0,168 \quad (13)$$

$$I_{pv}=\frac{V_n}{R_s}=\frac{V_n}{0,22\Omega}=V_n \times 4,54 \quad (14)$$

$$I_{pv}=V_{DAC} \times 0,168 \times 4,54=V_{DAC} \times 0,766 \quad (15)$$

Eşitlik 15 incelendiğinde DAC gerilimi ile panel akımı arasında doğrusal ilişki olduğu görülmektedir. Bu doğrusallık deneysel yöntemle sınanmış ve I_{pv}/V_{dac} eğrisi Şekil 5’de sunulmuştur.



Şekil 5. DC yük transfer karakteristiği

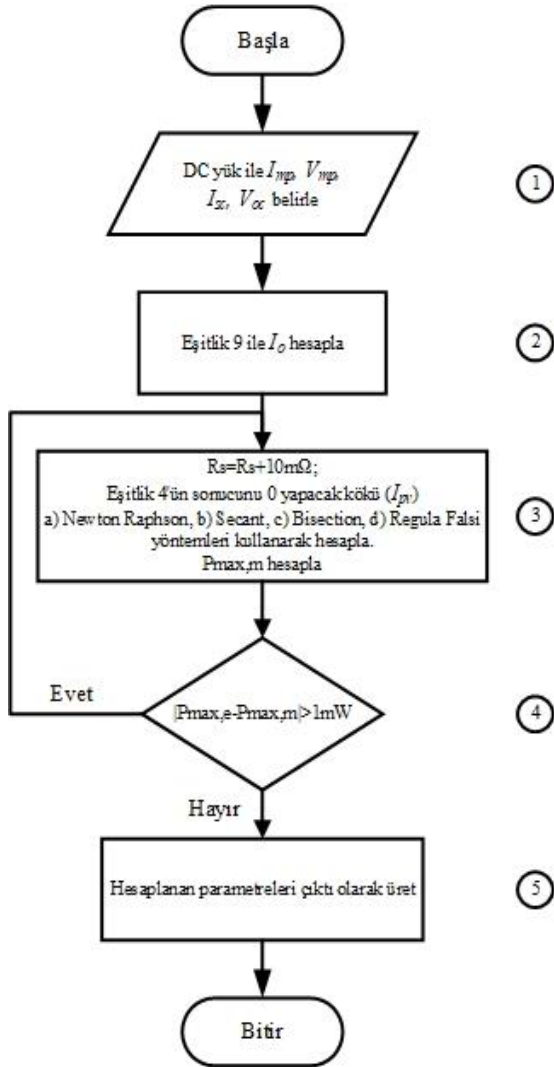
Şekil 5’den görüldüğü üzere tasarlanan DC yük Eşitlik 13-15’de verilen ifadelerle uygun şekilde çalışmaktadır.

3.2. FV Panel Parametre Kestirim Yazılımı

Bu çalışmada, Bölüm 2’de verilen eşitlikleri farklı yöntemlerle çözüp parametre tespiti yapan bir yazılım tasarlanmıştır. MATLAB ortamında geliştirilen bu yazılımın akış şeması Şekil 6’da verilmiştir.

Akış şemasının 1.bloğunda, FV panelin I/V eğrisi DC yük yardımıyla PC’ye aktarılır. Bu eğriden I_{mp} , V_{mp} , I_{sc} ve V_{oc} büyüklükleri belirlenir. Akış şemasının 2. bloğunda, Eşitlik 9 kullanılarak I_0 değeri tespit edilir.

Akış şemasının 3. bloğunda, tasarlanan yazılım R_s değerini dögüsel olarak arttırarak Eşitlik 4’ü sıfır yapacak I_{pv} değerini, farklı yöntemlerle hesaplanır. Akış şemasının 4.bloğunda dögü durdurma şartı bulunmaktadır. 3.blokta hesaplanan panel akım ile gerilimi çarpılarak güç değeri hesaplanır. Bu değer ile deneyden elde edilen güç değeri arasındaki fark belli bir değerden küçük olana kadar dögüye devam edilir. Dögü sonunda bulunan parametreler 5. Blokta belirtildiği gibi ekrana yansıtılır.



Şekil 6. FV panel parametre kestirim yazılımı akış diyagramı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

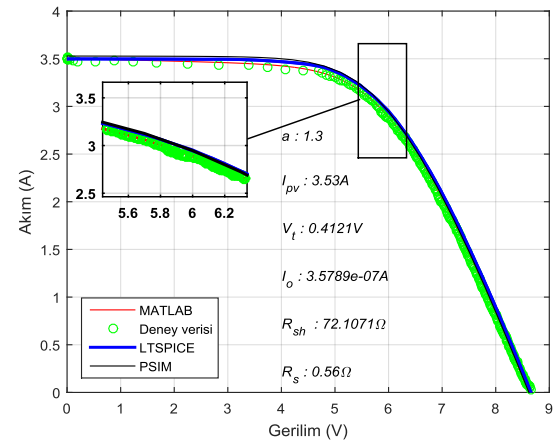
Bu çalışmada, FV panelin I/V eğrisi 1000W/m² ışımada kaydedilmiştir. Daha sonra bu eğrideki V_{oc} , I_{sc} , I_{mp} , V_{mp} gibi önemli büyüklükler yardımıyla I_{ph} , I_o , R_s , R_{sh} parametreleri hesaplanmıştır [10]. FV panelin modellenmesinde 2. bölümde verilen eşitlikler kullanılmıştır. Bu eşitlikler ve geliştirilen yazılımla a ideallik faktörü dışında kalan 4 parametre yüksek başarı ile hesaplanmıştır.

Geliştirilen yazılım ile Newton Raphson, Secant, Bisection ve Regula Falsi yöntemleri kullanılarak FV panel parametreleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda hesaplanan parametreler Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Elde edilen FV panel parametreleri

Parametre	Değer
R_s	0,56Ω
R_{sh}	72,10Ω
I_o	$3,57 \times 10^{-7}$
I_{ph}	3,53A
a	1,30

Elde edilen parametrelerin başarı incelenmesi için bu parametreler ile MATLAB, LTSPICE ve PSIM ortamlarında FV panel modelleri oluşturulmuştur. Bu benzetim sonuçlarından elde edilen I/V eğrileri Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Parametre kestirim başarı incelemesi

Şekil 7 incelendiğinde deney verileri ile bilgisayar benzetim grafiklerinin yakın değerler gösterdiği görülmektedir.

Bu çalışmada kullanılan kök bulma yöntemleri, aynı parametrelerini tespit edecek döngü sayısı kadar çalıştırılmıştır. Bu hesaplamalar i5 işlemcili bilgisayar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bulunan parametre değerleri Çizelge 1’de kök bulma yöntemlerinin işlem süreleri ise Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Parametre hesaplama süreleri

Kriter	Newton Raphson	Secant	Bi-section	Regula Falsi
Süre (sn)	9,02	3,35	4,17	3,49

Çizelge 2'den görüldüğü üzere Secant yöntemi incelenen diğer yöntemlerden daha kısa sürede parametreleri tespit etmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, parametreleri bilinmeyen bir FV panelin I_{ph} , I_0 , R_s , R_{sh} parametrelerinin kestirimi geliştirilen donanım ve yazılım ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, geliştirilen yazılım ile Newton Raphson, Secant, Bisection ve Regula Falsi yöntemlerinin başarısı da incelenmiştir. Bu yöntemlerden Secant yöntemi basit yapısı ve parametreleri tespit süresinin kısalığı açısından öne çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında bilgisayar ortamında yapılan tüm hesaplamaların ilerleyen çalışmalarda DC yük üzerindeki mikro denetleyici ile yapılması planlanmaktadır. Bu mikro denetleyicinin işlem kabiliyetinin bilgisayara göre zayıf olmasından dolayı Secant yönteminin kullanılması hesaplama süresi açısından büyük avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.

7. TEŞEKKÜR

Yazarlar, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi B.A.P birimine, 18103025 numaralı ve "Fotovoltaik (FV) paneller için parametre kestirimi sistemi" isimli projeye vermiş oldukları destekten dolayı teşekkür eder.

8. KAYNAKLAR

1. Öztürk, M., Yüksel, Y.E., 2016. Energy Structure of Turkey for Sustainable Development, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 1259-1272.
2. Tutkun, N., Elibol, E.D., Maden, D., 2014. Basic Parameter Extraction from an Organic Solar Cell Through the Single Diode Model and a Metaheuristic Technique with the

- Lambert W Function, International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC).
3. Jain, A., Kapoor, A., 2004. Exact Analytical Solutions of the Parameters of Real Solar Cells using Lambert W-function, Solar Energy Materials and Solar Cells, 81(2), 269-277.
4. Cubas, J., Pindado, P., De Manuel, C., 2014. Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-function, Energies, 7(7), 4098-4115.
5. Batzelis, E.I., Routsolias, I.A., Papanthanasios, S.A., 2013. An Explicit PV String Model Based on the Lambert W Function and Simplified MPP Expressions for Operation Under Partial Shading, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 5(1), 301-312.
6. Bastidas-Rodriguez, J.D., Petrone, G., Romas-Paja, C.A., Spagnuolo, G., 2017. A Genetic Algorithm for Identifying the Single Diode Model Parameters of a Photovoltaic Panel. Mathematics and Computers in Simulation, 131, 38-54.
7. Ünlü M., Çamur, S., Arifoğlu, B., 2013. Fotovoltaik Hücrenin Tek Diyot Eşdeğer Devre Parametrelerinin Çıkarılması ve Matlab/Simulink Modeli, 5. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 232-236.
8. Adamo, F., Attivissimo, F., Di Nisio, A., Lanzolla, A.M.L., Spadavecchia, M., 2009. Parameters Estimation for a Model of Photovoltaic Panels, XIX IMEKO World Congress Fundamental Applied Metrology, 6-11.
9. Mahmoud, Y.A., Xiao, W., Zeineldin, H.H., 2012. A Parameterization Approach for Enhancing PV Model Accuracy, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 60(12), 5708-5716.
10. Villalva, M.G., Gazoli, J.R., Filho, E.R., 2009. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays, IEEE Transactions on Power Electronics, 24(5), 1198-1208.
11. Subudhi, B., Pradhan, R., 2011. Characteristics Evaluation and Parameter Extraction of a Solar Array Based on Experimental Analysis, IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 340-344.

12. Kesilmiş, Z., Karabacak, M.A., 2016. Investigation of Performance of Stochastic Beam Search, Variable Neighborhood and Simulated Annealing Algorithms Under Partial Shaded Conditions, National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO), 58-62.

Yıllık Pelinotunun (*Artemisia annua* L.) Kimyasal Kompozisyonu ve Antioksidan Kapasitesinin Belirlenmesinde Sub ve Süperkritik Akışkanların Etkisi

Murat TÜRK*¹, E. Sultan GİRAY²

¹Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Meslek Yüksekokulu, Ceyhan, Adana
²Çukurova Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 18.09.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Bu çalışmada, tıbbi aromatik bitkilerden yıllık pelinotunun (*Artemisia annua* L.) kimyasal kompozisyonu ve antioksidan aktivitesi üzerine sub ve süperkritik akışkan ekstraksiyon metodlarının etkileri incelenmiştir. Uygulanan sub/süperkritik akışkan ekstraksiyonları, subkritik su, subkritik etanol ve süperkritik CO₂ kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemlerin etkinliği su buharı destilasyonu, geri soğutucu altında kaynatma ve ultrasonik banyoda organik çözücü ile ekstraksiyon yöntemleri kullanılarak kıyaslanmıştır. Ekstraktların antioksidan aktivitelerini belirlemek için serbest radikal temizleme yöntemi (DPPH), toplam antioksidan kapasite (CUPRAC) ve toplam fenol içeriği (FOLIN) yöntemleri uygulanmıştır. Sonuçlar ekstraktlardaki bileşen ve konsantrasyonların ekstraksiyon metoduna göre değişiklik gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu farklılıktan yararlanarak ekstraktın kullanım amacına uygun ekstraksiyon metodu seçilebilir. Ekonomik olarak önemli olan oksijenli bileşenler en fazla sub-kritik su ekstraksiyonu ile elde edilmiştir. Antioksidan aktivite belirleme çalışmalarında en etkin yöntemin sub-kritik etil alkol ekstraksiyonu olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların farmakoloji, gıda ve nutrasötik sektörlerine önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sub ve Süper kritik akışkanlar, *Artemisia annua* L., Antioksidan aktivite

The Effect of Sub and Supercritical Fluids in Determination Chemical Composition and Antioxidant Capacity of *Artemisia annua* L.

Abstract

In this study, the effects of sub and supercritical fluid extraction methods on the chemical composition and antioxidant activity of annual wormwood (*Artemisia annua* L.) which is important medicinal aromatic plants were investigated. The applied sub/supercritical fluid extractions were subcritical water, subcritical ethanol and supercritical CO₂. The efficiency of these methods has been compared by using steam distillation, refluxing and organic solvent extraction in an ultrasonic bath. Free radical scavenging method (DPPH), total antioxidant capacity (CUPRAC) and total phenol content (FOLIN) methods were conducted to determine the antioxidant activities of the extracts. The results revealed that the components and concentrations in the extracts varied according to the extraction method. Taking advantage of this difference, the extraction method suitable for the purpose of use of the extract can be selected.

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Murat TÜRK, murturk@cu.edu.tr

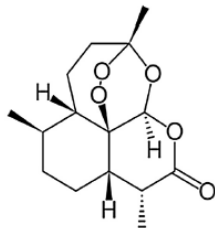
Economically important oxygenated components were mostly obtained by subcritical water extraction. It was determined that the most effective method in antioxidant activity determination studies was subcritical ethyl alcohol extraction. It is thought that the results obtained will make an important contribution to the pharmacology, food and nutraceuticals industries.

Keywords: Sub and Supercritical Fluids, *Artemisia annua* L, Antioxidant activity

1. GİRİŞ

Tıbbi bitkiler; modern ilaçlar, geleneksel ilaçlar, gıda katkıları, nutrosotikler, sentetik ilaçların kimyasal birimleri ve farmakolojik ara ürünler için en zengin biyolojik kaynaklardır. Aromatik bitkiler ise tat, koku, kozmetikler ve kimyasal terpenlerin kaynağıdır. Tıbbi ve aromatik bitkiler, gelişmiş ülkelerde olduğu gibi gelişmekte olan ülkelerde de basit yöntemlerden en ileri tekniklere kadar çeşitli yöntemlerle ekstrakte edilerek değerli bir biyo kaynağa dönüştürülebilmektedir [1].

Artemisia cinsinin üyeleri, en büyük ve yaygın olarak *Compositae* ailesine ait dağılmış türlerden biridir [2]. Yıllık pelinotu (*Artemisia annua* L.) ateş ve sıtma tedavisi için geleneksel Çin tıbbında kullanılan yıllık tıbbi bir bitkidir. Ayrıca yıllık pelinotu ekstraktları antimikrobiyal, antioksidan ve antiinflamatuvar aktivitelerle ilişkili çeşitli biyomedikal ve farmakolojik uygulamalar sergilemektedir. Yıllık pelinotunun kimyasal bileşimi uçucu ve uçucu olmayan bileşenlerden oluşur. Uçucu olmayan ana bileşenler arasında seskiterpenoidler, flavonoidler ve kumarinler bulunur. Bu seskiterpenoidler arasında, yıllık pelinotunun yapraklarında ve çiçeklerinde bulunan artemisininidir (Şekil 1). Artemisininin yıllık pelinotunun temel biyoaktif bileşimini temsil eder ve bu türün sıtma tedavisi aktivitesinden sorumludur [3].



Şekil 1. Artemisininin kimyasal yapısı

Tıbbi ve aromatik bitkilerin endüstriyel olarak değerlendirilmesi; çeşitli teknikler kullanarak aktif bileşenlerinin ekstrakte edilmesiyle başlar. Bu amaçla kullanılan yaygın yöntemler; maserasyon (ıslatma), demleme, sızdırma, parçalama, Soxhlet ekstraksiyonu, organik çözücülerle ekstraksiyon, mikrodalga yardımıyla ekstraksiyon, süperkritik akışkan ekstraksiyonu, ultrasonik ekstraksiyon ve hidroflorokarbon çözücülerle ekstraksiyondur. Aromatik bitkiler için hidro destilasyon (su, buhar ve su-buhar destilasyonları) ve sulu maserasyon en yaygın olarak uygulanan yöntemlerdir [1]. Çok daha yeni teknikler ise, katı-faz mikro ekstraksiyon, protoplast ekstraksiyon, mikrodestilasyon, termomikro destilasyon ve moleküler destilasyondur.

Tüm dünyada, bitkisel tıbbi ilaçlara, nutrosotiklere ve sağlık için doğal ürünlere gösterilen ilginin artmasıyla, tıbbi bitki ekstraktı üreticileri ve uçucu yağ üreticileri, ekstrakt ve uçucu yağ üretimi için belirli bir kaliteye sahip ve çalışma yapan her bir grubun birbirinden farklı sonuçlar vermeyeceği çok daha makul ekstraksiyon yöntemleri kullanmaya başlamışlardır [1]. Bu yaklaşımlar, hem artan kaliteli ürün isteğini karşılayabilmek hem de özellikle gelişmiş ülkelerde pazar sahibi olmak isteyen tıbbi aromatik bitkilerce zengin, gelişmekte olan ülkelerde kabul görmeye başlamıştır.

Uçucu yağlar, düşük konsantrasyonlarda bulunan kompleks karışımlardır. Bunların analiz edilmeden önce buldukları matriksten uzaklaştırılması gerekir. Bu amaçla hidrodestilasyon, buhar destilasyonu Soxhlet ekstraksiyonu yaygın olarak kullanılır. Ancak uçucu yağları oluşturan moleküller ısı olarak hassas ve sıcaklıkla kimyasal değişikliklere uğrayabilen bileşiklerdir. Bazı uçucu bileşenlerin kaybı, ısı ve hidrolitik etkilerle doymamış ve ester bileşiklerinin parçalanması ve ekstrakta zehirli çözücü kalıntısı, bu yöntemler kullanıldığında sık karşılaşılan dezavantajlardır.

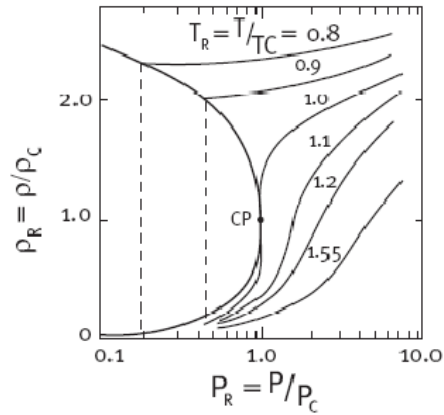
Bu dezavantajlar, uçucu yağ ekstraksiyonunda yeni, daha az enerji daha az çözücü kullanılan, süperkritik akışkan ekstraksiyonu, ultrasonik ekstraksiyon ve mikrodalga ekstraksiyonu gibi “yeşil” tekniklerin gelişmesine neden olmuştur[1].

Süper kritik akışkan ekstraksiyonu, 20.yy'ın ikinci yarısında alternatif bir yöntem olmuştur. Bu alanda en yaygın kullanılan çözücü CO₂'dir. Bunun en önemli sebepleri ise, çalışma sıcaklığının ve ekstraksiyon sürelerinin düşük olması ve dolayısıyla ısı olarak bozulabilecek doğal bileşenlerin zarar görmesinin engellenmiş olmasıdır. Özellikle 1980'lerden itibaren yapılan yoğun araştırmalar ile günümüzde süper kritik akışkanlarla ekstraksiyona ait tüm teknik ve ekonomik sorunlar yanıtlanmıştır. Süper kritik akışkan, aynı zamanda “yoğun gaz” olarak da tanımlanabilir. Sıcaklığı kritik sıcaklığın üzerinde ve basıncı da kritik basıncın üzerinde olan akışkanlardır. Bir akışkanın süper kritik akışkan olarak adlandırılması için indirgenmiş sıcaklığın $T_r = T/T_c$ 1,2-1,3 arasında olması ($T_r = T/T_c$) gerekir. İndirgenmiş basınç P_r ise kullanılan sistemin teknik olarak elverdiği ölçüde olması yeterlidir ($P_r = P/P_c$). Uygun koşullar sağlandığında herhangi bir sıvı süper kritik koşullarına ulaşabilir. Ancak sadece kritik sıcaklığı oda sıcaklığının çok üzerinde olmayan sıvılar, tıbbi aromatik bitkilerin ekstraksiyonunda alternatif bir çözücü olabilirler[4]. Karbon dioksit, düşük kritik sıcaklığı ve basıncı nedeniyle en çok uygulanan çözücü olmuştur ($T_c=31,06$ °C ve $P_c=73,81$ bar), süper kritik karbondioksit aynı zamanda toksik ve alev alıcı olmayışı, ucuz ve kolay temin edilebilir olması nedeniyle de alternatif bir çözücüdür. Ayrıca, süper kritik akışkanın yoğunluğu da önemli bir parametredir. Süper kritik akışkanların ekstraksiyon çözücüsü olabilmesi yoğunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Chrastil, yoğunluk ve çözünürlük arasındaki ilişkiyi formül 1 de verildiği gibi ifade etmiştir [4].

$$s = \rho^a \exp (b/T + c) \quad (1)$$

s çözünürlük; ρ çözücünün yoğunluğu; T mutlak çalışma sıcaklığı; a , b ve c düzeltme sabitleridir. Bir akışkan kritik şartlara yaklaştıkça yoğunluğu bir sıvının yoğunluğuna yaklaşır. Şekil 2'de CO₂

için yoğunluk izotermi indirgenmiş basınca karşı grafiğe geçirilmiştir. Buradan $T = 35$ °C ve $P = 200$ bar da $\rho = 866$ kg/m³ olduğu görülebilir. Çözücü yoğunluğu başarılı bir süper kritik akışkan ekstraksiyonunda anahtar faktördür.



Şekil 2. CO₂ için yoğunluk/basınç diyagramı

Sub- kritik su ise son birkaç yıl içinde çözücü olarak araştırmacılar tarafından kullanılmaya başlanmıştır.

Sub-kritik su ekstraksiyonu, 100-374 °C aralığında ve sıvı fazın oluşmasını sağlayacak bir basınçta suyun ekstraksiyon çözücüsü olarak kullanıldığı bir yöntemdir. Bu koşullardaki su; pek çok organik molekül için iyi bir çözücü özelliğine sahip olması nedeniyle, bitki ekstraksiyonu için klasik ve süperkritik CO₂ ekstraksiyonu yöntemlerine karşı alternatif bir yöntem olarak gelecek vaat etmekte ve son yıllarda araştırmacılar tarafından artan bir ilgiyle kullanılmaktadır [5-6]. Sub-kritik su ekstraksiyonu, 100-374 °C aralığında ve sıvı fazın oluşmasını sağlayacak bir basınçta suyun ekstraksiyon çözücüsü olarak kullanıldığı bir yöntemdir. Bu koşullardaki su; pek çok organik molekül için iyi bir çözücü özelliğine sahip olması nedeniyle, bitki ekstraksiyonu için klasik ve süperkritik CO₂ ekstraksiyonu yöntemlerine karşı alternatif bir yöntem olarak gelecek vaat etmektedir [7-8].

Bunların yanı sıra etanol insanlar için nispeten toksik bir çözücü olmaması, suya göre düşük kritik

sıcaklığa sahip olması, polaritesinin CO₂'de göre yüksek olması ve daha az korozif özellik göstermesi nedeniyle bitki ekstraksiyonunda alternatif olmaya adaydır [9].

Uçucu yağlar, gıda, farmakoloji ve parfüm endüstrisinde, koku ve tatları için kullanılan önemli doğal ürünlerdir. Özellikle enantiomerler ve yararlı kiral yapıtaşların sentezinde, aromatik kimyasalların da kaynağıdır. Son yıllarda uçucu yağların biyolojik ve farmakolojik aktiviteleri ve bileşenleri, artan bir şekilde bir ivme kazanmıştır. Uçucu yağların çoğu, hidrokarbonlar, esterler, terpenler, laktonlar, fenoller, aldehitler, asitler, alkol ve ketonlardan oluşur. Bunların arasında oksijenli bileşenler (alkol, ester, aldehit, keton, lakton, fenol) ana koku kaynağıdır. Bu bileşenler oksitleyici ve reçineleşme etkilerine karşı diğer bileşenlere göre daha kararlıdır. Diğer taraftan, monoterpenler ve seskiterpenler gibi doymamış bileşenler hava ve ışık varlığında oksitlenme ve reçineleşme eğilimindedirler.

İnsan sağlığı açısından büyük risk oluşturan başta kanser olmak üzere kalp ve damar hastalıkları gibi pek çok hastalığın ortaya çıkma riskini azaltan veya olumlu etkiler gösteren antioksidanlar, günümüzde oldukça ilgi çeken ve üzerinde pek çok araştırmalar yapılan bir konudur. Vücutta çeşitli metabolik reaksiyonlar sonucu oluşan ve bir veya daha fazla eşleşmemiş elektronu olması sebebiyle oldukça reaktif olan serbest radikallerin aşırı miktarları (reaktif oksijen türleri üretiminin, tüketiminden fazla olması 'oksidatif stres' olarak adlandırılır) birçok doku, organ ve sistemlerde hasarlara neden olur. Ayrıca, bitki ekstraktlarının gıda maddelerinin korunmasında da kullanılabilirliği bilinmektedir. Gıda maddelerinin işlenmesi, depolanması ve diğer işlemler sırasında lipidlerin oksidasyonu gıda ürünlerinde bozunmalara neden olan işlemlerin başında gelir. Dolayısıyla bunların dayanıklılığını artırmak için sentetik antioksidanlar kullanılmaktadır. Doğal antioksidanlar, sentetik olan bütillenmiş hidroksi toluen (BHT) ve bütillenmiş hidroksi anisol (BHA) bileşiklerinin kanserojenik oldukları şüpheleri nedeniyle doğal antioksidanlar tercih edilir hale gelmişlerdir [1].

Yapılan bir çalışmada, yıllık pelinotunda %1,4-4,0 arasında farklı yapılarda uçucu yağ bulunduğu, uçucu yağında temel bileşenler olarak kamfor, artemisia keton, germakren d ve 1,8-sineol'ün bulunduğu belirtilmektedir [10].

Juteau ve arkadaşları 2002 yılında yaptığı bir çalışmada, *Artemisia annua* nın uçucu kısımlarının kamfor (%44), germakren D (%16), *trans*-pinokarveol (%11), β -selinen (%9), α -karyofilen (%9) ve artemisia keton (%3)'dan oluşan uçucu yağın antimikrobiyal aktifliğini incelemişlerdir. Uçucu yağın, test edilen gram-pozitif bakteri *Enterococcus hirae*'nin ve tüm test mantarının gelişimini belirgin bir şekilde engellediğini tespit etmişlerdir. Bu uçucu yağ referans bileşiği %18'lik α -tocopherole eşdeğer bir antioksidan aktifliği gösterdiğini belirlemişlerdir [11].

Tzenkova ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, Bulgaristan'da yabani olarak yetişen *Artemisia annua*'nın uçucu yağı hidrodestilasyon ile elde etmişler ve GC/MS ile analiz etmişlerdir. Ana bileşenleri α -karyofillene (%24,73), α -kuveben (%13,53), α -kopaen (%7,42), β -selinene (%8,21), artemisia keton (%8,45) ve kamfor (%3,61) olarak belirlemişlerdir. Uçucu yağ bileşenlerinin diğer coğrafi bölgelerde yetişenlerden farklı olduğunu gözlemişlerdir [12].

2017 yılında yapılan bir başka çalışmada, yıllık pelinotu, süper kritik karbon dioksit ile ekstrakte edildikten sonra, kalan atık kısımdan fenolik bileşenler, su veya etanol gibi çözücülerle ikinci bir ekstraksiyon ile elde edildiği bildirilmiştir. Birinci basamakta yüksek verimle artemisin elde edildiğini ve sıtma tedavisinde etki gösterdiğini belirtmişlerdir. Atık kısmın ikinci ekstraksiyonunda artemisin bulunmamasına rağmen yüksek fenol içeriğe sahip olduğunu saptamışlar ve yüksek antioksidan kapasite gösterdiğini rapor etmişlerdir [3].

Bu çalışmada, tıbbi özelliklere sahip olan yıllık pelinotu (*Artemisia annua* L.) bitkisinin kimyasal kompozisyonu ve antioksidan aktivitesi üzerine sub ve süperkritik akışkan ekstraksiyon metodlarının etkileri incelenmiştir. Uygulanan

sub/süperkritik akışkan ekstraksiyonları, subkritik su, subkritik etanol ve süperkritik CO₂ kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemler su buharı destilasyonu, geri soğutucu altında kaynatma ve ultrasonik banyoda organik çözücü ile ekstraksiyon yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Ekstraktlara uygulanan antioksidan aktivite belirleme metodları olarak, serbest radikal temizleme yöntemi (DPPH), toplam antioksidan kapasitesi (CUPRAC) ve toplam fenol içeriği (FOLIN) yöntemleri kullanılmıştır. Belirlenen antioksidan kapasiteye göre en etkin bitki ekstraktı ve bir bitki için en yüksek antioksidan aktivite gösteren ekstraksiyon metodu değerlendirilmiştir. Ekstraksiyon verimi, biyolojik aktivite, bir bileşenin en fazla miktarda olması istenen bir kompozisyon gibi amaca uygun bir ekstraksiyon metodunun seçilebileceği bir çalışma amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

2.1.1. Bitki Kaynağı

Denemelerde kullanılan yıllık pelin otu (*Artemisia annua* L.), Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri araştırma alanında yetiştirilmiştir. Yıllık pelinotunun bitkinin toprak üstü kısımları saf su ile yıkandıktan sonra oda koşullarında karanlıkta 2 hafta boyunca kurutulmuştur. Kurutulmuş örnekler, 5 mm'lik iç çapa sahip huni boynundan geçecek şekilde elle öğütülmüştür. Kurutulmuş ve öğütülmüş bitki örnekleri, analizden önce plastik şişelerde buzdolabında 4 °C de saklanmıştır.

2.1.2. Kimyasallar

Hekzan, diklorometan, etanol, metanol, DPPH, ter-butil metileter, sodyum hidroksit, aseton, neokuprin, sodyum klorür, Amonyum asetat, Bakır(II) klorür, BF₃-metanol (%10-15 w/v), Folin-Ciocalteu reaktifi, troloks ve gallik asit (Merck-Sigma-Aldrich analitik saflıkta), CO_{2(g)} (Linde % 99,9999), C18 kartuş (Agilent marka).

2.2. Metot

2.2.1. Süper Kritik CO₂ Yöntemiyle (skCO₂E) Bitki Ekstraktlarının Hazırlanması

Ekstraksiyonlar Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü Organik Kimya Araştırma Laboratuvarında oluşturulan sistemin kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Çalışmada kullanılan parametreler ve aralıkları ön denemeler yapılarak Çizelge 1'de verilmiştir. Ekstraksiyon hücresi 2,0 g örnekle doldurulduktan sonra istenilen ekstraksiyon sıcaklığında çalışmak için fırın içine yerleştirilmiştir. Bir ISCO pompası yardımıyla istenilen basınçta süper kritik CO₂ hücreye gönderilerek, 30 dk statik ve 20 dk dinamik ekstraksiyon gerçekleştirilmiştir. Ekstrakte edilen bileşenleri toplamak için, yaklaşık 2 mL dk⁻¹ akış hızında bir restriktör (Suprex marka) ile içinde diklorometan bulunan bir tüpe toplanmıştır.



Şekil 3. Süper kritik akışkan ekstraksiyon sistemi, A: ISCO pompa; B: Fırın C: Ekstraksiyon hücresi; D: HPLC pompası

2.2.2. Sub-Kritik Su (sbkH₂O/E) Yöntemiyle Bitki Ekstraktlarının Hazırlanması

Ekstraksiyon hücresi 2,0 gram örnekle doldurulduktan sonra istenilen ekstraksiyon sıcaklığında çalışmak için fırın içine yerleştirilmiştir. Bir HPLC pompası yardımıyla istenilen basınçta gazı giderilmiş deiyonize su, 2 mL/dk akış hızında hücreye gönderilmiştir. 30 dk süreyle statik ekstraksiyon ve ardından 20 dk dinamik ekstraksiyonla örnek toplanmıştır. (Şekil 3). Kullanılan parametreler ve aralıkları ön denemeler yapılarak Çalışma koşulları, Çizelge 1. de verilmiştir. Uçucu yağlar bir kez 5 mL

diklorometan ile sıvı-sıvı ekstraksiyon yapılarak alınmıştır.

2.2.3. Sub-Kritik Su (sbkH₂O) Yöntemiyle Bitki Ekstraktlarının Hazırlanması

Ekstraksiyon hücresi 2,0 gram örnekle doldurulduktan sonra fırın içine yerleştirilmiştir. Çizelge 1’de verilen çalışma koşullarında, bir HPLC pompası yardımıyla, istenilen basınçta gazı giderilmiş etanol 2 mL/dk akış hızında hücreye gönderilmiştir. 30 dk süreyle statik ekstraksiyon ve ardından 20 dk dinamik ekstraksiyonla örnek toplanmıştır (Şekil 3).

Çizelge 1. Yıllık pelinotunun sub ve süperkritik akışkanlarla ekstraksiyon için çalışma koşulları

Çözücü	T (°C)	P (atm)	Akış Hızı (ml/dk)	Zaman (dk)
skCO ₂	40	300	2	20 (statik), 30 (dinamik)
H ₂ O	125	80	2	30 (statik), 20 (dinamik)
EtOH	125	80	2	30 (statik), 20 (dinamik)

2.2.4. Su Buharı Destilasyonu ile Bitki Ekstraksiyonu (SBD)

Pelinotunun üst kısımlarından alınan 50 g kurutulmuş örnek Neo-clevenger aparatında su buharı destilasyonu yöntemi ile 3 saat süreyle ekstrakte edilmiştir. Ekstraksiyon sonunda sulu fazdan uçucu yağların kuru olarak alınması katı faz ekstraksiyon sistemiyle yapılmıştır.

2.2.5. Ultrasonik Banyoda Organik Çözücülerle Bitki Ekstraksiyonu (USE)

2,0 gram pelinotu örneği 30 mL ter-butyl metil eter ile oda sıcaklığında ultrasonik banyoda 2 saat süreyle ekstrakte edilmiştir. Ekstraksiyon sonunda ekstrakt ve artık 10000 rpm de 30 dk santrifüj edildikten sonra ekstrakt Whatman 4 nolu süzgeç kağıdı ile süzülerek alınmıştır.

2.2.6. Organik Çözücülerle Geri Soğutucu Altında Kaynatma ile Bitki Ekstraksiyonu (GSK)

2 gram bitki örneği 30 mL (1:1 v/v) diklorometan:aseton çözücü karışımı ile karışımın

kaynama sıcaklığında 3 saat süreyle geri soğutucu altında kaynatılarak ekstrakte edilmiştir. Ekstraksiyon sonunda ekstrakt ve artık 10000 rpm de 30 dk santrifüj edildikten sonra ekstrakt Whatman 4 nolu süzgeç kağıdı ile süzülerek alınmıştır.

2.2.7. Katı Faz Ekstraksiyonu

Bu çalışmada C18 kartuş kullanılmıştır. Kolon yıkama ve şartlama işlemi metanol-su (1:1) karışımı kullanılmıştır. Örnek toplama işlemi çözücü olarak hekzan kullanılmıştır [13].

2.2.8. Kromatografik Ayırma ve Tanımlama

Tüm deneylerden elde edilen ekstraktların GC-MS analizleri Termo-Finnigan Trace marka kütle spektrometresinde elektron impakt (70 eV) ile yapılmıştır. Kromatografik ayırma TR-MS-5 (60m x 0,25 mm x 0,25 µm, %5 fenil polisiloksan), kolonda gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık programı 50 °C de 1 dakika bekletilir. 3 °C/dk ısıtma hızıyla 160 °C ye çıkarılır, burada 3 dakika bekletildikten sonra 5 °C/dk ısıtma hızıyla 250 °C’ye çıkarılır ve burada 10 dakika bekletilir. Enjeksiyon sıcaklığı 240 °C ve split10 modunda çalışılmıştır. Analizlerde helyum taşıyıcı gaz olarak kullanıldı ve akış hızı 1,0 mL dk⁻¹ olarak belirlendi. GC-MS analizlerinde enjeksiyon işlemi bir otosampler yardımıyla yapılmıştır. Her bir bileşen, kütle spektrumlarının Wiley07 ve NIST(2005) kütüphanesinden yararlanılarak karşılaştırma ve C₉-C₂₀ n- alkanlar kullanılarak Kovat İndislerinde hesaplanmasıyla tanımlanmıştır.

2.2.9. Kovat İndislerinin Hesaplanması

İsotermal olmayan Kovats İndisi (sıcaklık programı için Van den Dool ve Kratz’ın eşitliği kullanılarak) hesaplanmıştır [14] (Eşitlik 1).

$$I_x = 100n + 100(t_x - t_n) / (t_{n+1} - t_n) \quad (1)$$

Eşitlikte, I_x; “X” kimyasal bileşeni için Kovat indisi, t_n ve t_{n+1}, kimyasal bileşik “X” ten hemen önce ve sonra ayrılan referans n-alkan hidrokarbonlarının alkonma sürelerini

göstermektedir. Formülde tx ise “X” bileşiğinin alıkonma süresidir.

2.2.10. DPPH Yöntemi

DPPH yöntemi, antioksidanların kararlı bir organik azot radikali olan DPPH (1,1- difenil-2pikrilhidrazil) radikalini giderici etkilerini ölçmeye dayalı bir yöntemdir. Bu radikal hidrojen donörlerle etkileştiğinde hidrazine indirgenir. Kırmızı renkli DPPH radikali 515 nm’de maksimum absorpsiyon verir. DPPH çözeltisine antioksidanın ilave edilmesiyle absorbansta düşüş meydana gelir ve antioksidanların varlığıyla radikalın rengi kırmızıdan sarıya döner. Bu yöntem antioksidanların radikal giderici kabiliyetlerini değerlendiren kolay ve geçerli bir yöntem olarak bilinmektedir [15].

Miliauskas ve arkadaşları tarafından bildirilen DPPH metodunda laboratuvarımızda çok az değişiklik yapılarak kullanılmıştır. Değişik konsantrasyonlarda (2,5 mg ekstrakt/ml metil alkol; 1:5; 1:10 oranında seyreltilmiş) 100 mikrolitre ekstrakta, 3,9 ml metanolde çözülmüş 0,06 mM DPPH çözeltisi eklendi. Örnekler çalkalandıktan sonra oda koşullarında karanlıkta 20 dakika bekletildi ve 517 nm’de absorban ölçülmüştür. % DPPH radikal temizleme aktivitesi aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır (Eşitlik 2).

$$\% \text{ İnhibisyon} = \left[\frac{\text{Kontrol Absorbans} - \text{Örnek Absorbans}}{\text{Kontrol Absorbans}} \right] \times 100 \quad (2)$$

%50 radikal temizleme aktivitesine karşılık gelen derişim (%50 inhibisyon) I_{50} olarak ifade edilmiştir [16].

2.2.11. CUPRAC(Cupric Reducing Antioxidant Capacity; Cu(II) İyonu İndirgen Antioksidan Kapasitesi) Yöntemi ile Toplam Antioksidan Aktivite Ölçülmesi

Çözeltilerin Hazırlanması: 10^{-2} M Bakır(II)klorür çözeltisi, 0,4262 g $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 250 ml suda çözülerek hazırlanmıştır. pH 7,0 Amonyum asetat tampon çözeltisi, 19,27 g NH_4Ac 250 ml suda çözülerek hazırlanmıştır. $7,5 \times 10^{-3}$ M Neokuprin

çözeltisi, 0,039 g Neokuprin 25 ml %96’lık etil alkolde çözülerek hazırlanmıştır.

CUPRAC Yöntemi: Test tüpüne Bakır(II) Klorür çözeltisi, Neokuprin çözeltisi ve NH_4AC tampon çözeltisinden 1’er ml eklendi. Antioksidan örnek çözeltisinden (2,5 mg/ml) (veya standart çözeltiden) 0,1ml eklendikten sonra 1ml H_2O eklenerek toplam hacim 4,1 ml’ye tamamlandı. 1 saat sonra 450 nm’de köre karşı absorban ölçümleri kaydedilmiştir. Standart (trolloks) kalibrasyon eğrisi konsantrasyona karşı absorban olarak çizilmiştir ve sonuçlar eşdeğer trolloks olarak ifade edilmiştir [17].

2.2.12. Folin Ciocalteu Yöntemi ile Toplam Fenol İçerik Tayini (FOLIN)

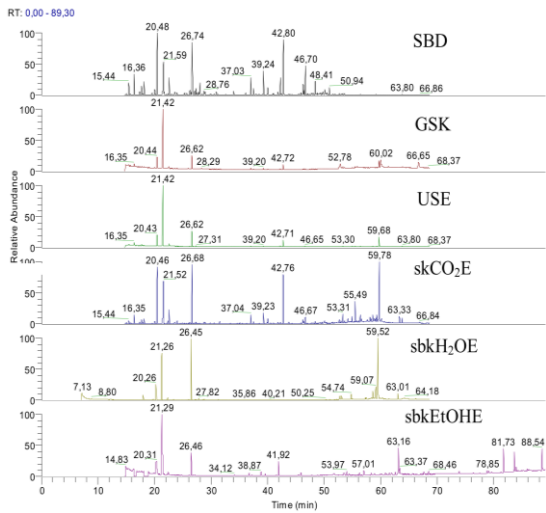
1 ml 1:10 seyreltilmiş Folin-Ciocalteu reaktifi üzerine 100 mikrolitre (2,5 mg/ml) ekstrakt eklendi. 4 dakika sonra 800 mikrolitre sodyum karbonat çözeltisi (75 g/L) eklendi. 2 saat oda koşullarında bekletildikten sonra 765 nm’de absorbanları ölçülmüştür. Standart kalibrasyon eğrisi gallik asit (0-500 mg/L) kullanılarak çizilmiştir. Sonuçlar eşdeğer gallik asit olarak ifade edilmiştir [18-19].

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada tıbbi aromatik bitkilerden biri olan yıllık pelinotunun (*Artemisia annua* L.) kimyasal kompozisyonu ve antioksidan aktivitesi üzerine ekstraksiyon metodlarının etkisi incelenmiştir.

Sub ve süperkritik akışkan ekstraksiyonunda kullanılan koşullar, temel bileşenlerin yüksek göreceli bolluğuna göre belirlenmiş olup, Çizelge 3’de özetlenmiştir. SBD ve sbkH_2OE yöntemleri ile hazırlanan uçucu yağlar ile GSK, USE, skCO_2E ve sbkEtOHE yöntemleri ile hazırlanan ekstraktların ekstraksiyon verimleri Çizelge 2’de verilmiştir. Yukarıda anılan yöntemlerle elde edilen ekstraktların organik bileşenleri Çizelge 3’de verilmiştir. Çizelgelerde de göreceli miktarı %0,1’den az olan bileşenlere yer verilmemiştir. Ekstraktlara ait GC-MS kromatogramları ise Şekil 4’de verilmiştir.

Yıllık Pelinotunun (*Artemisia annua* L.) Kimyasal Kompozisyonu ve Antioksidan Kapasitesinin Belirlenmesinde Sub ve Süperkritik Akışkanların Etkisi



Şekil 4. Yıllık pelinotunun SBD, GSK, USE, skCO₂E, sbkH₂OE ve sbkEtOHE ekstraksiyon yöntemleriyle, elde edilen uçucu yağların kromato gramları

Ekstraksiyon metoduna göre ekstraksiyon verimleri değerlendirildiğinde; sbkEtOH yöntemiyle hazırlanan ekstraktın en yüksek ekstrakt verimine (%18,1) sahip olduğu gözlenmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Yıllık Pelinotunun ekstraksiyon metoduna göre hazırlanan ekstraktlarının ekstraksiyon verimleri

Yöntem	Yıllık pelinotu % Verim (w/w)
sbkH ₂ OE	1,2
skCO ₂ E	6,5
sbkEtOH	18,1
SBD	2,5
GSK	7,1
USE	6,9

3.1. Yıllık Pelinotu ile Yapılan Ekstraksiyonlar

Yıllık Pelinotundan GSK, USE, skCO₂E, ve sbkEtOHE yöntemleri ile elde edilen ekstraktlar ve SBD, sbkH₂OE ile hazırlanan uçucu yağın GC-MS analiz sonuçları Çizelge 3'de ve GC-MS kromatogramları ise Şekil 4'de verilmiştir. sbkH₂OE ile ekstraksiyon sırasında en etkin çalışma koşullarının 125 °C sıcaklık, 80 atm basınç

ve dakikada 2 ml akış hızı olduğu belirlenmiştir (Çizelge 1). Yıllık pelinotudan sbkH₂OE ile elde edilen uçucu yağın verimi %1,2 w/w'dir ve GC-MS analizinde ise 133 sinyal tespit edilmiştir (Çizelge 2 ve 3).

sbkH₂OE ile hazırlanan uçucu yağda temel bileşenler sırasıyla bisiklik seskiterpen olan arteannuin b (artemisin) (%25,5), bisiklik monoterpen olan kamfor (%20,1), düzensiz bir monoterpen olan artemisya keton (%17,2), bir bisiklik monoterpen eter olan 1,8- sineol (%5,5) ve bir seskiterpen lakton olan qinghaosu (%2,1)'dur. sbkH₂OE yöntemiyle hazırlanan uçucu yağın %0,2'sini monoterpen bileşikleri, %45,3'ünü oksijenli monoterpen bileşikleri ve %36,5'ini oksijenli seskiterpen bileşiklerinin oluşturduğu belirlenmiştir.

Yıllık pelinotunun skCO₂E ile ekstraksiyonunda en uygun çalışma koşullarının 40 °C sıcaklık ve 300 atm basınç olduğu belirlenmiştir Çizelge 1. Bu koşullarda elde edilen ekstraktın verimi %6,5'dir ve GC-MS analizinde ise 262 sinyal tespit edilmiştir (Çizelge 2 ve 3). skCO₂E ile hazırlanan uçucu yağda temel bileşenler sırasıyla artemisya keton (%11,7), arteannuin b (artemisin) (%11,6), kamfor (%11,0), 1,8- sineol (%8,5), bisiklik seskiterpen olan β-selinen (%7,6), çok yönlü seskiterpen olan karyofillen (%1,6) ve bisiklik monoterpen olan kamfen (%1,6)'dir. skCO₂E yöntemiyle hazırlanan uçucu yağın %4,7'sini monoterpen bileşikleri, %37,7'sini oksijenli monoterpen bileşikleri %13,2'sini seskiterpen bileşikleri ve %17,4'sini oksijenli seskiterpen bileşiklerinin oluşturduğu belirlenmiştir.

sbkEtOHE ile yıllık pelinotundan elde edilen ekstraktın verimi %18,1 w/w'dir ve bu verim 125 °C sıcaklık ve 80 atm basınç uygulandığında gözlenmiştir (Çizelge 1). GC-MS analiz sonuçlarına göre 79 sinyal tespit edilmiştir (Çizelge 2 ve 3). sbkEtOHE ile hazırlanan ekstraktta temel bileşenler sırasıyla artemisya keton (%28,5), arteannuin b (artemisin) (%8,2), 1,8-sineol (%7,6), kamfor (%7,5), 31 karbonlu düz zincirli alkan olan hentriakontan (%7,9), 30 karbonlu dallanmış alkan olan squalen (%6,4), 30 karbonlu düz zincirli alkan olan triakontan (%6,1)

ve β -selinen (%3,3)'dir. sbkEtOHE yöntemiyle hazırlanan uçucu yağın %0,4'ünü monoterpen bileşikleri, %45,3'ünü oksijenli monoterpen bileşikleri %6,0'ını seskiterpen bileşikleri, %13,8'ini oksijenli seskiterpen bileşikleri ve %20,4'ünü uzun zincirli hidrokarbon bileşiklerinin oluşturduğu belirlenmiştir.

SBD ile yıllık pelinotundan elde edilen uçucu yağın verimi %2,5 w/w'dir ve GC-MS kromatogramında 234 sinyal tespit edilmiştir (Çizelge 1,2 ve 3). SBD ile hazırlanan uçucu yağda temel bileşenler sırasıyla kamfor (%13,2), artemisya keton (% 11,4), 1,8-sineol (%10,2), β -selinen (%9,4), karyofillen (%3,3) ve karyofillen oksit (3,8) olarak saptanmıştır. SBD yöntemiyle hazırlanan uçucu yağın %8,6'sını monoterpen bileşikleri, %47,3'ünü oksijenli monoterpen bileşikleri, %21,1'ini seskiterpen bileşikleri ve %12,7'sini oksijenli seskiterpen bileşiklerinin oluşturduğu belirlenmiştir.

GSK ile yıllık pelinotundan elde edilen ekstraktın verimi %7,1 w/w'dir ve GC-MS kromatogramında 62 sinyal belirlenmiştir (Çizelge 1, 2 ve 3). GSK

yöntemiyle hazırlanan uçucu yağda temel bileşenler sırasıyla artemisya keton (%43,7), kamfor (%9,9), 1,8-sineol (%7,1), arteannuin b (artemisin) (%5,6), β -selinen (%4,3), kamfen (%1,9) ve karyofillen (%1,3) olarak bulunmuştur. GSK yöntemiyle hazırlanan uçucu yağın %5,1'ini monoterpen bileşikleri, %63,6'sını oksijenli monoterpen bileşikleri, %7,6'sını seskiterpen bileşikleri ve %9,3'ünü oksijenli seskiterpen bileşiklerinin oluşturduğu belirlenmiştir.

USE ile yıllık pelinotundan elde edilen ekstraktın verimi %6,9 w/w'dir ve GC-MS analizinde ise 75 sinyal tespit edilmiştir (Çizelge 2 ve 3). USE ile hazırlanan uçucu yağda temel bileşenler sırasıyla artemisya keton (%42,6), kamfor (%12,2), 1,8-sineol (%9,0), arteannuin b (artemisin) (%6,8), β -selinen (%5,2) kamfen (%2,5) ve karyofillen (%1,2)'dir. USE yöntemiyle hazırlanan uçucu yağın %7,2'sini monoterpen bileşikleri, %67,6'sını oksijenli monoterpen bileşikleri %8,3'ünü seskiterpen bileşikleri ve %10,9'unu oksijenli seskiterpen bileşiklerinin oluşturduğu belirlenmiştir.

Çizelge 3. Yıllık pelinotunun (*Artemisia annua* L.) ekstraksiyon metoduna göre kimyasal kompozisyonu

KI	Bileşen	Göreceli Dağılım (%)					
		sbkH ₂ O/E	skCO ₂ E	sbkEtOHE	SBD	GSK	USE
934	α -thujen	...	0,5	...	0,3	...	...
941	α -pinen	---	0,6	---	1,8	1,0	1,3
957	kamfen	---	1,6	---	2,9	2,0	2,5
973	Sabinen	---	0,3	---	0,5	0,7	0,8
980	β -pinen	---	0,7	---	1,3	0,7	1,1
983	β -mirsen	---	0,2	---	0,3	0,2	0,3
986	yomogi alkol	1,6	0,7	---	2,0	0,6	0,8
1016	α -humulen	...	0,1	---	0,3	---	0,2
1029	p-simen	0,2	0,6	0,4	1,1	0,3	0,5
1034	dl-limonen	---	---	---	0,1	---	0,1
1042	1,8-sineol	5,5	8,5	7,6	10,2	7,1	9,0
1072	artemisia keton	17,2	11,7	28,5	11,4	43,7	42,6
1073	γ -terpinen	---	0,2	---	---	0,2	0,4
1093	trans-sabinene hidrat	---	0,4	0,2	0,2	0,4	0,3
1098	3,3,6-trimetil-1,5-heptadien-4-ol	0,9	2,0	1,1	2,3	1,6	1,8
1119	E-farnesen epoksit	0,2	0,2	---	0,4	---	0,2
1128	5-isopropyl-2-metilbisiklo[3.1.0]hexan-	...	0,6	0,2	0,3	0,3	0,4
1146	2-metil-3-penten-1-ol	0,1	0,2	...	...	...	...

Yıllık Pelinotunun (*Artemisia annua* L.) Kimyasal Kompozisyonu ve Antioksidan Kapasitesinin Belirlenmesinde Sub ve Süperkritik Akışkanların Etkisi

Çizelge 3 (devam)

1155	α -kamfolenal	---	0,1	---	0,4	---	---
1162	2-metil-6-metilen-1,7-oktadien-3-on	...	0,1	...	0,3	...	...
1173	pinokarveol	0,3	0,4	---	0,9	---	0,2
1178	2,6-dimetil-1,5,7-oktatrien-3-ol	...	0,1	...	0,3	...	...
1183	kamphor	20,1	11,0	7,5	13,2	9,9	12,2
1189	cis-verbenol	---	0,2	---	0,5	---	---
1195	2(10)-pinen-3-on	0,2	0,3	---	0,7	0,2	0,3
1200	p-menth-1-en-8-ol	0,1	0,2	---	0,3	---	---
1205	borneol	---	0,13	---	0,6	---	---
1211	p-menth-1-en-4-ol	0,5	0,2	---	1,5	---	0,1
1227	linalil propionat	0,2	0,5	---	1,0	---	0,2
1232	mirtenal	0,2	0,2	---	0,3	---	0,2
1268	cis-karveol	...	0,2	...	0,2	...	...
1355	C ₁₀ H ₂₀ O	...	0,1	0,2	...	...	...
1386	eugenol	0,1	---	---	0,3	---	---
1405	α-kopaen	---	1,2	0,5	2,1	0,9	0,9
1413	benzil 2-metilbutanoat	---	0,4	0,2	1,1	0,3	0,4
1432	β -kopaen-4 α -ol	0,1	...	...	0,2	...	...
1447	karyofillen	---	1,6	---	3,3	1,3	1,2
1463	β -farnesen	---	0,8	0,5	1,3	0,4	0,5
1482	α -karyofillene	---	0,1	---	0,2	---	---
1496	α -himakalen	---	0,3	0,3	0,6	---	---
1508	germakren-d	---	0,4	0,7	2,4	0,7	0,6
1523	β-selinen	---	7,6	3,3	9,4	4,3	5,2
1548	δ -kadinen	---	0,4	---	0,2	---	---
1555	C ₁₅ H ₂₄ O	...	0,1	...	0,1	...	...
1564	C ₁₄ H ₂₂ O	...	0,1	0,1	0,1	...	...
1604	C ₁₅ H ₂₄	...	0,1	...	0,3	...	...
1611	tanımlanamadı	...	0,7	...	2,0	0,2	0,2
1612	C ₁₅ H ₂₄ O	...	0,6	0,2	...	...	0,2
1618	karyofillen oksit	---	0,9	---	3,8	0,7	0,6
1634	α -bisabolen epoxide	---	0,2	---	0,6	---	---
1645	kubenol	---	0,6	0,8	1,9	---	0,2
1672	C ₁₅ H ₂₄ O	0,1	0,5	0,9	1,0	0,1	0,2
1678	isoaromadendren	0,1	0,2	1,0	0,4	---	---
1721	C ₁₅ H ₂₄ O	1,2	1,2	---	0,2	0,8	0,8
1724	C ₁₄ H ₂₂ O	0,3	0,4	1,1	0,2	0,2	0,1
1751	arteannuik asit	0,2	0,2	---	---	---	---
1754	C ₁₅ H ₂₆ O ₂	0,1	0,1	0,5	---	---	---
1756	tanımlanamadı	1,6	0,7	0,1	---	0,3	0,3
1772	C ₁₅ H ₂₄ O	0,3	0,2	---	---	---	---
1778	tanımlanamadı	0,2	2,6	0,2	---	0,8	0,7
1797	sedran-8-13-diol	0,2	0,9	0,2	---	0,3	0,3
1800	C ₁₅ H ₂₄ O	...	0,4	---	---	0,3	0,3
1827	tanımlanamadı	0,7	0,3	0,2	---	---	---
1838	C ₁₅ H ₂₀ O ₂	0,3	0,5	0,5	---	0,2	0,2
1850	iso-velleral	0,6	1,0	0,6	---	0,3	0,3
1857	tanımlanamadı	3,2	0,7	---	---	---	---

Çizelge 3 (devam)

1863	heneikosan	0,2	0,3	0,8	---	0,3	0,2
1867	deoksinghaosu	3,4	0,8	---	---	0,3	0,3
1877	arteannuin b (artemisin)	25,5	11,6	8,2	---	5,6	6,8
1885	tetrakosan	0,7	0,1	---	---	4,5	---
1945	Qinghaosu	2,1	---	---	---	---	---
1952	C ₁₄ H ₂₂ O ₂	...	1,1	---	---	0,4	0,4
1961	heptakosan						
2015	nonakosan	---	0,3	---	---	2,6	---
2102	squalen	---	---	6,4	---	---	---
2127	triakontan	---	---	6,1	---	---	---
2131	tanımlanamadı	---	---	1,2	---	---	---
2193	hentriacontan	---	---	7,7	---	---	---
TOPLAM GERİ KAZANIM		88,5	82,5	88	87,3	94,7	96,4

Çizelge 3'den de görüldüğü gibi yıllık pelinotundan elde edilen uçucu yağlarda belirlenen bileşenlerin göreceli dağılımı (%) seçilen ekstraksiyon metoduna göre farklılık göstermektedir.

Genel olarak α -tujen, α -pinen, kamfen, sabinen, β -pinen ve β -mirsen gibi monoterpen bileşiklerine sbkH₂O ve sbkEtOHE ekstraktlarında hiç rastlanmamıştır. Artemisya keton, kamfor, 1,8 sineol, β -selinen ve arteannuin b (artemisin) bileşikleri tüm yöntemlerde hazırlanan uçucu yağlarda belirlenmiştir. Ancak, artemisya keton göreceli olarak en fazla %43,7 ile GSK yönteminde gözlenirken, kamfor göreceli olarak en fazla (%20,1) sbkH₂O yönteminde, 1,8-sineol göreceli olarak en fazla (%10,2) SBD yönteminde, β -selinen göreceli olarak en fazla (%9,4) SBD yönteminde ve arteannuin b (artemisin) göreceli olarak en fazla (%25,5) sbkH₂O yönteminde gözlenmiştir.

Altı farklı ekstraksiyon ile yıllık pelinotundan elde edilen ekstraktlarda oksijenli monoterpen bileşikleri göreceli olarak en fazla USE ekstraksiyonunda elde edilirken, seskiterpen bileşikleri göreceli olarak en fazla SBD ekstraksiyonunda elde edilmiştir. Oksijenli seskiterpen bileşikleri ise göreceli olarak en fazla sbkH₂O yönteminde elde edilmiştir. Diğer yöntemlerden farklı olarak sbkEtOHE yönteminde uçucu yağların yanı sıra uzun zincirli hidrokarbonlar da elde edilmiştir.

Literatürde yer alan bir çalışmada yıllık pelinotunu hidrodestilasyon ekstraksiyonu ile ekstrakte etmişler. Ekstraksiyon sonucunda temel bileşenleri kamfor (%44,0), germakren (%16,0), trans-pinokarveol (%11,0), β -selinen (%9,0), β -karyofillen (%9,0) ve artemisya keton (%3,0) olarak belirlemişlerdir [11]. Literatürde yer alan bir diğer çalışmada Bulgaristan'da yetiştirilen yıllık pelinotunu hidrodestilasyon ekstraksiyonu ile ekstrakte etmişler. Ekstraksiyon sonucunda GC-MS analiz sonuçlarına göre temel bileşenleri α -karyofillen (%24,7), α -kuveben (%13,5), α -kopaen (%7,4), α -selinen (%8,2), artemisya keton (%8,5) ve kamfor (%3,6) olarak belirlemişlerdir [12].

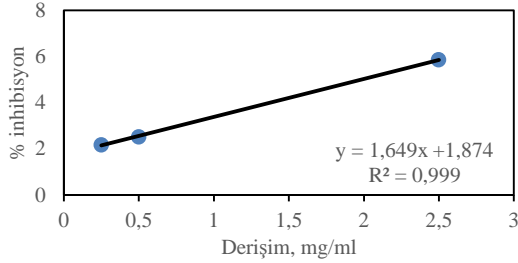
Literatürde yer alan çalışmalarda ve bizim çalışmamızdan elde edilen uçucu yağ bileşenleri aynı olmakla beraber göreceli dağılımları farklıdır. Bu da bitkilerin farklı coğrafyalardan yetiştirilmiş olmasından kaynaklanmaktadır.

3.1. Yıllık Pelinotundan Elde Edilen Uçucu Yağ ve Ekstraktların Antioksidan Aktiviteleri

3.1.1. DPPH Yöntemi

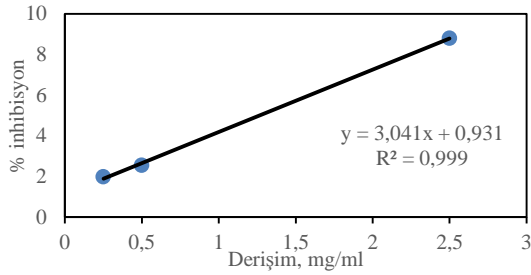
Yıllık pelinotunun su buharı destilasyonu ile ekstraksiyonu sonucu elde edilen ekstraktın DPPH yöntemi ile antioksidan aktivitesi ölçülmüştür. SBD ekstraksiyonu ile elde edilen ekstraktın, Şekil 5'de verilen grafikten, I₅₀ değeri 1167,2 mg bitki/ml olarak bulunmuştur.

Yıllık Pelinotunun (*Artemisia annua* L.) Kimyasal Kompozisyonu ve Antioksidan Kapasitesinin Belirlenmesinde Sub ve Süperkritik Akışkanların Etkisi



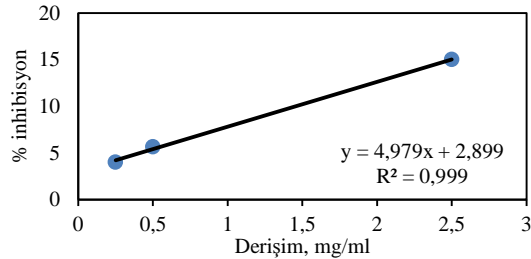
Şekil 5. Yıllık pelinotunun SBD ekstraksiyonu ile elde edilen ekstraktın derişim-% inhibisyon grafiği

Yıllık pelinotunun geri soğutucu altında çözücü ile kaynatma (GSK) sonucu elde edilen ekstraktın DPPH yöntemi ile antioksidan aktivitesi ölçüldüğünde, I_{50} değeri 227,3 mg bitki/ml olarak bulunmuştur (Şekil 6).



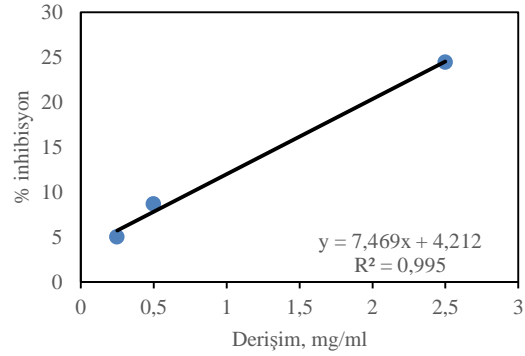
Şekil 6. Yıllık pelinotunun GSK ekstraksiyonu ile elde edilen ekstraktın derişim-% inhibisyon grafiği

Yıllık pelinotunun ultrasonik banyoda ekstraksiyonu (USE) sonucu elde edilen ekstraktın DPPH yöntemi ile antioksidan aktivitesi ölçüldüğünde (Şekil 7) I_{50} değeri 138,0 mg bitki/ml olarak bulunmuştur.



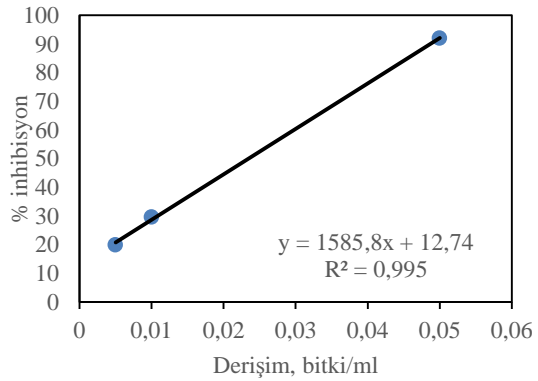
Şekil 7. Yıllık pelinotunun USE ekstraksiyonu ile elde edilen ekstraktın derişim-% inhibisyon grafiği

Sub kritik su ekstraksiyonu (sbkH₂O) sonucu elde edilen yıllık pelinotu ekstraktın I_{50} değeri 510,8 mg bitki/ml olarak bulunmuştur (Şekil 8).



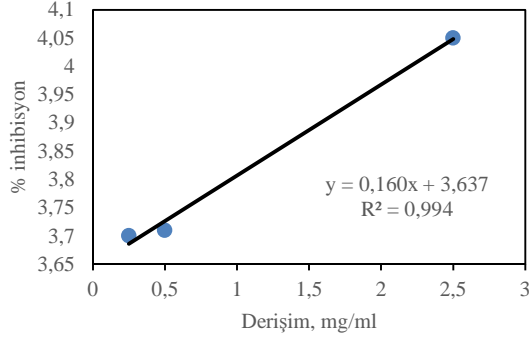
Şekil 8. Yıllık pelinotunun sbkH₂O yöntemi ile elde edilen ekstraktın derişim-% inhibisyon grafiği

Yıllık pelinotunun sub kritik etil alkol ekstraksiyonu (sbkEtO) sonucu elde edilen ekstraktın DPPH yöntemi ile antioksidan aktivitesi Şekil 9'da verilen grafikten, I_{50} değeri 24,4 mg bitki/ml olarak bulunmuştur.



Şekil 9. Yıllık pelinotunun sbkEtO yöntemi ile elde edilen ekstraktın derişim-% inhibisyon grafiği

Yıllık pelinotunun süper kritik CO₂ ekstraksiyonu (skCO₂) sonucu elde edilen ekstraktın DPPH yöntemi ile antioksidan aktivitesi ölçülmüştür. Şekil 10'da verilen grafikten, I_{50} değeri 4488,0 mg bitki/ml olarak bulunmuştur.



Şekil 10. Yıllık pelinotunun skCO₂E ekstraksiyonu ile elde edilen ekstraktın Derişim-% inhibisyon grafiği

Yöntem	I ₅₀ mg bitki/ml
sbkH ₂ OE	510,8
skCO ₂ E	4458,0
sbkEtOHE	24,4
SBD	1167,2
GSK	227,3
USE	138,0
BHT	1,55 mg BHT/ml

Çizelge 4. Yıllık pelinotunun altı farklı yöntemle elde edilen ekstraktlarının ve sentetik antioksidan BHT'nin DPPH yöntemi ile I₅₀ değerleri

Yıllık pelinotu için radikal temizleme aktivitesine göre yöntemleri büyükten küçüğe sıralayacak olursak sbkEtOHE>USE>GSK>sbkH₂OE > SBD >skCO₂E şeklinde sıralanmaktadır.

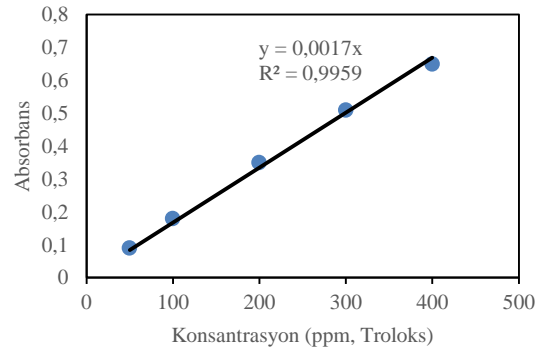
3.1.2. CUPRAC Yöntemi

Yıllık pelinotunun elde edilen altı farklı ekstraktlarının CUPRAC yöntemi ile toplam antioksidan aktiviteleri belirlenmiştir. Sonuçlar Şekil 11'de verilen kalibrasyon eğrisinden yararlanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen ekstraktların fenol içerikleri Çizelge 6'da gösterilmiştir. Çizelge 6'dan da görüleceği gibi sbkEtOHE yöntemiyle elde edilen ekstraktının diğer yöntemlerle elde edilen ekstraktlara göre yüksek fenol içeriğine sahip olduğu görülmektedir. Sonuçlar, CUPRAC yöntemi ve DPPH yöntemiyle elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

skCO₂E>sbkH₂OE>SBD şeklinde sıralanmaktadır. Sonuçlar DPPH yöntemiyle karşılaştırıldığında, benzer sonuçlar elde edildiği saptanmıştır.

Çizelge 5. Yıllık pelinotu ekstraktlarının CUPRAC yöntemi ile toplam antioksidan aktiviteleri

Yöntem	mg troloks/g bitki
sbkH ₂ OE	2,3
skCO ₂ E	3,2
sbkEtOHE	41,4
SBD	1,0
GSK	3,8
USE	7,9
BHT	1270,40 mg TR/g BHT



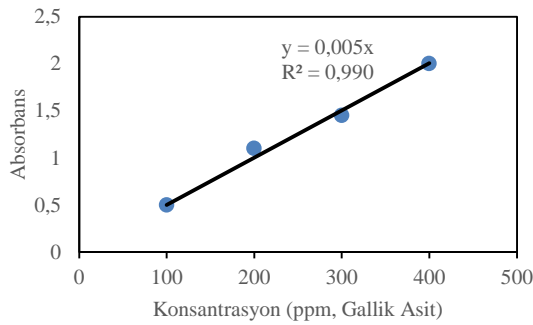
Şekil 11. Yıllık pelinotu ekstraktlarının CUPRAC yöntemiyle toplam antioksidan değerlerini belirlenmesi için standart troloks kalibrasyon eğrisi

3.1.3. Folin Ciocalteu Yöntemi (FOLIN)

Folin Ciocalteu yöntemi ile yıllık pelinotunun ekstraktlarının toplam fenol içerikleri belirlenmiştir. Sonuçlar Şekil 12'de verilen kalibrasyon eğrisinden yararlanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen ekstraktların fenol içerikleri Çizelge 6'da gösterilmiştir. Çizelge 6'dan da görüleceği gibi sbkEtOHE yöntemiyle elde edilen ekstraktının diğer yöntemlerle elde edilen ekstraktlara göre yüksek fenol içeriğine sahip olduğu görülmektedir. Sonuçlar, CUPRAC yöntemi ve DPPH yöntemiyle elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

Çizelge 6. Yıllık pelinotu ekstraktlarının Folin Ciocalteu yöntemi ile toplam fenol içeriklerinin belirlenmesi

Yöntem	mg GA/g bitki
sbkH ₂ OE	0,7
skCO ₂ E	0,9
sbkEtOHE	9,0
SBD	0,5
GSK	1,1
USE	2,6



Şekil 12. Yıllık pelinotu ekstraktlarının toplam fenol içeriklerinin belirlenmesi için standart gallik asit kalibrasyon eğrisi

4. SONUÇLAR

4.1. Sonuçlar ve Öneriler

i) sbkH₂OE yöntemiyle elde edilen ekstraktın uçucu yağ kalitesinin diğer yöntemlerle elde edilen yağlardan daha iyi olması, ekstraksiyonun hızlı bir şekilde tamamlanması, göreceli olarak düşük sıcaklıklarda çalışılarak, sıcaklıkla bozulan bileşenlerin kaybının önlenmesi, göreceli olarak düşük maliyetli olması, basit olması ve çevresel açıdan elverişli olması gibi özellikleri ile diğer yöntemlere güçlü alternatif bir yöntem olduğu belirlenmiştir. Antioksidan aktivitesi açısından değerlendirildiğinde sbkEtOHE ekstraksiyon metodunun güçlü bir yöntem olduğu görülmektedir. Bileşen konsantrasyonları ekstraksiyon metoduna göre değişiklik göstermesi nedeniyle; ekstraktın kullanım amacına uygun (gıda, kozmetik, ilaç vb.) bir ekstraksiyon metodunun

seçilebilmesinin mümkün olduğu belirlenmiştir.

- ii) Ekstraksiyon metoduna göre farklılık gösteren bileşenler amaca göre ekstrakte edildikten sonra ayırma ve saflaştırma teknikleri ile saf olarak elde edilebilir ve karakterize edilebilir.
- iii) Sub ve süper kritik akışkan ekstraksiyon için belirlenen optimum koşullarda sürekli bir ekstraksiyon sistemi ile çalışılabilir.
- iv) Elde edilen ekstraktlara mikrokapsülleme uygulamaları çalışılabilir.
- v) sbkH₂OE ve SBD ile ekstraksiyonda uçucu yağ elde edildikten sonra kalan sulu kısımdaki bileşenleri belirleme çalışmaları sıvı kromatografisi ile (HPLC, LC-MS, vb.) yürütülebilir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmada Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinasyonu Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje numarası: FEF2006D19). Bu çalışmada yıllık pelinotunu temin edilmesini sağlayan, Ç.Ü. Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü Öğretim Üyelerinden sayın Prof. Dr. Saliha KIRICI'ya teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. Türk, M., 2010. Bazı Önemli Tıbbi Bitkilerin Kimyasal Kompozisyonu ve Antioksidan Kapasitelerinin Belirlenmesinde Sub ve Süperkritik Akışkanların Etkisi, Ç.Ü. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
2. Altunkaya, A., Yıldırım, B., Ekici, K., Terzioğlu, Ö., 2014. Determining Essential Oil Composition, Antibacterial and Antioxidant Activity of Water Wormwood Extracts, GIDA, 39(1), 17-24.
3. Martinez-Correa, A.H., Bitencourt G., Raphaela, Kayano, A.V.A.C., Magalhães, M.P., Costa, T.M.F., Cabral, A.F., 2017. Integrated Extraction Process to Obtain Bioactive Extracts of *Artemisia Annu* L.

- Leaves Using Supercritical CO₂, Ethanol and Water, *Industrial Crops and Products*, 95, 535-542.
4. Chrastil, J., 1982. Solubility of Solids and Liquids in Supercritical Gases, *Journal of Physical Chemistry*, 86, 3016-3021.
 5. Giray, E. S., Kırıcı, S., Kaya, D. A., Türk, M., Sönmez, Ö., İnan, M., 2008. Comparing the Effect of Subcritical Water Extraction with Conventional Extraction Methods on the Chemical Composition of *Lavandula Stoechas*. *Talanta*, 74, 930-935.
 6. Özel, Z.M., Gogus, F., Lewis, C.A., 2003. Subcritical Water Extraction of Essential Oils from *Thymbra Spicata*, *Food Chemistry*, 82, 381-386.
 7. Gracia, G.L., Castro, L.D.M., 2000. Continuous Subcritical Water Extraction of Medicinal Plant Essential Oil: Comparison with Conventional Techniques, *Talanta*, 51, 1179-1185.
 8. Kubatova, A., Miller, J.D., Hawthorne, B.S., 2001. Comparison of Subcritical Water and Organic Solvents for Extracting Kava Lactones from Kava Root, *Journal of Chromatography A*, 923, 187-194.
 9. Wang, Y., Gao, Y., Ding, H., Liu, S., Han, X., Gui, J., Liu, D., 2017. Subcritical Ethanol Extraction of Flavonoids from *Moringa Oleifera* Leaf and Evaluation of Antioxidant Activity, *Food Chemistry*, 218, 152-158.
 10. Mohammadreza, R.V., 2008. Variation in the Essential Oil Composition of *Artemisia annua* L. of Different Growth Stages Cultivated in Iran, *Botany Research Journal*, 1(2), 33-35.
 11. Juteau, F., Masotti, V., Bessiere, M.J., Dherbomez, M., Viano, J., 2002. Antibacterial and Antioxidant Activities of *Artemisia Annua* Essential Oil, *Fitoterapia*, 73, 532-535.
 12. Tzenkova, R., Kamenarska, Z., Draganov, A., Atanassov, A., 2010. Composition of *Artemisia Annua* Essential Oil Obtained From Species Growing Wild In Bulgaria, *Biotechnol & Biotechnol. Eq.*, 24(2), 1833- 1835.
 13. Beney, P.J., Breuer, G.M., Jacobs, G.H., Zierath, D.L., Mollenhauer, P.J., Norton, K.K., 1996. Review, Evaluation, and Application of Solid Phase Extraction Methods, Hygienic Laboratory, University of Iowa, 102 Oakdale Campus, Iowa City, Iowa, 52242-500.
 14. <http://webbook.nist.gov/chemistry/gc-ri/>
 15. Sanchez, M. C., Larrauri, J.A., Saura, C.F., 1998. A Procedure to Measure the Antiradical Efficiency of Polyphenols, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 76, 270-276.
 16. Miliuskas, G., Venskutonis, R. P., Beek, van T.A., 2004. Screening of Radical Scavenging Activity of Some Medicinal and Aromatic Plant Extracts, *Food Chemistry*, 85, 231-237.
 17. Apak, R., Güçlü, K., Özyürek, M., Karademir, E.S., 2004. Novel Total Antioxidant Capacity Index for Dietary Polyphenols and Vitamins C and E, Using Their Cupric Ion Reducing Capability in the Presence of Neocuproine: CUPRAC Method, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, 7970-7981.
 18. Singleton, V.L., Rossi, J.A., 1965. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents, *American Journal of Enology and Viticulture*, 16, 144-158.
 19. Singleton, V.L., Orthofer, R., Lamuela-Raventos, R.M., 1999. Analysis of Total Phenols and Other Oxidation Substrates and Antioxidants by means of Folin-Ciocalteu Reagent, *Methods in Enzymology*, 299, 152-178.
 20. Wong, M., Li, B.H., Cheng, K.W., Chen, F., 2006. A Systematic Survey of Antioxidant Activity of 30 Chinese Medicinal Plants Using the Ferric Reducing Antioxidant Power Assay, *Food Chemistry*, 97, 705-7011.

Soğutma Panellerinde Kullanılabilecek Yeni Tip Kompozit Yalıtım Malzemelerin Sayısal İncelenmesi

Mustafa KILIÇ*¹ Mehmet YANARDAĞ¹

¹Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 21.09.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Enerji tasarrufu, ısıtma ve soğutma sisteminde karşılaşılan en önemli problem sahalarından birisidir. Soğutma panellerinde ısı kaybının azaltılması; işletme maliyetinin azaltılması, sistem veriminin artırılması ve enerji tasarrufu açısından büyük öneme sahiptir. Bu sebeple bu çalışmada; bir endüstriyel soğuk hava deposunun soğutma panelinde kullanılabilecek yeni tip yalıtım malzemelerinin farklı konfigürasyonlar için ısı performansını sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada iki farklı çözüm yaklaşımı incelenmiştir. Birinci yaklaşımda; yalıtım malzemeleri tabakalar halinde kullanılmış ve üç farklı konfigürasyon oluşturulmuştur. İkinci yaklaşımda; poliüretan (PU) esaslı homojen yapılu kompozit yalıtım malzemelerinin ısı performansı incelenmiştir. Sayısal çalışmada; Ansys Fluent 19.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği programı kullanılmıştır. Sonuç olarak; Magpan-PU tabakalı yapısının (Konfigürasyon-2), yalnızca PU köpük kullanılma durumuna (Konfigürasyon-1) göre ısı kaybında %9,3'lük bir azalmaya sebep olduğu belirlenmiştir. Poliüretan esaslı homojen yapılu kompozit yalıtım malzemeleri karşılaştırıldığında ise; %5 Silika aerojel katkılı PU köpük malzemenin, yalnızca PU köpük malzeme kullanılması durumuna göre ısı performansında %19,9 artış gösterdiği, %1 nanokil içeren PU köpük malzeme kullanılma durumunda ise, ısı performansında %9,8 azalma tespit edilmiştir. Model sonuçlarının, fiziksel durumu iyi bir şekilde temsil edebildiği, homojen yapıyı farklı tip yalıtım malzemelerinin modellenmesinde farklı parametreler için kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji tasarrufu, Yalıtım malzemesi, Kompozit yapı, Sayısal Modelleme

Numerical Analysis of New Type Composite Insulation Materials for Cooling Panels

Abstract

Energy saving is an important problem area in heating and cooling systems. Reducing heat loss from cooling panels is crucial for reducing operating cost, increasing system efficiency and energy saving. For his reason in this paper, the thermal performance of new type of insulation materials for an industry cold storage is numerically investigated for different configurations. Two different solution methods are used. For the first method, insulation materials are used in layers in three different configurations. For the second method, thermal performance of PU based homogeneous composite insulation materials is numerically investigated. Ansys Fluent 19.3 CFD program is used for numerical analysis. As a result; using Magpan-PU composite insulation material (configuration-2) causes a reduction of 9.3% on heat loss

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Mustafa KILIÇ, mkilic@atu.edu.tr

according to the reference PU foam (configuration -1). For comparing PU based homogeneous composite insulation materials, using 5% doped silica aerogel PU causes an increase of 19.9% on the thermal performance of insulation material and using 1% doped nano-clay PU causes a decrease of 9.8% on the thermal performance of insulation material. It is determined that model results can represent the physical process and can be used for modeling different type of insulation materials for different parameters.

Keywords: Energy saving, Insulation material, Composite structure, Numerical modelling

1. GİRİŞ

Günümüzde, endüstride kompozit yapıli yalıtım malzemelerinin soğuk hava depolarında kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Soğuk hava depolarında iç ve dış sıcaklıklar arasındaki farkın yüksek olması, enerji tasarrufu açısından kullanılan yalıtım malzemesinin ısıl direncinin önemini bir kat daha arttırmaktadır. Yalıtım malzemelerinin ısıl direncinin artırılması, enerji tasarrufu sağlamakta, bu durum ise doğru bir yalıtım malzemesi konfigürasyonu ile mümkün olabilmektedir. Soğuk hava depolarının yalıtım malzemelerinin uygun şekilde belirlenmesi ve doğru bir tasarımla, %8'den %72'e kadar enerji tasarrufunun sağlanmasında önemli bir potansiyele sahip olduğu değerlendirilmektedir [1]. Uygun yalıtım malzemelerinin seçiminin enerji tasarrufu yanında diğeri bir önemli kriteri ise maliyet etkin olmasıdır. Bu kapsamda; yalıtım malzemesi geri ödeme süresinin 0-6 yıl arasında olduğu varsayılmaktadır [2].

Yalıtım malzemelerinin konfigürasyonu, her bir malzemenin yalıtım kalınlığı, malzeme tipi ve malzemenin konumu gibi bileşenlerden oluşur. Böylece yalıtım direnci artırılmaya ve enerji kaybı azaltılmaya çalışılır. Enerji kaybındaki bu azalma, yalıtım malzemesinden geçen ısı transferi miktarı kadardır ve yalıtım malzemesinin termal performansını belirler. Bu sebeple, tabakalar halinde ısı yalıtım malzemesinin uygulanması ile ısı kaybının azaltılacağı ve yalıtım malzemesinin ısıl performansının artırılacağı öngörülmektedir [3].

Soğuk hava depolarında yalıtım malzemesi olarak son zamanlarda faz değıştiren malzemeler (PCM) kullanılmaya başlamıştır. PCM termal özellikleri sebebiyle, erime ve donma sırasında yüksek

miktarda enerji depolar, depolanan bu enerji sistemden olan ısı kaybını azaltır. Zalba ve arkadaşları (2003) PCM'nin termofiziksel özelliklerinin faz değıştirme enerjisinden faydalanarak termal kararlılığın artırılacağı ve daha verimli sistemler tasarlanacağı belirtilmiştir [4].

Poliüretan (PU) köpük yalıtım malzemesi, düşük ısı iletim katsayısı ile son zamanlarda endüstride birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstride kullanılan PU yalıtım malzemesinin tercih edilme sebebi; fiyatının ucuz olması, enerji kaybının az olması (düşük ısı iletim katsayısı sebebiyle) ve bakımı kolaylığıdır. PU yalıtım malzemesinin termal iletkenliği 760 torr gaz basıncı altında 0,00682-0,00915 W/mK'e kadar düşürülebilmektedir [5]. Amaral ve arkadaşları [6] parafin ve kalsiyum karbonat kullanarak, ticari PU materyaline kıyasla düşük termal iletkenlik ve yoğunluk artışına sahip bir malzemeyi deneysel olarak sentezlemiştir.

Fiberglas, polietilen, polystiren vb. gibi birçok yalıtım malzemesi düşük ısı iletkenliği nedeniyle ısı kaybını azaltmak için ticari uygulamalarda kullanılmaktadır.

Yalıtım malzemelerinde aranan bir başka önemli özellik ise, yangın gibi çevresel etkilere karşı dayanımının yüksek olmasıdır. Bu nedenle, yangından korunmak için; yalıtım malzemelerinin tutuşma süresinin ve sıcaklığının yükseltilmesi gerekmektedir. Bu sebeple; bu çalışmada endüstride yangına karşı dayanımı yüksek bir yalıtım malzemesi olan Magpan malzemesi seçilmiş ve ısıl performansı incelenmiştir.

Sevindir ve arkadaşları [7] yatırım, işletme ve bakım maliyetleri için en uygun yalıtım kalınlığını tespit etmeye çalışmıştır. Bu çalışmada, toplam ısı

transfer oranı ve enerji maliyeti dikkate alınarak farklı sıcaklıklardaki en uygun ısı yalıtım kalınlığı belirlenmeye çalışılmıştır. Yalıtım malzemesinin verimi, toplam ısı aktarım hızı dikkate alınarak hesaplanmalıdır.

Abdou ve arkadaşları [8] sıcaklık artışına bağlı olarak ısı iletim katsayısındaki değişimi incelemiştir. Daha yüksek çalışma sıcaklıklarının daha yüksek termal iletkenliğin nedeni olduğu belirlemiştir.

Ahmed ve arkadaşları [9] bir soğuk hava deposunun, geleneksel yalıtım yönteminin PCM'ler kullanılarak iyileştirilmesini deneysel olarak araştırmıştır. PCM ısı transfer kaybını azalttığını gözlemlemiştir. Isı transferi miktarındaki azalmanın %11,3-43,8 aralığında olduğunu tespit etmiştir.

Li ve arkadaşları [10], soğuk hava tünellerinde havadaki nemin ısı yalıtımına etkilerini incelemiştir. Isı iletiminin havadaki neme bağlı olduğunu, soğuk havada yalıtım malzemesi içindeki suyun donması sonucu, ısıl direnci azalttığını tespit etmiştir.

Huang ve arkadaşları [11] PCM kullanılarak yalıtımlı bir kapta sıcak değişimini incelemiştir. Düşük sıcaklıklarda yalıtımın ısıl performansının arttığını tespit etmişlerdir.

Michel ve arkadaşları [12] çok katmanlı, kompozit yapılı yalıtım malzemelerinin PU-PCM formunun bileşenleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Kompozit tabakanın yalıtım duvarı içindeki konumunun da önemli olduğunu tespit etmişlerdir.

Kozak ve arkadaşları [13], soğuk hava depo yalıtım malzemeleri performansını PCM kullanılarak sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Şekil değiştirme sürecinde ısıl iletimindeki değişimleri ve PCM'nin etkilerini ortaya koymuşlardır.

Laguerre ve arkadaşları [14] başlangıç sıcaklığı -5 °C ve ortam sıcaklığı 30 °C olan PCM malzemesinin ısıl performansını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. CFD analizi ve

deneysel sonuçlarının karşılaştırılması sonucunda şekil değiştiren PCM malzemesinin yaklaşık 32 saatlik bir süre için ısıyı depolayabildiğini tespit etmişlerdir.

Choi ve arkadaşları [15] farklı PU yoğunluğu ile termal iletkenlik artışının ısı transferine etkilerini deneysel ve teorik olarak incelemiştir. PU'nun yoğunluğunun artması ile ısıl iletkenliğinin de arttığını tespit etmişlerdir.

Serrano ve arkadaşları [16] sert poliüretan (RPU) köpüklere mikrokapsüller eklenerek sentezlenen yalıtım malzemelerinin ısı kaybını etkisini incelemiştir. Farklı oranlarda % 0-%50 eklenen mikrokapsüllerin standart sert poliüretan köpüklere göre ısı kaybını azalttığı tespit edilmiştir.

Amaral ve arkadaşları [17], mikrokapsüller eklenen PCM'lerin sentezlenmesi ile oluşturulan yalıtım malzemelerinin termal özelliklerini incelemiştir. Çalışmada melaminli ve melamin içermeyen genişletilebilir grafitli sert PU köpük malzemenin üç farklı form kullanılmıştır. PU ve mikrokapsül ilaveli PCM'lerin termal performans karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, HPU köpüklerine melamin ve genişletilmiş grafit ilavesinin, hem gizli ısı depolama kapasitesini, hem de termal iletkenliğini arttırdığını tespit etmişlerdir.

Estravis ve arkadaşları [18], hücresel yapıda modifikasyonlar ile üretilen ağırlıkça farklı konsantrasyonlarda (%0, %1, %3, %5) üretilen nanokil ilaveli sert poliüretan malzemenin ısı iletim katsayısını incelemiştir. En düşük ısı iletim katsayısının 1% nanokil ilave edilmesi ile sağlandığını tespit etmişlerdir ($k=33,30$ mW/mK).

Nazeran ve arkadaşları (2017) [19] silika aerojel takviyeli PU köpük nanokompozit yalıtım malzemesi sentezleyerek ısıl performansını incelemiştir. Silika arojelin konsantrasyonu ağırlıkça %1-5 oranında kullanılmıştır. PU köpük malzemeye silika aerojel eklenmesinin daha düzgün hücre yapısına neden olduğunu belirlemiştir. Silika aerojel içeriği arttıkça termal iletkenliğin azaldığı ve ısıl direncinin arttığı gözlemlenmiştir. En küçük termal iletkenlik,

ağırlıkça %5 silika aerojel $k=0,0171$ W/mK kullanılarak ölçülmüştür.

Wi ve arkadaşları [20] ısı iletim katsayısını azaltmak için PU köpük malzemeye ilave edilen aerojel ve grafitin etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, aerojel takviyeli PU köpük malzemenin ısı iletim katsayısının %20 oranında azaltılabildiğini tespit etmiştir.

Septevani ve arkadaşları [21] sert poliüretan köpük malzemeye nanokristaller ilave edilmiş, ultrasonizasyon yöntemi kullanılarak termal iletkenliği azaltılmaya çalışılmıştır. PU köpük malzemeye ağırlıkça %0,4 oranında nanokristal ilave edildiğinde ısı iletim katsayısının, referans PU köpük malzemeye göre %5 azaltılabileceğini tespit etmişlerdir.

Piszczyk ve arkadaşları [22] referans PU köpük malzemenin poligliserol takviyesi ile yangına karşı direncini arttırırken ısı performansının nasıl değiştiğini incelemiştir. Referans PU köpük malzemeye %35 oranında poligliserol ve poliölün ilave edilmesi durumunda ısı iletim katsayısının sırası ile %0,8 arttığı ve %1,1 azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, PU'nun tutuşma sıcaklığının 250 °C'den 300-340 °C aralığına kadar arttırılabildiği tespit edilmiştir.

Cao ve arkadaşları [23] referans PU köpük malzemeye farklı oranlarda grafen ekleyerek, yangına karşı direncini arttırırken ısı performansının nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Hazırlanan grafen takviyeli PU köpük malzemenin yangına karşı direnci artarken, ısı performansının %12,2 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Du ve arkadaşları [24] dopamin katkılı siyah fosfor nanoplakalara işlenmiş polietilen glikol esaslı poliüretan malzemenin moleküler yapısındaki değişimler sayesinde, hem yangına karşı daha dayanıklı, hem de enerji depolama malzemesi olarak kullanılabileceğini tespit etmişlerdir. Malzemenin enerji dönüşüm veriminin %88,5 ve ısı iletim katsayısındaki artışın %69,4 olarak belirlemiştir.

Zhao ve arkadaşları [25] zirkonyum katkılı PU köpük malzemenin ısı karakterinin ve geçirgenliği değişimini incelemiştir. Hazırlanan malzemenin, ısı kararlılığının ve sıvı tutma kabiliyetinin arttığını tespit etmişlerdir.

Andersons ve arkadaşları [26] Biyolojik yağ asitlerinden ürettikleri PU köpük malzemenin ısı analizini yapmıştır. Geri dönüştürülebilir biyolojik esaslı PU malzemenin, fasıl yakıt esaslı referans PU köpük malzeme ilke benzer ısı ve mekanik özellikleri gösterdiğini belirlemiştir.

Zeng ve arkadaşları [27] yaptıkları çalışmada PU malzemeyi fosfor ve bazı biyolojik yağlar ile karıştırarak hem çevreye karşı zarar vermeyen hem de yangına karşı daha dirençli yalıtım malzemeleri geliştirebileceklerini tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada, endüstriyel soğuk hava deposunun soğutma panelinde kullanılabilecek yeni tip yalıtım malzemelerinin farklı konfigürasyonlar için ısı performansı sayısal olarak incelenmiştir. Literatür incelendiğinde, genellikle PU köpük malzemeye yapılan bazı ilave malzemeler ile malzeme özelliklerinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Bu çalışmanın literatürde yer alan çalışmalardan farkı; iki farklı yaklaşımla (tabakalı yapıya sahip kompozit yalıtım malzemesi oluşturma ve homojen yapılı kompozit yalıtım malzemesi oluşturma) oluşturulan kompozit yapılı yalıtım malzemelerinin ısı dirençlerinin ve ısı performanslarının incelenmesidir. Bu amaçla; soğutma paneli duvarının bir bölümünün ısı yalıtım performansını, çalışma koşullarını ve yalıtım malzemesinin termal iletkenliğini değerlendirmek için Ansys Fluent 19.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği programı kullanılarak, sayısal olarak ısı transfer modellemesi yapılmıştır. Yalıtım malzemesinin seçiminde, termal iletkenliğinin yanı sıra uygun maliyeti sebebiyle piyasada en çok kullanılan PU köpük malzeme kullanılmıştır. Tabakalı kompozit yalıtım malzemesi için farklı tipte yalıtım malzemeleri katmanlar halinde kullanılmıştır. Homojen yapılı kompozit yalıtım malzemelerinde ise; malzemenin çevre şartlarına karşı direncini ve yangına karşı direncini arttırmak için katkı malzemeleri ilave edilerek, PU köpük malzeme

sentezlenmiştir. Bu kapsamda; a. Farklı tip yalıtım malzemelerinin tabakalar halinde kullanılmasının ısı transferine etkisi, b. Poliüretan esaslı homojen yapılu kompozit yalıtım malzemeleri kullanılmasının ısı transferine etkisi incelenmiştir.

2. SAYISAL MODEL VE MATEMATİKSEL FORMÜLASYON

Bu çalışmada, bir endüstri soğuk hava deposunda kullanılması öngörülen PU yalıtım malzemesinin termal iletkenliğini azaltarak enerji tasarrufu olarak sayısal olarak araştırılmıştır.

Enerji denklemi (Eşitlik 1);

$$\dot{Q}_{giriş} - \dot{Q}_{çıkış} = \frac{dE_{Duvar}}{dt} \quad (1)$$

$\frac{dE_{Duvar}}{dt} = 0$ Sürekli halde duvar içerisindeki zamana bağlı enerji değişimi olmayacaktır (Eşitlik 2).

$$\int_{x=0}^L \dot{Q}_{cond,Duvar} dx = - \int_{T=T_1}^{T_2} kAdT \quad (2)$$

Burada k ısı iletim katsayısı ve A duvarın yüzey ısı iletimine dik yüzey alanıdır (Eşitlik 3).

$$\dot{Q}_{cond,Duvar} = -kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (3)$$

L nerede yüksekliktir. Duvarın termal direnci (Eşitlik 4);

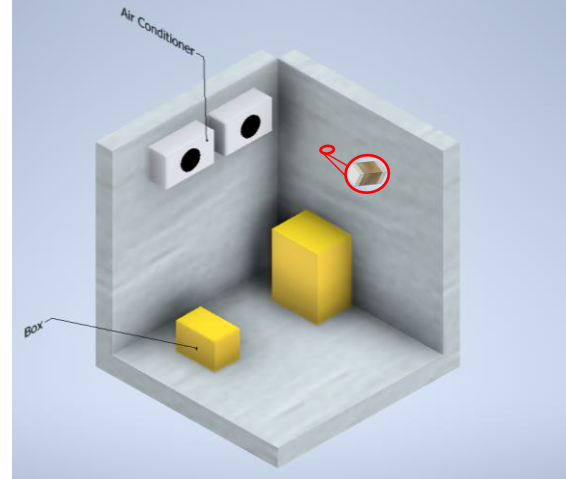
$$R_{Duvar} = \frac{L}{kA} \quad (4)$$

Duvardan ısı iletimi (Eşitlik 5);

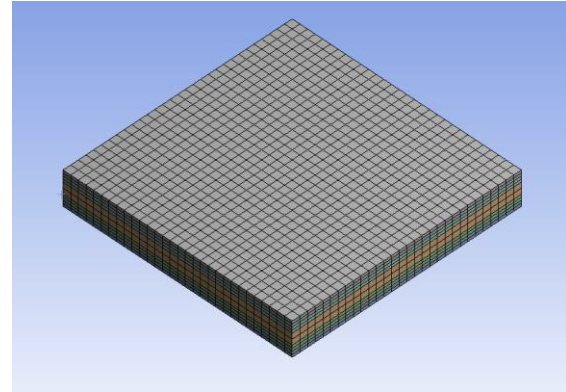
$$\dot{Q}_{cond,Duvar} = \frac{T_1 - T_2}{R_{Duvar}} \quad (5)$$

Sayısal model, Ansys Fluent 19.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği programı kullanılarak oluşturulmuştur. Program sonuçları; bir soğuk hava deposundaki gerçek sıcaklık sınır şartlarına göre ve sürekli halde ısı transferi olacak şekilde oluşturulmuştur. Şekil 1, analiz için kullanılan

soğuk hava deposu panel kesitini ve Şekil 2’de, analiz için kullanılan yalıtım malzemesi hücre yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1. Soğuk hava deposu panel kesiti



Şekil 2. Yalıtım malzemesi hücre yapısı

Sayısal modelde, yalıtım malzemesi boyutları 1x1x0,1 m (uzunluk x genişlik x yükseklik) olarak alınmıştır. Soğuk hava deposu iç ve dış sıcaklıkları -5 °C ve 24 °C olarak alınmıştır. Temel yalıtım malzemesi poliüretan köpük malzemesi olarak belirlenmiştir. Tabakalı yalıtım malzemesinin tasarımında, özellikleri iyileştirilmiş MAGPAN malzeme ile yanmaya karşı malzeme direncini arttıracak cam elyafının etkisi incelenmiştir. Homojen yapılu kompozit yalıtım malzemeleri kullanılması durumunda ise, farklı katkı maddeleri PU yalıtım malzemesi içerisinde farklı oranlarda

homojen bir şekilde karıştırılmış ve bunların malzemenin ısı direncine ve malzemenin ısı kaybına olan etkisi incelenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada, soğuk hava depolarında kullanılabilecek olan yalıtım malzemelerinin ısı performansı sayısal olarak incelenmiştir. Isıl direncin artırılması ve enerji tasarrufu sağlamak için iki farklı yöntem kullanılarak 9 farklı yalıtım malzemesi sayısal olarak karşılaştırılmıştır.

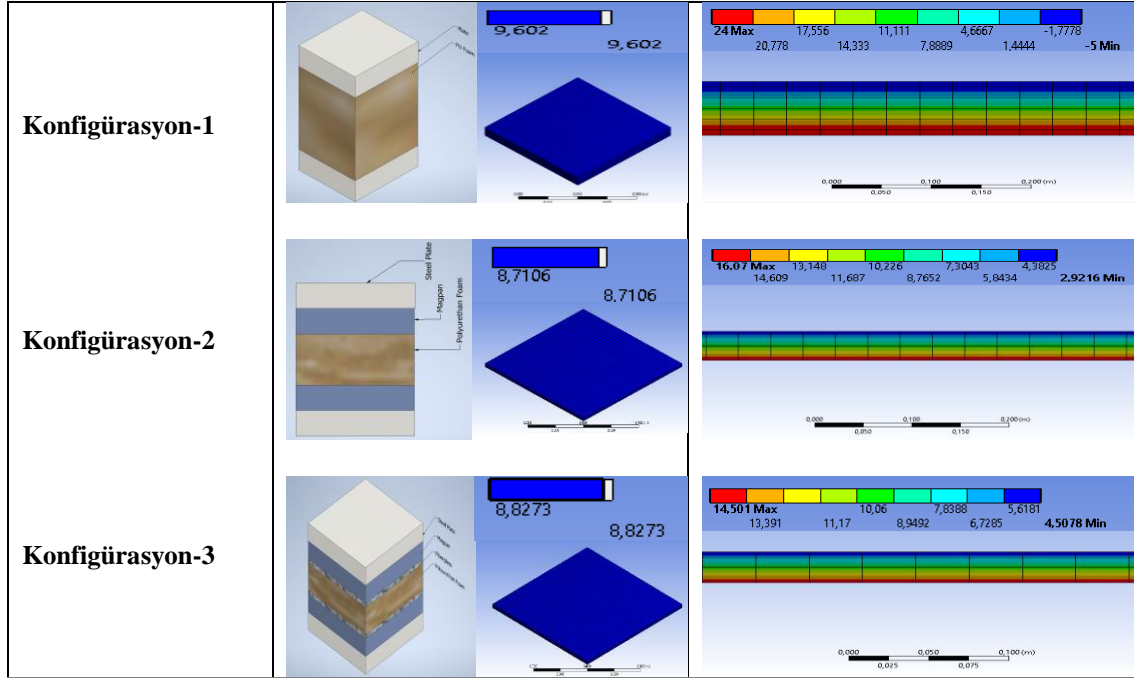
3.1. Farklı Tip Yalıtım Malzemelerinin Tabakalar Halinde Kullanılmasının Isı Transferine Etkisi

Soğuk hava depo yalıtım malzemelerinin ısı direncinin artırılmasının, malzemenin ısı performansının artışıyla önemli olduğu bilinmektedir. Bu sebeple; bu çalışmanın birinci aşamasında çok katmalı yalıtım malzemeleri kullanarak her tabakada geçişinde ısı direncin artırılması ve ısı kaybının azaltılması hedeflenmiştir. Bu çalışmada referans malzeme PU köpük malzeme olarak alınmış, yangına karşı direnci yüksek olan Magpan malzeme ile PU köpük tabakalar halinde incelenmiş, son durumda ise; Magpan-cam elyafı-PU köpük yalıtım malzemesi tabakalar halinde kullanılmıştır. Toplam ısı kaybını karşılaştırmak için 3 farklı konfigürasyon öngörülmüştür. Yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayıları; saf PU köpük için $k=0,0265$ W/mK, Magpan için $k=0,022$ W/mK ve cam elyafı için $k=0,032$ W/mK olarak belirlenmiştir. Bu çalışma için Magpan malzeme ve cam elyafı yangına karşı yüksek

dayanımı (tutuşma süresi uzun ve tutuşma sıcaklığının yüksek olması) ve yüksek ısı dirence sahip olmaları sebebiyle seçilmiştir. Çalışmada 3 farklı konfigürasyon şu şekilde belirlenmiştir. **Konfigürasyon-1'de;** soğuk hava deposu yalıtım malzemesinin referans yapısı temel alınmıştır. 20 mm kalınlığında sac levhalar arasında 80 mm poliüretan köpük malzeme kullanıldığı öngörülmüştür. **Konfigürasyon-2'de;** yalıtım malzemesinin yangına karşı direncini arttırmak maksadıyla; 20 mm kalınlığında sac levhalar arasında, 2x20 mm Magpan malzeme arasında, 40 mm PU köpük kullanıldığı öngörülmüştür. **Konfigürasyon-3'de;** hem yangına karşı direncini arttırmak hem de ısı direnci arttırmak için; 20 mm kalınlığında sac levhalar arasında, 2x20 mm Magpan malzeme arasında, 2x5 mm cam elyafı arasında, 30 mm PU köpük kullanıldığı öngörülmüştür. Şekil 3'de tabakalı modellerin kesitleri, ısı akıları ve yalıtım malzemesinde oluşan sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Sonuç olarak; Farklı tip yalıtım malzemelerinin tabakalar halinde kullanılması durumunda; yalnızca PU köpük malzeme kullanılma durumuna göre; Magpan-PU köpük birlikte kullanılmasında ısı kaybında %9,3 azalma olduğu ve Magpan-cam elyafı-PU köpük birlikte kullanılmasında ise; ısı kaybında %8,3 azalma olduğu tespit edilmiştir. En iyi ısı performansı, Magpan-PU köpük birlikte kullanılmasında elde edilmiştir. Konfigürasyon-3'te öngörülen tabakalı yapının, yangına karşı direnci arttırmasına rağmen, konfigürasyon-2'ye göre ısı dirençte azalmaya sebep olduğu tespit edilmiştir. Tablo 2'de farklı tip tabakalı yalıtım malzemelerinin termofiziksel özellikler ve ısı kaybı değerleri sunulmuştur.

Tablo 2. Yalıtım malzemelerinin termofiziksel özellikler ve ısı kaybı değerleri

	Malzeme	K (W/mk)	L (m)	Alan (m ²)	İç Sıcaklık (°C)	Dış Sıcaklık (°C)	Q (W)
Konfig. 1	Poliüretan	0,0265	0,08	1	-5	24	9,6
Konfig. 2	Magpan	0,022	0,02	1	-5	24	8,7
	Poliüretan	0,0265	0,04				
Konfig. 3	Magpan	0,022	0,02	1	-5	24	8,8
	Poliüretan	0,0265	0,03				
	Cam Elyafı	0,032	0,005				



Şekil 3. Farklı tabakalı yapıdaki yalıtım malzemeleri için ısı akıları ve sıcaklık dağılımları

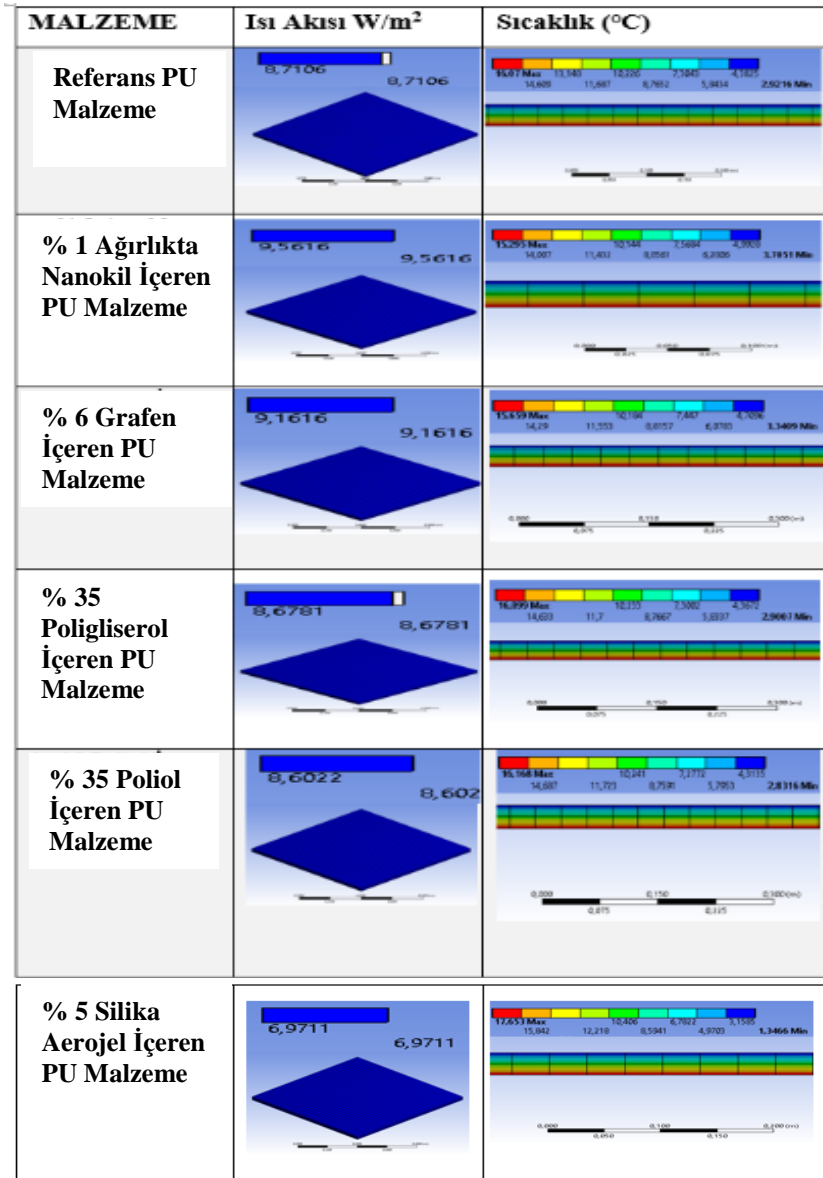
3.2. Poliüretan Esaslı Homojen Yapılı Kompozit Yalıtım Malzemeleri Kullanılmasının Isı Transferine Etkisi

Çalışmanın ikinci aşamasında; poliüretan esaslı homojen yapıları kompozit yalıtım malzemeleri kullanılması durumunda ısı transferindeki ve ısı kaybındaki değişim incelenmiştir. Bu maksatla; PU köpük malzemeye farklı oranlarda katkı maddeleri eklenerek, hem termal özellikleri iyileştirilmeye çalışılmış, hem de ısı iletim katsayısı azaltılmaya çalışılmıştır. Sayısal modeli oluşturmak için; literatürde yer alan [18,19,22,23] farklı oranlarda, farklı katkı maddeleri ilave edilerek sentezlenmiş PU köpük malzemelerin ısı özellikleri kullanılmıştır. Tablo 3'te farklı tip homojen yapıları yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayıları sunulmuştur. Homojen yapıları yalıtım malzemelerinden olan ısı transferi sayısal modelde modellenerek, referans PU köpük malzeme ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4'te, farklı tip yalıtım malzemeleri için elde edilen ısı akısı ve sıcaklık dağılımı değerleri sunulmuştur.

Sonuç olarak; Poliüretan içeren (%35) PU köpük malzeme ise referans PU köpük malzemeye göre sırası ile %0,4 ve %1,2 değerinde daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Nanokil takviyeli (%1) PU köpük ile Grafen takviyeli (%6) PU köpük malzemenin referans PU köpük malzemeye göre sırası ile %9,8 ve %5,1 daha düşük bir performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum PU köpük malzemeye nanokil ve grafen eklenerek, mekanik dayanımının ve yangına karşı dayanımının artırılmasına karşılık ısı direncin azaldığı ve ısı kaybının arttığı tespit edilmiştir. Poligliserol içeren (%35) PU köpük malzeme ile bu iki malzemenin referans PU köpük malzeme ile yaklaşık aynı ısı performansı gösterdiği değerlendirilebilir. Referans PU köpük malzemeye göre en iyi ısı performansı ise, silika aerojel içeren (%5) PU köpük malzeme %19,9 artış ile göstermiştir. Yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısı azaltıldığında yalıtım performansının arttığı ve ısı kayıplarının azaldığı tespit edilmiştir.

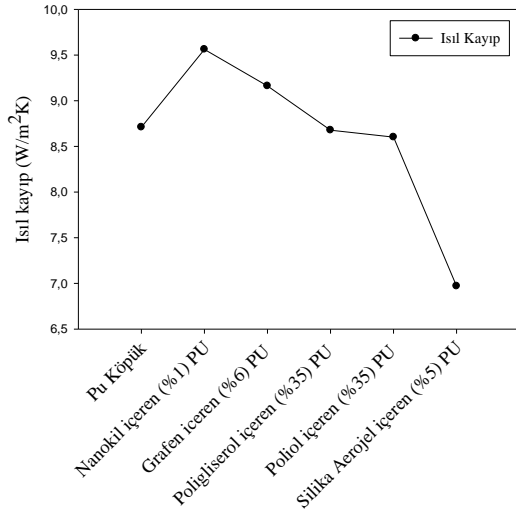
Tablo 3. Homojen yapılı kompozit yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayıları

Malzeme	Isı İletim Katsayısı W/mK
PU	0,0265
% 1 nano kil içeren PU [18]	0,0330
%5 silika aerojel içeren PU [19]	0,0170
%35 poligliserol içeren PU [22]	0,0263
%35 polioli içeren PU [22]	0,0258
%6 grafen içeren PU [23]	0,0298



Şekil 4. Farklı tip kompozit yalıtım malzemelerinde meydana gelen ısı akıları ve sıcaklık dağılımı

Şekil 5'te poliüretan esaslı homojen yapıları farklı tip kompozit yalıtım malzemelerinden olan ısı kayıp değerleri sunulmuştur. Diğer kompozit yapıları yalıtım malzemelerine kıyasla en iyi yalıtım performansını %5 Silica Aerojel içeren PU köpük malzeme göstermiştir.



Şekil. 5. Farklı Tip yalıtım malzemelerinin ısı kayıp değerleri

4. SONUÇ

Bu çalışmada, bir endüstriyel soğuk hava deposundan olan ısı kaybının azaltılması ve enerji tasarrufunun artırılması amacıyla, farklı konfigürasyonlarda oluşturulmuş yalıtım malzemelerinin ısı performansı sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada ısı transferi yüzey alanları ve yalıtım malzemesi toplam kalınlığı sabit tutulmuş, ısı iletim katsayısındaki değişim temel parametre olarak ele alınmıştır. Sonuç olarak;

a) Farklı tip yalıtım malzemelerinin tabakalar halinde kullanılması durumunda; yalnızca PU köpük malzeme kullanılması durumuna göre; Magpan-PU köpük birlikte kullanıldığında ısı kaybında %9,3'lük bir azalma olduğu ve Magpan-camelyafı-PU köpük birlikte kullanılması durumunda ise; ısı kaybında %8,3'lük bir azalma olduğu tespit edilmiştir.

b) Poliüretan esaslı homojen yapıları kompozit yalıtım malzemeleri kullanılması durumunda; referans yalıtım malzemesi olarak, PU köpük malzemesi alınmıştır. Nanokil takviyeli (%1) PU köpük ile Grafen takviyeli (%6) PU köpük malzemenin referans PU köpük malzemeye göre sırası ile %9,8 ve %5,1 daha düşük bir performans gösterdiği tespit edilmiştir. Poligliserol içeren (%35) PU köpük malzeme ile Poliol içeren (%35) PU köpük malzeme ise referans PU köpük malzemeye göre sırası ile %0,4 ve %1,2 değerinde daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bu iki malzemenin referans PU köpük malzeme ile yaklaşık aynı ısı performansı gösterdiği değerlendirilebilir. Referans PU köpük malzemeye göre en iyi ısı performansı ise, silika aerojel içeren (%5) PU köpük malzeme %19,9 artış ile göstermiştir.

c) Bu çalışma sonuçları göz önüne alındığında; gelecekte farklı tip homojen yapıları kompozit yalıtım malzemelerinin tasarımı, mekanik davranışı, çevresel etkilere karşı dayanımının artırılması ve ısı performansı incelenebilir, ısı kayıplarının azaltılması, verimlilik artışı ve maliyetin düşürülmesi ile ilgili çözümler araştırılabilir.

5. KAYNAKLAR

1. Evans, J.A., Hammond, E.C., Gigiel, A.J., Foster, A.M., Reinholdt, L., Fikiin, K., Zilio, C., 2014. Assessment of Methods to Reduce the Energy Consumption of Food Cold Stores. *Applied Thermal Engineering*, 62(2), 697-705.
2. Dylewski, R., Adamczyk, J., 2016. Study on Ecological Cost-effectiveness for the Thermal Insulation of Building External Vertical Walls in Poland. *Journal of Cleaner Production*, 133, 467-478.
3. Xie, T., He, Y.L., Tong, Z.X., 2016. Analysis of Insulation Performance of Multilayer Thermal Insulation Doped with Phase Change Material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 934-943.
4. Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F., Mehling, H., 2003. Review on Thermal Energy Storage

- with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251-283.
5. Wu, J.W., Sung, W.F., Chu, H.S., 1999. Thermal Conductivity of Polyurethane Foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42(12), 2211-2217.
 6. Amaral, C., Pinto, S.C., Silva, T., Mohseni, F., Amaral, J.S., Amaral, V.S., Vicente, R., 2020. Development of Polyurethane Foam Incorporating Phase Change Material for Thermal Energy Storage. *Journal of Energy Storage*, 28, 101177.
 7. Sevindir, M.K., Demir, H., Ağra, Ö., Atayılmaz, Ş.Ö., Teke, İ., 2017. Modelling the Optimum Distribution of Insulation Material. *Renewable Energy*, 113, 74-84.
 8. Abdou, A.A., Budaiwi, I.M., 2005. Comparison of Thermal Conductivity Measurements of Building Insulation Materials Under Various Operating Temperatures. *Journal of Building Physics*, 29(2), 171-184.
 9. Ahmed, M., Meade, O., Medina, M.A., 2010. Reducing Heat Transfer Across the Insulated Walls of Refrigerated Truck Trailers by the Application of Phase Change Materials. *Energy Conversion and Management*, 51(3), 383-392.
 10. Li, Y., Sun, Y., Qiu, J., Liu, T., Yang, L., She, H., 2020. Moisture Absorption Characteristics and Thermal Insulation Performance of Thermal Insulation Materials for Cold Region Tunnels. *Construction and Building Materials*, 237, 117765.
 11. Huang, L., Piontek, U., 2017. Improving Performance of Cold-chain Insulated Container with Phase Change Material: An Experimental Investigation. *Applied Sciences*, 7(12), 1288.
 12. Michel, B., Glouannec, P., Fuentes, A., Chauvelon, P., 2017. Experimental and Numerical Study of Insulation Walls Containing a Composite Layer of PU-PCM and Dedicated to Refrigerated Vehicle. *Applied Thermal Engineering*, 116, 382-391.
 13. Kozak, Y., Farid, M., Ziskind, G., 2017. Experimental and Comprehensive Theoretical Study of Cold Storage Packages Containing PCM. *Applied Thermal Engineering*, 115, 899-912.
 14. Laguerre, O., Aissa, M.B., Flick, D., 2008. Methodology of Temperature Prediction in an Insulated Container Equipped with PCM. *International Journal of Refrigeration*, 31(6), 1063-1072.
 15. Choi, S.W., Jung, J.M., Yoo, H.M., Kim, S.H., Lee, W.I., 2018. Analysis of Thermal Properties and Heat Transfer Mechanisms for Polyurethane Foams Blown with Water. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 132(2), 1253-1262.
 16. Serrano, A., Borreguero, A.M., Garrido, I., Rodríguez, J.F., Carmona, M., 2016. Reducing Heat Loss Through the Building Envelope by Using Polyurethane Foams Containing Thermoregulating Microcapsules. *Applied Thermal Engineering*, 103, 226-232.
 17. Amaral, C., Vicente, R., Eisenblätter, J., Marques, P.A.A.P., 2017. Thermal Characterization of Polyurethane Foams with Phase Change Material. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 29(2), 1-7.
 18. Estravis, S., Tirado-Mediavilla, J., Santiago-Calvo, M., Ruiz-Herrero, J.L., Villafaña, F., Rodríguez-Pérez, M.Á., 2016. Rigid Polyurethane Foams with Infused Nanoclays: Relationship Between Cellular Structure and Thermal Conductivity. *European Polymer Journal*, 80, 1-15.
 19. Nazeran, N., Moghaddas, J., 2017. Synthesis and Characterization of Silica Aerogel Reinforced Rigid Polyurethane Foam for Thermal Insulation Application. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 461, 1-11.
 20. Wi, S., Berardi, U., Di Loreto, S., Kim, S., 2020. Microstructure and Thermal Characterization of Aerogel-graphite Polyurethane Spray-foam Composite for High Efficiency Thermal Energy Utilization. *Journal of Hazardous Materials*, 122656.
 21. Septevani, A.A., Evans, D.A., Annamalai, P.K., Martin, D.J., 2017. The Use of Cellulose Nanocrystals to Enhance the Thermal Insulation Properties and Sustainability of Rigid Polyurethane Foam. *Industrial Crops and Products*, 107, 114-121.
 22. Piszczyk, Ł., Strankowski, M., Danowska, M., Hejna, A., Haponiuk, J.T., 2014. Rigid Polyurethane Foams from a Polyglycerol-based

- Polyol. *European Polymer Journal*, 57, 143-150.
23. Cao, Z.J., Liao, W., Wang, S.X., Zhao, H.B., Wang, Y.Z., 2019. Polyurethane Foams with Functionalized Graphene Towards High Fire-Resistance, Low Smoke Release, Superior Thermal Insulation. *Chemical Engineering Journal*, 361, 1245-1254.
 24. Du, X., Qiu, J., Deng, S., Du, Z., Xu C., Wang, H., 2021. Flame-retardant and Solid-solid Phase Change Composites Based on Dopamine-decorated BP Nanosheets/Polyurethane for Efficient Solar-to-thermal Energy Storage, *Renewable Energy*, 164, 1-10.
 25. Zhao, J., Xu, L., Su, Y., Yu, H., Liu, H., Qian, S., Zheng, W., Zhao, Y., 2021. Zr-MOFs Loaded on Polyurethane Foam by Polydopamine for Enhanced Dye Adsorption, *Journal of Environmental Science*, 11, 177-188.
 26. Andersons, J., Kirpluks, M., Cabulis, P., Kalnins, K., Cabulis, U., 2020. Bio-based Rigid High-density Polyurethane Foams as a Structural Thermalbreak Material, *Construction and Building Material*, 260-120471.
 27. Zeng, S., Xing, C., Chen, L., Xu, L., Li, B., Zhang, S., 2020. Green Flame-retardant Flexible Polyurethane Foam Based On cyclodextrin, *Polymer Degradation and Stability*, 178,109170.

Bir Top ve Çubuk Sisteminin Ayırıklaştırılmış Geri Adımlamalı Kayan Kipli Kontrolü

Barış ATA*¹

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 22.09.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Bu çalışmada, eksik eyleyicili mekanik sistemlerin bir örneği olan top ve çubuk sistemi için bir ayırıklaştırılmış geri adımlamalı kayan kipli kontrol kuralı tasarlanmıştır. Kayan kipli kontrol ve geri adımlamalı kontrol yöntemlerini birleştiren ve bir ayırıklaştırma algoritması ile bu yöntemin eksik eyleyicili sistemlere uygulanmasını sağlayan ayırıklaştırılmış geri adımlamalı kayan kipli kontrol yöntemi top ve çubuk sisteminin kontrolünde kullanılmıştır. Kontrolörün tasarım yöntemi Lyapunov teoremine dayandığı için sistemin kararlılığı garanti altına alınmıştır. Tasarlanan kontrolörün etkinliği benzetim çalışmaları ile test edilmiştir. Benzetim bulguları ayırıklaştırılmış geri adımlamalı kayan kipli kontrol yönteminin geleneksel ayırıklaştırılmış kayan kipli kontrol yöntemi ile karşılaştırıldığında dış bozululara karşı etkili bir kontrol sinyali ürettiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Eksik eyleyicili mekanik sistemler, Top ve çubuk sistemi, Kayan kipli kontrol, Geri adımlamalı kontrol

Decoupled Backstepping Sliding Mode Control of a Ball and Beam System

Abstract

In this study, a decoupled backstepping sliding mode controller is designed for a ball and beam system as an example of underactuated mechanical systems. The decoupled backstepping sliding mode control method which is a combination of backstepping and sliding mode with a decoupling algorithm is considered to control a ball and beam system. The stability of the system is guaranteed by the design procedure of the controller which is based on the Lyapunov theorem. The effectiveness of the designed controller is verified by simulation tests. Simulation results show that the decoupled backstepping sliding method provides a robust control signal under external disturbances compared to the conventional decoupled sliding mode control method.

Keywords: Underactuated mechanical systems, Ball and beam system, Sliding mode control, Backstepping control

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Barış ATA, bata@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Serbestlik derecesinden daha az sayıda eyleyiciye sahip olan sistemler eksik eyleyicili sistemler olarak tanımlanır. Eksik eyleyicili sistemler daha az sayıda eyleyici ile kontrol edildiklerinden maliyetin ve sistem karmaşıklığının azaltılması amacıyla robotik uygulamaları [1], su altı araçları [2] ve uzay araçları [3] gibi gerçek uygulamalarda da kullanılmaktadır. Bu nedenle eksik eyleyicili mekanik sistemlerin kontrolü günümüzde de aktif bir çalışma alanı olmaya devam etmektedir [4-6]. Ancak eksik eyleyicili mekanik sistemlerin kontrolü tam eyleyicili sistemlere göre daha karmaşık bir problem ortaya koymaktadır. Bu nedenle arabalı ters sarkaç ve top ve çubuk sistemi gibi laboratuvar cihazları eksik eyleyicili mekanik sistemlere birer örnek olarak kontrol yöntemlerinin test edilmesinde ve karşılaştırılmasında sıklıkla kullanılmaktadır [7,8].

Top ve çubuk sistemi doğrusal ve kararlı olmayan yapısıyla birçok klasik ve modern kontrol yönteminin test edilmesinde araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir [9-10]. Ayrıca uçakların iniş sırasında yatay dengesinin sağlanması gibi gerçek kontrol problemleri de bu sistem sayesinde modellenabilmektedir [11]. Sistem açısı bir DC motor tarafından kontrol edilen bir çubuk ve bu çubuğun üzerinde kaymadan yuvarlanan bir toptan meydana gelmektedir. Dolayısıyla sistemde DC motorun çalışmasını sağlayan bir voltaj girişine karşılık çubuğun açısı ve topun konumunu ifade eden iki ayrı çıkış bulunmaktadır. Literatürde top ve çubuk sisteminin kontrolü için lineer kuadratik regülatör [12], PID [13], kayan kipli kontrol [14] ve geri adımlamalı kayan kipli kontrol [15] gibi birçok kontrol yaklaşımı önerilmiştir.

Geri adımlamalı kontrol yöntemi Lyapunov kararlılık teoremine dayanan bir kontrol yaklaşımıdır [16]. Burada sistemin kararlılık analizinde kullanılan Lyapunov fonksiyonu ve sistemi kontrol etmek için kullanılan kontrol kuralı özinelemeli sistematik bir prosedür ile belirlenmektedir [17]. Kontrol kuralının belirlenmesi doğrudan Lyapunov teoremine dayandığı için sistemin kararlılığı da garanti altına

alınmaktadır. Literatürde geri adımlamalı kontrol yönteminin insansız hava araçları [18], su altı araçları [19] ve robotik [20] gibi karmaşık sistemlerin kontrolünde kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca geri adımlamalı kontrol yöntemi belirsizliklere ve bozuculara karşı etkili kontrol kurallarının tasarlanmasında kayan kipli kontrol yöntemi ile birlikte de kullanılabilir [21,22]

Uygun şartlar altında belirsizliklere ve bozuculara karşı etkili bir performans sağlayan bir yöntem olarak bilinen kayan kipli kontrol, değişken yapıli kontrol yönteminin özelleşmiş bir türüdür [23]. Geleneksel kayma kipli kontrol metodu erişme evresi ve kayma evresi olarak adlandırılan iki temel evreden oluşmaktadır. Erişim evresinde sistem durumları başlangıç konumlarından daha önceden tanımlanmış olan bir kayma yüzeyine doğru harekete zorlanmaktadır. Erişim evresi sistem durumlarının kayma yüzeyi üzerinde denge noktasına doğru hareket ettiği kayma evresi tarafından takip edilmektedir [24]. Sistem kayma yüzeyi üzerindeyken bozuculara karşı duyarsızdır [25].

Geleneksel kayan kipli kontrol yönteminin en önemli dezavantajlarından biri çatırdama problemi olarak adlandırılan kontrol sinyalindeki yüksek frekanslı salınım etkisidir [26]. Bir diğer dezavantaj ise bu yöntemin yüksek bağlaşıklık yapıları nedeniyle eksik eyleyicili mekanik sistemlere doğrudan uygulanamamasıdır. Bu sorunu aşmak için eksik eyleyicili mekanik sistemlerin kontrolünde ayırıklaştırılmış kayma kipli kontrol (AKKK) yöntemi kullanılabilir [27]. AKKK yönteminin temel yaklaşımı sistemi iki alt sisteme ayırıp bunların her biri için farklı birer kayma yüzeyi tanımlamaktır. Dahası bu ayırıklaştırma yaklaşımı geri adımlamalı kayan kipli kontrol yöntemine de uygulanabilmektedir [28].

Bu çalışmada Ata ve Çoban [28] tarafından iki serbestlik derecesine sahip eksik eyleyicili mekanik sistemlerin kontrolü için önerilmiş olan ayırıklaştırılmış geri adımlamalı kayan kipli kontrol (AGKKK) yaklaşımı kullanılarak top ve çubuk sistemi için bir kontrolör tasarlanmıştır. Etkinlik ve performansının incelenebilmesi için yöntem

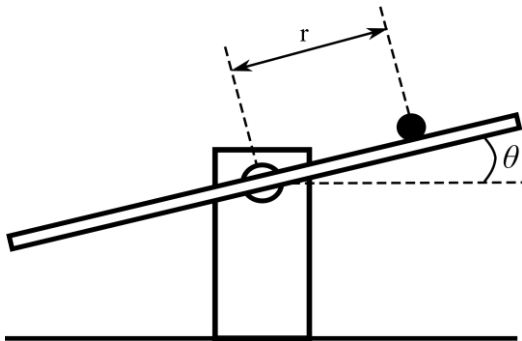
benzetim çalışmalarıyla Lo ve Kuo [27] tarafından önerilen AKKK metodu ile karşılaştırılmış ve her iki yöntemin bozucu girişe karşı tepkisi incelenmiştir.

Çalışmanın 2. bölümünde benzetim çalışmalarında kullanılan top ve çubuk sisteminin matematiksel modeli tanıtılmış ardından ayrıklaştırılmış kayan kipli kontrol ve ayrıklaştırılmış geri adımalmalı kayan kipli kontrol yöntemleri ile kontrolör tasarım adımları ele alınmıştır. 3. bölümde benzetim çalışmaları ile elde edilen karşılaştırma bulgular sunulmuş, 4. bölümde ise çalışmadan elde edilen sonuçlar ve gelecek çalışmalar için önerilere yer verilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Top ve Çubuk Sisteminin Matematiksel Modeli

Top ve çubuk sistemi, bir top, topun üzerinde yer değiştirdiği bir çubuk ve bu çubuğu hareket ettiren bir DC motordan oluşan mekanik bir sistemdir. Top ve çubuk sisteminin parametrik gösterimi Şekil 1’de sunulmuştur. Çubuğun yatay düzlem ile yaptığı açı neticesinde top, çubuk ile temasını koruyarak yuvarlanmaktadır. Sistemin kontrol hedefi çubuğun açısı vasıtasıyla topun konumunu denetlemektir. Dolayısıyla sistem biri çubuğun dairesel hareketi diğeri ise topun çubuk üzerindeki hareketi olmak üzere iki serbestlik derecesine sahiptir. Ancak bunlardan sadece çubuğun hareketi bir giriş sinyali ile denetlenebildiği için top ve çubuk sistemi eksik eyleyicili mekanik sistemlere bir örnek oluşturmaktadır.



Şekil 1. Top ve çubuk sistemi

Çubuğun açısı θ , topun konumu ise r olarak ele alınırsa sistemin hareket denklemleri Eşitlik 1 ve 2’de verilen bağıntılar ile ifade edilebilir [29].

$$\left(\frac{J_C}{R^2} + m\right)\ddot{r} + mg \sin(\theta) - mr\dot{\theta}^2 = 0 \quad (1)$$

$$(mr^2 + J_C + J_T)\ddot{\theta} + 2mr\dot{r}\dot{\theta} + mgr \cos(\theta) = \tau \quad (2)$$

Burada J_C çubuğun eylemsizlik momenti; m , R ve J_T sırasıyla topun kütlesi, çapı ve eylemsizlik momenti; g yer çekimi ivmesi ve τ ise çubuğa uygulanan kuvvet momentidir.

Top ve çubuk sistemine uygulanan kontrol sinyali u ile çubuğa uygulanan kuvvet momenti τ arasında dönüşüm için Eşitlik 3’te verilen bağıntı kullanılabilir [29]:

$$\tau = 2mr\dot{\theta} + mgr \cos(\theta) + (mr^2 + J_C + J_T)u \quad (3)$$

Sistemin durumları $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [r \ \dot{r} \ \theta \ \dot{\theta}]^T$ olarak tanımlanırsa, Eşitlik 1 ve 2’de verilen hareket denklemleri ile Eşitlik 3’te verilen kontrol sinyali dönüşüm bağıntısı yardımıyla top ve çubuk sisteminin durum denklemleri Eşitlik 4’deki gibi tanımlanabilir [27,29]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= \frac{M}{J_T / R^2 + M} (x_1(t)x_4^2(t) - g \sin(x_3(t))) \\ \dot{x}_3(t) &= x_4(t) \\ \dot{x}_4(t) &= u(t) + \epsilon(t) \end{aligned} \quad (4)$$

Burada $\epsilon(t)$ dış bozucuların ve belirsizliklerin toplamını ifade etmektedir ve $|\epsilon(t)| \leq \epsilon_{max}$ ile sınırlı olduğu varsayılmaktadır.

2.2. Ayrıklaştırılmış Kayan Kipli Kontrol

Kayan kipli kontrol değişken yapıli kontrol yönteminin özel bir türüdür ve model belirsizlikleri ile dış bozuculara karşı gürbüz bir kontrol yöntemi olarak doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde sıklıkla kullanılmaktadır [23,24].

Klasik kayan kipli kontrol yönteminin temel iki evreden oluşmaktadır. Öncelikle kapalı çevrim sistemin tepkisine göre durum uzayında bir kayma yüzeyi tasarlanır. İlk evrede sonsuz anahtarlama frekansına sahip bir geri besleme sinyali vasıtasıyla sistem tepkisi bu yüzeye çekilir. İkinci evrede ise sistem tepkisi yüzey üzerinde tutularak denge noktasına doğru kaydırılır. Bu evreler erişme evresi ve kayma evresi olarak tanımlanmaktadır. İdeal kayan kipli kontrol yaklaşımında sistem, kayma yüzeyine ulaştıktan sonra bu yüzeyde kalır ve bozuculara karşı dirençli bir davranış ortaya koyar [23,24].

Klasik kayan kipli kontrol yöntemi kanonik formda ifade edilebilen sistemlerin kontrolü için uygundur ancak eksik eyleyicili sistemlere doğrudan uygulanamamaktadır. Top ve çubuk sistemi gibi 4. dereceden tek girişli eksik eyleyicili sistemler Eşitlik 5'teki gibi tanımlanabilir:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= \phi_1(x, t) + \gamma_1(x, t)u(t) + \epsilon_1(t) \\ \dot{x}_3(t) &= x_4(t) \\ \dot{x}_4(t) &= \phi_2(x, t) + \gamma_2(x, t)u(t) + \epsilon_2(t)\end{aligned}\quad (5)$$

Burada $x=[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ durum vektörü; $\phi_1(x, t)$, $\phi_2(x, t)$, $\gamma_1(x, t)$, ve $\gamma_2(x, t)$ doğrusal olmayan fonksiyonlar ve $u(t)$ kontrol sinyalini ifade ederken $\epsilon_1(t)$ ve $\epsilon_2(t)$ belirsizlik ve bozucuların toplamını ifade etmektedir. Ayrıca $\epsilon_1(t)$ ile $\epsilon_2(t)$ 'nin $|\epsilon_1(t)| \leq \epsilon_{1\max}$ ve $|\epsilon_2(t)| \leq \epsilon_{2\max}$ ile sınırlı olduğu ve $\epsilon_{1\max}$ ve $\epsilon_{2\max}$ 'in pozitif sabitler olduğu varsayılmaktadır.

Eşitlik 5'teki gibi eksik eyleyicili sistemlerin kayan kipli kontrolü için AKKK metodu kullanılabilir [27,30]. AKKK yönteminin temel yaklaşımı sistemi iki alt sisteme ayırıp bunların her biri için farklı birer kayma yüzeyi tanımlamaktır. Eşitlik 5'te verilen sistemin çıkışları $y_1(t)=x_1(t)$ ve $y_2(t)=x_3(t)$, beklenen çıkışlar ise $y_{d1}(t)$ ve $y_{d2}(t)$ olarak tanımlandığında her iki çıkış için elde edilen izleme hataları ve kayma yüzeyleri Eşitlik 6-9'da verilmiştir.

$$e_1(t) = y_1(t) - y_{d1}(t) \quad (6)$$

$$s_1(t) = k_1 e_1(t) - \dot{e}_1(t) \quad (7)$$

$$e_2(t) = y_2(t) - y_{d2}(t) \quad (8)$$

$$s_2(t) = k_2 e_2(t) - \dot{e}_2(t) \quad (9)$$

Burada $e_1(t)$ ve $e_2(t)$ izleme hataları; $s_1(t)$ ve $s_2(t)$ kayma yüzeyleri; k_1 ve k_2 ise reel pozitif sabitlerdir.

Kayan kipli kontrol yönteminin temel amacı kayma yüzeyini sifıra doğru yaklaştırmaktır. Bu nedenle kayma yüzeylerinden birinin değerini bir ara değişken yardımıyla diğer kayma yüzeyine aktararak her iki alt sistemi eş zamanlı olarak kontrol etmek mümkündür. Eşitlik 7'de verilen kayma yüzeyi $s_1(t)$ değerinden elde edilen transfer değişkeni $z(t)$ ve bu değişken yardımıyla Eşitlik 9'da verilen kayma yüzeyi $s_2(t)$ 'nin ayırıklaştırılmış kayma yüzeyine dönüşüm bağıntıları sırasıyla Eşitlik 10 ve 11'de verilmiştir.

$$z(t) = \text{sat} \left(\frac{s_1(t)}{\Delta_z} \right) z_u, \quad 0 < z_u < 1 \quad (10)$$

$$s_2(t) = k_2 (e_2(t) - z(t)) + \dot{e}_2(t) \quad (11)$$

Burada z_u , $z(t)$ 'nin üst limitini; Δ_z ise sınır seviyesini ifade eden sabitlerdir. Satürasyon fonksiyonu $\text{sat}(\kappa)$ ise Eşitlik 12 ile tanımlanmıştır:

$$\text{sat}(\kappa) = \begin{cases} \text{sign}(\kappa), & |\kappa| \geq 1 \\ \kappa, & |\kappa| < 1 \end{cases} \quad (12)$$

Böylece $z(t)$ 'nin üst limiti z_u , $s_2(t)$ 'nin sınırlı olmasını garanti altına alacak ve transfer değişkeni sayesinde $s_1(t)$ 'nin sifıra ulaşmasının ardından $s_2(t)$ de sifıra yakınsayacaktır.

Ayırıklaştırılmış kayan kipli kontrolör tasarımı için Lyapunov fonksiyonu ve bu fonksiyonun zaman bağlı türevi Eşitlik 13 ve 14'te verilmiştir.

$$V(s_2) = \frac{1}{2} s_2^2(t) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(s_2) &= s_2(t) \dot{s}_2(t) \\ &= s_2(t) (k_2 (\dot{e}_2(t) - \dot{z}(t)) + \ddot{e}_2(t)) \\ &= s_2(t) (k_2 (\dot{e}_2(t) - \dot{z}(t))) \\ &\quad + s_2(t) (\ddot{y}_2(t) - \ddot{y}_{d2}(t)) \\ &= s_2(t) (k_2 (\dot{e}_2(t) - \dot{z}(t)) + \dot{x}_4 - \ddot{y}_{d2}(t)) \\ &= s_2(t) [k_2 (\dot{e}_2(t) - \dot{z}(t)) \\ &\quad + \phi_2(x) + \gamma_2(x) u_s(t) + \epsilon_2(t) - \ddot{y}_{d2}(t)] \end{aligned} \quad (14)$$

Eşitlik 14'te verilen Lyapunov fonksiyonunun türevinin negatif tanımlı olabilmesi için gereken kontrol kuralı $u_s(t)$ Eşitlik 15'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} u_s(t) &= \frac{1}{\gamma_2(x)} [-k_2 (\dot{e}_2(t) - \dot{z}(t)) + \ddot{y}_{d2}(t)] \\ &\quad - \frac{1}{\gamma_2(x)} (\phi(x) + K \text{sign}(s_2(t))) \end{aligned} \quad (15)$$

Burada K pozitif sabiti $K > \epsilon_{2\max} \geq |\epsilon_2(t)|$ olmalıdır. Eşitlik 15'in Eşitlik 14'te yerine koyulmasıyla Eşitlik 16 elde edilir:

$$\begin{aligned} \dot{V}(s_2) &= s_2(t) (-K \text{sign}(s_2(t)) + \epsilon_2(t)) \\ &= -K s_2(t) \text{sign}(s_2(t)) + s_2(t) \epsilon_2(t) \\ &\leq -K |s_2(t)| + s_2(t) \epsilon_{2\max} \\ &\leq -|s_2(t)| (K - \epsilon_{2\max}) \\ &< 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Lyapunov kararlılık teoremine göre $\dot{V}(s_2)$ negatif tanımlı olduğu için sistem kayma yüzeyine ulaşacak ve yüzey üzerinde kalacaktır. Böylece sistemin asimptotik kararlılığı garanti altına alınmıştır.

2.3. Ayrıklaştırılmış Geri Adımlamalı Kayan Kipli Kontrol

Geri adımlama yöntemi, kontrol kuralının belirlenmesinde yinelemeli Lyapunov kararlılık

teoremini kullanan bir doğrusal olmayan kontrol metodudur [16]. Geri adımlamalı kontrol yöntemi, model belirsizliklerine ve dış bozuculara karşı etkili bir kontrol kuralının tasarlanmasında sıklıkla kayan kipli kontrol yöntemi ile birlikte kullanılmaktadır [31]. Ancak tıpkı kayan kipli kontrol yönteminde olduğu gibi geri adımlamalı kayan kipli kontrol yöntemi de kanonik formdaki sistemlere uygulanabilirken Eşitlik 5'te verilen eksik eyleyicili mekanik sistemlerin kontrolünde doğrudan kullanılamamaktadır. Bu nedenle eksik eyleyicili sistemlerin geri adımlamalı kayan kipli kontrolü için AGKKK yöntemi kullanılabilir [29].

Eşitlik 5'te verilen eksik eyleyicili sistemi için geri adımlamalı kayan kipli kontrol kuralı tasarımının ilk adımında Eşitlik 8'de verilen izleme hatası kullanılarak seçilen Lyapunov fonksiyonu ve bu fonksiyonun zamana bağlı türevi bağıntıları sırasıyla Eşitlik 17 ve 18'de verilmiştir.

$$V_{B1}(e_2) = \frac{1}{2} e_2^2(t) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{B1}(e_2) &= e_2(t) \dot{e}_2(t) \\ &= e_2(t) (x_4(t) - y_{d2}(t)) \end{aligned} \quad (18)$$

Tasarımın bu aşamasında sistemin çıkışlarına karşılık gelen iki farklı kayma yüzeyi aşağıdaki gibi seçilebilir:

$$s_{B1}(t) = c_1 e_1(t) + \dot{e}_1(t) \quad (19)$$

$$s_{B2}(t) = c_1 e_2(t) + \dot{e}_2(t) \quad (20)$$

Burada c_1 ve c_2 pozitif sabitlerdir.

Sistem durumlarından $x_4(t)$ sanal kontrol sinyali olarak seçilmiş ve Eşitlik 21'de verilen bağıntı ile yeniden tanımlanmıştır.

$$x_4(t) = s_{B2}(t) - c_2 e_2(t) + \dot{y}_{d2}(t) \quad (21)$$

Eşitlik 21'de verilen $x_4(t)$ 'nin Eşitlik 18'de yerine konulmasıyla Eşitlik 22 elde edilir:

$$\dot{V}_{B1}(e_2) = e_2(t) s_{B2}(t) - c_2 e_2^2(t) \quad (22)$$

$\dot{V}_{B1}(e_2) = -c_2 e_2^2(t)$ bağıntısı yalnızca $s_{B2}(t) = 0$ olması durumunda negatif tanımlı olacaktır. Bu nedenle bir sonraki adımda kararlılığın garanti altına alınabilmesi için seçilen Lyapunov fonksiyonu Eşitlik 23'te verilmiştir.

$$V_{B2}(e_2) = V_{B1}(e_2) + \frac{1}{2} s_{B2}^2(t) \quad (23)$$

Eşitlik 22'nin yardımıyla $V_{B2}(e_2)$ nin zamana bağlı türevi Eşitlik 24'te elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{B2}(e_2) &= \dot{V}_{B1}(e_2) + s_{B2}(t) \dot{s}_{B2}(t) \\ &= e_2(t) s_{B2}(t) - c_2 e_2^2(t) \\ &\quad + s_{B2}(t) (\phi_2(x) + \gamma_2(x) u_B(t)) \\ &\quad + s_{B2}(t) (\dot{e}_2(t) + c_2 \dot{e}_2(t) - \ddot{y}_{d2}(t)) \end{aligned} \quad (24)$$

Burada $u_B(t)$ geri adımlamalı kayan kipli kontrol kuralıdır ve $\dot{V}_{B2}(e_2)$ 'nin negatif tanımlı olmasını sağlamak için tasarlanan kontrol kuralı Eşitlik 25'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} u_B(t) &= \frac{1}{\gamma_2(x)} (-\phi_2(x) - e_2(t) - c_2 \dot{e}_2(t)) \\ &\quad + \frac{1}{\gamma_2(x)} (\ddot{y}_{d2}(t) - c_3 s_{B2}(t)) \\ &\quad - \frac{1}{\gamma_2(x)} (B \text{sign}(s_{B2}(t))) \end{aligned} \quad (25)$$

Burada c_3 ve B pozitif sabitlerdir. Ayrıca B pozitif sabiti $B > \epsilon_{2\max} \geq |\epsilon_2(t)|$ olacak şekilde seçilmelidir.

Eşitlik 25'in Eşitlik 24'te yerine koyulmasıyla Eşitlik 26 elde edilir:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{B2}(e_2) &= -c_2 e_2^2(t) - c_3 s_{B2}^2(t) \\ &\quad + \epsilon_2(t) s_{B2}(t) - B |s_{B2}(t)| \\ &\leq -c_2 e_2^2(t) - c_3 s_{B2}^2(t) \\ &\quad - |s_{B2}(t)| (B - \epsilon_{2\max}) \\ &< 0 \end{aligned} \quad (26)$$

$B > \epsilon_{2\max} \geq |\epsilon_2(t)|$ koşulunun sağlanması durumunda $\dot{V}_{B2}(e_2)$ negatif tanımlı olacaktır. Böylece Lyapunov kararlılık teoremine göre sistemin asimptotik kararlılığı garanti altına alınmıştır.

Ayrıklaştırılmış bir kontrolör tasarlamak için Eşitlik 19'da verilen kayma yüzeyi $s_{B1}(t)$ değerinden elde edilen transfer değişkeni $z_B(t)$ ve bu değişken yardımıyla tanımlanan ayrıklaştırılmış kayma yüzeyi bağıntıları sırasıyla Eşitlik 27 ve 28'de verilmiştir.

$$z_B(t) = \text{sat} \left(\frac{s_{B1}(t)}{\Delta_{Bz}} \right) z_{Bu}, \quad 0 < z_{Bu} < 1 \quad (27)$$

$$s_d(t) = c_2 (e_2(t) - z_B(t)) + \dot{e}_2(t) \quad (28)$$

Burada z_{Bu} , $z_B(t)$ 'nin üst limitini; Δ_{Bz} ise sınır seviyesini ifade eden sabitlerdir.

Sonuç olarak, Eşitlik 28'de verilen ayrıklaştırılmış kayma yüzeyinin Eşitlik 25'teki kayma yüzeyi $s_{B2}(t)$ 'nin yerine koyulmasıyla elde edilen eksik eyleyicili sistemler için AGKKK kuralı Eşitlik 29'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} u_B(t) &= \frac{1}{\gamma_2(x)} (-\phi_2(x) - e_2(t) - c_2 \dot{e}_2(t)) \\ &\quad + \frac{1}{\gamma_2(x)} (\ddot{y}_{d2}(t) - c_3 s_d(t)) \\ &\quad - \frac{1}{\gamma_2(x)} (B \text{sign}(s_d(t))) \end{aligned} \quad (29)$$

3. BENZETİM BULGULARI

Eşitlik 15'te verilen AKKK ve Eşitlik 25'te verilen AGKKK yöntemlerini karşılaştırmak için benzetim testleri yapılmıştır. Eşitlik 4'te verilen top ve çubuk sisteminin kontrolü için her iki yöntem kullanılarak birer kontrolör tasarlanmış, çatırdama etkisini azaltmak için tasarım aşamasında $\text{sign}(\kappa)$ işaret fonksiyonu yerine $\text{sat}(\kappa)$ fonksiyonu kullanılmıştır. Kontrol amacı topun konumu ve çubuğun açısını başlangıç

durumlarından denge noktasına getirmek olarak belirlenmiştir. Tüm benzetim testlerinde başlangıç değerleri $\theta=60^\circ$, $r=10$ cm olarak seçilirken test süresi 20 s, örnekleme aralığı 0,001 s olarak alınmıştır.

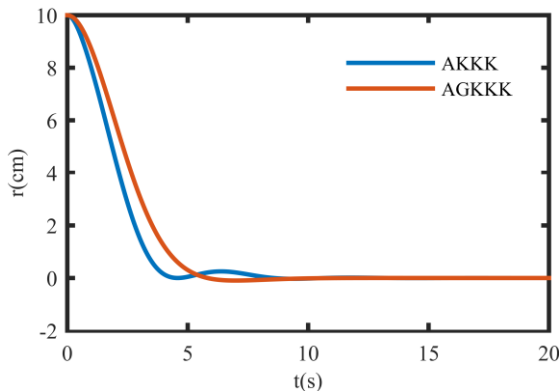
Benzetim testleri sırasında Eşitlik 4'te verilen top ve çubuk sistemi için sistem parametreleri $J_T=2 \times 10^{-6}$, $M=0,05$ kg, $R=0,01$ m ve $g=9,8$ m/s² olarak seçilmiştir [27]. AKKK ve AGKKK yöntemleri için deneme ve yanılma yöntemiyle belirlenmiş olan parametreler ise Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Kontrolör parametreleri

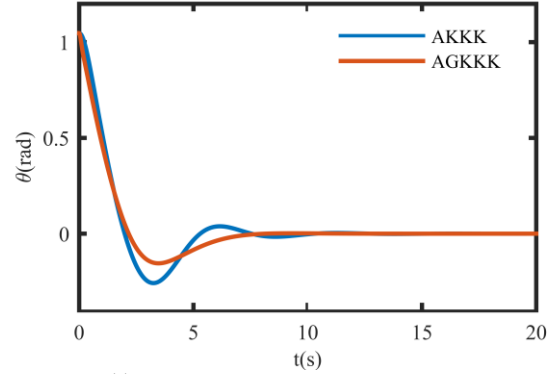
Parametre	Değeri
k_1, c_1	0,5
k_2, c_2	10
c_3	20
K, B	10
Z_{Su}, Z_{Du}	0,94
Δ_{Sz}, Δ_{Bz}	5

İlk benzetim testinde AKKK ve AGKKK yöntemleri Eşitlik 4'te verilen top ve çubuk sistemi üzerinde karşılaştırılmıştır. Bu teste sisteme etki eden bozucuların toplamı $\epsilon(t)=0$ olarak kabul edilmiş, dolayısıyla sisteme herhangi bir bozucu sinyal dahil edilmemiştir.

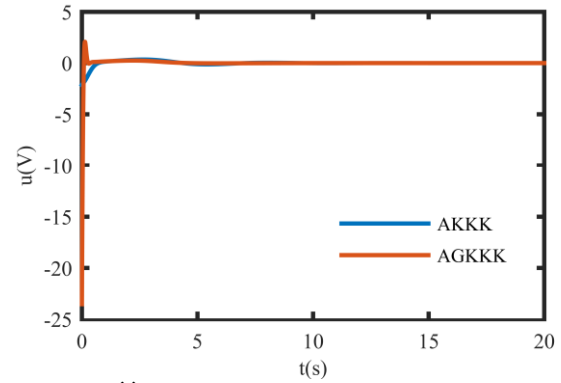
Başlangıç koşulları $\theta=60^\circ$, $r=10$ cm ve bozucuların toplamı $\epsilon(t)=0$ için topun konumu, çubuğun açısı ve kontrol sinyali sırasıyla Şekil 2-4'te verilmiştir.



Şekil 2. $\epsilon(t) = 0$ için topun konumu

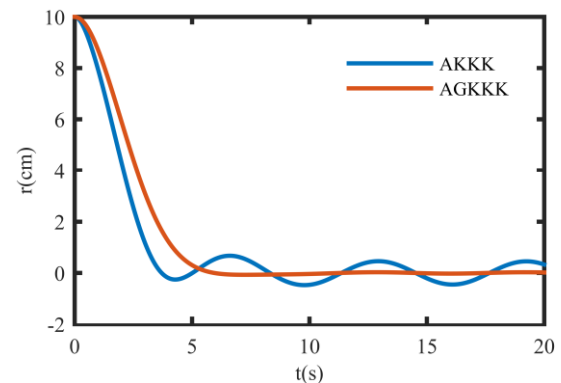


Şekil 3. $\epsilon(t)=0$ için çubuğun açısı

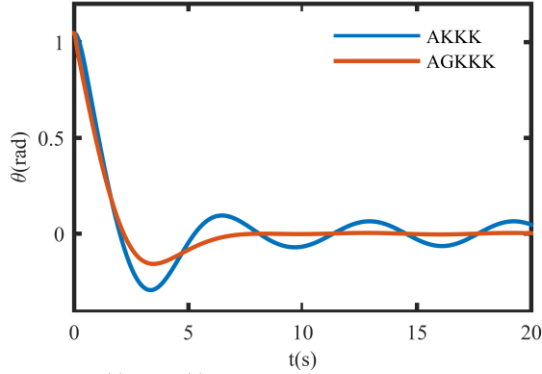


Şekil 4. $\epsilon(t)=0$ için kontrol sinyali

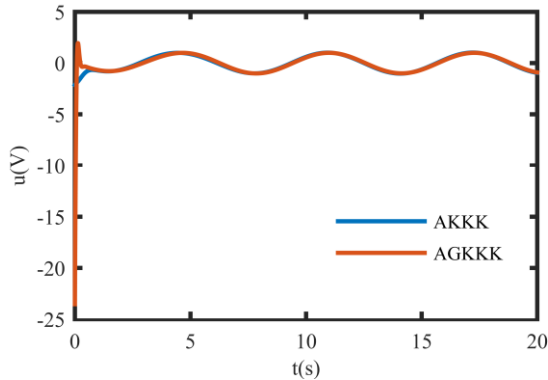
Şekil 2'de görüldüğü gibi her iki kontrolör de topun konumunu başarıyla kontrol etmektedir. Ancak AKKK için yerleşme zamanı 7,07 s iken AGKKK için 5,20 s olarak ölçülmüştür. Bu nedenle konum kontrolü için AGKKK'ün daha başarılı bir kontrol sinyali ürettiği görülmektedir.



Şekil 5. $\epsilon(t)=\sin(t)$ için topun konumu



Şekil 6. $\epsilon(t)=\sin(t)$ için çubuğun açısı



Şekil 7. $\epsilon(t)=\sin(t)$ için kontrol sinyali

Şekil 3 incelendiğinde her iki kontrolörün de yaklaşık olarak aynı zamanda çubuğun açısını kontrol etmeyi başardığı ancak AGKKK'nin daha düşük yüzde aşımı ile sistemi kontrol etmeyi başardığı görülmektedir.

İkinci benzetim testinde daha zorlayıcı bir problem yaratmak için sisteme dış bozucu olarak $\epsilon(t)=\sin(t)$ büyüklüğünde bir sinyal dahil edilmiştir. Başlangıç koşulları $\theta=60^\circ$, $r=10$ cm ve bozucuların toplamı $\epsilon(t)=\sin(t)$ için topun konumu, çubuğun açısı ve kontrol sinyali sırasıyla Şekil 5-7'de verilmiştir.

Şekil 5 ve 6'da görüldüğü gibi artan dış bozucu etkisi ile birlikte AKKK hem topun pozisyonunu hem de çubuğun açısını kontrol etmekte başarısız olurken AGKKK dış bozuculara karşı etkili bir kontrol sinyali sunarak hem topun konumunu hem de çubuğun açısını stabilize etmeyi başarmıştır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada eksik eyleyicili mekanik sistemlere örnek teşkil eden bir top ve çubuk sisteminin ayırıklaştırılmış geri adımlamalı kayan kipli kontrol (AGKKK) metodu ile bir denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan denetleyicinin kararlılığın ve etkinliği benzetim çalışmaları ile incelenmiştir. Benzetim sonuçları dış bozucu etkisinin olmadığı durumlarda AGKKK'nin geleneksel ayırıklaştırılmış kayan kipli kontrol (AKKK) yöntemine göre daha etkin bir kontrol sinyali oluşturduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca dış bozucu etkisi altında AKKK yöntemi sistemi kontrol etmede başarısız olurken AGKKK yöntemi hem de topun pozisyonunu hem de çubuğun açısını başarıyla kontrol etmiş ve dış bozuculara karşı etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Benzetim bulgularının tatmin edici sonuçlar ortaya koyması gelecek çalışmalarda bu yöntemin fiziksel bir top ve çubuk sisteminin kontrolünde kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca bu yöntemin farklı eksik eyleyicili mekanik sistemler üzerinde kullanılması mümkündür. Bu çalışmada kontrolör parametreleri deneme yanılma metodu ile belirlenmiştir. AGKKK parametrelerinin belirlenmesinde çeşitli optimizasyon tekniklerinin kullanılması da gelecek çalışmalar için ilgi çekici bir başlık olacaktır.

5. KAYNAKLAR

1. Oryschuk, P., Salerno, A., Al-Husseini, A.M., Angeles, J., 2009. Experimental Validation of an Underactuated Two-wheeled Mobile Robot. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 14(2), 252–257.
2. Woods, S.A., Bauer, R.J., Seto, M.L., 2012. Automated Ballast Tank Control System for Autonomous Underwater Vehicles. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 37(4), 727–739.
3. Olfati-Saber, R., 2001. Nonlinear Control of Underactuated Mechanical Systems with Application to Robotics and Aerospace Vehicles. Doktora Tezi, Massachusetts Institute

- of Technology. Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, 316.
4. Choukchou-Braham, A., Cherki, B., Djemai, M., Busawon, K., 2013. Analysis and Control of Underactuated Mechanical Systems. Springer-Verlag, New York.
 5. Liu, Y., Yu, H., 2013. A Survey of Underactuated Mechanical Systems. IET Control Theory and Applications, 7(7), 921–935.
 6. Huang, X., Ralescu, A. L., Gao, H., Huang, H., 2019. A Survey on the Application of Fuzzy Systems for Underactuated Systems. Journal of Systems and Control Engineering, 233(3), 217–244.
 7. She, J., Zhang, A., Lai, X., Wu, M., 2012. Global Stabilization of 2-DOF Underactuated Mechanical Systems-an Equivalent-input-disturbance Approach. Nonlinear Dynamics, 69(1–2), 495–509.
 8. Shah, I., Rehman, F.U., 2018. Smooth Second Order Sliding Mode Control of a Class of Underactuated Mechanical Systems. IEEE Access, 6(c), 7759–7771.
 9. Mehedi, I.M., Al-Saggaf, U.M., Mansouri, R., Bettayeb, M., 2019. Two Degrees of Freedom Fractional Controller Design: Application to the Ball and Beam System. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 135, 13–22.
 10. Yang, J., Wang, Z.H., 2010. Adaptive Robust Dissipative Design on Stability Control for Ball and Beam System. International Conference on Computer and Automation Engineering, ICCAE 2010, 4, 68–71.
 11. Guinaldo, M., Vargas, H., Sánchez, J., Sanz, E., Dormido, S., 2009. Web-based Control Laboratory: The Ball and Beam System. IFAC Proceedings Volumes 8, 174–179.
 12. Choudhary, M.K., Naresh Kumar, G., 2016. ESO Based LQR Controller for Ball and Beam System. IFAC-PapersOnLine, 49(1), 607–610.
 13. Hirschorn, R.M., 2002. Incremental Sliding Mode Control of the Ball and Beam. IEEE Transactions on Automatic Control, 47(10), 1696–1700.
 14. Meenakshipriya, B., Kalpana, K., 2014. Modelling and Control of Ball and Beam System Using Coefficient Diagram Method (CDM) Based PID Controller. IFAC Proceedings Volumes, 3, 620–626.
 15. Moezi, S. A., Zakeri, E., Eghtesad, M., 2019. Optimal Adaptive Interval Type-2 Fuzzy Fractional-order Backstepping Sliding Mode Control Method for Some Classes of Nonlinear Systems. ISA Transactions, 93, 23–39.
 16. Freeman, R.A., Kokotović, P., 1996. Robust Nonlinear Control Design. Birkhäuser, Boston.
 17. Krstic, M., Kokotovic, P.V., Kanellakopoulos, I., 1995. Nonlinear and Adaptive Control Design. Wiley, New York.
 18. Madani, T., Benallegue, A., 2006. Backstepping Control for a Quadrotor Helicopter. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 3255–3260.
 19. Liu, S., Liu, Y., Wang, N., Liu, S., Liu, Y., Wang, N., Wang, N., 2017. Nonlinear Disturbance Observer-based Backstepping Finite-time Sliding Mode Tracking Control of Underwater Vehicles with System Uncertainties and External Disturbances. Nonlinear Dynamics, 88, 465–476.
 20. Pan, Y., Wang, H., Li, X., Yu, H., 2018. Adaptive Command-Filtered Backstepping Control of Robot Arms with Compliant Actuators. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 26(3), 1149–1156.
 21. Bouabdallah, S., Siegwart, R., 2005. Backstepping and Sliding-mode Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2247–2252.
 22. Coban, R., 2017. Backstepping Sliding Mode Tracking Controller Design and Experimental Application to an Electromechanical System. Control Engineering and Applied Informatics, 19(3), 88–96.
 23. Utkin, V., 1977. Variable Structure Systems with Sliding Modes. IEEE Transactions on Automatic Control, 22(2), 212–222.
 24. Utkin, V., 1992. Sliding Modes in Control and Optimization. Springer, Berlin.
 25. Edwards, C., Spurgeon, S., 1998. Sliding Mode Control. CRC Press, London.
 26. Lee, H., Utkin, V.I., 2007. Chattering Suppression Methods in Sliding Mode Control Systems. Annual Reviews in Control, 31(2), 179–188.

27. Lo, J. C., Kuo, Y. H., 1998. Decoupled Fuzzy Sliding-mode Control. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 6(3), 426–435.
28. Ata, B., Coban, R., 2019. Decoupled Backstepping Sliding Mode Control of Underactuated Systems with Uncertainty: Experimental Results. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(8), 7013–7021.
29. Hauser, J., Sastry, S., Kokotovic, P., 1992. Nonlinear Control Via Approximate Input-output Linearization: The Ball and Beam Example. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37(3), 392-398.
30. Coban, R., Ata, B., 2017. Decoupled Sliding Mode Control of an Inverted Pendulum on a Cart: An Experimental Study. 2017 *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 993–997.
31. Lu, C.H., Hwang, Y.R., Shen, Y.T., 2011. Backstepping Sliding Mode Tracking Control of a Vane-type Air Motor X–Y Table Motion System. *ISA Transactions*, 50(2), 278–286.

BN İlavesinin Sıkıştırma Döküm Yöntemi ile Üretilen B₄C/Al Hibrit Kompozitlerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri

Mehmet İPEKOĞLU^{*1}, Amin NEKOUYAN², Önder ALBAYRAK³,
Sabri ALTINTAŞ²

¹Türk-Alman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul

²Boğaziçi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul

³Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin

Geliş tarihi: 12.05.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Yürütülen çalışma kapsamında, bor nitrid (BN) ilavesinin bor karbür (B₄C) ile güçlendirilmiş alüminyum (Al) kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ağırlıkça %5 B₄C katkı olarak hazırlanan alüminyum matris kompozit malzemelere ağırlıkça %3, %5 ve %10 BN ilave edilerek ve 75 MPa basınç altında sıkıştırma döküm yöntemi ile döküm işlemi gerçekleştirilerek BN-B₄C/Al hibrit kompozit malzeme üretilmiştir. Kontrol ve karşılaştırma amacıyla, BN ve B₄C ilavesi olmaksızın alüminyumdan elde edilen numuneler kullanılmış; BN ve B₄C ilavesinin üretilen malzemelerin yoğunlukları üzerine etkileri ve ortalama talaş uzunlukları incelenmiştir. BN katkısının mekanik özellikler üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiş; malzemelerin akma dayanımları, çekme dayanımları ve yüzde uzama miktarları çekme testi yardımıyla belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, Bor nitrid, Bor karbür, Sıkıştırma döküm, Mekanik özellikler

Effect of BN Addition on the Mechanical Properties of B₄C/Al Hybrid Composites Produced via Squeeze Casting Method

Abstract

In this study, effects of boron nitride (BN) addition on the mechanical properties of boron carbide reinforced (B₄C) aluminum (Al) composites were investigated. 3, 5 and 10 wt. %BN were added to Al matrix composites reinforced with 5% B₄C and melts were cast by squeeze casting technique under 75 MPa casting pressure to produce BN-B₄C/Al hybrid composites. Control samples were prepared without any BN and B₄C addition for comparison purposes and effect of BN and B₄C addition on the density and chip lengths of the produced materials were obtained. In order to determine the effect of BN addition on the mechanical properties hardness measurements were conducted and the yield and ultimate tensile strengths and per cent elongation values were determined by tensile testing and results were compared.

Keywords: Aluminum, Boron nitride, Boron carbide, Squeeze casting, Mechanical properties

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Mehmet İPEKOĞLU, ipekoglu@tau.edu.tr

1. GİRİŞ

Metal bir malzemeye takviye amacıyla farklı malzemelerden oluşan parçacık veya fiberlerin eklenmesiyle üretilen metal matriks kompozitler, özellikle malzeme ağırlığının önem taşıdığı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. Bu tür kompozitlerin üretiminde temel amaç; malzemenin sünekliliği ve tokluğu korunurken akma ve çekme dayanımının artırılması ve malzemenin yorulma ve sürünme davranışının iyileştirilmesidir.

Yakıt ekonomisi ve emisyon değerleri gibi nedenlerden ötürü, üretilen kompozit malzemelerin ağırlığının azaltılmasının önem taşıdığı başta havacılık ve otomotiv olmak üzere farklı sektörlerde kullanılan metal matriks kompozit malzemeler, yaygın olarak hafif metallerin matriks malzemesi olarak kullanıldığı kompozitler şeklinde üretilmektedir [4-6]. Bu noktada, demir ve demir alaşımlarına oranla hafif bir metal olması nedeniyle alüminyum, matriks malzemesi olarak özellikle ilgi çekmekte ve endüstride yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Alüminyum metal matriks kompozitler, özellikle düşük yoğunlukları, yüksek mekanik mukavemetleri, korozyon dayanımları, sünek davranış göstermeleri ve iyi işlenebilirlik özellikleri nedeniyle metal matriks malzemeler arasında ön plana çıkmakta [7] ve motor bloğu, süspansiyon takımları, gövde paneli ve yapısal elemanların üretiminde sıklıkla tercih edilmektedir [8]. Alüminyum, dünyada yaygın olarak bulunan ve bu nedenle endüstriyel açıdan düşük maliyetli bir metaldir. Hafifliği, korozyon dayanımı, iyi ısı ve elektrik iletkenliği ve sünekliliğinin yanı sıra geri dönüşüme uygun olması, alüminyumun endüstriyel açıdan yaygın olarak kullanılmasının önünü açan başlıca etkenlerdir [4,9]. Bu sayılan özellikler, alüminyumu metal matriks kompozitlerin üretiminde tercih edilen bir matriks malzemesi haline getirmektedir.

Metal matriks kompozitlerin üretiminde kullanılacak olan takviye malzemesinin; matriks malzemesi olan metal ile uyumu, mekanik özelliklere ve işlenebilirliğe sağlayacağı katkı, kolay tedarik edilebilir olması ve fiyatı katkı

malzemesinin seçiminde önemli etkenlerdir. Bu açılardan değerlendirildiğinde, başta alüminyum olmak üzere metal matriks kompozitlerin [10] üretiminde BN [11], B₄C [12], SiC [13,14], TiC [15], TiB₂ [16], Al₂O₃ [17], Si₃N₄ [18], MgO [19] gibi farklı seramiklerin ve grafitin [20] takviye amaçlı olarak kullanımına sıklıkla rastlanmaktadır. Her ne kadar sürekli fiberlerden oluşan takviye malzemelerinin mekanik özellikler üzerinde daha iyi etki gösterdiği bilirse de parçacık formunda kullanılan takviye malzemeleri özellikle fiyat, uygulama kolaylığı ve izotropik özellikler ortaya koymaları nedeniyle tercih edilmektedir [21-23].

Farklı takviyelerin bir arada kullanımı ile birden fazla özelliğin iyileştirilmesi veya belirli bir amaçla kullanılan takviye malzemesinin neden olduğu bir olumsuzluğu gidermek amacıyla başka bir takviye malzemesinin ilave edilmesi ile üretilen alüminyum hibrit kompozitler, araştırma ve uygulamada giderek yaygınlaşmaktadır. Yürütülen çalışmalar B₄C ilavesinin alüminyumun mekanik özelliklerini iyileştirdiğini ancak işlenebilirliğini olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır [24,25]. Benzer şekilde, alüminyum matriks kompozitlerde mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan SiC nedeniyle azalan işlenebilirliğinin iyileştirilmesinde BN parçacıklarının etkili olduğu literatürde rapor edilmiştir [26].

Bu nedenle; gerçekleştirilen çalışmada akma dayanımı, çekme dayanımı ve sertlik olmak üzere mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla B₄C takviyeli olarak üretilen alüminyum metal matriks kompozitlere BN ilavesinin mekanik özellikler, talaş uzunluğu ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmış, akma ve çekme dayanımı yüksek ve yüksek sertlik değerine sahip alüminyum matriks hibrit kompozitlerin eldesi amaçlanmıştır. Alüminyum matriks hibrit kompozitlerin üretiminde içerdiği avantajlar dolayısıyla sıkıştırma döküm tekniği kullanılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Kullanılan Malzemeler

Üretilen kompozitlerde matriks malzemesi olarak ticari saf alüminyum (Şahinler Metal Tic. Ltd. Şti,

Türkiye), flaks olarak 75 µm boyutlarında ve 3,01 g/cm³ yoğunluğa sahip potasyum florotitanat (K₂TiF₆) (Hongwu International Group Ltd., Çin Halk Cumhuriyeti) kullanılmıştır. Tedarik edilen alüminyuma ait kimyasal analiz sonuçları yazarların daha önceki bir çalışmasında [27], BN taneciklerinin ıslanabilirliğinin artırılması amacıyla kullanılan K₂TiF₆'a ait kimyasal analiz sonuçları ise Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Kullanılan flaksın kimyasal analizi (ağ. %)

Cl	SO ₄	H ₂ O	Mg	Pb
0,050	0,010	0,050	0,001	0,010

SiO ₂	Fe	Ca	K ₂ TiF ₆
0,200	0,020	0,010	>98,000

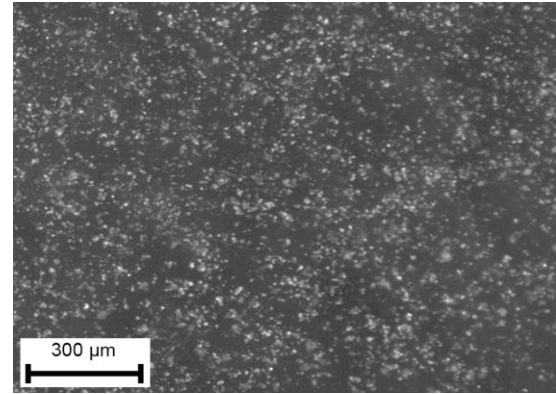
Kompozitlerin hazırlanmasında 65 µm tanecik boyutuna sahip B₄C (Hongwu International Group Ltd., Çin Halk Cumhuriyeti) ve 5 µm tanecik boyutuna sahip BN (Hongwu International Group Ltd., Çin Halk Cumhuriyeti) tozlardan yararlanılmıştır. Çalışma dahilinde B₄C:flaks oranı 1:1 olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu tozlara ait mikroyapı görüntüleri Şekil 1'de sunulmuştur.

2.2. Numunelerin Hazırlanması

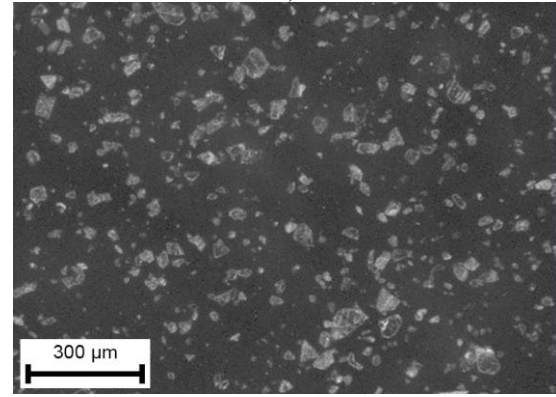
Katkılı kompozit malzemelerin hazırlanması aşamasında BN taneciklerinin ıslanabilirliğinin artırılmasına yönelik olarak TiC ve TiB₂ fazlarının oluşumunun sağlanması amacıyla, BN tanecikleri ve flaks; bilyeli bir karıştırıcıda destile su içerisinde 10 mm çapa sahip alumina öğütme bilyeleri kullanılarak 85 dev/dk hızında 7 saat boyunca karıştırılmıştır. Elde edilen karışım atmosferik bir etüvde 110 °C'de 2 saat süresince kurutulmuş, ardından agat bir havan içerisinde el ile öğütülmüştür. Hazırlanan karışım ağırlıkça %5 B₄C içeren 850 °C'deki alüminyum eriyik içerisine ağırlıkça %3, 5 ve 10 oranlarında BN ihtiva edecek şekilde ilave edilmiş (Çizelge 2) ve bir karıştırıcı yardımıyla 15 dk boyunca 250 dev/dk hızında karıştırılmıştır (Şekil 2).

Sıkıştırma döküm tekniği kullanılarak katkılı kompozitlerin üretilmesi amacıyla

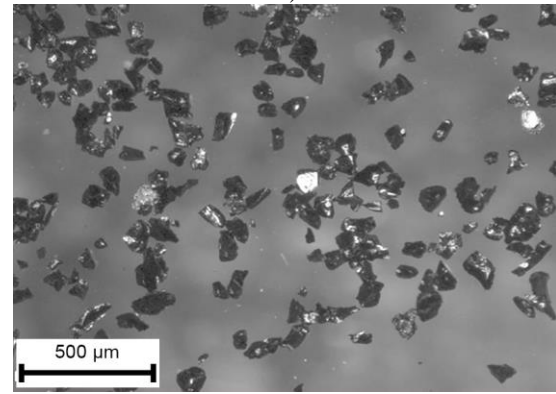
laboratuvarımızda hazırlanan, 200 mm stroka sahip sıkıştırma döküm düzeneği kullanılmış olup (Şekil 3a); kalıp ve zımba (Şekil 3b) döküm işlemi öncesinde 350 °C'ye ısıtılmıştır.



a)



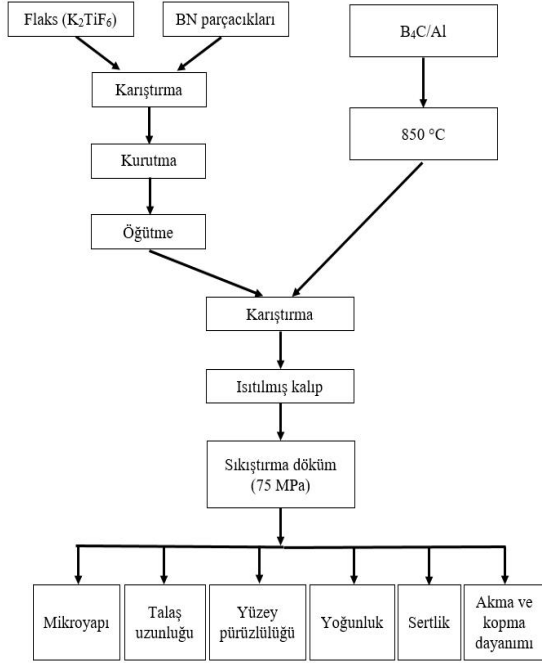
b)



c)

Şekil 1. Üretilen kompozitlerde kullanılan katkı malzemelerinin mikroyapı görüntüleri; a) BN, b) K₂TiF₆, c) B₄C

BN İlavesinin Sıkıştırma Döküm Yöntemi ile Üretilen B₄C/Al Hibrit Kompozitlerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri



Şekil 2. Sıkıştırma döküm tekniği ile BN katkılı B₄C ile güçlendirilmiş alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonuna ait akış diyagramı

Çizelge 2. Numunelerin adlandırılması

Numune adı	BN içeriği (ağ. %)	B ₄ C içeriği (ağ. %)
Al	-	-
B ₄ C/Al	-	5
3BN-B ₄ C/Al	3	5
5BN-B ₄ C/Al	5	5
10BN-B ₄ C/Al	10	5

Isıl çift ile takip edilen eriyik sıcaklığı 730 °C'ye düşünce döküm işlemi gerçekleştirilmiş olup 60 saniye süresince 75 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmıştır. Bu şekilde sıkıştırma döküm tekniği ile BN katkısız ve ağırlıkça %3, 5 ve 10 BN katkılı B₄C/Al kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan her bir numune seti; 13 mm çapında ve 7'şer adet silindirik numuneden oluşmakta olup; hazırlanan numunelerden örnek bir görüntü Şekil 3.c'de sunulmuştur.



a)



b)



c)

Şekil 3. Deneylere ait görüntüler; a) sıkıştırma döküm düzeneği, b) sıkıştırma döküm kalıbı, c) sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen numune

2.3. Mekanik Özelliklerin Karakterizasyonu ve Mikroyapı İncelemesi

Yapılan çalışmada, BN ilavesinin, B₄C/Al matrisli kompozitlerin yapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, elde edilen numunelerin mikroyapıları incelenmiş; yoğunluk, talaş uzunluğu, akma ve çekme dayanımları, yüzde uzaması ve sertlikleri belirlenmiştir (Şekil 2). Talaş uzunluğu ve yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesi amacıyla, dökümü yapılan numunelerin baş kısımları bir testere yardımıyla kesilmiş, elde edilen silindirik numunelerin boyları 60 mm, çapları 10 mm olacak şekilde, seramik torna kalemleri (Sumitomo DNGA432, Japonya) ile 860 dev/dk dönüş, 0,7 ve 2,68 mm/s ilerleme hızı kullanılarak tornalanmıştır. Her bir numunenin tornalanması

sırasında oluşan talaşların boyları, yazarların daha önceki bir çalışmada yapmış olduklarına benzer şekilde ölçülmüş ve bu talaşların en uzun 3 adedinin ortalaması alınmıştır [27]. Elde edilen numunelerin yüzey pürüzlülükleri profilometre (Bruker Dektak XT, ABD) yardımıyla belirlenmiştir. Tornalanan numunelerin tartım işleminin ardından yoğunlukları hesaplanmıştır.

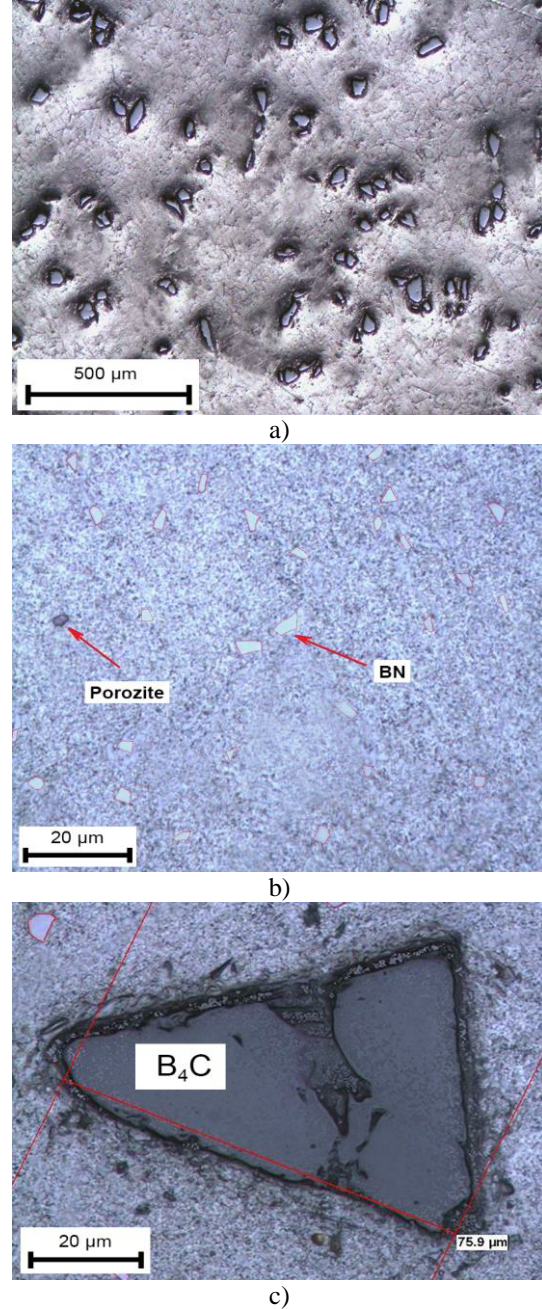
Numunelerin Brinell sertlik tayini, 2,5 mm çapında çelik bilye kullanılarak 10 s süresince uygulanan 187,5 kgf yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Farklı oranlarda BN ilavesinin alüminyum matris kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisinin belirlenmesi amacıyla, farklı BN oranlarına sahip numune gruplarından 5'er adet numune ASTM E8 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan çekme numuneleri 10 kN yük hücresi kullanılarak universal test cihazında (Zwick/Roell Z10, Almanya) çekme testine tabi tutulmuş; elde edilen değerlerin ortalamaları ve standart sapmaları hesaplanmıştır.

Mikroyapı incelemesi öncesinde, numuneler kesilerek bakalite alınmış, parlatılmış (Struers LaboPol-5, Almanya) ve Marble çözeltisi (50 ml HCl/50 ml destile su içerisinde 10 g CuSO₄) kullanılarak dağlanmışlardır. Ardından numuneler optik mikroskop (Clemex LV 150, Kanada) ve taramalı elektron mikroskobu altında (Philips SEM XL30, Hollanda) incelenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Mikroyapı İncelemesi

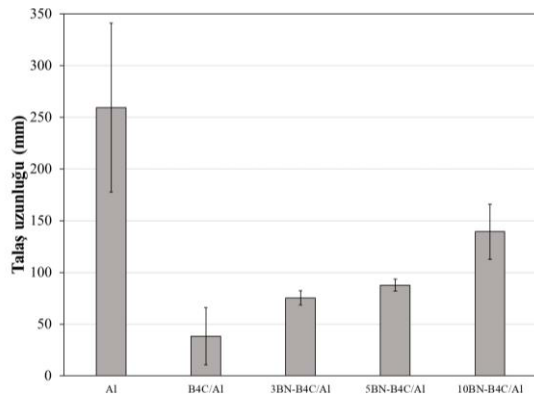
Üretilen BN-B₄C/Al kompozit malzemeler üzerinde gerçekleştirilen mikroskop incelemelerinde B₄C (Şekil 4a) ve BN (Şekil 4b) parçacıklarının, matris malzemesi olan Al içerisinde homojen bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 4c). Ayrıca; üretilen kompozit malzemelerde basınç altında uygulanan sıkıştırma döküm yöntemine rağmen az miktarda gözenek oluştuğu görülmektedir (Şekil 4b).



Şekil 4. BN-B₄C/Al hibrit kompozitlerine ait mikroskop görüntüleri. a) 5BN-B₄C/Al içerisinde bulunan B₄C parçacıklarının dağılımı, b) 3BN-B₄C içerisinde BN parçacıklarının dağılımı, c) 3BN-B₄C/Al içerisindeki B₄C ve BN parçacıkları.

3.2. Talaş Uzunluğunun İncelenmesi

BN miktarının, sıkıştırma döküm tekniği ile üretilen BN-B₄C/Al kompozitlerinin işlenmesi esnasında oluşan talaş uzunluğu üzerindeki etkilerinin belirlenmesinde; hazırlanan numuneler, tornalama sırasında oluşturdukları talaş uzunlukları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Yazarların daha önce gerçekleştirmiş oldukları bir çalışmada; B₄C katkısının talaş uzunluğunu büyük ölçüde düşürdüğü belirlenmiştir [27]. Bunun, B₄C'in gevrek doğasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Talaş uzunluğunda meydana gelen bu düşüşü telafi etmek amacıyla ilave edilen BN'nin talaş uzunluklarının artmasını sağladığı gözlemlenmiştir. B₄C/Al numunelere % 3, 5 ve 10 oranında ilave edilen BN katkısının, tornalama esnasında meydana gelen talaş uzunluklarını arttırdığı belirlenmiştir (Şekil 5). İlave edilen BN miktarı arttıkça, talaş uzunluğu artmaktadır. Bu sayede, B₄C ilavesinden kaynaklanan düşüncün, BN ilavesiyle önemli ölçüde telafi edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. BN ilavesi ile B₄C/Al kompozitlerinin talaş uzunluklarının artması mümkün olmaktadır.



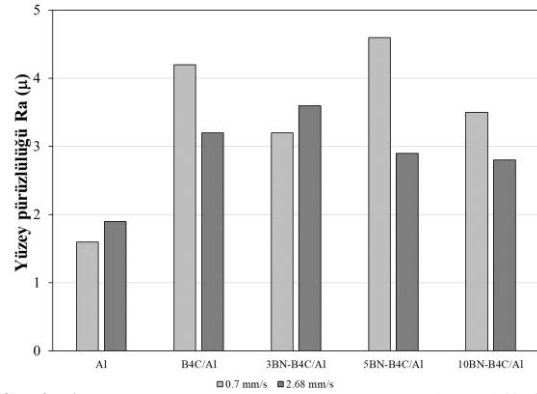
Şekil 5. BN oranının BN-B₄C/Al hibrit kompozitlerinin talaş uzunluğuna etkisi

3.3. Yüzey Pürüzlülüğünün Belirlenmesi

BN ilavesinin B₄C/Al hibrit kompozitlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin belirlenmesi amacıyla işlenen numunelerin yüzey pürüzlülükleri profilometre aracılığıyla ölçülmüştür. Gerek düşük gerekse orta ilerleme hızlarında yapılan işleme

neticesinde BN ilavesinin numunelerin yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelenmiştir (Şekil 6). Buna göre; düşük ilerleme hızı (0,7 mm/s) seçeneğinde düşük oranda yapılan BN ilavesinin (%3) olumlu etki gösterdiği, orta ilerleme hızında ise (2,68 mm/s) ilave edilen BN miktarının artırılmasının (%5 ve %10) avantaj sağladığı görülmüştür.

Elde edilen bulgular, düşük miktarda BN ilavesinin numunelerin yüzey pürüzlülüğüne olumlu etki ettiği şeklinde yorumlanmıştır.



Şekil 6. BN oranının BN-B₄C/Al hibrit kompozitlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

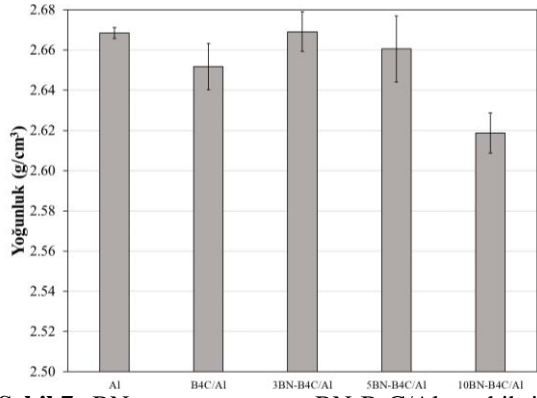
3.4. Yoğunluk Ölçümleri

Aluminyuma %5 B₄C katkısı, elde edilen numunelerin yoğunluğunu azaltmıştır. B₄C/Al'a ilave edilen BN, katkı oranına göre yoğunluk üzerinde bir miktar değişime neden olmuştur. Ağırılıkça %3 oranında ilave edilen BN ile numunelerin yoğunluk değerlerinde bir miktar artış gözlemlenmiş olup, yüksek BN oranlarında yoğunluk değerlerinin tekrar azalma eğilimi gösterdikleri belirlenmiştir (Şekil 7).

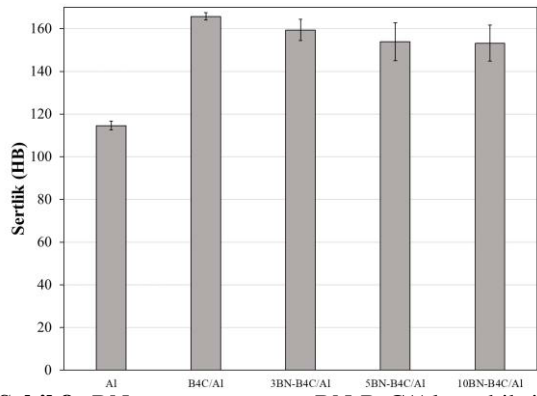
3.5. Sertlik Ölçümleri

B₄C'in yüksek sertliğe sahip olması nedeniyle, %5 B₄C içeren numunelerin saf Al numunelere göre daha yüksek sertlik değerine sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, ilave edilen BN'nin B₄C'den daha düşük sertlikte olması

nedeniyle, üretilen kompozitlerin sertlik değerlerinde bir miktar düşüşe neden olduğu ve BN oranı arttıkça bu düşüşün arttığı belirlenmiştir. Ancak söz konusu düşüş oldukça kısıtlı olup, BN ihtiva eden B₄C/Al numunelerin sertlik değerleri, katkısız Al numunelerin sertlik değerlerinden yüksektir (Şekil 8).



Şekil 7. BN oranının BN-B₄C/Al hibrit kompozitlerinin yoğunluğuna etkisi

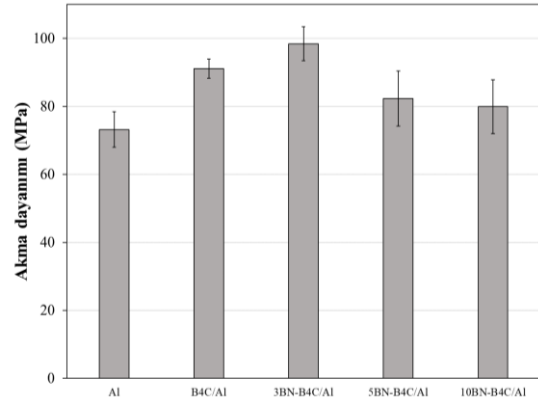


Şekil 8. BN oranının BN-B₄C/Al hibrit kompozitlerinin sertliğine etkisi

3.6. Akma ve Çekme Dayanımlarının ve Yüzde Uzamanın Belirlenmesi

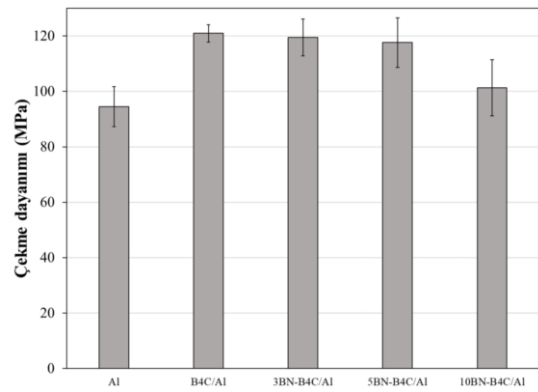
Ağırlıkça %5 B₄C ile güçlendirilmiş numunelerin, katkısız Al numunelere göre yüksek akma ve çekme dayanımına sahip olduğu tarafımızca yapılan önceki bir çalışmada belirlenmiştir [27]. Yürütülmüş olan mevcut çalışmada; BN ilavesinin, B₄C/Al kompozitlerinin akma ve çekme dayanımları üzerindeki etkilerini belirlemek

amacıyla gerçekleştirilen çekme testleri, %3 BN ilavesinin B₄C/Al kompozitlerinin sahip olduğu akma dayanımını daha da arttırdığını göstermektedir (Şekil 9). Ancak BN oranı artmaya devam ettikçe akma dayanımında düşüş meydana gelmektedir. Böylelikle, sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen B₄C/Al kompozitlerine %3'lük BN ilavesinin akma dayanımı üzerinde olumlu etki yaptığı belirlenmiştir.



Şekil 9. BN oranının BN-B₄C/Al hibrit kompozitlerinin akma dayanımına etkisi

Ağırlıkça %3 ve %5 BN ilavesinin, B₄C/Al kompozitlerinin çekme dayanımı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir (Şekil 10). BN oranının %10'a çıkarılmasıyla çekme dayanımında bir miktar düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir.

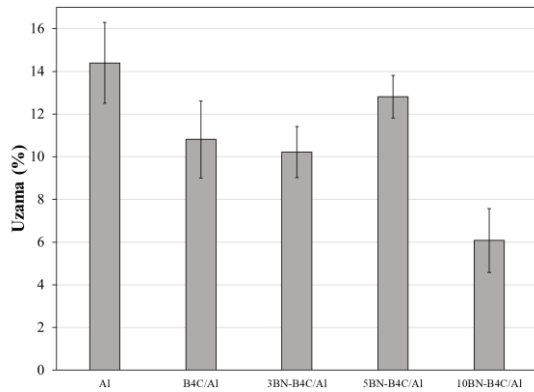


Şekil 10. BN oranının BN-B₄C/Al hibrit kompozitlerinin çekme dayanımına etkisi

BN-B₄C/Al kompozitlerinin katkısız olarak üretilen Al numunelere göre daha yüksek mukavemet değerlerine sahip olması (Şekil 9-10), ilave edilen BN ve B₄C parçacıklarının çekirdeklenme bölgesi işlevi görerek tane küçülmesine neden olması ile açıklanabilir [28,29]. Ayrıca BN ve B₄C parçacıklarının varlığının, matriks malzemesi Al ve ilave edilen parçacık arayüzeylerinde ısıl genişleme uyumsuzluğuna bağlı olarak artan dislokasyon yoğunluğunun soğuma esnasında dislokasyon hareketini güçleştirilmesi sayesinde mekanik dayanımı arttırdığı düşünülmektedir.

B₄C/Al kompozitlerine ilave edilen görece yüksek oranda BN'nin akma ve çekme dayanımlarını bir miktar düşürdüğü belirlenmiştir (Şekil 9-10). İlave edilen BN miktarı arttıkça mekanik özelliklerde gözlemlenen değişimin, ilave edilen BN ve B₄C parçacıklarının mekanik özellikleri arasındaki farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, ilave edilen BN miktarı arttıkça mekanik özelliklerde bir miktar bozulmanın meydana gelmesi, artan BN oranlarının matriks içerisinde topaklanmaya ve bu nedenle homojen olmayan bir dağılıma sebep olabileceğini ve buna bağlı olarak mekanik dayanımı düşürebileceğini akla getirmektedir.

Al'a ilave edilen BN ve B₄C'ün % uzama değerlerinde genel bir düşüşe sebep olduğu belirlenmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. BN oranının BN-B₄C/Al hibrit kompozitlerinin uzamasına etkisi

4. SONUÇLAR

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında sıkıştırma döküm yöntemi ile farklı BN oranlarına sahip BN-B₄C/Al kompozitleri üretilmiş olup elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- İlave edilen BN ve B₄C'in matriks malzemesi olan Al içerisinde homojen bir dağılıma sahip olduğu mikroskop incelemesi ile belirlenmiştir.
- İlave edilen BN'ün, B₄C/Al kompozitlerinin talaş uzunluğunu olumlu yönde etkilediği ve BN oranı arttıkça talaş uzunluğunun arttığı belirlenmiştir.
- BN oranı arttıkça, BN-B₄C/Al kompozitlerinin sertlik değerlerinde belirgin olmayan bir düşüş meydana gelmektedir.
- %3 oranında ilave edilen BN'ün, BN-B₄C/Al kompozitlerinin akma dayanımında artışa yol açtığı gözlemlenmiştir.
- Artan BN ilavesinin, BN-B₄C/Al kompozitlerinin çekme dayanımında bir miktar düşüşe neden olmasına karşın özellikle %3'lük BN ilavesi için bu düşüşün çok az olduğu belirlenmiştir.
- Sonuç olarak; özellikle %3 oranında BN ilavesi ile üretilen BN-B₄C/Al kompozitlerinin, çekme dayanımındaki belirgin olmayan bir düşüşe karşın daha yüksek akma dayanımına sahip olduğu ve bu nedenle akma dayanımı gerektiren uygulamalarda tercih edilebileceği belirlenmiştir.

5. KAYNAKLAR

1. Kainer, K.U., 2006. Metal Matrix Composites. Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., KGaA, Weinheim.
2. Kim, Y.H., Lee, S., Kim, N.J., 1992. Fracture Mechanisms of a 2124 Aluminum Matrix Composite Reinforced with SiC Whiskers. Metallurgical and Materials Transactions A, 23(9), 2589-2596.
3. Song, W.Q., Krauklis, P., Mauritz, A.P., Bandyopadhyay, S., 1995. The Effect of Thermal Aging on the Abrasive Behaviour of

- Age-hardening 2014 Al/SiC and 6061 Al/SiC Composites. *Wear*, 185(1-2), 125-130.
4. Chawla, N., Chawla, K.K., 2006. *Metal Matrix Composites*, Springer, New York.
 5. Koli, D.K., Agnihotri, G., Purohit, R., 2015. *Advanced Aluminium Matrix Composites: The Critical Need of Automotive and Aerospace Engineering Fields*. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 3032-3041.
 6. Surappa, M.K., 2003. *Aluminium Matrix Composites: Challenges and Opportunities*. *Sadhana*, 28(1-2), 319-334.
 7. Ramnath, V., Elanchezian, C., Annamalai, R.M., Aravind, S., Ananda Atreya, T.S., Vignesh, V., Subramanian, C., 2014. *Aluminium Metal Matrix Composites - A Review*. *Reviews on Advanced Materials Science*, 38(1), 55-60.
 8. Macke, A., Schultz B.F., Rohatgi, P., 2012. *Metal Matrix Composites Offer the Automotive Industry an Opportunity to Reduce Vehicle Weight, Improve Performance*. *Advanced Materials and Processes*, 170(3), 19-23.
 9. European Aluminium, 2020. <https://www.european-aluminium.eu/about-aluminium/>, 09 Mayıs 2020.
 10. Pandey, A.B., 1992. *Metallic Matrices*. In: Miracle, D.B., Donaldson, L. (eds), *ASM Handbook Vol. 21*. ASM International, Metals Park, A.B.D., 396-402.
 11. Wang, Y., Lei, K., Ruan, Y., Dong, W., 2016. *Microstructure and Wear Resistance of c-BN/Ni-Cr-Ti Composites Prepared by Spark Plasma Sintering*. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 54, 98-103.
 12. Harichandran, R., Selvakumar, N., 2016. *Effect of Nano/micro B4C Particles on the Mechanical Properties of Aluminium Metal Matrix Composites Fabricated by Ultrasonic Cavitation-Assisted Solidification Process*. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16(1), 147-158.
 13. Kim, S.-B. Kim, Koss, D.A., Gerard, D.A., 2000. *High Cycle Fatigue of Squeeze Cast Al/SiCw Composites*. *Materials Science and Engineering: A*, 277(1-2), 123-133.
 14. Ozben, T., Kilickap, E., Cakır, O., 2008. *Investigation of Mechanical and Machinability Properties of SiC Particle Reinforced Al-MMC*. *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1-3), 220-225.
 15. Chen, K., Hua, Y., Xu, C., Zhang, Q., Qi, C., Jie, Y., 2015. *Preparation of TiC/SiC Composites from Ti-Enriched Slag by an Electrochemical Process in Molten Salts*. *Ceramics International*, 41(9A), 11428-11435.
 16. Johny James, S., Venkatesan, K., Kuppan, P., Ramanujam, R., 2014. *Hybrid Aluminium Metal Matrix Composite Reinforced with SiC and TiB₂*. *Procedia Engineering*, 97, 1018-1026.
 17. Saravanan, L., Senthilvelan, T., 2015. *Investigations on the hot Workability Characteristics and Deformation Mechanisms of Aluminium Alloy - Al₂O₃ Nanocomposite*. *Materials & Design*, 79, 6-14.
 18. Sharma, P., Sharma, S., Khanduja, D., 2015. *Production and some Properties of Si₃N₄ Reinforced Aluminium Alloy Composites*. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 3(3), 352-359.
 19. Takahashi, S., Imai, Y., Kan, A., Hotta, Y., Ogawa, H., 2015. *Improvements in the Temperature-Dependent Properties of Dielectric Composites by Utilizing MgO Whiskers as the Dielectric Filler in an iPP Matrix*. *Journal of Alloys and Compounds*, 640, 428-432.
 20. Baradeswaran, A., Vettivel, S.C., Elaya Perumal, A., Selvakumar, N., Franklin Issac, R., 2014. *Experimental Investigation on Mechanical Behaviour, Modelling and Optimization of Wear Parameters of B4C and Graphite Reinforced Aluminium Hybrid Composites*. *Materials & Design*, 63, 620-632.
 21. Dieringa, H., Kainer, K.U., 2006. *Particles, Fibers and Short Fibers for the Reinforcement of Metal Materials*. In: Kainer, K.U. (ed), *Metal Matrix Composites*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 55-75.
 22. Timofeeva, E.V., Gavrilov, A.N., McCloskey, J.M., Tolmachev, Y.V., Sprunt, S., Lopatina, L.M., Selinger, J.V., 2007. *Thermal Conductivity and Particle Agglomeration in*

- Alumina Nanofluids: Experiment and Theory. *Physical Review E*, 76(6), 061203/1-16.
23. Huntz, A.M., Maréchal, L., Lesage, B., Molins, R., 2006. Thermal Expansion Coefficient of Alumina Films Developed by Oxidation of a FeCrAl Alloy Determined by a Deflection Technique. *Applied Surface Science*, 252(22), 7781-7787.
 24. Garg, H.K., Verma, K., Manna, A., Kumar, R., 2012. Hybrid Metal Matrix Composites and Further Improvement in Their Machinability- A Review. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 1(1), 36-44.
 25. Pandi, G., Muthusamy, S., 2012. A Review on Machining and Tribological Behaviors of Aluminium Hybrid Composites, *Procedia Engineering*, 38, 1399-1408.
 26. Tjong, S.C., Lau, K.C., Wu, S.Q., 1999. Wear of Al-based Hybrid Composites Containing BN and SiC Particulates. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30(9), 2551-2555.
 27. Ipekoglu, M., Nekouyan, A., Albayrak, O., Altintas, S., 2017. Mechanical Characterization of B₄C Reinforced Aluminum Matrix Composites Produced by Squeeze Casting. *Journal of Materials Research*, 32(3), 599-605.
 28. Kashyap, K.T., Ramachandra, C., Dutta, C., Chatterji, B., 2000. Role of Work Hardening Characteristics of Matrix Alloys in the Strengthening of Metal Matrix Composites, *Bulletin of Materials Science*, 23(1), 47-49.
 29. Bodunrin, M.O., Alaneme, K.K., Chown, L.H., 2015. Aluminium Matrix Hybrid Composites: A Review of Reinforcement Philosophies; Mechanical, Corrosion and Tribological Characteristics. *Journal of Materials Research and Technology*, 4(4), 434-445.

Horzum (Feke/Adana) Çinko-Kurşun Cevherleşmesinin 3 Boyutlu Modellemesi

Ceren Gizem ÇETİN¹, Mustafa AKYILDIZ^{*1}

Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 25.08.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Horzum kurşun Çinko yatakları Kozan-Feke ilçeleri arasında yer almaktadır. Cevherleşme K-G yönlü yaklaşık 20 km boyunca devam etmektedir. Kurşun çinko cevherleşmesi kristalize kireçtaşları, dolomit ve dolomititik kireçtaşlarından oluşan orta Kambriyen yaşlı Çaltepe formasyonuna ait açık renkli kireçtaşları içinde bulunmakta, cevherleşmenin genel duruşu KD-GB doğrultulu ve GD'ye eğimli olarak gözlenmektedir. Cevherleşme kristalize kireçtaşları, dolomit ve dolomititik kireçtaşlarından oluşan orta Kambriyen yaşlı Çaltepe formasyonuna ait açık renkli kireçtaşları içinde bulunmaktadır. Cevherleşmede birincil sülfürlü mineraller; galenit, sfalerit, pirit ve az miktarda kalkopiritir. Oksitlenmiş cevher zonunda ise hidrozinkit, simitsonit, götit, limonit ve az oranda serüzit mineralleri gelişmiştir. Blok model yöntemiyle yapılan hesaplamalarda Horzum Kurşun-Çinko yatağında %5 üzeri tenörde 108000 ton cevher rezervi tespiti edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Horzum, Kurşun, Çinko, Rezerv, Cevherleşme

3D Ore Modeling of Horzum (Feke/Adana) Zinc-Lead Mineralization

Abstract

Horzum lead Zinc deposits are located between Kozan-Feke districts. Mineralization continues for about 20 km in N-S direction. Lead zinc mineralization is within the light colored limestones belonging to middle Cambrian aged Çaltepe formation consisting of crystallized limestones, dolomite and dolomitic limestones, and the general elongation of the mineralization is observed in NE-SW direction and inclination to SE. Mineralization is located within the light colored limestones of the medium Cambrian aged Çaltepe formation consisting of crystallized limestones, dolomite and dolomititic limestones. Primary sulphide minerals in mineralization; galenite, sphalerite, pyrite and few photographs are chalcopyrite. In the oxidized ore zone, hydrozinkite, simitsonite, goethite, limonite and fewer serusite minerals have developed. In the calculations made with the block model method, 108000 tons of reserve was determined in 5% higher grade in Horzum Lead - Zinc bed.

Key Words: Horzum, Lead, Zinc, Reserve, Mineralization

* Sorumlu yazar (Corresponding author): Mustafa AKYILDIZ, akyildzm@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Madencilik ilk yatırım maliyetlerinden dolayı riski fazla olan bir sektördür. Bu nedenle üretim öncesi yapılan planlamanın amacı, yatırım maliyetlerini ve risk katsayısını düşürmektir. Planlamanın aşamalarından biri de cevher yataklarının 3 boyutlu modellemesidir. Çünkü güvenilir kaynak ve rezerv tahmini ilk yatırım için çok önemlidir.

İlk yatırım riskini en aza indirmek için maden kaynak tahmininin gerçeğe en yakın şekilde doğru olarak yapılması gerekmektedir. Yanlış, gerçekten uzak kaynak tahminleri; yanlış yatırım kararları, proje maliyetinin planlananın üzerine çıkması, projenin geç tamamlanması, fazladan çıkan maliyetler, düşük maden üretimi gibi kötü senaryolar ortaya çıkarabilmektedir.

Maden kaynak tahminini gerçeğe en yakın ve doğru şekilde yapabilmek için: yatak hakkında jeolojik bilgiye sahip olmak, jeolojik kontrolün tenör üzerindeki etkisinin tam anlaşılması, örnekleme yapılırken gerekli hassasiyet ve analiz kalitesi, doğru ve eksiksiz veri, bilgisayar destekli tahmin programlarının doğru kullanılması gibi konulara önem verilmelidir.

Sağladığı birçok avantaj nedeniyle bu bilgisayar yazılımları hem jeoloji hem de maden mühendisleri tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Madencilik sektöründe mühendislerin ihtiyaçlarına karşılık veren oldukça fazla yazılım bulunmaktadır. Bu yazılımların en çok bilinenleri Netpromine, Surpac, Vulcan, Datamine ve Micromine adlı programlardır. Bu programlar sondajlardan elde edilen verilerle oluşturulan veritabanı sayesinde çalışma yapılan alanı üç boyutlu ortama taşıyabilme imkanı sağlarlar.

Adana- Kozan-Horzum ve Pınargözü Pb-Zn cevherleşmesi üzerine yapılan çalışmalarda cevherleşmenin sfalerit, galenit, pirit, kalkopirit, simitsonit, zinkit, limonit, kalsit, barit ve kuvars parajenezine sahip olduğunu ve Orta Kambriyen yaşlı kireçtaşı içerisinde D-B, KB-GD gidişli faylarda, tabaka aralarında, kırık ve karstik boşluklarda muhtemelen hidrotermal olarak

yerleştiğini belirtmişlerdir. Yöredeki birincil sülfürlü cevherlerin gömülü bir granitik sokulundan doğrudan veya dolaylı olarak beslenen cevherli çözeltilerle ilişkili olabileceğini Birincil cevher oluşumunun olası yaşı Paleosen-Alt Eosen olup, karbonatlı cevher oluşumları ise birincil cevherlerin Miyosen sonrasındaki oksidasyon zonu zenginleşmelerine bağlı oluşmuşlardır [1-2].

Dama [3], Taşınmış (karbonatlı) cevherlerin yumrulu kireçtaşı seviyesi hariç Harapkayası formasyonunun diğer bütün seviyeleri içinde görüldüğünü, altında ve üzerinde yer alan birimlere göre daha geçirgen olan gri veya masif kireçtaşları, cevher getiren akışkanların yukarı doğru göçüne elverişli bir kanal ve kapan görevi gördüklerini, çoğunlukla D-B doğrultulu fayları seçerek gelen hidrotermal eriyiklerin bu faylar ve yakın çevresindeki uygun yan kayaçlar (karbonat kayaları) içerisinde Mississippi Vadisi Tip (MVT) art-oluşumlu ve düşük sıcaklıklı (80-200 °C), tabakaya paralel (stratabound) cevherleşmeler oluşturdukları belirtmişlerdir.

Akyüz [5] ise Horzum ve Pınargözü sahalarında alınan karbonatlı ve sülfürlü cevher örneklerinden jeokimyasal analizleri yaparak incelemiştir. Cevherleşmenin gömülü intrüzifile ilişkili Karbonat Ornatım Tip olabileceğine işaret etmiştir.

Bölgenin karmaşık olan jeolojik yapısı ve cevherleşlerin oluşum kökenine ait farklı çalışmalar yapılmıştır. Bu araştırma ile güncel jeolojik ve jeokimyasal verilerle Kaynak tahminine veri sağlayacak 3 boyutlu cevher modelleme çalışmaları, toplam 55752,45 m uzunlukta 470 adet sondaj verisi kullanılarak Micromine programı ile değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Materyal

Horzum-Kozan (Adana) Bölgesinde yer alan Kurşun-Çinko Cevherleşmesi modelleme çalışmaları, 470 adet karotlu sondaj verileri kullanılarak yapılmıştır.

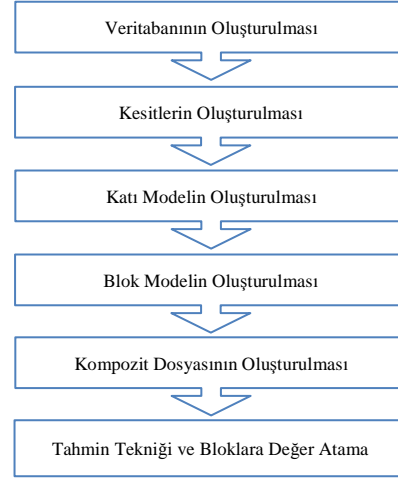
İnceleme alanı Adana İli'nin yaklaşık 97 km kuzeydoğusunda, Kozan İlçesi'nin yaklaşık 27 km kuzeyinde yer almaktadır. Ruhsat sahası 1/25000 ölçekli Adana- M35-c1 ve M35 c2 paftalarında yer almaktadır. Ruhsat sahası Horzum Maden ve Arama A.Ş. ye aittir.

Cevherleşme kristalize kireçtaşı, dolomit ve dolomititik kireçtaşlarından oluşan orta Kambriyen yaşlı Çaltepe formasyonu içerisinde, kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşı kesen yapısal hatların kontrolünde ve bu hatlarda gelişen karstik alanlarda oluşmuştur. Cevherleşmeler genel olarak bölgede hakim ana yapısal hat olan K-G doğrultulu ana fayları kesen D-B ve KB-GD doğrultulu hatlarda, huni şekilli geometriye sahip mercerler şeklinde gelişmiştir. Mineralizasyonların ornatımla yerleşmesi, ana-iz element içerikleri, mineral birlikleri, izotop çalışmaları ve sıvı kapanım verileri sonuçlarına göre cevherleşmenin gömülü intrüziyle ilişkili Karbonat Ornatım Tip olabileceği belirtilmektedir [4].

2.2. Metod

Kaynak tahmini süreci, jeolojik veriler, karot verimi, jeoteknik veriler, mineral özellikleri, numune ve analiz verileri, yoğunluk verileri gibi birçok verinin uygun bir veritabanı oluşturulmasıyla başlar. Jeolojik rezerv hesapları bu veriler kullanılarak yapılır.

Micromine programından (Akmetal AŞ) yararlanabilmek için Koordinat (sondaj konumu) tablosunun hazırlanması gerekmektedir. Koordinat tablosu her bir sondajın konumunu (x, y, z) ve derinlik değerlerini içerir eder. Doğrultu ve eğim değerleri de koordinat tablosuna girilebilir. Koordinat tablosunun dışında 3 boyutlu cevher modellemesini yapabilmemiz için analiz sonuçlarının yer aldığı analiz tablosu da oluşturulmalıdır. Bu tabloda sondaj kuyu isimleri, cevherli derinlik ve tenör gibi değerler bulunur. Bütün bu ham veriler sayısal ortama alınıp görsel hale getirildikten sonra hem sondaj kesitleri hem de topoğrafya kesitleri alınarak modelleme aşamasına geçilir. Micromine yazılımı yardımıyla cevher modelleme adımlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz (Şekil 1).



Şekil 1. Cevher modelleme adımları

Cevherin tenör değerlerine göre bloklara ayrılması ile elde edilen blok model, oluşturulan katı modelin ekonomik olarak değerlendirilmesindeki hata payını en aza indirmek için tasarlanır. Oluşturulan bloğun analiz değerlerinin belirlenmesi için programda “inverse distance” (mesafenin tersi), “ordinary kriging” (normal kriging) yöntemleri bulunmaktadır. Veri tabanının istatistiksel analizi, interpolasyon yöntemi olarak “uzaklığın tersi ile ağırlıklandırma” (inverse distance weighting) yönteminin uygun olduğunu göstermiştir. Bu nedenle kaynak tahmininde uzaklığın tersi (ID) ile ağırlıklandırma metodu kullanılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Bölgesel Jeolojisi

Doğu Toroslar'ın batı bölümünde, Adana ilinin kuzeydoğusunda, Kozan-Feke ilçeleri arasında kalan inceleme alanında, birbirleriyle stratigrafik ve tektonik ilişkili farklı yaş, ortam ve kayaçlar ile temsil edilen allokton konumlu farklı yapısal birimler bulunur. Birimler, Tersiyer ve Kuvaterner yaşlı çökeller tarafından açısız uyumsuz olarak örtülür. Kozan-Feke-Mansurlu arasında; İnfrakambriyen-Paleosen (?) yaşlı, Görbiyes Dağı Birliği ile İnfrakambriyen-Geç Kretase yaşlı Geyikdağı Birliği bulunmaktadır [2-3] (Şekil 2).

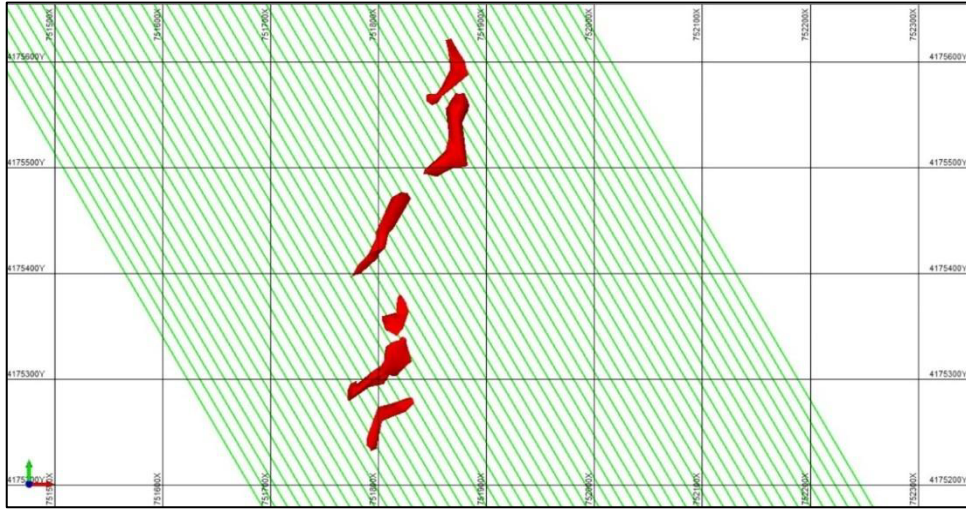
4.2. Modelleme

Modelleme için, toplam 55752,45 m uzunlukta 470 adet sondaj ve 10166 adet analizi yapılmış numune verisi kullanılmıştır. Sondaj verilerine ait bilgiler Çizelge 1’de verilmiştir. Hem yüzey hem de yer altı sondaj istasyonlarında açılı ışınal sondajlar yapılmıştır. Hem yan hem de dikey düzlemlerde sondaj gerçekleştirilmiştir. Böylece elde edilen sondaj verilerinden yararlanılarak, sondajlarla sınırlanmış alan için bir kaynak tahmini yapılmıştır.

Çizelge 1. Sondajlara ait bilgiler ve modelleme tekniği

Sondaj Sayısı	Toplam Metraj (m)	Numune Sayısı	Modelleme Tekniği
470	55752,45	10166	Uzaklığın tersi (ID) ile ağırlıklandırma

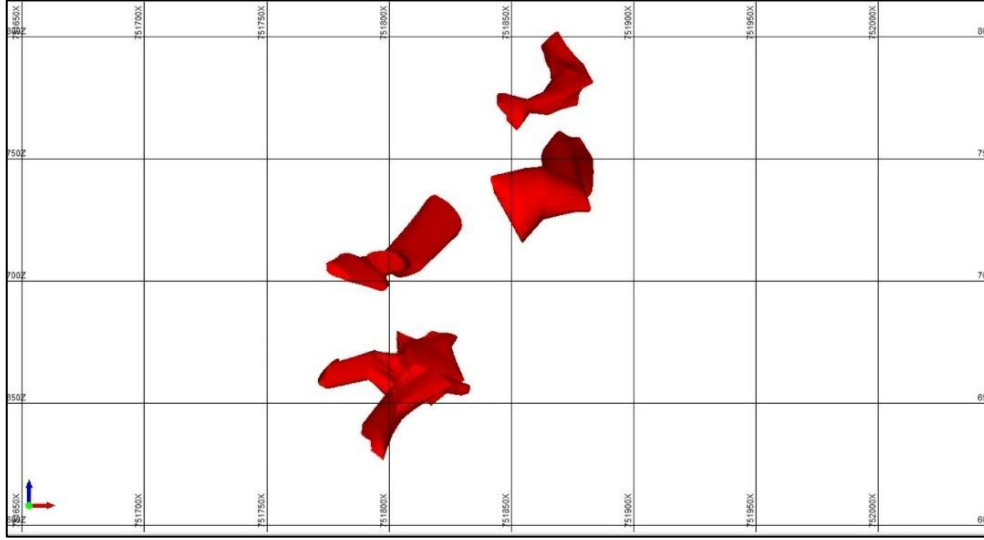
Katı model oluşturabilmek için, öncelikle kesitler alınmıştır. Kesit almada önemli kavramlardan biri kesitin yönüdür. Bu çalışmada kesit yönü belirlenirken cevherin duruşu göz önünde bulundurulmuş ve Kuzeybatı-Güneydoğu yönünde alınmıştır. Saha, sondaj kuyularına denk getirilerek oluşturulan tesir mesafesi 10 m olan birbirine paralel 49 adet enine kesit alınarak dijital olarak eşit aralıklara bölünmüştür (Şekil 3). Cevher yatağının sınırlarını belirlemek için oluşturulan kesitler Micromine paket programın DTM (Digital Terrain Model) modülü kullanılarak 3 boyutlu cevher katı modeli oluşturulmuştur. Cevher gövdesini sınırlandırmak için jeolojik eşik değer %5 Zn alınmıştır.



Şekil 3. Kesit çizgilerinin görünümü

Oluşturulan katı model artık hacim bilgisi vermekte ve daha sonra yapılacak tüm işlemlerde kullanılacak blok modelin oluşturulmasına olanak sağlayacaktır. Bu aşamada cevherin ortalama yoğunluğu da sisteme değişken olarak girilerek cevherin miktarı hesaplanabilir fakat bu tüm cevher bloğu için hesaplandığından sağlıklı bir bilgi olmayacaktır. Bu hesaplama ancak blok

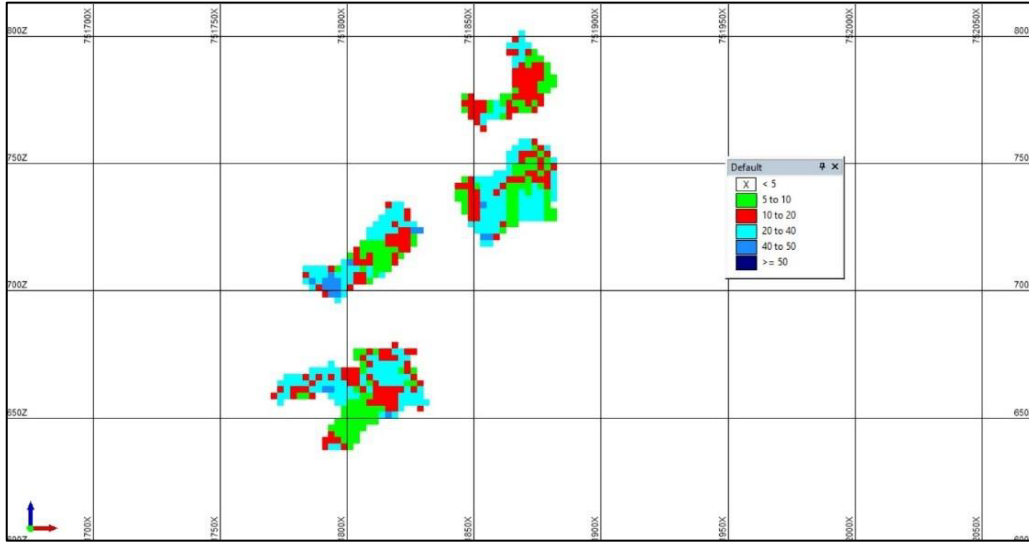
içindeki cevher yerini belirlemeye yönelik arama elipsoidi oluşturulduktan sonra blok model tasarlanarak yapılabilir. Cevherin tenör değerlerine göre bloklara ayrılması ile elde edilen blok model, oluşturulan katı modelin ekonomik olarak değerlendirilmesindeki hata payını en aza indirmek için tasarlanır (Şekil 4).



Şekil 4. Oluşturulan cevher katı modelin kuzeyden görünümü

Blok modele sondajlardan elde edilen değerler atanarak, her bloğun içeriğini hesaplamak için kompozitleme işlemi yapılmıştır. Tenör analizlerinin interval boyutuna göre ağırlıklı olarak

hesaplamalara dahil edilmesi gerekir. Bu nedenle önce ortalama interval aralığı bulunmuş ve bu aralığa göre kompozit analiz dosyası ve interval dosyası oluşturulmuştur (Şekil 5).



Şekil 5. Blok modelin kuzeyden görünümü

Zn içeriğine ait genel istatistikler gözden geçirilmiş ve numune uzunluklarının %52'sinin 0,0-1,0 m aralıklarla alındığını tespit edilmiştir. Ortalama uzunluk 0,77 m ve ortanca uzunluk

0,90 m olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak kompozitlemede kullanılacak ortalama aralık 1 m olarak alınmıştır. Bütün bunlardan sonra hesaplanıp değer atanacak bloklar ve hesaplamada

kullanılacak değerler (kompozit yapı ve ağırlıklar belirlenmiş analiz değerleri) hazır olduğunda bloklara uzaklığın tersi yöntemi ile tenör atama işlemine geçilmiştir.

Search elipsoidi kullanılarak hesaplamada kullanılacak verilerin hangi yöntemle göre belirleneceği bilgisayara tanımlanmıştır. Search elipsoidi bloğun ortasına oturur ve tanımlanmış yöntemle göre elipsoid içerisine giren gerçek analiz değerlerini dikkate alarak hesaplama yapar ve hesapladığı değeri bloğa atar.

Blok model yöntemiyle yapılan hesaplamalarda Horzum Kurşun-Çinko yatağında %5 üzeri tenörde 108000 ton cevher rezerv tespiti yapılmıştır. Bu rezervin tenör aralıklarına göre miktar ve ortalama tenör dağılımları Çizelge 2-5'te verilmiştir.

Çizelge 2. Zn Tenör aralıklarında rezerv dağılımı

%		Hacim (m ³)	Miktar (ton)	Yoğunluk (t/m ³)	Zn (%)
5	10	7250,00	19575,00	2,7	7,34
10	20	11359,38	30670,31	2,7	14,76
20	40	17031,25	45984,38	2,7	29,12
40	50	2250,00	6075,00	2,7	43,27
50	100	46,88	126,56	2,7	53,04

Çizelge 3. Pb Tenör aralıklarında rezerv dağılımı

%		Hacim (m ³)	Miktar (ton)	Yoğunluk (t/m ³)	Pb (%)
5	10	1234,38	3332,81	2,7	7,0
10	20	703,13	1898,44	2,7	15,49
20	40	125,00	337,50	2,7	24,75
40	50	0,00	0,00	2,7	0,00
50	100	0,00	0,00	2,7	0,00

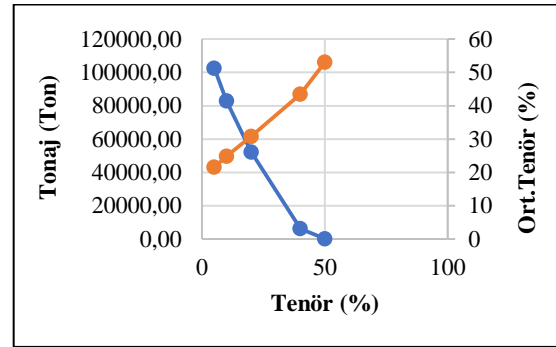
Çizelge 4. Zn Tenör tonaj dağılımı

Tenör	Tonaj (ton)	Hacim (m ³)	Yoğunluk (t/m ³)	Zn (%)
5	102431,25	37937,51	2,7	21,526
10	82856,25	30687,51	2,7	24,878
20	52185,94	19328,13	2,7	30,825
40	6201,56	2296,88	2,7	43,469
50	126,56	46,88	2,7	53,04

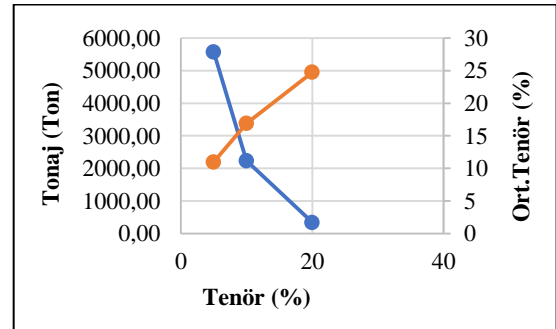
Çizelge 5. Pb Tenör tonaj dağılımı

Tenör	Tonaj (ton)	Hacim (m ³)	Yoğunluk (t/m ³)	Pb (%)
5	5568,75	2062,51	2,7	10,97008
10	2235,94	828,13	2,7	16,88773
20	337,5	125	2,7	24,75
40	0	0	2,7	0
50	0	0	2,7	0

Çinko ve kurşun için tonaj ve ortalama tenör değeri dağılımını gösteren grafikler Şekil 6'de ve Şekil 7'de yer almaktadır.



Şekil 6. Zn için tonaj-ort. tenör değeri dağılımı grafiği



Şekil 7. Pb için tonaj-ort. tenör değeri dağılımı grafiği

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bölgede yapılan karotlu sondaj verileri kullanılarak kaynak tahminine veri sağlayacak 3 boyutlu cevher modellemesi Micromine yazılımında yapılmıştır.

Horzum Kurşun-Çinko yatağında %5 üzeri tenörde ortalama %21,53 tenörlü 102431,25 ton çinko ve ortalama %10,97 tenörlü 5568,75 ton kurşun olmak üzere toplam 108000 ton cevher rezervi tespit edilmiştir. Hesaplamalardan elde edilen sonuçlara göre, ortalama %7,34 tenörde 19575,00 ton, ortalama %14,76 tenörde 30670,31 ton, ortalama %29,12 tenörde 45984,38 ton, ortalama %43,27 tenörde 6075,00 ton, ortalama %53,04 tenörde 126,16 ton çinko; ortalama %7,00 tenörde 3332,81 ton, ortalama %15,49 tenörde 1898,44 ton, ortalama %24,75 tenörde 337,50 ton kurşun rezervi tespit edilmiştir. Ayrıca bu yatak için belirlenen tonaj-ortalama tenör eğrilerinden (Şekil 4-5) faydalanılarak farklı sınır tenörlerde hangi ortalama tenör ve ne kadar cevher tonajı olduğuna dair bilgiler görülebilmektedir.

Micromine yazılımı kullanılarak yapılan bu çalışmanın neticesinde hesabı uzun süren rezerv ve bu rezervin tenör aralıklarına göre dağılımı madencilikte kullanılan bu vb. yazılımlar sayesinde çok kısa sürede hesaplanıp, tüm cevher modeline uygulanabilir olduğu görülmüştür. Ayrıca var olan hataların kısa sürede farkedilip düzeltilmesi, proje planlamada parametrelerin hızlı ve etkin olarak işlenebilmesi ve sonradan veri ekleyebilme özelliği, veri sınırlandırması olmadan çok sayıda sondaj verisinin aynı anda programa girilebilmesi, çizimlerin hassasiyetle yapılması ve bilgisayar hesaplama tekniği ile hesap hatalarının önüne geçilmesi programın sağladığı diğer avantajlardır.

Tüm bunların yanında doğru bir modelleme ve rezerv hesabı için veri tabanı oluşturma, verilerin işlenmesi ve düzenlenmesi gibi adımların büyük önem taşıdığı sonucuna varılmıştır. Çünkü ortaya çıkan rakamların doğruluğunun olması gereken sıklıkta alınmış ve gereken önem verilerek değerlendirilmiş sondaj verilerine dayandığı da unutulmamalıdır.

Projeden sorumlu mühendisin teknik ve program bilgisi ile madencilikte kullanılan bu yazılımlar madencilik projelerinin daha kısa sürede, daha kesin sonuçlarla ve daha düşük maliyetlerle gerçekleşmesine olanak sağlayacaktır.

Katkı Belirleme: Bu çalışma, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda "Horzum (Feke/Adana) Çinko-Kurşun Cevherleşmesinin 3 Boyutlu Modellemesi" konulu yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Araştırma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından FYL-2019-11742 proje kapsamında desteklenmiştir.

6. KAYNAKLAR

1. Bingöl, N., Yıldırım, R., 1983. Adana Kozan Horzum Çinko Madeninde Yer Altı Sondajlı Çalışma Raporu: MTA.
2. Temur, S., 1986. Horzum (Kozan-Adana) Piritli Çinko-kurşun Yataklarının Jenetik İncelemesi: Hacettepe Üniv. Yerbilimleri Derg., 12(13), 31-49.
3. Dama, 2007. Horzum (Kozan Adana) Çinko Yatağı Maden Jeolojisi Etüt Raporu (Yayınlanmamış)
5. Usta, D., Usta, M., Balcı, V., Kop, A., 2013. Doğu Toroslar'ın Jeolojisi ve Metalojeni (Kozan/Feke/Adana) MTA Raporu, Ankara.
6. Akyüz, F., 2019. Horzum-Kozan (Adana) Pb-Zn Cevherleşmelerinin Kökeni, Ç.Ü. Fen Bilimleri Enst. Yüksek Lisans Tezi, Adana, 128.

Farklı Kültürlere Ait Farklı Türdeki Müziklerden Duygu Tanıma

Serhat HIZLISOY^{*1}, Zekeriya TÜFEKÇİ¹

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 22.09.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Bu çalışmada, klasik makine öğrenme yöntemleri farklı kültürlere ait farklı türdeki müziklerden oluşmuş veri tabanları üzerinde duygu tanınması yapmak için kullanılmışlardır. Bu veri tabanlarında bulunan müziklerden öznelik çıkarmak için çalışmalarda yaygın olarak kullanılan araçlar tercih edilmiştir. Çıkarılan bütün özneliklere korelasyon tabanlı öznelik seçme yöntemi uygulanmıştır. Makine öğrenmesi yöntemleri olarak Bayes Ağları, Sıralı Minimal Optimizasyon, Lojistik Regresyon ve Karar Ağaçları kullanılmıştır. Öznelik seçim işlemi sonrasında kalan özneliklere Bayes Ağları yöntemi uygulandığında, Türkçe Duygusal Müzik Veri Tabanı için %94,35, Bi-Modal Veri Tabanı için %79,62 ve Soundtrack Veri Tabanı için ise %75,45 tanıma oranı elde edilmiş ve karşılaştırılan sınıflandırıcılardan daha iyi sonuç alınmıştır. Daha sonra, araçlardan çıkarılan öznelikler bir araya getirilmiş ve yine seçim işlemi yapılmıştır. Bu işlemden sonra ise, sırasıyla bu veritabanları için %95,96, %80,24 ve %82,72 tanıma oranları elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Müzik, Duygu tanıma, Makine öğrenmesi

Emotion Recognition From Different Types of Music From Different Cultures

Abstract

In this study, various machine learning methods were used to recognize emotions on databases of different types of music belonging to different cultures. In order to obtain features from the music in these databases, widely used toolboxes were preferred. Correlation-based feature selection method was applied to all the obtained features. BayesNet, Sequential Minimal Optimization, Logistic Regression and Decision Trees are used as machine learning methods. When BayesNet was applied to the remaining features after the feature selection process, %94,35 recognition accuracy rate was obtained for Turkish Emotional Music Database, %79,62 for Bi-Modal Database, and %75,45 for Soundtrack Database, and better results were achieved than other classifiers. Then, the features obtained from the toolboxes were combined and the selection process was made again. After this process, recognition rates of %95,96, %80,24 and %82,72 were obtained for these databases, respectively.

Keywords: Music, Emotion recognition, Machine learning

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Serhat HIZLISOY, shizlisoy@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Müzik, kişide çeşitli duygu ve düşünceler uyandıran ve insanlığın başlangıcından bu yana hayatımızda bulunan evrensel bir dildir. Müzik dinlemek insanların günlük hayatta çok sık yaptığı aktivitelerdendir. Müziğin, insan psikolojisi ve fizyolojisi üzerinde önemli etkileri vardır. İnsanlar çoğu zaman duygu durumlarını değiştirmek için müziğe yönelirken, bazen de hissettikleri olumlu ya da olumsuz duygu oranlarını daha da artırmak için de müziğe başvurabilirler.

Teknolojinin gelişmesi, cihaz ve uygulamaların geliştirilmesi ile duygu tanıma üzerine yapılan çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Bilgisayar bilimi, müzikoloji, sosyoloji ve hatta psikoloji gibi farklı disiplinlerde yapılan birçok çalışma, bu duyguları farklı yöntemler ve ölçme araçları kullanarak ortaya çıkarmayı amaçlamıştır. Son zamanlarda ise bu çalışmalar, müziğin insanda uyandırdığı duygular düşünülerek, müzik ile duygu tanıma üzerine yoğunlaşmıştır. Yapılan çalışmalarda genellikle ses ve görüntü verilerinden faydalanılır.

Müzikten duygu tanıma yapmak için, genellikle müzik sinyalleri kullanılır. Duygu tanıma için, bazı çalışmalarda ham sinyal ya da bu sinyallerden çıkarılan öznitelikler, bazılarında ise bu özniteliklerden elde edilen spektogram gibi görsel öğeler kullanılır. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda müziklerin, insanların duygularına yön vererek hormonlarını etkilediği de düşünüldüğünden müzik sinyalinin kalp ritmi, nabız ve beyin dalgaları gibi fizyolojik parametrelerle birlikte uygulandığı da görülmektedir [1].

Günümüzde Spotify gibi insanların dinledikleri müziklerden duygu analizi yapan sistemler barındıran çok sayıda müzik öneri sisteminin ve otomatik çalma listesi oluşturma uygulamalarının geliştirildiğini görmekteyiz. Bu uygulamalar dışında müzikten duygu tanıma sistemleri ayrıca, müziğin rehabilite etme ve sosyalleştirme özelliği sayesinde müzik terapisi ve duygusal bozuklukların tedavisi gibi birçok amaç için de kullanılmaktadır [2].

Müziğin insanda hissettirdiği duygular; üzüntü, mutluluk, öfke, depresyon, heyecan ve sakinlik gibi çeşitli kategoriler altında toplanabilir. Ancak günümüzde duygusal müzik kategorilerinin belirlenmesi birçok nedenden dolayı oldukça zordur ve bu durum müzikten duygu tanıması yapılması sürecini zorlaştırır. Bu nedenlerden biri, insanların duygu algısı öznel olduğu için aynı müzikten farklı duyguları hissedebilmesidir. Hissedilen duygu; yaşa, cinsiyete, karaktere, şarkı sözlerine, hatta çevresel faktörlere göre bile değişebilir [3].

Müzikten duygu tanımayı zorlaştıran diğer etmenleri kaliteli veri tabanı seçiminin zorluğu, müziklerin doğru etiketlenmemesi, öznitelik çıkarımı ve uygun sınıflandırma yöntemleri seçimi olarak sayabiliriz. Bu çalışma ile yapılaş amaçları ayrı olan (Album, Film) farklı kültürlerdeki (Türk Müziği, Batı Müziği) müziklerden oluşan veri tabanları üzerinde duygu tanıma yapılması için genel problemler tespit edilmiştir. Bu problemlerin üstesinden gelmek ve sınıflandırma başarısını artırmak için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Müzikten duygu tanıma yapabilmek için, öncelikle doğru etiketlenmiş duygusal müzik veri tabanına ihtiyaç vardır. Çünkü verileri etiketleme kalitesi arttıkça, bu veriler üzerinde eğitilen yöntemlerin başarısı da o derece artmaktadır. Dinleyiciler tarafından duyguların etiketlenmesi için kategorik ve boyutsal olmak üzere iki yaklaşım vardır. Kategorik yaklaşımda, müzikteki duygular ayrı etiketlerle değerlendirilir. Bu alandaki en eski çalışma Hevner [4] tarafından, sekiz kategoride 66 duygu etiketi kullanılarak yapılmıştır. Duyguları sınıflandırmak için Y. Feng ve arkadaşları [5] ise üzgün, mutlu, korku, öfkeyi kullanmışlardır. Paul Ekman [6] ise öfke, tiksinti, korku, mutluluk, üzüntü ve şaşkınlıktan oluşan 6 temel duygulu bir model sunmuştur. İkinci yaklaşımda ise duygular boyutsal uzayda çeşitli ve bağımsız eksenlerle temsil edilir. Russels [7] tarafından değerlik ve aktivasyon olmak üzere iki boyuttan oluşan bir model önerilmiştir. Ayrıca, müzikal tanım için iyi bilinen bir diğer boyutsal model, Thayer'in enerji-stres modelidir [8]. Bu model Russell'in döngüsel modelinden uyarlanmıştır. Bazı çalışmalarda

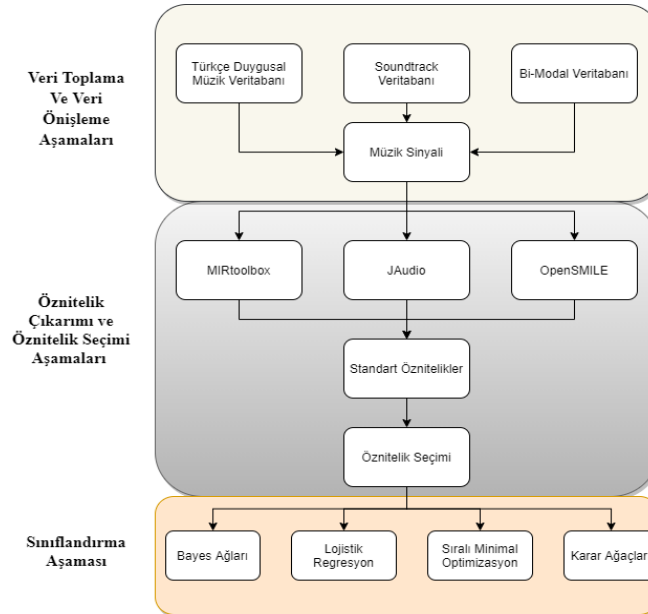
üçüncü boyut olarak baskınlık kullanılsa da genellikle iki boyutlu model tercih edilir. Kategorik modellerde kategori sayısı üzerinde fikir birliği yoktur. Boyutsal modellerin avantajı, kategorik yaklaşıma göre belirsizliğin az olmasıdır.

Müzikten duygu tanımadaki bir diğer önemli faktör kullanılan veri tabanlarıdır. Kaliteli veri tabanlarının sayısının az olması, birçok araştırmacıyı kendi veri tabanlarını oluşturmaları konusunda mecbur bırakmıştır. Yang ve Chen [9] kendi veri tabanlarını oluşturmuşlardır. Bu veri tabanı boyutsal modeller üzerinden etiketlenmiş 1240 adet pop müzikten (Çince) oluşmaktadır. Diğer bir büyük veri tabanı, M. Soleymani ve arkadaşları [10] tarafından hazırlanmıştır ve 744 adet müzik parçasından oluşmaktadır.

Sınıflandırma başarısını artırmak için gerekli aşamalardan biri de, müzikten alınan duyguyu tam olarak karşılayan akustik özellikleri çıkarmayı sağlayan özellik çıkarma işlemidir. Araştırmacılar tarafından bu zamana kadar müzik ve duygu arasında ilişki kurabilecek harmoni, tını, ritim ve enerji gibi çok çeşitli akustik özellikler bulunmuştur. Artikülasyon, ses perdesi, melodi, uyum, tonalite ve ritim gibi özellikler

kullanılmıştır [10]. Ek olarak bütün bu özellikleri bir arada getiren MIRToolbox [11], Pysound [12], Jaudio [13], OpenSMILE [14] ve Marsyas [15] gibi çok sayıda araç da mevcuttur. Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan ve duygusal özellikleri temsil etme yeteneğine sahip özellikler MIRtoolbox, OpenSMILE ve JAudio araçları kullanılarak çıkarılmıştır.

Müzikten duygu tanımda belki de en zorlu süreç doğru sınıflandırıcıyı seçme aşamasıdır. Müzikte duygu tanıma yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde çoğunlukla Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine) [16], Lojistik Regresyon [17], Sıralı Minimal Optimizasyon [18], k tane en yakın komşu (k-NN) [19], Rastgele Ormanlar [20], Karar Ağaçları (J.48) [21], ve Bayes Ağları gibi makine öğrenme yöntemlerinin kullandığı görülmektedir. Bu yöntemlerin dışında Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks, CNN), Uzun Kısa Vadeli Hafıza Ağları (Long Short Term Memory, LSTM) [22], ve derin evrişimli sinir ağları (Deep Convolutional Neural Network, DCNN) [23] gibi derin öğrenme metodları da araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır.



Şekil 1. Sistemin akış şeması

Çalışmanın şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümde kullanılan veri tabanları ile ilgili bilgiler, özneliklerin nasıl çıkarıldığı, nasıl seçildiği, kullanılan sınıflandırıcılar ile ilgili bilgiler ve gerçekleştirilme aşamaları ele alınmıştır. Üçüncü bölümde çalışma ile elde edilen bulgular analiz edilirken, çalışmanın son bölümünde elde edilen sonuçlar ve tartışmalar bulunmaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Kullanılan Veri Tabanları

2.1.1. Türkçe Duygusal Müzik Veri Tabanı

Yapılan çalışmada üç farklı veri tabanı kullanılmıştır. İlk olarak, müzikten duygu tanıma çalışmalarında kullanmak için geliştirmiş olduğumuz geleneksel Türkçe müziklerden oluşan Türkçe Duygusal Müzik Veri Tabanı [24] kullanılmıştır. Bu veri tabanı her biri 30 saniye uzunluğunda farklı türlerde 124 parçanın bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu parçalar, şarkı sözlerinin değerlendiricinin şarkının duygusu ile ilgili fikirlerini etkileyeceği düşünüldüğü için sadece müzik olacak şekilde meydana getirilmiştir. Her bir parça sadece dinleyici olmayan aynı zamanda enstrüman da kullanabilen 21 (5 kadın, 16 erkek) değerlendirici tarafından, AnnoEmo [25] programı kullanılarak 2 boyutlu modele göre değerlendirilmiştir. Daha sonra bu değerlendirmelerin her bir parça için ortalama değerleri alınmış ve 2 boyutlu düzlemde 3 farklı bölgede toplandığı görülmüştür. Son olarak bu değerlendirmeler mutlu, üzgün ve öfke olmak üzere 3 sınıfa adapte edilmiştir. Veri tabanındaki müzikler Çizelge 1'de gösterildiği gibi, 3 sınıfa dağılmıştır.

Çizelge 1. Veri tabanlarına göre müziklerin duygu dağılımı

Duygu	Türkçe Veri Tabanı	Bi-Modal Veri Tabanı	Soundtrack Veri Tabanı
Mutlu	75	52	23
Kızgın	11	45	39
Üzgün	38	31	27
Sakin	-	34	21
Toplam	124	162	110

2.1.2. Bi-Modal Veri Tabanı

Malheiro ve arkadaşları [26], tarafından yayınlanan Bi-Modal veri tabanı, farklı dönemlere ait çeşitli müzik türlerini içeren 162 şarkıdan oluşmaktadır. Her şarkı 30 saniye uzunluğundadır ve şarkılar iki boyutlu modele göre 4 duygu olarak (mutlu, öfke, üzgün ve sakin) sırasıyla 52, 45, 31 ve 34 sayıda şarkı ile dağıtılmıştır. Şarkılar, farklı özelliklere sahip 39 kişi tarafından manuel olarak değerlendirilmiştir. [24]'deki veri tabanının aksine, bu veri tabanındaki şarkılar şarkı sözleri içermekte ve farklı dillerdeki şarkılardan oluşmaktadır. Deneysel çalışmalarda sadece müzik sinyali ele alınmış ve sözler ihmal edilmiştir. Kullanılan veri tabanı, boyutu, hazırlanışı ve değerlendirme şekli gibi birçok açıdan [24]'deki veri tabanı ile benzerlik göstermektedir.

2.1.3. Soundtrack Veri Tabanı

Soundtrack (Stimulus Set 2) veri tabanı [27] farklı film türlerine sahip 110 film müzik parçasından oluşur. Her bir müzik parçası beş farklı duygu kategorisi (öfke, üzgün, mutlu, korku, sakin) ve üç boyutlu model (değerlik, enerji, baskınlık) ile değerlendiriciler tarafından etiketlenmiştir. Değerlendiriciler, 18-42 yaş arası 116 üniversite öğrencisidir (%68 kadın ve %32 erkek).

Her bir müzik parçası 15 saniyedir ve şarkı sözü, diyalog ya da ses efekti içermez. İlk 50 müzik parçasının duygu durumu 5 farklı kategoriye göre, kalan 60 müzik parçası ise 3 boyutlu düzlem ile değerlendirilmiştir. Değerlendiricilerin 60 parça için verdiği notların ortalaması alınmış ve en çok hangi duygu ile eşleşiyorsa o duyguyu temsil ettiği kabul edilmiştir. Verilen değerlere bakıldığında, öfke ve korku duygusu arasında yüksek bir korelasyon olduğunu fark edilmiş ve bu yüzden bu iki sınıf birleştirilip tek bir sınıf olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak, müzik parçaları mutlu, kızgın, üzgün ve sakin olarak 4 farklı duyguya sırasıyla 23, 39, 27 ve 21 sayılarında dağılmıştır.

2.2. Öznelik Çıkarımı

Ses sinyallerinde, eğitim modelleri için sinyalin karakteristiğini yansıtacak basit ve anlamlı veriler

elde etmek gerekir. [11,12,13]'deki gibi çalışmalar duygu sınıflandırması için en bilgilendirici öznelikleri aramaya odaklanmış olsa da duyguyu belirlemede baskın tek bir öznelik ortaya çıkmamıştır. Duygu tanıma sürecinin başarısı, müziklerden elde edilen özelliklerin, sınıf özelliklerini ne kadar iyi temsil ettiğine bağlıdır. Müziksel özellikler genellikle dinamik (enerji), tını (spektral), harmoni (melodi) ve ritim (tempo) gibi dört ila sekiz farklı başlık altında toplanabilir [20]. Yüksek enerjili müziklerin mutluluk ve öfke duyguları ile ilgili olduğu, düşük enerjili müziklerin ise sakin ve üzgün duygularıyla ilgili olduğu söylenebilir [18]. Diğer bir taraftan hızlı tempolu müzikler genellikle mutluluk veya öfke duygusuyla ilişkilendirilirken, yavaş tempolu müzikler üzgün veya sakin duyguları ile ilişkilendirilir. Yine mutlu duyguları ifade eden müzikler, genellikle üzgün duygulara sahip müziklerden daha büyük bir spektral enerjiye sahiptirler. Son olarak, basit ve uyumlu, harmoniler genellikle mutlu veya sakin gibi duygularla ilgili iken, karmaşık, uyumsuz harmoniler, müzikal bir harekette istikrarsızlık yarattıkları için öfke veya üzgün gibi duygularla ilgilidir [18]. Bu çalışmada müziklerden almamız gereken öznelıklar, çalışmalarda sık karşılaştığımız ve çok sayıda öznelik çıkarmamızı sağlayan MIRtoolbox, OpenSMILE, ve JAudio araçları kullanılarak toplanmıştır.

Yaygın olarak kullanılan bir yazılım olan MIRtoolbox, kendine özgü entegre bir dizi fonksiyona sahip olmakla birlikte, müzik verilerinden bilgi çıkarma alanındaki hesaplama yaklaşımlarına genel bir bakış sağlamak için hazırlanmıştır. MATLAB'a entegre bu yazılımın avantajları, kullanımı kolay ve kapsamlı dökümantasyona sahip olmasıdır. Bu yazılım sayesinde hem düşük hem de yüksek seviyeli çok sayıda öznelik çıkarılabilmektedir. Örneğin, bu çalışmada 348 öznelik çıkarılmıştır.

OpenSMILE yazılımı, sinyal işleme ve makine öğrenim teknikleri için modüler ve esnek bir öznelik çıkarıcıdır. Bu yazılım ilk olarak, konuşma işleme için tasarlanmış olsa da, duygu tanıma konusundaki birçok çalışmada da iyi performans göstermiştir. Büyük OpenSMILE

(emo-large) duygu öznelik seti, düşük düzeyli tanımlayıcılara, çeşitli işlevler, filtreler ve dönüşümler uygulanarak çok sayıda öznelik çıkarmamızı sağlar. Bu çalışmada OpenSMILE yazılımı kullanılarak 6553 öznelik çıkarılmıştır.

Son olarak, JAudio kütüphanesi kullanılmış ve MIRtoolbox'tan daha fazla öznelik (468 adet) çıkarılmıştır. Öznelik çıkarma sırasında karşılaşılan sorunlara kapsamlı bir çözüm sağlayan JAudio, Java ortamında yazılan, öznelikleri hem kullanıcı arayüzü hem de komut satırı kullanılarak çıkarabilen açık kaynaklı bir kütüphanedir. OpenSMILE ve MIRtoolbox'tan farklı olarak, karekök ortalama, düşük enerji, en güçlü vuruş, gibi çok sayıda özelliğin kullanımına olanak sağlar. Ayrıca standart sapma, türev ve ortalama gibi meta öznelikler herhangi bir özneliğe uygulanabilir ve öznelik sayısı genişletilebilir.

2.3. Öznelik Seçimi

Müziklerden çıkarılan özneliklerin kalitesi, başarı oranını ve sınıflandırma yöntemlerini etkileyen önemli bir faktördür. Örneğin, öznelik çıkarma işlemi bittikten sonra yüzlerce veya binlerce özelliğe sahip olma şansımız vardır. Ancak, modele verilecek çok fazla öznelik olması modelin çalışmasını zorlaştırır, eğitim süresini ve süreç yükünü artırır. Çünkü öznelikler eşit önemde değildir ve mevcut öznelikler arasından en iyileri seçmek gerekir. Eğitim sırasında duygu tanıma performansını olumsuz yönde etkileyen gereksiz öznelikleri ortadan kaldırmak için veri setlerinde çeşitli öznelik seçme yöntemleri kullanılır. Öznelik seçim yöntemleri, tahmin doğruluğunu en üst düzeye çıkararak, en uygun öznelik setini bulmayı sağlar. Bu nedenle öznelik seçimi müzikten duygu tanıma için önemli bir adımdır. Çalışmamızda, öznelik uzayımızın boyutu, Korelasyon Tabanlı Öznelik Seçimi Algoritması (Correlation-based Feature Selection, CFS) [28] kullanılarak küçültülmüş ve daha kolay çalışılabilir hale dönüştürülmüştür. Bu algoritma, birbiriyle bağlantısı olmayan ama sınıfla ilişkisi yüksek öznelik alt kümelerini sezgisel fonksiyon aracılığıyla sıralayarak işlemini gerçekleştirir.

2.4. Sınıflandırıcılar

Sınıflandırma, eldeki verilerle, belirli öznelikler dikkate alınarak, sınıfı belli olmayan verilerin çeşitli sınıflara ayrılmasına denir. Sınıflandırma problemlerinde çıktı uzayındaki her elemana "sınıf", sınıflandırma problemini çözen algoritmaya ise "sınıflandırıcı" adı verilir. Sınıflandırma makine öğreniminin popüler ve temel görevlerinden biridir ve denetimli öğrenme problemidir. Makine öğrenme yöntemleri, modeli iyi etiketlenmiş veriler üzerinden öğrenebilen ve bilinmeyenler hakkında tahminlerde bulunabilen sınıflandırıcılar. Sınıflandırma işleminde, örneklerden çıkarılan öznelik veri tabanı "eğitim" ve "test" olmak üzere iki gruba ayrılır, bazıları sınıflandırıcıyı eğitmek için, diğerleri ise test etmek için kullanılır. Eğitim için önceden sınıfları belirli veri seti olmalıdır. Test için veri setine yeni örnekler eklenmesindeki amaç, bunları mevcut sınıflar içinden en yüksek doğrulukla uygun sınıfa yerleştirmektir. Yani sınıflandırmanın amacı, hangi sınıfa ait oldukları bilinen örneklerin özneliklerini kullanarak bir model oluşturmak ve bu modeli, özellikleri bilinmeyen yeni örneklerin sınıflandırılmasında kullanmaktır. Modelin başarı oranı yeterli ise, elde edilen modelin mevcut problemin çözümünde etkili olduğu söylenebilir. Tanıma sistemlerinin başarısında, sınıflandırma yöntemi öznelik çıkarma kadar önemlidir ve çoğu zaman hangi sınıflandırma yönteminin en iyi veya en uygun olduğu kesin olarak söylenemez. Örneklerin yapısı ve sayısı, işlem süresi ve karmaşıklık gibi faktörler, bir sınıflandırma yöntemini diğerinden daha başarılı hale getirebilir. Sınıflandırma aşamasında WEKA [29] programı kullanılmıştır. Bu program içerisinde çok sayıda sınıflandırma ve kümeleme algoritmaları bulunmaktadır. Duygu analizi ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, makine öğrenimi yöntemlerinin birçok kez tercih edildiği görülmektedir. Bu çalışmada, oldukça popüler olan ve yaygın olarak uygulanan Karar Ağaçları (J.48), Bayes Ağları, Sıralı Minimal Optimizasyon, ve Lojistik Regresyon, kullanılmıştır. Bu sınıflandırıcılar Weka'nın varsayılan parametreleri ile kullanılmıştır.

2.4.1. Karar Ağaçları

Karar ağaçları yorumlanması kolay, veri yapılarını ifade etmede başarılı, hızlı, ve güvenli olması nedeniyle yaygın kullanılan makine öğrenme algoritmalarındandır. Deneysel çalışmalar çoğu zaman Weka da gerçekleştirildiği için karar ağacı olarak J.48 algoritması [29] kullanılmaktadır [21]. Bu algoritma çalışmalarda sık karşımıza çıkan C4.5 [30] algoritmasına dayanır ki bu algoritma da ağaç oluşturma algoritması ID3'ün geliştirilmiş versiyonudur. J.48, ilk olarak entropi değerini hesaplar ve karar ağacı oluşturma işlemine dallanmanın hangi niteliğe göre olacağını belirler. Daha sonra bilgi kazançlarını da hesaplayarak devam eder. Bu hesaplamaların amacı, en yüksek bilgi kazancı sağlayan sınıfı bulmaktır. Bilgi kazancı en yüksek olan değişken, köke yerleştirilir ve ağaç bu değişkenden itibaren yukarıdan aşağıya doğru özyinelemeli olarak dallandırılır. Eğer kayıp bir veri varsa, bu veri diğer veriler kullanılarak tahmin edilebilir. Amaç, bütün düğümlerde en az sayıda örnek olana kadar ağacı büyütme. Ayrıca anlamlı olmayan, zayıf düğümlere budama işlemi yapılarak ağaç optimize edilir.

2.4.2. Bayes Ağları

Judea Pearl [31] tarafından önerilen Bayes ağları, son dönemde sık karşılaştığımız, veri modelleme ve durum geçişi ifade etmek için kullanılan olasılıksal ağlardır. Çıkarım yapma ve yorumlama açısından başarılı olduğu için bir çok alanda kullanılmaktadır. Bayes Teoremi'nin üzerine inşa edilmiştir ve olasılık ilişkisi bulunan küme elemanlarının ilişkilerini modellemeye yarar. Grafikler ve tablolar sayesinde, anlaşılması zor matematiksel denklem ve ifadeleri daha anlaşılabilir hale getirir. Bayes ağlarında her düğüm bir raslantı değişkenini ifade eder ve daire biçiminde gösterilir. Düğümler arasındaki yollar değişkenler arasındaki olasılıksal bağımlılıkları açıklar ve düğümler arasına çizilen oklarla gösterilirler. Bu ilişkileri, hem ilişkili düğümleri hem de ilişkisiz düğümleri anlatan yönlü, çevrimsiz grafikleri kullanarak yapar.

2.4.3. Sıralı Minimal Optimizasyon

Sıralı Minimal Optimizasyon Algoritması (SMO), John Platt [32] tarafından geliştirilmiştir. Destek vektör sınıflandırıcısını (SVM) eğitmek için kullanılan kavramsal olarak basit, uygulaması kolay ve popüler bir algoritmadır. Her aşamada mümkün olan en küçük optimizasyon sorununu çözerek sonucu elde etmeyi hedefler. Çünkü SVM, eğitim aşamasında büyük miktarda karesel programlama hesaplamaları gerektirir ve SVM'nin eğitim algoritmaları da bu büyük problemlerde yavaştır ve karmaşıktır. SMO, SVM'nin standart eğitim algoritmalarının aksine, bu hesaplamaları, ekstra matris depolaması olmadan, küçük problemlere bölerek, hızlı ve daha iyi bir şekilde çözmek için geliştirilmiştir. İlk adım, başlangıç parametrelerini ayarlamaktır. İkinci adım ise döngü prosedürüdür. Döngü prosedürü, iki Lagrange çarpanını seçmek, bunların iyileştirmelerini takip etmek ve SVM parametrelerini güncellemek olan üç temel işlemi gerçekleştirir. Döngüler iç ve dış olmak üzere 2 döngüden oluşur. Bütün örnekler istenilen seviyeye çıkana kadar döngüler çalıştırılmaya devam eder. SMO sınıflandırma problemlerinin dışında ayrıca regresyon işlemlerinde de kullanılır.

2.4.4. Lojistik Regresyon

Lojistik Regresyon, verilerin sınıflandırılmasında ve regresyon işlemlerinde kullanılır. Standart regresyon problemlerinde olduğu gibi bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri araştırır ve en az değişken ile en çok uyumu sağlayan matematiksel bir model kurar. Kullanımı rahat, esnek ve aynı zamanda doğrusal olmayan verilerle çalışıldığında da başarılı bir yöntemdir [33]. Bu metod, birçok istatistiksel analiz metoduyla benzerlikler gösterir. Lojistik regresyon, logit fonksiyonunu kullanarak, olayın olma olasılığının olmama olasılığına bölünmesiyle elde edilen değerler e tabanında logaritmasının alınmasıyla bulunur. Bu fonksiyon ile negatif ve pozitif değerler alabilen ve 0-1 aralığında bir olasılığa çevrilebilen metrik bir değişken elde edilir.

2.5. Gerçekleştirim

Bu çalışmada OpenSMILE aracı kullanılarak 6553 öznitelik, MIRtoolbox aracı kullanılarak 348 öznitelik ve son olarak JAudio aracı kullanılarak 468 öznitelik olmak üzere toplamda 7369 öznitelik çıkarılmıştır. Bu araçlardan çıkarılan öznitelikler hem bir arada, hem de ayrı ayrı olarak çalışmalarda kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar, Java dilinde geliştirilmiş, açık kaynak kodlu WEKA programı kullanılarak yapılmıştır. Sınıflandırma modellerinin eğitilmesi ve sonuçların değerlendirilmesi için K Katlamalı Çapraz Doğrulama (K-Fold Cross Validation) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde göre veri seti 10 eşit parçaya ayrılır (K=10) ve bu parçalardan 9'u eğitim verisi olarak kullanılarak model oluşturulur. Oluşturulan model geriye kalan 1 test verisi üzerinden test edilir ve doğruluk oranı hesaplanır. Her bir parça hem eğitim verisi hem de test verisi olarak kullanılına kadar bu işlem 10 kez tekrarlanır. Modelin doğruluğu, 10 kez yapılan bu işlem sonucunda bulunan doğruluk oranlarının aritmetik ortalaması alınarak hesaplanır. Oluşturulan modeller doğruluk ölçütü kullanılarak değerlendirilmiş ve bu değerleri bulmak için hata matrisi oluşturulmuştur. Doğruluk ölçütü, başarılı sınıflandırılmış örnek sayısının (DN+DP), toplam örnek sayısına oranına (DN+DP+YP+YN) bölünmesi ile Eşitlik 1'de gösterildiği gibi bulunur.

Tahmin Edilen

	Doğru Pozitif (DP)	Yanlış Pozitif (YP)
Gerçek	Yanlış Negatif (YN)	Doğru Negatif (DN)

Şekil 2. Hata matrisi

Oluşturulan modellerin başarısını ölçmek için, doğruluk ölçütü dışında yaygın olarak kullanılan başka ölçütler de vardır. Hata oranı, duyarlılık, kesinlik ve f-ölçütü, bu ölçütlerin en bilinenlerindedir.

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

3. BULGULAR

Müzikteki duyguyu belirlemek için yapılan çalışmalar incelendiğinde, araştırmacıların neredeyse tamamına yakınının batı müziğindeki örnekleri kullanarak çalışma yaptıkları görülmüştür. Bu çalışmada ise farklı kültüre ait ve farklı türdeki müziklerden oluşan 3 veri tabanındaki müziklerden duygu tanıma yapılmak istenmektedir.

Türkçe müziklerden oluşan veri tabanında elde edilen duygu tanıma oranının diğer veri tabanlarından elde edilenlere oranla daha yüksek

olduğu görülmektedir. Buradan, Türkçe müziklerden insana geçen duyguların, diğer dillere ve kültürlere ait müziklerle kıyaslandığında daha net bir şekilde aktarıldığı sonucu çıkarılabilir. Ek olarak, bu veri tabanının daha az sınıftan oluşması ve sınıflara ait müziklerin eşit şekilde dağılmamasının da etkisi olduğu düşünülebilir. Bi-modal veri tabanında ise, Soundtrack veri tabanına oranla daha az tanıma yapıldığı görülmektedir. Şarkı sözleri bunun gerçekleşmesinde önemli bir etken olabilir. Çünkü müzikleri etiketleyen değerlendiriciler şarkı sözlerinden etkilenebilirler.

Çizelge 2. Türkçe duygusal veri tabanı üzerinde yapılan sınıflandırma sonuçları

Sınıflandırıcılar	MIRtoolbox		Jaudio		OpenSMILE	
	Öznitelik Seçimi Öncesi	Öznitelik Seçimi Sonrası	Öznitelik Seçimi Öncesi	Öznitelik Seçimi Sonrası	Öznitelik Seçimi Öncesi	Öznitelik Seçimi Sonrası
Bayes Ağları	%87,09	%94,35	%81,45	%91,93	%83,87	%94,35
Karar Ağaçları	%82,25	%87,09	%83,87	%84,67	%81,45	%82,25
Lojistik Regresyon	%77,41	%87,09	%75	%85,48	%82,25	%91,12
SMO	%89,51	%90,32	%89,51	%89,51	%90,32	%93,54

Çizelge 3. Bi-Modal veri tabanı üzerinde yapılan sınıflandırma sonuçları

Sınıflandırıcılar	MIRtoolbox		Jaudio		OpenSMILE	
	Öznitelik Seçimi Öncesi	Öznitelik Seçimi Sonrası	Öznitelik Seçimi Öncesi	Öznitelik Seçimi Sonrası	Öznitelik Seçimi Öncesi	Öznitelik Seçimi Sonrası
Bayes Ağları	%61,72	%66,04	%59,25	%63,58	%63,58	%79,62
Karar Ağaçları	%58,02	%61,72	%51,85	%56,79	%55,55	%60,49
Lojistik Regresyon	%43,20	%55,55	%41,35	%49,38	%49,38	%52,46
SMO	%63,96	%64,81	%61,11	%63,58	%70,98	%72,22

Ayrıca Soundtrack veri tabanı belirli sahnelerde belirli duyguları vurgulamak için yapılan film müziklerinden oluştuğu için, değerlendiriciler tarafından daha iyi etiketlenme ihtimali vardır.

Müziklerden çıkarılacak öznitelikler ise 3 (MIRtoolbox, OpenSMILE, JAudio) farklı araçtan sağlanmıştır. Çıkarılan öznitelikler klasik makine öğrenme metotları olan 4 farklı sınıflandırıcı ile kullanılmıştır. Çizelgelerdeki sonuçlara bakıldığında öznitelik seçim işleminin tanıma oranlarını artırmada ne kadar etkili olduğu görülmüştür. Çünkü sınıflandırma metotlarının

hepsi bu işlem uygulandıktan sonra başarılarını önemli ölçüde artırmıştır.

Ayrıca verilen çizelgeler incelenirse, her bir veri tabanı için araçların ayrı ayrı kullanılmasıyla çıkarılan öznitelikler ile en iyi duygu tanıma yapan sınıflandırıcılar görülmektedir. Hemen hemen bütün sonuçlarda, öznitelik seçimi öncesinde SMO sınıflandırıcısı, öznitelik seçimi sonrasında ise Bayes ağları sınıflandırıcısı en iyi sonucu elde etmiştir. Son çizelgede ise, bütün veri tabanlarında en iyi sonuçları almamızı sağlayan Bayes ağları metodunun, farklı araçlarla ve bu araçların

hepsinden çıkarılan özneliklerin bir araya getirilmesi ile elde edilen doğruluk oranları gösterilmiştir. Bütün öznelikler bir araya gelince, öznelik sayısının artışına da bağlı olarak tanıma oranları Türkçe Duygusal Müzik veri tabanında %1,6 artış ile %95,96'ya, Bi-Modal veri tabanında %0,62 artış ile %80,24'e ve son olarak Soundtrack veri tabanında %7,27 artış ile %82,72'ye çıktığı gözlemlenmiştir. Bu oranlar, deneysel çalışmalarda bu veri tabanları için elde edilen en yüksek tanıma oranlarıdır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Kullanılan araçlar sayesinde çıkarılan öznelikler ile yapılan duygu tanıma işlemi sonuçlarına bakıldığında en başarılı sonuçlara OpenSMILE aracı kullanıldığında ulaşıldığı görülüyor. Bu aracın öznelik sayısı bakımından diğer araçlara oranla çok fazla olması ve çok daha farklı öznelikleri kazandırması bu başarıdaki temel etken olarak düşünülebilir.

Çizelge 4. Soundtrack veri tabanı üzerinde yapılan sınıflandırma sonuçları

Sınıflandırıcılar	MIRtoolbox		Jaudio		OpenSMILE	
	Öznelik Seçimi Öncesi	Öznelik Seçimi Sonrası	Öznelik Seçimi Öncesi	Öznelik Seçimi Sonrası	Öznelik Seçimi Öncesi	Öznelik Seçimi Sonrası
Bayes Ağları	%53,63	%67,27	%70,00	%70,90	%44,54	%75,45
Karar Ağaçları	%59,09	%63,63	%53,63	%59,09	%46,36	%70,00
Lojistik Regresyon	%54,54	%66,36	%45,45	%53,63	%48,18	%57,27
SMO	%61,81	%69,09	%53,63	%56,36	%61,81	%70,90

Çizelge 5. Farklı veri tabanları üzerinde ayrı ayrı ve birlikte kullanıldığı durumlarda elde edilen sonuçlar

Araçlar	Türkçe Duygusal Müzik Veri Tabanı	Bi-Modal Veri Tabanı	Soundtrack Veri Tabanı
	Bayes Ağları Sonuçlar	Bayes Ağları Sonuçlar	Bayes Ağları Sonuçlar
MIRtoolbox	%94,35	%66,04	%67,27
JAudio	%91,93	%63,58	%70,90
OpenSMILE	%94,35	%79,62	%75,45
MIRtoolbox + JAudio + OpenSMILE	%95,96	%80,24	%82,72

Daha önce bahsedildiği gibi farklı araçların kullanılmasının nedeni farklı özneliklerin çıkarılmasıdır. Dolayısıyla araçlar bir arada kullanıldığında kendilerinde bulunmayan öznelikler de öznelik havuzuna eklenir. Havuzdaki farklı öznelik sayısının artması ile doğru orantılı olarak tanıma oranlarının da artacağı düşüncesinin doğru olduğu Çizelge 5 incelendiğinde görülmüştür. Öznelik seçim işlemi sonrasında sınıflandırma için kullanılacak öznelik sayısının Türkçe müziklerden oluşan veri tabanında 81'e, Bi-Modal veri tabanında 106'ya ve

son olarak Soundtrack veri tabanında 80'e düştüğü görülmektedir. Ancak, bu özneliklerin temsil edilen sınıflarla yüksek ilintili olması ve sistemin sınıflarla ilişkisi olmayan gereksiz özneliklerden arındırılması tanıma oranını önemli ölçüde artırır.

Veri tabanları ile ilgili sonuçlar incelendiğinde, neredeyse bütün veri tabanlarında, öznelik seçim işlemi öncesinde SMO'nun, öznelik seçim işlemi sonrasında ise Bayes ağlarının en başarılı sonuçları aldığı gözlenmektedir. Bu sonuçlardan büyük miktarda verilerin kullanıldığı ve fazla hesaplama

gerektiren durumlarda SMO'nun, veri sayılarının az olduğu durumlarda ise Bayes Ağları'nın, diğer yöntemlerden daha iyi neticeler elde ettiği söylenebilir.

Bu çalışmada yeni bir yöntem önerilmemiş, klasik makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak farklı kültürlere ait farklı türdeki müziklerden oluşan veri tabanları üzerindeki duygu tanıma performansları ölçülmüş ve daha sonraki çalışmalara bir temel oluşturulmak istenmiştir. Yöntem olarak Sıralı Minimal Optimizasyon, Lojistik Regresyon, Bayes Ağları ve Karar Ağları kullanılmıştır. Bu yöntemlerin, öznelik seçim işlemi uygulandıktan sonrasındaki performansları karşılaştırıldığında, Bayes Ağlarının diğer metotlardan çok daha başarılı tanıma oranları elde ettiği gözlenmiştir. Bu yöntemi sırasıyla Sıralı Minimal Optimizasyon, Karar Ağları ve Lojistik Regresyon yöntemleri takip etmektedir.

Türkçe müziklerden oluşan veri tabanında Bayes Ağları, öznelik seçimi sonrasında duygu tanıma için %94,35 doğruluk oranı elde ederken, bütün araçlar bir arada kullanılarak öznelik sayısının artmasıyla, doğruluk oranını %95,96'ya çıkarmıştır. Bi-modal veri tabanında ise öznelik seçimi sonrasında %79,62 doğruluk oranı elde ederken, bütün araçlar bir arada kullanıldığında %80,24 tanıma yapmıştır. Son olarak Soundtrack veri tabanında ise öznelik seçimi sonrasında %75,45 tanıma yaparken, bütün araçlar bir arada kullanıldığında %82,72 doğruluk oranı elde etmiştir. Deneysel sonuçlar kullanılan veri tabanlarının kalitesini, çıkarılan özneliklerin tanıma oranlarına katkısını ve kullanılan sınıflandırıcıların ne kadar etkili sonuçlar ortaya koyduğunu göstermiştir.

5. KAYNAKLAR

1. Alakuş, T.B., Türkoğlu, İ., 2018. EEG Tabanlı Duygu Analiz Sistemleri. Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi, 11(1), 26-39.
2. Kaya, A.İ., 2018. Üniversite Öğrencilerinde Dini İçerikli Müzik Terapinin Kaygı, Duygu Durumu ve Algılanan Stres Üzerindeki Etkisi. Uluslararası Din & Felsefe Araştırmaları Dergisi 1,1.
3. Erdal, B., 2015. Hissedilen ve Algılanan Duygular Bağlamında Arabesk Müzik Beğenisi Etkileyen Faktörler Üzerine Bir Araştırma. International Journal of Human Sciences, 12, 1: 1016-1055 doi: 10.14687/ijhs.v12i1.3199.
4. Hevner, K., 1936. Experimental Studies of the Elements of Expression in Music. The American Journal of Psychology, 48(2), 246-268.
5. Feng, Y., Zhuang, Y., Pan, Y., 2003. Popular Music Retrieval by Detecting Mood. In: SIGIR Forum (ACM Spec. Interes. Gr. Inf. Retrieval), 375-376.
6. Ekman, P., 2005. Basic Emotions. In Handbook of Cognition and Emotion, (3), 45-60, doi: 10.1002/0470013494.ch3.
7. Russell, J.A., 1980. A Circumplex Model of Affect. Journal of Personality and Social Psychology, 39, 1161-1178.
8. Thayer, R.E., 1989. The Biopsychology of Mood and Arousal. New York: Oxford University Press.
9. Yang, Y.H., Chen, H.H., 2011. Ranking-based Emotion Recognition for Music Organization and Retrieval. IEEE Transactions on Audio Speech and Language Processing, 19, 762-774.
10. Soleymani, M., Caro, M.N., Schmidt, E.M., Sha, C.Y., Yang, Y.H., 2013. 1000 Songs for Emotional Analysis of Music. CrowdMM- Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Crowdsourcing for Multimedia; 1-6, doi:10.1145/2506364.2506365
11. Lartillot, O., Toivainen, P., 2007. Mir in Matlab (II): A Toolbox for Musical Feature Extraction from Audio. Proceedings of the 8th International Conference on Music Information Retrieval, September 23-27, Vienna, Austria, 127-130.
12. Cabrera, D., 1999. PsySound: A Computer Program for Psychoacoustical Analysis. Australian Acoustical Society Conference, 47-54, doi: 10.1002/asi.
13. McKay, C., 2009. JAudio: Towards a Standardized Extensible Audio Music Feature Extraction System. Course Paper, McGill University, Canada.

14. Eyben, F., Schuller, B., 2015. OpenSMILE–The Munich Versatile and Fast Open-source Audio Feature Extractor. *ACM SIGMultimedia Records*, 6(4), 4–13, doi: 10.1145-2729095.2729097.
15. Tzanetakis, G., Cook, P., 1999. MARSYAS: A Framework for Audio Analysis. *Organised Sound*, 4(3), 169-175.
16. Song, Y., Dixon, S., Pearce, M., 2012. Evaluation of Musical Features for Emotion Classification. *Proceedings of the 13th International Society for Music Information Retrieval Conference*, October, Porto, Portugal.
17. Kim, Y., Schmidt, E., Migneco, R., Morton, B., Richardson, P., Scott, J., Speck, J., Turnbull, D., 2010. State of the Art Report: Music Emotion Recognition: A State of the Art Review. *Proceedings of the 11th International Society for Music Information Retrieval Conference*, 9-13 August, Utrecht, Netherlands. 255-266.
18. Rocha, B., Panda, R., Paiva, R.P., 2013. Music Emotion Recognition: The Importance of Melodic Features. *6th International Workshop on Music and Machine Learning in conjunction with the European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases*, September, Prague, Czech Republic.
19. Delbouys, R., Hennequin, R., Piccoli, F., Royo-Letelier, J. ve Moussallam, M., 2018. Music Mood Detection Based on Audio and Lyrics with Deep Neural Net. *CoRR*, abs/1809.07276.
20. Zhang, F., Meng, H., Li, M., 2016. Emotion Extraction and Recognition from Music. *12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 1728-1733, doi: 10.1109-FSKD.2016.7603438.
21. Grekow, J., 2015. Audio Features Dedicated to the Detection of Four Basic Emotion. *Computer Information Systems and Industrial Management: CISIM'2015: 14th IFIP TC8 International Conference*, September 24-26, Warszawa, Poland.
22. Benito-Gorron, D.de., Lozano-Diez, A., Toledano, D.T., Gonzalez- Rodriguez, J., 2019. Exploring Convolutional, Recurrent, and Hybrid Deep Neural Networks for Speech and Music Detection in a Large Audio Dataset. *Eurasip Journal on Audio, Speech, and Music Processing*, (1), 1–18.
23. Sarkar, R., Choudhury, S., Dutta, S., Roy, A., Saha, S.K., 2019. Recognition of Emotion in Music Based on Deep Convolutional Neural Network. *Multimedia Tools and Applications*, 79, 765–783.
24. Hızlısoy, S., Tüfekçi, Z., 2020. Türkçe Müzikten Duygu Tanıma. *1st International Conference on Computer, Electrical, and Electronic Sciences*, 8-10 October 2020.
25. Yang, Y.H., Su, Y.F., Lin, Y.C., Chen, H.H., 2007. Music Emotion Recognition: The Role of Individuality. In *Proceedings of the ACM International Workshop on Human-Centered Multimedia*, 13-21.
26. Malheiro, R., Panda, R., Gomes, P., Paiva, R.P., 2016. Bi-Modal Music Emotion Recognition: Novel Lyrical Features and Dataset. *9th International Workshop on Music and Machine Learning-MML'2016-in Conjunction with the European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases-ECML/PKDD*, Riva del Garda, Italy.
27. Eerola, T., Vuoskoski, J., 2011. A Comparison of the Discrete and Dimensional Models of Emotion in Music. *Psychology of Music*, 10.1177/0305735610362821.
28. Hall, M., Smith, L., 1997. Feature Subset Selection: A Correlation-based Filter Approach. *Proceedings of the 4th International Conference on Neural Information Processing and Intelligent Information Systems*, New Zealand, 855–858.
29. Hall, M., Frank, E., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P., Witten, I., 2008. The WEKA Data Mining Software: An Update. *SIGKDD Explor. Newsl.* 11. 10-18.
30. Quinlan, J.R., 1993. *C4.5: Programs for Machine Learning*. Morgan Kaufmann Publishers.
31. Pearl, J., 1985. Bayesian Networks: A Model of Self-activated Memory for Evidential Reasoning. *Proceedings of the Seventh Conference of the Cognitive Science Society*, California, USA.

32. Platt, J., 1998. Sequential Minimal Optimization: A Fast Algorithm for Training Support Vector Machines. Microsoft Research Technical Report: MSRTR, 98-14.
33. Le Cessie, S., van Houwelingen, J.C., 1992. Ridge Estimators in Logistic Regression. Applied Statistics, 41(1), 191-201.

Evaluation of CNT/MOSFET Based Active Electrode with ECG, EMG, and EEG Signals

Mustafa İSTANBULLU*¹, Mutlu AVCI¹

¹Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Biomedical Engineering, Adana

Geliş tarihi: 21.09.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Abstract

In this study, the electrical circuit equivalents of the previously designed novel CNT/MOSFET based active electrode and commonly used wet electrode are simulated by applying different biopotentials. Responses of the electrode models are compared within the certain skin surface circumstances. Fourier transforms and total harmonic distortion calculations of obtained biopotentials are examined to assess the electrodes. The simulation results demonstrate that the CNT / MOSFET based electrode predominates the wet electrode and can measure biopotentials with high quality.

Keywords: CNT, MOSFET, Biopotential electrodes, Fourier transform, Total harmonic distortion

KNT/MOSFET Tabanlı Aktif Elektrotun EKG, EMG, EEG İşaretleri ile Değerlendirilmesi

Öz

Bu çalışmada, önceden tasarlanmış olan özgün KNT/MOSFET tabanlı aktif elektrotun ve yaygın olarak kullanılan ıslak elektrotun elektrik devresi eşdeğerlerine, farklı biyopotansiyeller uygulanarak benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Elektrotların giriş sinyallerine verdiği yanıtlar, belirli cilt yüzeyi koşullarında karşılaştırılmıştır. Elektrotları değerlendirmek için elde edilen biyopotansiyellerin Fourier dönüşümleri ve toplam harmonik bozulmaları incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, KNT/MOSFET tabanlı elektrotun ıslak elektrottan daha iyi sonuçlar verdiğini ve biyopotansiyelleri yüksek kalitede ölçebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: KNT, MOSFET, Biyopotansiyel elektrotlar, Fourier dönüşümü, Toplam harmonik bozulma

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Mustafa İSTANBULLU, mistanbullu@cu.edu.tr

1. INTRODUCTION

Many organs and tissues in the human body exhibit their health states or functions with electrical signals called biopotentials. The signals obtained from the activities of the heart (electrocardiogram), brain (electroencephalogram), or muscle (electromyogram) are examples of biopotentials. These electrophysiological signals or the other biopotentials measured from the human body enable the identification of the diseases.

Biopotentials are small-amplitude signals in the microvolts or millivolts, and their frequencies are between DC to several hundred hertz [1]. The quality of the measuring electrode is crucial to acquire these small amplitude signals from the skin surface with high precision [2]. Artefacts and noises on a biopotential signal generally depend on the measuring electrodes as well as the skin surface. The surface of the human skin contains a high number of dead cells and hairs, leading to increased resistivity and decreased contact surface area with the measuring electrode [3]. Therefore, the surface of the skin must be prepared before performing the measurement. Abrasion of the outermost stratum corneum layer decreases the contact resistivity arising from dead cells. Besides, applying a conductive electrolytic gel on the skin surface also decreases the resistivity and increases the surface area between the electrode and skin. The electrolytic gel between the skin surface and electrode, diffuses into the skin and enables forming a highly conductive layer.

Although the self-gelled skin electrodes present good performance for short duration measurements, signal deterioration occurs on long-duration records, since the gel dries out over a period of time. Besides, the conductive gel is allergenic. Gel-free dry electrodes are a promising alternative for long-duration recordings [4]. There are various dry electrodes, from a pure disk metal to silicon-based microfabricated electrodes containing on-chip amplifiers [5,8]. However, the absence of conductive gel in dry electrodes causes high electrode-skin impedance, high interface potential, and low signal quality problems [9,10].

In the literature, dry electrode designs involve carbon nanotubes to decrease high contact impedance as an alternative to metallic needle electrodes [11,12]. Researches show that the vertically aligned carbon nanotube electrodes have low electrode-skin impedance and can increase the measurement quality according to dry and wet electrodes. Since CNT utilizing electrodes do not contain electrolytic gel, which negatively affects the signal quality over time, it maintains the signal quality even in long-term measurements. Although CNTs increase the quality of the measured signal, they should not be designed long enough to reach nerve cells when attached to the skin [13].

In this work, previously designed novel CNT/MOSFET based active electrode [14] is simulated and evaluated in terms of signal quality for ECG, EMG and EEG signals. The input biopotential signals are selected randomly from the Massachusetts Institute of Technology Beth Israel Hospital database. The biopotential signals are also applied to the circuit equivalents of commonly used wet electrodes for comparison. Simulations are performed for two different skin surface cases. The first case is prepared skin and the second case is unprepared skin surfaces. The simulations of previously designed electrode are performed under the worst skin case specifications. The obtained biopotential signals and their Fourier transforms are compared. Additionally, total harmonic distortions of obtained signals are calculated. The simulation results indicate the high performance and feasibility of the CNT/MOSFET based active electrode for clinical applications.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. The CNT/MOSFET Based Electrode

The novel CNT/MOSFET based electrode increases the electrode-skin contact surface area by utilizing CNTs. CNTs constitute a robust interface contact that leads to reduce motion artifacts. Additionally, the electrode does not require conductive gel and abrasion process since it penetrates the skin surface. The mentioned multi-walled, metallic CNT arrays are grown on the gate

of depletion type n-channel MOSFET. MOSFET in the electrode converts biopotentials from voltage to current form and provides high dielectric insulation between the skin and instrumentation unit. Besides, the MOSFET device amplifies the measured signal with low-noise as reported previously. [14]. Figure 1 shows the CNT/MOSFET based active electrode model.

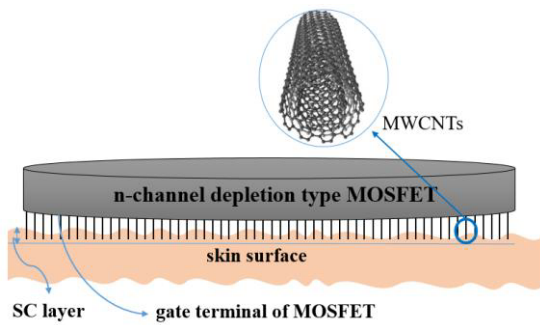


Figure 1. Schematic of CNT/MOSFET based electrode

As shown in the figure vertically aligned brush-like CNT arrays are grown on the gate terminal of the n-channel depletion type MOSFET. CNTs penetrate the outermost layer of the skin. The electrode provides stable contact and decreased contact resistance since the CNTs bypassed the dead skin layer. Figure 2 shows the AC equivalent of the electrode. As shown in the figure, circuit equivalent model of individual CNT in contact with the gate terminal of the MOSFET is given at the left hand side. Small signal AC equivalent of the n-channel depletion type MOSFET is located at the right hand side. When the electrode attached to the skin surface, CNTs acquire biopotentials and transfer to the MOSFET. The MOSFET converts the sensed biopotential to a current flowing between source and drain terminals.

The electrode contains several numbers of CNT/MOSFET hybridized cells in an array manner. All drain and source terminals in individual measuring cell are electrically connected to each other as shown in Figure 3. Thus, biopotentials from different sites of the skin acquired simultaneously.

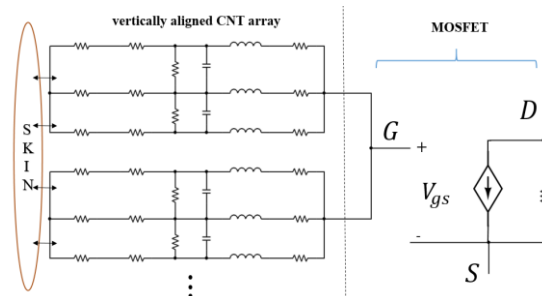


Figure 2. AC equivalent circuit of CNT/MOSFET based electrode

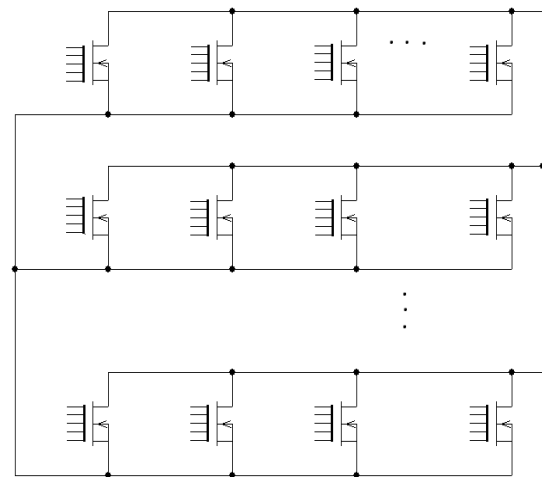


Figure 3. The complete circuit diagram of the CNT/MOSFET based electrode

2.2. The Electrode-Skin Interface

The skin-electrode interface is in fact a RC network. The circuit equivalent model of a skin-wet electrode interface is given in Figure 1 (ref), in which the model for popular Ag/AgCl electrode is used. In Figure 1, R_d and C_d are the resistance and capacitance associated with the electrode-electrolyte interface, respectively. R_s is the effective resistance related with the interface effects of the electrolytic gel between electrode and the skin. E_{se} potential arises from the ionic concentration difference across epidermis. Epidermis layer also behave as an electrical impedance represented by a parallel RC circuit, $R_p \parallel C_p$. The subcutaneous tissues can be characterized by a pure resistance, R_m .

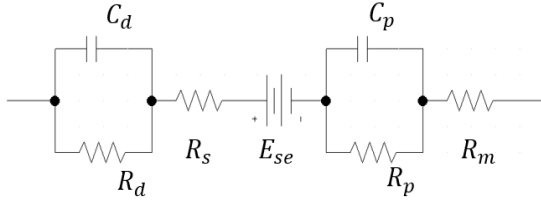


Figure 4. Circuit model of wet electrode-skin interface

The values of resistances and capacitances shown in Figure 4 depend highly upon skin condition and preparation. Type of electrode itself and electrolytic gel, attachment status of the electrode to the skin surface define the numerical values. Experimentally proven typical values of these parameters are given in Table 1 [15].

Table 1. Typical values of skin-electrode interface parameters

For unprepared skin	$R_d = 1M\Omega$ $C_d = 40nF$ $R_u = 120\Omega$ $R_s = 100\Omega$
For well prepared skin	$R_d = 10k\Omega$ $C_d = 10nF$ $R_u = 120\Omega$ $R_s = 100\Omega$
Well attached electrode	$R_p = 500\Omega$ $C_p = 100nF$ $R_s = 100\Omega$
Poor attached electrode	$R_p = 2k\Omega$ $C_p = 20nF$ $R_s = 100\Omega$

Figure 4 shows the electrical equivalent of electrode-skin interface in the case of wet electrode is used for recording biopotentials. However, if the CNT/MOSFET based electrode is used, the electrode-skin interface equivalent is reduced much simpler form since the CNT penetrated and bypassed the outer layer of the skin. The parameters associated with electrode-electrolyte interface (R_d , C_d , R_s , E_{se}) are then eliminated. In this case, only $R_p \parallel C_p$ pair and R_m resistance are remain to exist in the electrode-skin interface. Therefore, a decrease is reasonably predictable in the contact interface impedance and artifacts due to dead cell containing stratum corneum layer.

2.3. Fourier Transform and Total Harmonic Distortion

The Fourier transform is a mathematical tool to represent a function or a waveform into the frequency domain. All waveforms are the sum of sinusoids at different frequencies. The discrete Fourier transform (DFT) is obtained by decomposing a sequence of values into elements of different frequencies. Thus, DFT is an extremely useful operation for signal analysis. The DFT of a finite-length signal of length N is given in Equation 1.

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n W_N^{kn} \quad \text{for } k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

where $W_N = e^{-j(2\pi/N)}$ and $j = \sqrt{-1}$.

The Fourier transform of a waveform gives the fundamental frequency components, harmonics as well as the relative amplitudes. Therefore, analyzing the Fourier spectrum of an electrode's signal output provides information about the related electrode quality.

The total harmonic distortion (THD) can be calculated by the ratio of the sum of the harmonic component powers to the fundamental frequency power. Considering a biopotential electrode, lower distortion in an acquired biopotential lead to a more accurate measurement. The biopotential obtained as a result of the measurement must be free of noise. Since undesired signals mainly appear by depending on the measuring electrode, THD calculation of obtained biopotential presents the electrode quality. The THD of a signal can be defined as Equation 2.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \quad (2)$$

where V_n is the RMS voltage of the n^{th} harmonic and $n=1$ for fundamental frequency. THD values are usually expressed in percent. In this work,

THDs of each obtained biopotentials for the electrodes within all cases are calculated. THD values are listed in Table 2.

3. SIMULATION RESULTS

In this work, simulations are performed on simulation program for integrated circuit emphasis (SPICE). Plotting Fourier transforms and THD calculations are done in the MATLAB environment. The obtained biopotentials from the circuit equivalents of the CNT/MOSFET based active electrode and the commonly used wet electrode circuit model are compared. Two cases of skin condition are taken into consideration for comparison. These are prepared and unprepared skin cases. The typical numerical values of skin, gel, and electrode parameters are given in Table 1. In any case, measurements with dry electrodes are noisier, and they contain more artifacts with

respect to wet and CNT/MOSFET based electrodes. Thus, a comparison with dry electrode measurement is not performed.

Before evaluating the electrodes with considering biopotentials, circuit equivalent model responses of the CNT/MOSFET based electrode on unprepared skin, wet electrode on prepared skin with gel and wet electrode on unprepared skin with gel are simulated. Figure 5 shows the simulation results of the three electrode models to the 2 Hz, 100 mV sinusoidal wave. Bypassing the dead stratum corneum layer with CNT/MOSFET based electrode has great effect on signal amplitudes as obvious in the figure. Signal amplitude obtained from the CNT/MOSFET based electrode model maintains the 93.27% of the input signal, whereas the signal amplitudes taken from wet electrodes on prepared and unprepared skin surfaces retain their input amplitudes 48.26% and 0.99%, respectively.

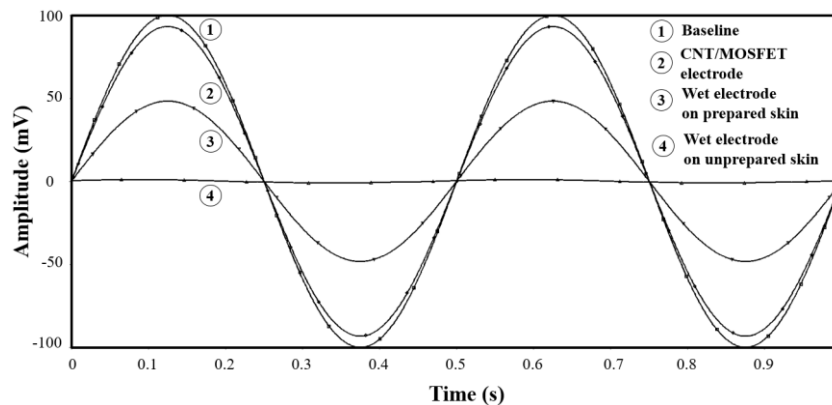


Figure 5. Responses of electrode circuit equivalents to the sinusoidal signal

ECG, EMG and EEG signals given in Figure 6 are also applied to electrodes in order to observe their effects on the signals. The EMG signal is taken from a healthy person with a 4000 Hz sampling frequency, whereas the EEG signal is obtained by the 10-20 electrode system with 500 Hz sampling frequency. The EEG signal, given in the Figure 6 (c), is the pre-frontal (Fp1) recording. Fourier transforms of the input signals are also given in Figure 6.

Signal responses of the CNT/MOSFET based electrode, as well as wet electrodes in two cases, to

the ECG, EMG and EEG inputs, are shown in Figure 7, Figure 8 and Figure 9, respectively. Figure 7 shows the captured signal waveforms of the CNT/MOSFET based electrode and the wet electrode models for ECG signal in certain cases. The simulation results, shown in Figure 7, are the CNT/MOSFET based electrode on unprepared skin (a), wet electrode on prepared skin (b), and wet electrode on unprepared skin (c), respectively. Figure 7 (b) is the first case where the skin is well prepared, and the electrolytic gel is applied. The results show that the amplitude of the input signal is reduced to approximately half of the baseline

shown in Figure 6 (a). In the second case, the skin is not cleaned from hairs and stratum corneum layer, the signal quality is quite distorted, and the

amplitude of the signal is reduced one-tenth of the baseline.

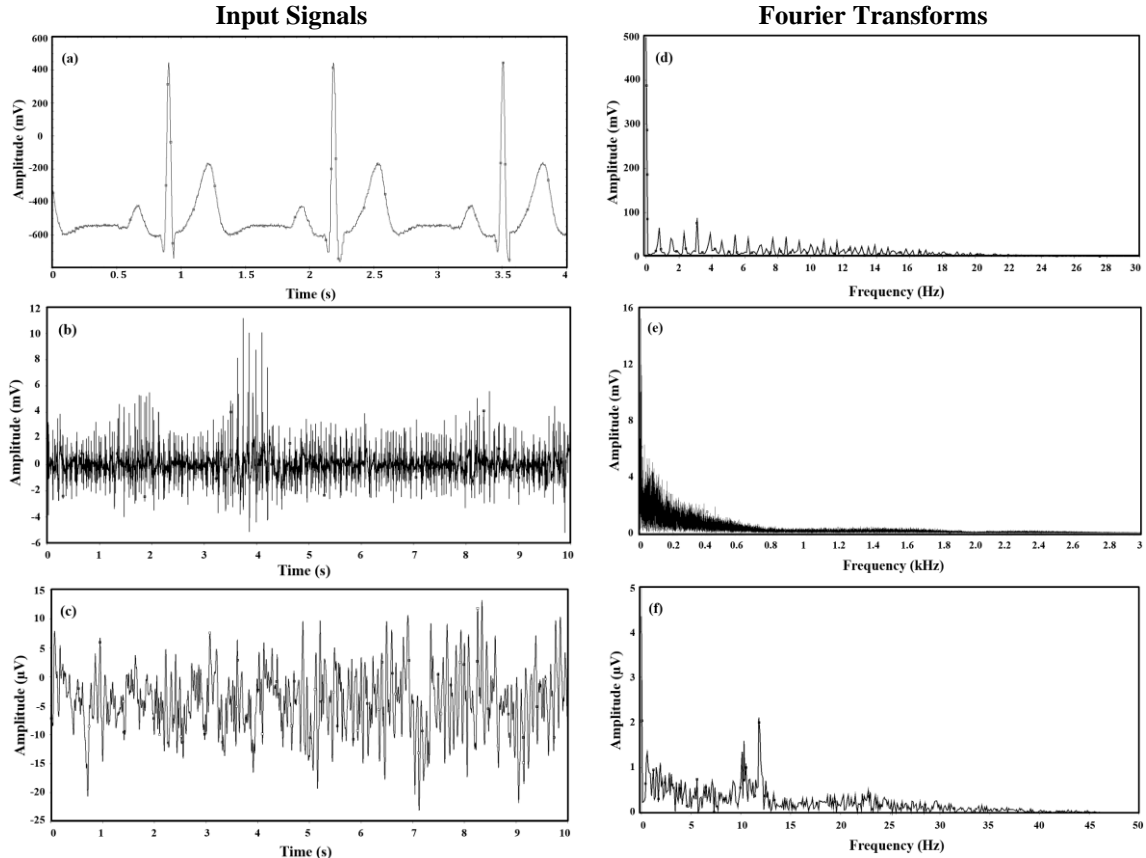


Figure 6. Input biopotential signals (a) ECG, (b) EMG, (c) EEG and their Fourier transforms (d), (e), (f), respectively

Biopotentials obtained from the wet electrode model for the second case show approximately ~480 mV half-cell potential, whereas half-cell potential of the first case is ~290 mV. The amplitude of the signal obtained by the CNT/MOSFET based electrode is attenuated slightly and maintains the baseline amplitude at approximately 93%. Additionally, the CNT/MOSFET based electrode model presents the smallest half-cell potential (~30 mV).

In Figure 8 (a), the EMG signal obtained from the CNT/MOSFET based electrode remains the amplitude of the input signal, whereas the

amplitude of the signal, taken from the wet electrode on the prepared skin surface with the presence of conductive gel, is decreased approximately 60% as given in Figure 8 (b). Moreover, the signal acquired from the wet electrode on the unprepared skin is reduced considerably, as shown in Figure 8 (c).

Similarly, when the EEG signal is applied to the three electrode models, comparable results are obtained with that of ECG and EMG inputs. The signal output from the CNT/MOSFET based electrode almost does not show voltage drop in contrast with the wet electrodes, as given in

Figure 9 (a). The simulation results show that the CNT/MOSFET based electrode has much lower contact impedance and obtain biopotentials with high-quality. Although skin preparation and/or gel application are performed in the both wet electrode acquisitions, the electrophysiological signal qualities are much less than that of the CNT/MOSFET based electrode, as shown in Figure 9 (b) and (c).

The Fourier transforms of obtained biopotential signals prove the abovementioned considerations. Figures 7 (d), 7 (e) 7 (f), 8 (d), 8 (e) 8 (f) and 9 (d), 9 (e) and 9 (f) show the Fourier transforms of the simulation outputs for ECG, EMG and EEG signal inputs. The figures annotated with (d) show the Fourier transforms for the CNT/MOSFET based

electrode model, whereas (e) and (f) give the Fourier transforms for the wet electrode on prepared skin and the wet electrode on the unprepared skin, respectively. Figures 7 (d), 8 (d) and 9 (d) exhibit almost the same Fourier transform with respect to that of original signals given in Figure 6 (d), (e) and (f). Fourier transforms for wet electrode at the case-2 show considerable decrement on the amplitude of principal frequency components as given in Figure 7 (e), 8 (e) and 9 (e). It is obvious from the Fourier transforms for the wet electrode at case-1, the signal amplitude is extremely reduced. Additionally, amplitudes of noise components are increased considerably, as shown in Figure 7 (f), 8 (f) and 9 (f).

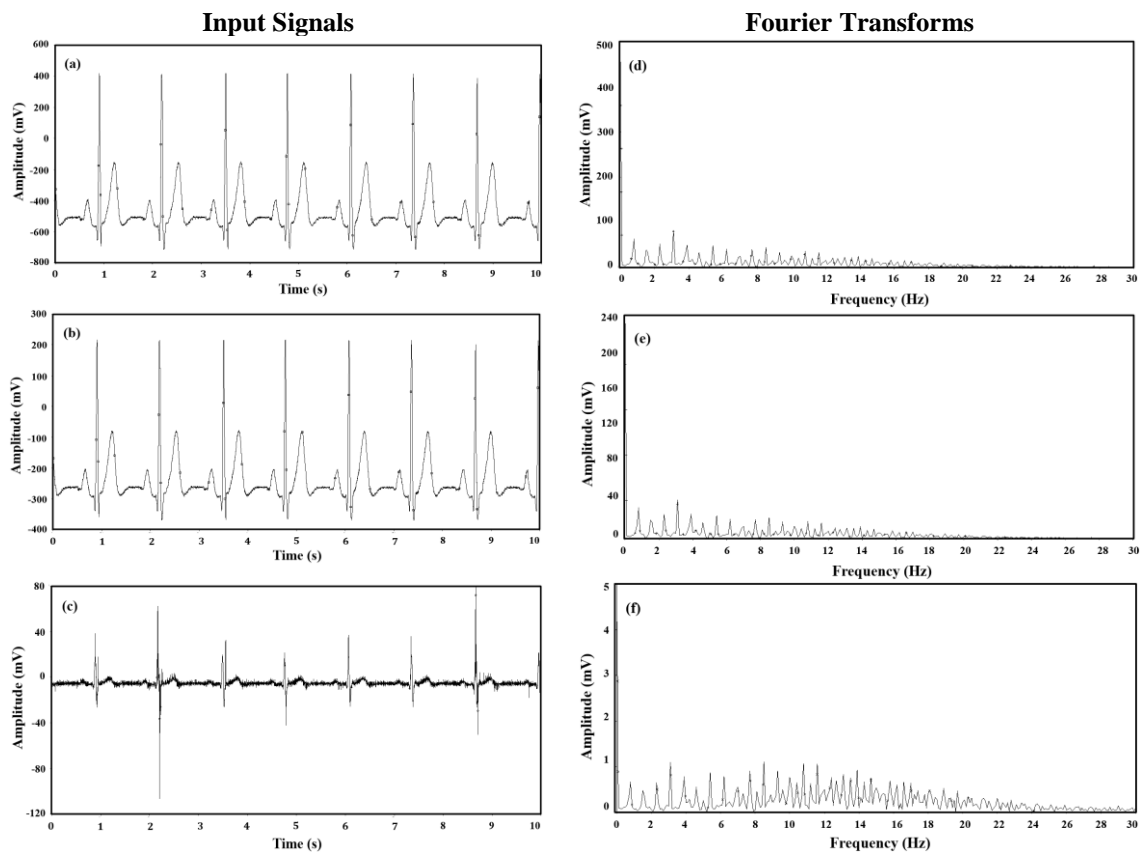


Figure 7. Simulation results to the ECG signal. (a) CNT/MOSFET based electrode, (b) Wet electrode on prepared skin (c) Wet electrode on unprepared skin, and their Fourier transforms (d), (e), (f), respectively

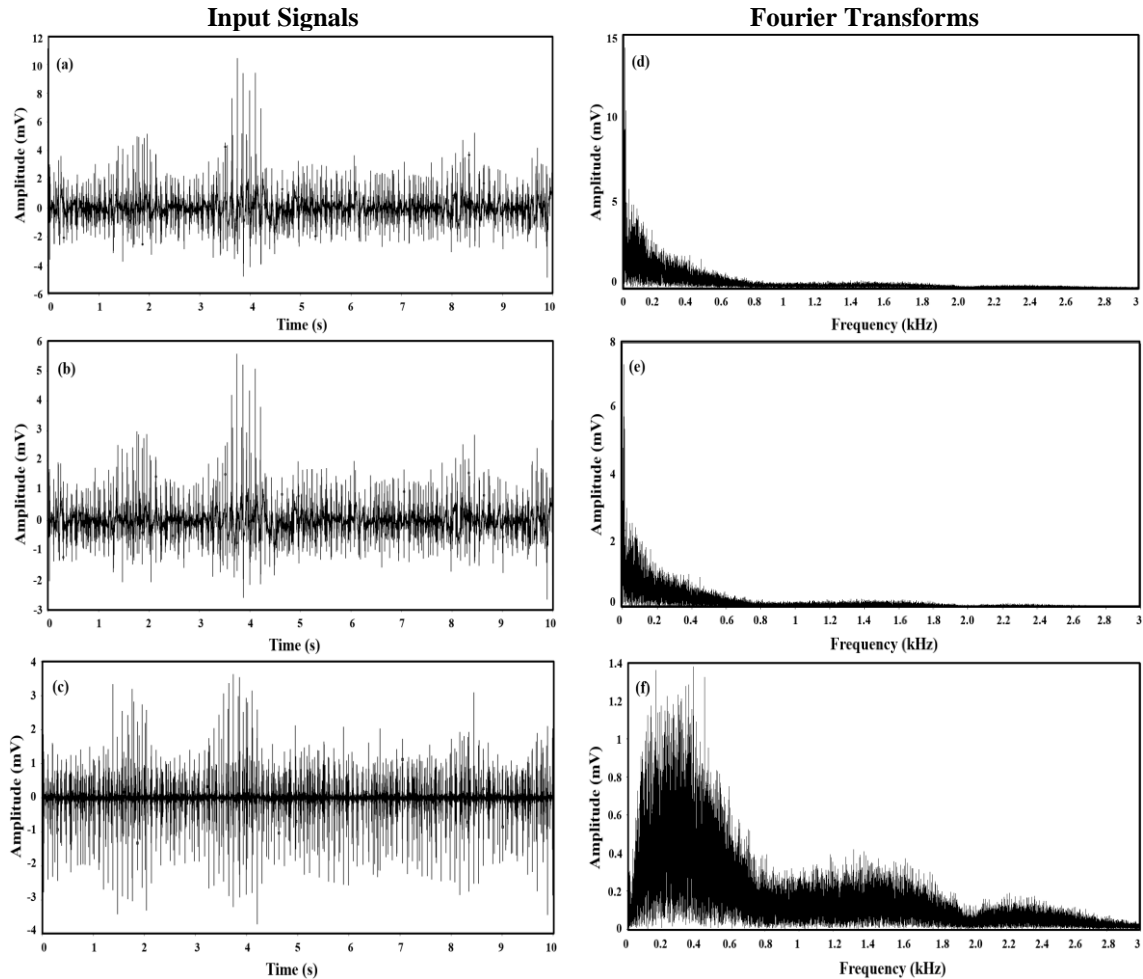


Figure 8. Simulation results to the EMG signal. (a) CNT/MOSFET based electrode, (b) Wet electrode on prepared skin (c) Wet electrode on unprepared skin, and their Fourier transforms (d), (e), (f), respectively

THD calculations of the obtained biopotentials from each electrode model are given in Table 2. As shown in the table, CNT/MOSFET based electrode exhibits THD around 6.7% for ECG, EMG, and EEG signals, whereas THD for wet electrode on prepared skin is around 51.5%. The impedance value of dead cells containing the stratum corneum layer of the skin depends on signal frequency, as stated before. Since the stratum corneum layer remains to exist in unprepared skin, it affects the THD calculations for different biopotentials with different frequencies. The value of THD for the wet electrode on unprepared skin is 67.09% for

EMG signal, whereas 98.66% and 97.29% for ECG and EEG signals, respectively. THD values of the wet electrode on unprepared skin is more than that of CNT/MOSFET based electrode and the wet electrode on prepared skin, as it is expected. However, THD values of CNT/MOSFET based electrode are small and stable for all biopotentials, since the stratum corneum layer is bypassed employing CNTs. THD calculations prove the feasibility of the CNT/MOSFET based electrode on biopotential measurements.

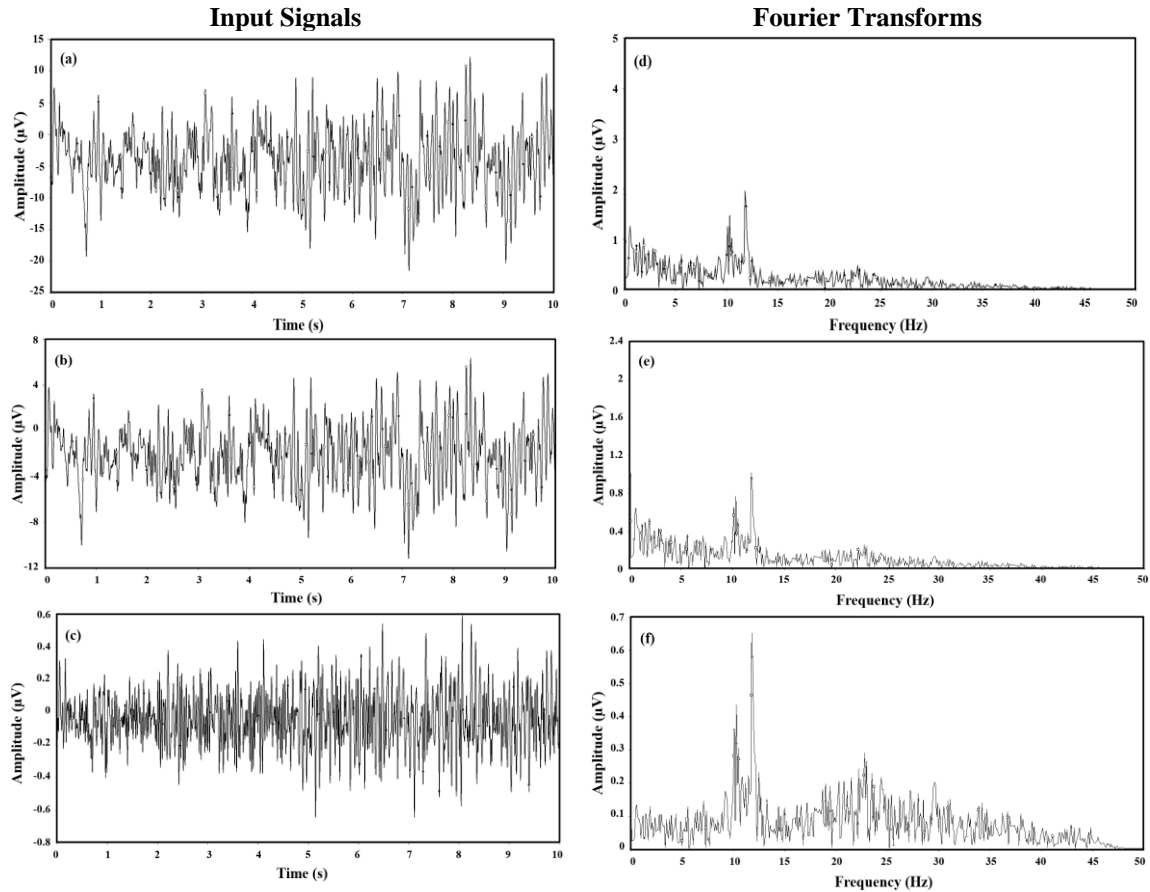


Figure 9. Simulation results to the EEG signal. (a) CNT/MOSFET based electrode, (b) Wet electrode on prepared skin (c) Wet electrode on unprepared skin, and their Fourier transforms (d), (e), (f), respectively

Table 2. THD values of the biopotentials obtained from the electrodes

Electrode Type	THD Values		
	ECG	EMG	EEG
CNT/MOSFET Based Electrode	6.72%	6.69%	6.72%
Wet electrode on prepared skin	51.73%	51.27%	51.68%
Wet electrode on unprepared skin	98.66%	67.09%	97.29%

4. CONCLUSIONS

The stratum corneum layer of the skin consisting of dead cells has negative effects on the

biopotential signal acquisition such as noise and increase in the electrode-skin contact impedance. To improve the obtained signal quality, the negative effects of this layer must be reduced with either the electrode itself or applying the conductive gel. The conductive gel applied to the skin surface dries up in long-term measurements and causes noise on the obtained biopotentials. Besides, it may cause allergic reactions.

In this work, previously designed novel CNT/MOSFET based active electrode is simulated and evaluated in terms of signal quality for ECG, EMG and EEG signals.

The effects of stratum corneum layer and the conductive electrolytic gel on the obtained biopotentials are shown in the simulation results. SC layer on the human skin exhibits resistive/capacitive medium properties that lead to a voltage drop at the output of the electrode. Comparison of simulations for prepared and unprepared skin conditions prove this phenomenon. Although conductive gel reduces the significant decrease in signal amplitude, it cannot completely prevent the distortion and noise on the signal, since it cannot completely eliminate the effect of the SC layer. In contrast with the wet electrode cases, the CNT/MOSFET based electrode simulated for unprepared skin without conductive gel. Although it is simulated at the worst case specifications, the CNT/MOSFET based model obtained the highest quality signals. As shown in the Fourier transforms of the biopotential signal outputs, the signal to noise ratio of the CNT/MOSFET based electrode is higher than that of the wet electrodes. THD calculations of the obtained biopotentials also indicate the great effect of measuring electrode on the signal quality. The simulation results demonstrate and prove the efficiency of the CNT/MOSFET based electrode.

The CNT/MOSFET based electrode has advantages such as recording biopotentials with high signal to noise ratio, eliminating the negative effects of the stratum corneum skin layer, providing robust, stable skin contact, no need to both conductive electrolytic gel usage and skin abrasion process. The simulation results prove the efficiency and importance of the previously designed electrode. This electrode can be used for clinical measurements even for long-term measurements without biocompatibility problems.

5. REFERENCES

1. Grimnes, S., Martinsen, O.G., 2015.. Bioimpedance And Bioelectricity Basics, Academic Press, 3rd Edt.
2. Plonsey, R., Barr, R.C., 2007. Bioelectricity: A Quantitative Approach, Springer US, 3rd Edt.
3. Webster, J.G., Ed., 2006. Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation, Hoboken, NJ., USA: John Wiley & Sons, Inc.
4. Neuman M., 2010. Biopotential Electrodes in Medical Instrumentation Application and Design, Fourth Edi., Webster J., Ed. Wiley, 189–240.
5. Valchinov, E.S., Pallikarakis, N.E., 2004. An Active Electrode for Biopotential Recording from Small Localized Bio-sources, Biomed. Eng. Online, 3(1), 25.
6. Yoo, J., Yan, L., Lee, S., Kim, H., Kim, B., Yoo, H.J., 2009. An Attachable ECG Sensor Bandage with Planar-fashionable Circuit Board, Proc.-Int. Symp. Wearable Comput. ISWC, 145–146.
7. Wang, L.F., Liu, J.Q., Yang, B., Yang, C.S., 2012. PDMS-Based Low Cost Flexible Dry Electrode for Long-Term EEG Measurement, IEEE Sens. J., 12(9), 2898–2904.
8. Griss, P., Tolvanen, H.K., Meriläinen, P., Stemme G., 2002. Characterization of Micromachined Spiked Biopotential Electrodes, IEEE Trans. Biomed. Eng., 49(6), 597–604.
9. Mestrovic, M.A., Helmer, R.J.N., Kyratzis, L., Kumar, D., 2007. Preliminary Study of Dry Knitted Fabric Electrodes for Physiological Monitoring, Proc. 2007 Int. Conf. Intell. Sensors, Sens. Networks Inf. Process. ISSNIP, 601–606.
10. Gargiulo, G., Bifulco, P., Calvo, R.A., Cesarelli, M., Jin, C., Van Schaik, A., 2008. Mobile Biomedical Sensing with Dry Electrodes, ISSNIP 2008-Proc. 2008 Int. Conf. Intell. Sensors, Sens. Networks Inf. Process., 261–266.
11. Giulio, R., Stephen, D., Esteve, F., Josep, M.P., Chris, R., Ernest, M., Ravi, S., Carles, G., 2006. A Dry Electrophysiology Electrode Using CNT Arrays, Sensors Actuators A Phys., 132(1), 34–41.
12. Abu-Saude, M.J., Morshed, B.I., 2015. Patterned Vertical Carbon Nanotube Dry Electrodes for Impedimetric Sensing and Stimulation, IEEE Sens. J., 15(10), 5851-5858.
13. Abu-Saude, M., Consul-Pacareu, S., Morshed, B.I., 2015. Feasibility of Patterned Vertical CNT for Dry Electrode Sensing of Physiological Parameters, 2015 IEEE Topical Conference on Biomedical Wireless

- Technologies, Networks, and Sensing Systems (BioWireleSS), San Diego, CA, 1-4.
- 14.** Istanbul, M., Avci, M., 2019. Novel Multiwalled Carbon Nanotube (MWCNT) Modified Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) Based Electrode for Electrophysiological Measurements on Human Skin, *Instrum. Sci. Technol.*, 47(5), 545–563.
 - 15.** Liu, Y.L., Lin, D.L., Lin, Y.D., 2004. Spice Model for Computer-Aided Design of Biopotential Amplifier, *Biomed. Eng. Appl. Basis Commun.*, 16(3), 151–156.

Determination of High Efficiency Standard Cyclone Performance Using Numerical Methods

Nihan UYGUR*¹

¹*Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Environmental Engineering, Kahramanmaraş*

Geliş tarihi: 08.06.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Abstract

The cyclones, one of the dust collection devices, are used to separate the particles or liquid from the carrier gas by centrifugal forces. They have been widely applied in gas-solid separation for an industrial air cleaning process. In addition to being economical, their simplicity of constructions, lack of moving parts, and adaptation to high pressure and temperature conditions make these devices durable and efficient. On the other hand, in the operation of cyclones, the effects of particle, carrier gas, cyclone dimensions, and other factors are very important operational requirements in determining the cyclone performance. In the cyclone design, the terms of pressure drop, and cut-off diameter determine the cyclone performance. In addition, cyclone geometry plays an important role on changes in pressure drop and cut-off diameter values. In this study, high efficiency standard cyclone geometric structure is studied, and this structure is modelled using Solidworks program. Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to determine of cyclone separation performance. In the scope of the study, flow analysis is performed, and cut-off diameters are tried to be determined by using statistical learning methods from the results of the analysis.

Keywords: High-efficiency cyclone, Flow simulation, Cut-off diameter, Pressure drops, Particulate matter

Yüksek Verimli Standart Siklon Performansının Nümerik Yöntemler Kullanılarak Belirlenmesi

Öz

Siklonlar, santrifüj kuvvetler etkisiyle, katı ya da sıvı partikülleri gaz taşıyıcıdan ayırmaya yarayan toz toplama cihazlarıdır. Endüstriyel alanlarda hava toz temizleme proseslerinde çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ekonomik olmalarının yanı sıra çok fazla hareketli parça içermemeleri, yüksek basınç ve sıcaklık uygulamalarına uyum sağlayabilmeleri bu cihazları dayanıklı ve verimli kılmaktadır. Öte yandan siklonların çalışmasında, partikülün, taşıyıcı gazın, siklon boyutlarının ve diğer faktörlerin etkileri siklon performansı belirlemede oldukça önemlidir. Siklon dizaynında, basınç düşmesi ve kesme çapı değerleri siklon performansını belirleyen parametrelerdir. Bu anlamda siklon geometrisi basınç

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Nihan UYGUR, nuygur@ksu.edu.tr

düşümü ve kesim çapı değerlerindeki değişiklikler üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Yapılan bu çalışmada yüksek verimli standart siklon geometrik yapısı üzerinde çalışılmıştır ve bu yapı Solidworks programı ile modellenmiştir. Bilgisayar destekli Akış Analizi (CFD), siklon performansını belirlemek için kullanıldı. Çalışma kapsamında akış analizleri yapılmış, analiz sonuçlarından istatistiksel öğrenme yöntemleri kullanılarak kesme çapları belirlenmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek verimli siklon, Akış simülasyonu, Kesme çapı, Basınç kayıpları, Partikül madde

1. INTRODUCTION

Inertial dust collectors are generally divided into three main groups as deposition chambers, baffles, and cyclone dust collectors. The cyclone dust collectors or cyclone separators are one of the most efficient, important, and robust dust control devices in the field of both science and engineering [1]. Robustness is expressed by their higher ability to extreme operating conditions and lack of moving structures [1]. Cyclone Separators (CS) are widely used for aerosol sampling and industrial applications, in air pollution control and gas-solid separation [2]. The centrifugal force generated in cyclone separates solid particles from the air through the densities difference of gases and solids [3]. Significant advantages of cyclone separators as their simplicity to fabricate; low cost to operate, and maintenance; their capability of adaptation to extremely harsh conditions such as high temperature, high particulate matter (PM) loads, high corrosiveness (because of corrosive gases), high pressures were underlined for particulate control in air pollution control field [1,4-6]. However, their main disadvantages are pressure drop and low collection efficiency for fine particulate matter. Besides the advantages and disadvantages of cyclones, performance parameters are also very important. Pressure drop is the main part of cyclone performance. Performance and flow surfaces in cyclones can be considered as a function of cyclone dimensions, particulate properties, gas, and flow other parameters [1]. According to Demir [6], the cyclone pressure drop is the function of these parameters such as temperature, high solid loading; on other hand pressure drop related to collection efficiency. He showed that an increase in pressure drop increases collection efficiency [6].

As a result, the determination of pressure drop is a crucial application for design criteria. The performance usually described in cyclones is the sum of the pressure drop and collection efficiency [4]. Another important parameter for cyclones is cyclone geometry. Because the cyclone geometry also has significant effects on pressure losses and collection efficiency. In addition, experimental studies and simulations have revealed that the pressure drop and collection efficiency are a function of the cyclone geometry [4]. Cyclone inlet structures and configurations are among the geometric parameters by setting the cyclone options at the most [7]. In order to reveal the effects of cyclone geometry on cyclone efficiency, different approaches have been proposed: mathematical models, experimental measurements, computer aided flow dynamics, optimization methods, and artificial neural networks. For instance, Dirgo and Leith Stairmand [8] studied the collecting efficiency and pressure losses at various flow rates in the high-efficiency cyclone and wanted to empirically test the results. On the other hand, Griffiths and Boysan [17] examined the three cyclone samplers and calculated the pressure losses associated with CFD data very well. CFD provides the best possible flow dynamics in cyclone separators. Nowadays, optimal cyclone design is being used by using computer-aided methods in order to increase particle collection efficiency and reduce pressure drops [9,10]. However, the performance of the cyclone is greatly influenced by geometric design and operating conditions [11]. Pressure drops and partial collection efficiencies are defined as basic cyclone performance [11]. Particle removal or collection efficiency is a function of complex three dimensional and two-phase turbulent flow [12], the pressure drop is the sum of local and frictional losses [6] and fractional efficiency related to

percent efficiency to the particle diameter [13]. The determination of an accurate cyclone pressure drop is concerning operating costs directly [14]. Considering these factors, flow regimes and various geometric designs in cyclones should be determined with the help of mathematical models [11]. In this sense, CFD applications can be seen as very useful tools. Recently, in order to improve cyclone performance, change in the geometric structure and properties of the cyclone have been made in the numerous studies. [15]. CFD use Reynolds Stress Model (RSM), Large Eddy Simulation (LES), e.g. in order to calculate velocities, pressures, particle moving, e.g. in turbulent flow.

In this study, High Efficiency Stairmand Cyclone structure is modeled by using the SolidWorks program and its performance is determined by numerical methods.

2. MATERIALS AND METHODS

In the present study the cyclone geometry was created by using Solidworks solid modeling and simulation program based on the High Efficiency Stairmand Standard Cyclone. The flow analysis were completed, and particle collection efficiencies obtained with uniform dispersed particulate matter using particle study tool. Based on the used statistical data obtained from particle study, it was found the cut-off diameter value according to the logistic regression method. The maximum likelihood method was used in the logistic regression. Maximization of the likelihood equation used to gradient ascent algorithm. The pressure drop value were also analyzed.

2.1. Cyclone Modelling

Based on the cyclone design and operation conditions, there are many types of cyclones to separate dust from the gas-particle mixture [16]. In this study, modeling and analysis were performed using high efficiency standard (Stairmand, 1951) cyclone sizes [17]. Basically, there are two types of standard cyclone, high throughput, and high efficiency, in terms of

pressure drop and collection efficiency [17]. Since this study is efficiency based, the analyzes were carried out in high efficiency cyclone approach of Stairmand. The modeled cyclone is shown in Figure 1 and its geometrical dimensions such as inlet height (H), inlet width (W), vortex finder diameter (De), body height (Lb), cone height (Lc), vortex finder length (S), cone tip diameter (Dd) (proportional dimensions according to cyclone diameter) of the cyclone are given in in Table 1. In addition, the general structure of the cyclone is outlined as in Figure 2 and the cyclone diameter (D) is taken as 200 mm.

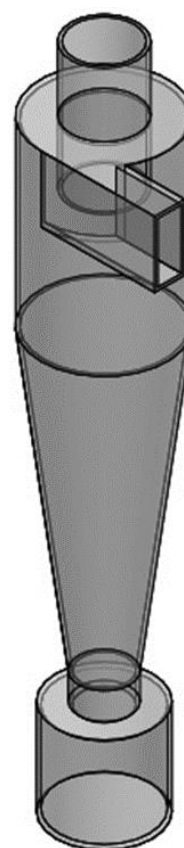


Figure 1. Isometric view of stairmand high efficiency standard cyclone

Table 1. Geometrical dimensions according to cyclone diameter

H/D	W/D	De/D	Lb/D	Lc/D	S/D	Dd/D
0.5	0.2	0.5	1.5	2.5	0.5	0.375

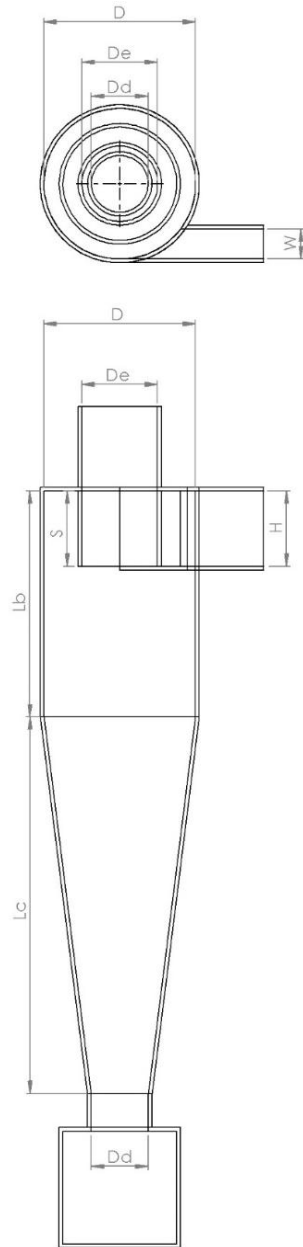


Figure 2. Schematic of studied cyclone separator

2.2. Flow Analysis with Computational Tools

Analysis of turbulent or laminar gas-particle flows in cyclone separators is carried out in computational tools. While making analysis, the most appropriate materials are selected. In the

present study Talcum Powder is taken as the particulate matter. It has been studied by selecting suitable parameters for high efficiency cyclones. Hexahedral mesh structure was used to grid cyclone.

2.2.1. Flow Simulation

The gas flow in the cyclone is assumed to be turbulent flow regime for present study. The CFD approach, which has been widely used for simulation of gas cyclones, is applied to determine cut-off diameter and pressure drop.

In this section, for simulations temperature, pressure, relative humidity, gravitational acceleration, turbulence density, and turbulence length are 293.2 K, 101325 Pa, 50%, 9.81 m/s², 2%, and 2 mm, respectively. Air is selected as the fluid material and fluid dynamic viscosity, specific heat, and thermal conductivity graphs are given in Figures 3, 4, and 5.

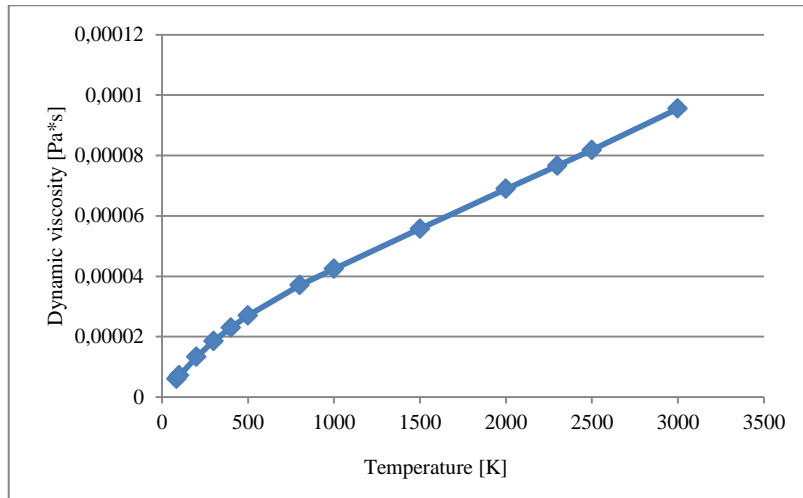


Figure 3. Dynamic viscosity of fluid

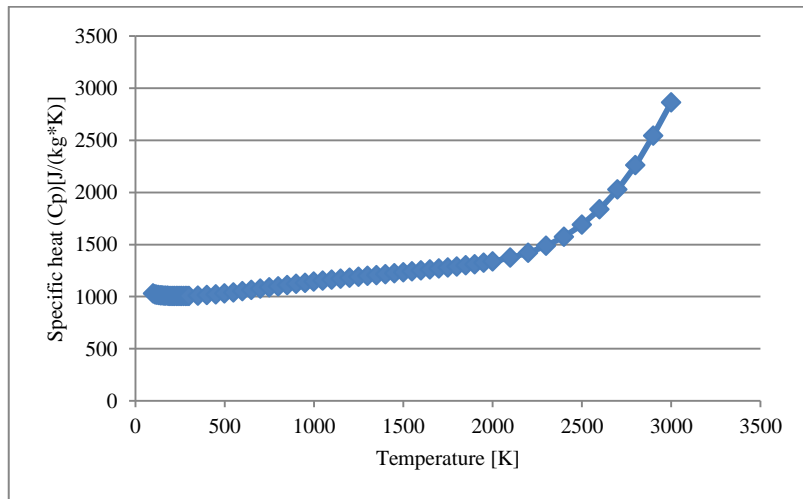


Figure 4. Specific heat of fluid

Adiabatic wall conditions were chosen as the cyclone wall conditions. In flow analysis, the inlet velocity of the fluid is 20 m/s; the cyclone outlet

pressure is set to 101325 Pa and other boundaries was selected as wall.

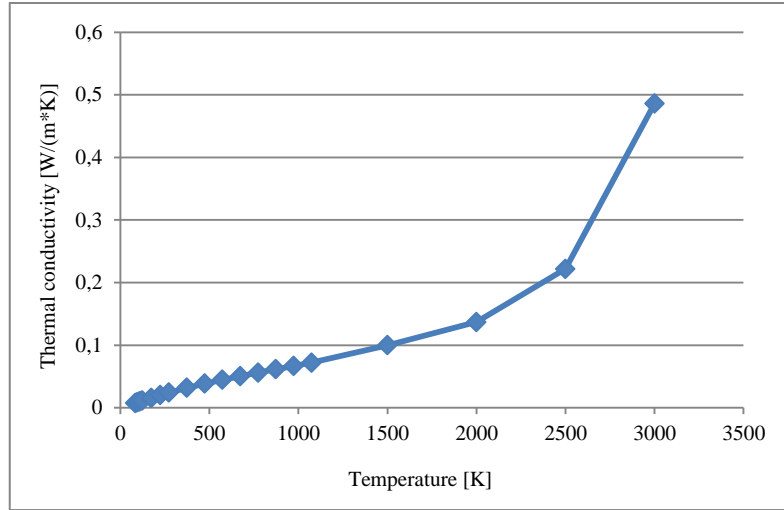


Figure 5. Thermal conductivity of fluid

2.2.2. Particle Study

In the current CFD study, the particle diameters were determined ranging from 1 micron to 10 microns with ten different classes and particles velocity equal to the fluid (air) velocity for inlet boundary. The relevant particle diameter range was determined in the particle study section of the CFD. The total particle concentration was 30 g/m^3 entering to this cyclone uniform distributed and concentration of 3 g/m^3 for each diameter. Because of the Talcum Powder widely used in cyclone separator, it was preferred in the current study. The Talcum Powder density, specific heat, thermal conductivity, and melting temperature are 2700 kg/m^3 , 870.84 J/(kg.K) , 7 W/(m.K) , and 1073 K , respectively.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Pressure Drops

The performance of the cyclones is expressed as the sum of the collection efficiency and the pressure drop. Figure 6 shows the contour plots of static pressure. However, the obtained pressure drop value was determined as 797.02 Pa .

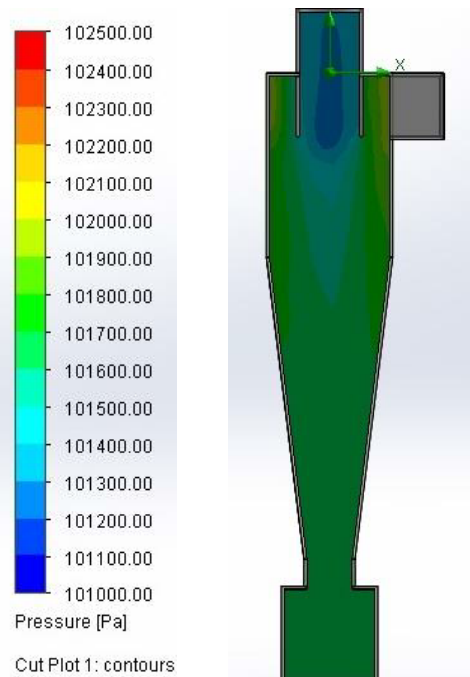


Figure 6. Pressure contour plot of working cyclone

3.2. Collection Efficiency

The Logistic Regression Method was used after obtaining particle collection efficiencies. The

logistic regression equation is shown in Equation 1. Maximum likelihood approach was used to determine the coefficients. Likelihood function is defined by Equation 2. As underlined before, maximization of this function was performed gradient ascent algorithm.

$$P(Y=1|X=x) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x}} \quad (1)$$

$$l(\beta_0, \beta_1) = \prod_{i: y_i=1} p(x_i) \prod_{i: y_i=0} (1-p(x_i)) \quad (2)$$

The coefficients are calculated as $\hat{\beta}_0 = -7.458$ and $\hat{\beta}_1 = 2.632$. The statistical $R^2 = 0.9893$ for this regression process. This value reveals that regression is successful. The regression curve is shown in Figure 7.

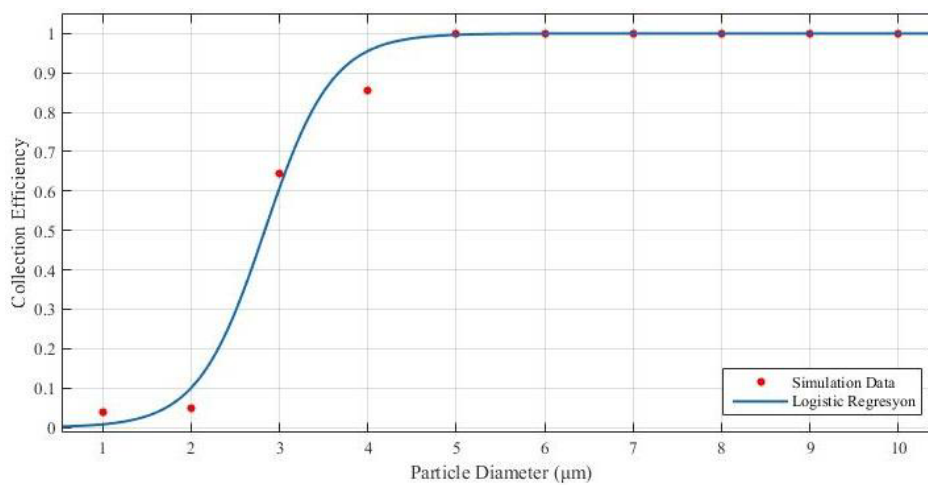


Figure 7. View of collection efficiency and logistic regression

Determination of the cut-off diameter \hat{d}_c value was made by substituting the $\hat{\beta}_0$ and $\hat{\beta}_1$ values in Equation 3. As a result, the cut-off diameter was found as $\hat{d}_c = 2.834 \mu\text{m}$.

In addition, tangential velocity, due to its effects on the particle separation process and pressure drops, it is an important component of gas flow in cyclones [4]. The tangential velocity increases with the increase of the inlet velocity. In cyclones separators, collecting efficiency increases with tangential velocity. Similarly, increasing the particle density increases the collection efficiency.

3.3. Model Validation

To validate the CFD analysis, the experimental cyclone study by Karadeniz [18] is simulated and the CFD results are compared with the corresponding measured data. The present model

is capable of determining the collection efficiency and pressure drops in cyclones acceptable accuracy.

4. CONCLUSIONS

More recently the CFD techniques have been applied to design of cyclone separators and its predict performance parameters are governed by operational and geometrical elements. Furthermore, pressure drops, collection efficiencies of cyclone were easily predicted with CFD which is becoming most important component of processes. In contrast to experimental studies, CFD is cost and lead times effective methods. These features make CFD effective and preferred.

Improving the collection efficiency and pressure drop in cyclone separators is the most important

step. The effects of geometric properties of cyclone on the cut-off diameter and pressure drop were determined for the Stairmand High Efficiency Cyclone Separator in present study. Cut-off diameter is important in determining the characteristic of cyclones. The cut-off diameter is the particle size where the cyclone collection efficiency is 50%. For the geometries and operating conditions of cyclones, it is important to know the cut-off diameter [11]. For that reason, many investigations carried out about cyclone purposed to understanding calculation of cut-off diameter.

In this study, the particle cut-off diameter was found to be $2.834 \mu\text{m}$ in the given working conditions based on the high-efficiency cyclone geometry, using the numerical and statistical learning methods. In addition, the resulting pressure drop value was determined as 797.02 Pa .

The statistical learning method used to determine the particle cut-off diameter successfully. This study also showed that, result of successful modeling, performance of high efficiency cyclone can be revealed upon the computational tools.

5. REFERENCES

1. Elsayed, K., Lacor, C., 2016. Analysis and Optimization of Cyclone Separators Geometry Using RANS and LES Methodologies, 125. doi:10.1007/978-3-662-43489-5-8.
2. Zhu, Y., Lee, K.W., 1999. Experimental Study on Small Cyclones Operating at High Flowrates, *Journal of Aerosol Science*, 30(10), 1303–1315. doi:10.1016/S0021-8502(99)00024-5.
3. Siadaty, M., Kheradmand, S., Ghadiri, F., 2017. Improvement of the Cyclone Separation Efficiency with a Magnetic Field, *Journal of Aerosol Science* 114 (May 2017) 219–232. doi:10.1016/j.jaerosci.2017.09.015.
4. Zhou, F., Sun, G., Han, X., Zhang, Y., Bi, W., 2018. Experimental and CFD Study on Effects of Spiral Guide Vanes on Cyclone Performance, *Advanced Powder Technology* 29(12), 3394–3403. doi:10.1016/j.ap.2018.09.022.
5. Zhao, B., 2009. Modeling Pressure Drop Coefficient for Cyclone Separators: A Support Vector Machine Approach, *Chemical Engineering Science* 64(19), 4131–4136. doi:10.1016/j.ces.2009.06.017.
6. Demir, S., 2014. A Practical Model for Estimating Pressure Drop in Cyclone Separators: An Experimental Study, *Powder Technology*. doi:10.1016/j.powtec.2014.08.024.
7. Misiulia, D., Andersson, A.G., Lundström, T. S., 2017. Effects of the Inlet Angle on the Collection Efficiency of a Cyclone with Helical-roof Inlet, *Powder Technology*, 305, 48–55. doi:10.1016/j.powtec.2016.09.050.
8. Dirgo, J., Leith, D., 1985. Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions, *Aerosol Science and Technology* 4(4), 401–415. doi:10.1080/02786828508959066.
9. Parvaz, F., Hosseini, S.H., Elsayed, K., Ahmadi, G., 2019. Influence of the Dipleg Shape on the Performance of Gas Cyclones, *Separation and Purification Technology* 233 (May 2019) 116000. doi:10.1016/j.seppur.2019.116000.
10. He, M., Zhang, Y., Ma, L., Wang, H., Fu, P., Zhao, Z., 2018. Study on Flow Field Characteristics in a Reverse Rotation Cyclone with PIV, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 126 (February) 100–107. doi:10.1016/j.cep.2018.02.026.
11. Azadi, M., Mohebbi, A., 2010. A CFD Study of the Effect of Cyclone Size on its Performance Parameters, *Journal of Hazardous Materials* 182(1-3), 835–841. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.06.115.
12. Qian, F.P., Zhang, M.Y., 2007. Effects of the Inlet Section Angle on the Flow Field of a Cyclone, *Chemical Engineering and Technology*, 30(11), 1564–1570. doi:10.1002/ceat.200700246.
13. Cui, J., Chen, X., Gong, X., Yu, G., 2010. Numerical Study of Gas-solid Flow in a Radial-inlet Structure Cyclone Separator, *Industrial and Engineering Chemistry Research* 49(11), 5450–5460. doi:10.1021/ie901962r

14. Gimbun, J., Chuah, T.G., Fakhru'l-Razi, A., Choong, T.S., 2005. The Influence of Temperature and Inlet Velocity on Cyclone Pressure Drop: A CFD Study, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 44 (1), 7–12. doi:10.1016/j.cep.2004.03.005.
15. Zhao, B., Shen, H., Kang, Y., 2004. Development of a Symmetrical Spiral Inlet to Improve Cyclone Separator Performance, *Powder Technology* 145(1), 47–50. doi:10.1016/j.powtec.2004.06.001.
16. Elsayed, K., Lacor, C., 2012. Modeling and c Using RBF Type Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms, *Powder Technology*, 217, 84–99. doi:10.1016/j.powtec.2011.10.015.
17. Griffiths, W.D., Boysan, F., 1995. Computational Fluid Dynamics (CFD) and Emprical Modelling the Performance of a Number of Cyclone Samplers, *Journal Aerosal Science*, 27(2), 281-304. doi.org/10.1016/0021-8502(95)00549-8
18. Karadeniz, A., 2015. Stairmand Tipi Yüksek Verimli Siklon Geometrisindeki Modifikasyonların Partikül Tutma Verimi ve Basınç Kaybına Etkisi (In Turkish), MSc Thesis, Institute of Natural Sciences, Yıldız Technical University, Istanbul.

Investigation of Alternative Material and Design of Rotary Kiln: A Case Study

Fatih DÖKME*¹, Sadık ÜNAL²

¹ Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş. Şişecam Kimyasallar Soda Fabrikası Şubesi, Mersin

² Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş. Şişecam Kimyasallar Kromsan Fabrikası Şubesi, Mersin

Geliş tarihi: 29.09.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Abstract

Rotary kilns have widespread usage in many field of industry due to continues flow and heating the products inside it, simultaneously. Rotary kiln can be used in the process of alumina, cement, lime, magnesium etc. Rotary kiln material for corrosive process media is usually designated as stainless steel. In some media as high temperature and dilute acidic, even stainless steel can be subject to rapid corrosion. In this study, an alternative material, titanium Gr 2, was investigated instead of conventional 316L (1.4404) quality stainless steel material of rotary kiln. Due to the different physical properties of titanium Gr 2 material, two different alternative designs were prepared and analyzed with the model. In the first design the outside of the titanium shell of the rotary kiln was covered with 316L (1.4404) quality steel material. In this design, different thermal expansion of the materials limited the usage of hybrid materials at high temperature. Therefore, as a second alternative the length of the rotary kiln was extended. According to required product output temperature the required of the length extension was calculated as 4600 mm.

Keywords: Rotary kiln, Titanium, Heat transfer, Thermal expansion

Döner Fırının Alternatif Malzeme ve Tasarımının İncelenmesi: Bir Örnek Olay

Özet

Döner fırın, içerisindeki ürünlerin sürekli akması ve aynı zamanda ısıtılması nedeniyle endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Alümina, çimento, kireç, magnezyum vb. işlemlerinde döner fırın kullanılabilir. Bu çalışmada fırınların yaygın bir malzemesi olan klasik 316L (1,4404) kalite çelik malzemesi yerine alternatif bir malzeme olan titanyum Gr 2 malzemesi incelenmiştir. Titanyum Gr 2 malzemenin farklı fiziksel özelliklerinden dolayı model ile iki farklı alternatif tasarım hazırlanmış ve analiz edilmiştir. İlk tasarımda döner fırının titanyum kabuğunun dışı 316L (1,4404) kalite çelik malzeme ile kaplanmıştır. Bu tasarımda malzemelerin farklı termal genleşmeleri, hibrit malzemelerin yüksek sıcaklıkta kullanımını sınırlandırmıştır. Bu nedenle, ikinci bir alternatif olarak döner fırının uzunluğu arttırılmıştır. İstenilen ürün çıkış sıcaklığının elde edilebilmesi için 4600 mm boy uzatmana gerek olduğu hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Döner fırın, Titanyum, Isı transferi, Termal genleşme

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Fatih DÖKME, fdokme@gmail.com

1. INTRODUCTION

A rotary kiln is a combination of large cylindrical steel vessels which is supported by rolling supports. It slightly inclined in the horizontal axis, and rotate about its axis very slowly [1]. It uses to increase material temperature to a high temperature in a continues process and its main aim is to drive a reaction at a specified temperature and time [2]. Although there are many methods to produce chemical products, using of rotary kiln is widely preferred due to dynamic nature of production of goods in chemical, metallurgical and cement industries [3,4]. The rotary kiln can be used to produce cement clinker which is the main product of cement extracting, nickel from saprolite ore, crystallization of sodium chromate, Calcination of dolomite pyrolysis and gasification process of oily sludge [5-10]. Therefore, the rotary kiln has an important task in the production line of many goods. Rotation speed, temperature, inclination angle, material flow rate and discharge rate of the kiln are several properties that effects the efficiency of the operation [11].

In literature, there is some studies about the details of the heat and flow in a rotary kiln, however, there are few studies about an alternative design and materials of a rotary kiln. In previous studies, Witt et al. (2018) used hybrid approach in order to observe dynamic and thermal behaviour of gaseous freeboard and bed [12]. They used 2D discrete element method (DEM) to measure mean solids velocities in bed and 3D two-phase CFD models to validate the solid rheology method. As a result, they found out that the procedure could be used for large-scale rotary kilns. Yin et al. (2014) developed a mathematical model based three-dimensional model to understand the particle motion characteristic in a rotary kiln [13]. Their model was based on the Eulerian and kinetic theory of granular flow method. They concluded that the bed surface tilted and became slightly S-shaped. Moreover, they found out that the particle velocity reached the highest magnitude at the free bed surface. Gunnarsson et al. (2020) focused on the radiative and convective heat transfer between the gases in the freeboard which includes particle radiation and the kiln wall [14]. They predict the

inner wall and bed surface temperatures with less than 11% errors with the model. Boateng and Batt (1996) developed a mathematical model in order to investigate the temperature distribution within the bed and heat transfer from the freeboard gas to the bed of a rotary kiln [15]. Barr et al. (1989) investigated the heat transfer in the cross-section of a rotary kiln. Their mathematical model was include all the transport mechanisms of heat transfer processes [16]. The results showed that the high net inputs to the bed material reached at the initial 1,5 m of the kiln length and then the net heat input to the bed material declined. They also suggested that feed should be preheated to a specific level for an endothermic bed reaction in order to proceed the reaction immediately upon the goods entering the kiln. Wulandari et al., investigated the effect of temperature, feed rate, rotating frequency and particle size of the dolomite calcination at a bench scale rotary kiln. Based on the conversion rates and operational temperatures, they found out that at a larger scale, heat transfer plays important role in the calcination of dolomite [10].

Conventionally, rotary kilns are generally produced with steel material. Stainless steels have a wide application area in industry due to its corrosion and heat resistant and they meet different requirements such as strength, weldability and toughness [17]. In current system, the main material of the rotary kiln is 316L (1.4404) quality steel. Although 316L (1.4404) quality steel has a good corrosion resistance, the rotary kiln shell is corroded until it becomes unusable in every six months. The aim of this study is to investigate the temperature distribution on a rotary kiln by considering the kiln's material. The alternative material and design to current system was also examined and they were numerically analysed. Due to the different properties of material, alternative designs were suggested throughout the study.

2. MATERIAL AND METHOD

In the current system, the solution enter the rotary kiln at 145 °C and leave at 215 °C by means of heating the second region of the kiln to 636 °C.

The basic operation properties of the current system was given in Table 1. In Figure 1, the section of the rotary kiln which uses in the current application was illustrated. Although the inside diameter of rotary kiln is 900 mm, in the process, only 200 mm of height from the bottom was filled with the goods.

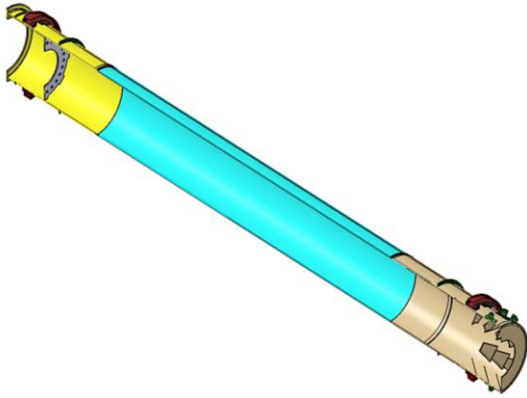


Figure 1. Section of the 3D model of the rotary kiln

Table 1. The basic operation properties of the current system

Materials	I. Region	316 L
	II. Region	316 L
	III. Region	316 L
Outside temperature	I. Region	20 °C
	II. Region	636 °C
	III. Region	20 °C
Average input temperature of the goods		145.0 °C
Average output temperature of the goods		215.0 °C
Mass flow rate		0.893 kg/s

In the application the current system of rotary kiln was composed of 316L (1.4404) quality steel. The properties of the material is given in Table 2.

Table 2. Properties of 316L (1.4404) quality steel

Chemical composition of 316L (1.4404) quality steel			
C	Cr	Mn	Mo
0.030	16.0-18.0	2.0	2.0-3.0
Ni	P	S	Si
10.0-14.0	0.045	0.03	1.0
Physical properties of 316L (1.4404) quality steel			
Density			7850 kg/m ³
Modulus of elasticity			193 GPA
Thermal conductivity			16.2 W/m-K
Specific heat			0.50 kJ/kg-K

In the study, titanium Gr 2 material was chosen as an alternative material to the rotary kiln since the material has a higher corrosion resistance than 316L (1.4404). However, due to the stability of the material is limited to 500 °C, the outside temperature of the rotary kiln was decreased to 500 °C. The properties of titanium Gr 2 material was given in Table 3.

Table 3. Properties of titanium Gr 2 material

Chemical composition of titanium Gr 2 material					
C	H	Fe	N	O	Ti
≤0.08	≤0.015	≤0.30	≤0.03	≤0.25	Rest
Physical properties of titanium Gr 2					
Density			4620 kg/m ³		
Modulus of elasticity			105 GPA		
Specific heat			0.52 kJ/kg-K		
Thermal conductivity			20 W/m-K		

In the study, 3D model of the kiln was prepared for numerical analyses. In the analyses material inside the kiln was prepared with boolean operation. Moreover, air inside the rotary kiln was also modelled for the analyses.

The required heat input to the goods inside the rotary kiln may be calculated analytically by means of heat absorbed from the goods and heat lost to the ambient. The heat lost from a rotary kiln to the ambient air occurred through convection and radiation, it can be shown in an Equation 1 as;

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{con}} + \dot{Q}_{\text{rad}} \quad (1)$$

Heat lost through convection along the length of rotary kiln with subdivided into a number of n small segments dx may calculate from Equation 2.

$$\dot{Q}_{con} = h_n \cdot 2\pi r_o dx \cdot (T_{s,n} - T_A) \quad (2)$$

Where, h_n is convective heat transfer coefficient; r_o is the outer shell of the rotary kiln; $T_{s,n}$ and T_A are the average temperature of the section and average ambient air temperature.

Heat lost radiation along the length of rotary kiln with subdivided into a number of n small segments dx may described as it shown in Equation 3.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot 2\pi r_o dx \cdot (T_{s,n}^4 - T_A^4) \quad (3)$$

Where, ε is the emissivity and σ is the Stefan-Boltzmann constant ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$)

Due to the kiln rotation, in order to increase the accuracy of the model Equation 4 was used by Sadighi et al. (2011), Gorog et al. (1982) and Agrawal et al. (2017) of the model for values of Re_w/\sqrt{Gr} greater than 0.2 [18-20].

$$h_n = \frac{0.11\lambda Pr^{0.36}}{D} (0,5Re_w^2 + Re^2 + Gr)^{0,35} \quad (4)$$

3. RESULT AND DISCUSSION

During the numerical studies, firstly, the existing conditions were modelled and the results compared both with the measured data in the field and analytical results. According to numerical analyses of existing conditions, the output temperature was found as 216.9 °C. The result of the analyses was shown in Figure 2 below. The desired output of the product is 215±5 °C.

By using titanium Gr 2 material instead of 316L steel material, due to the stability conditions of the material, the outside temperature at heated part (Region II) of the rotary kiln should be decreased to 500 °C. Temperature distribution of the liquid was shown by using titanium Gr 2 was shown Figure 3. According to results, the output temperature of the liquid was found as 191.5 °C. This result is unacceptable for the process. Therefore, other applications was performed in the study. In other system, rotary kiln combined with 316L (1.4404) and titanium Gr 2 materials. In this proposed hybrid system the outside of Region II was covered with the steel material and the inside of the region was covered with titanium material. By this, the outside temperature of the rotary kiln was able to increase to 636 °C. The heat distribution of this system was shown in Figure 4. However due to the different thermal expansion the stress was calculated as 1296.2 MPa which may fail the materials of the kiln. The von-Mises stress distribution of rotary kiln was shown in Figure 5.

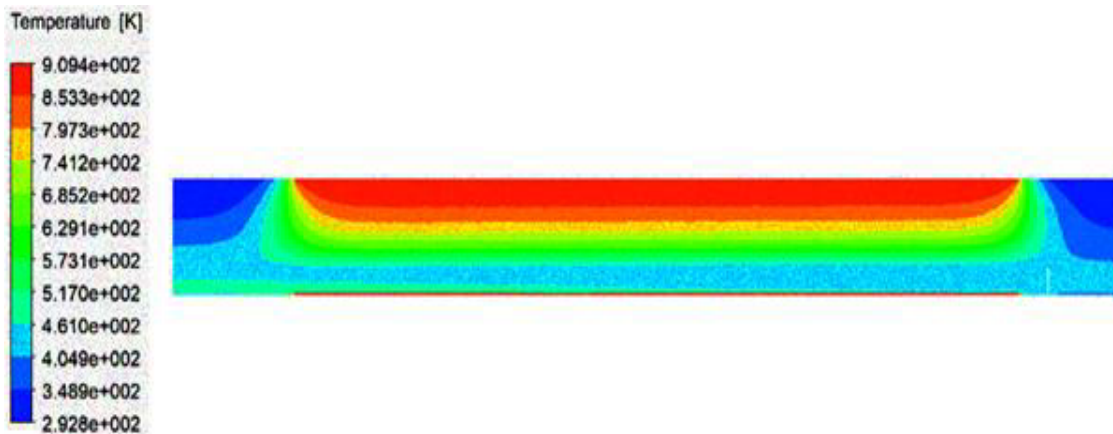


Figure 2. Temperature distribution of the liquid in current system

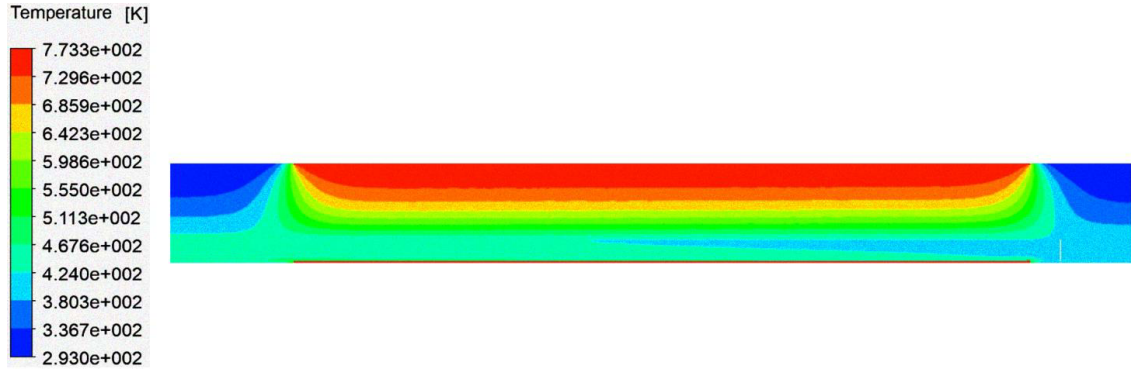


Figure 3. Temperature distribution of the liquid by using titanium Gr2 material.

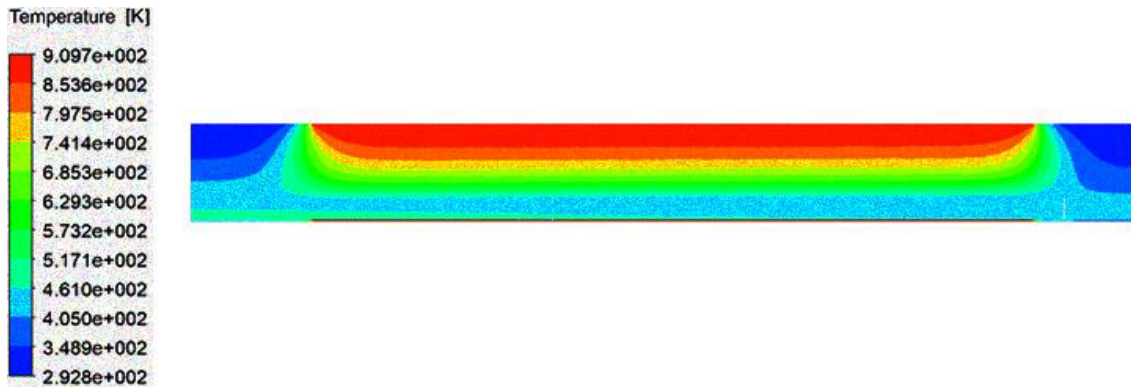


Figure 4. Temperature distribution of the liquid by using the combination of 316L (1.4404) and titanium Gr 2 materials

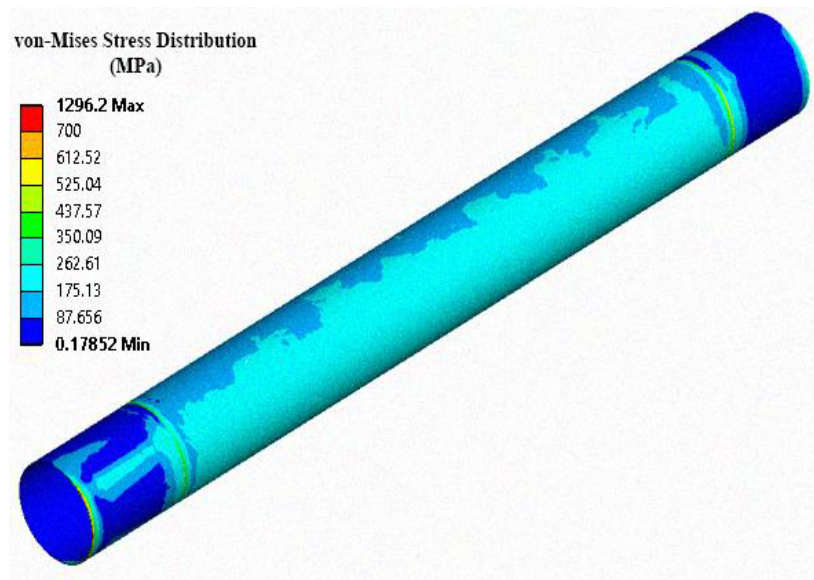


Figure 5. Thermal stress distribution with the combination of 316L (1.4404) and titanium Gr 2 materials

In the last, the length of the region II, which is the heated part from boiler (Region II) was extent by 4600 mm. With increment of the heat input region the output temperature of the fluid was able to reach 214.8 °C and the heat distribution of the

solution was in a good match with current system. Thus, heat distribution was acceptable for the process. The temperature distribution of the system was illustrated in Figure 6.

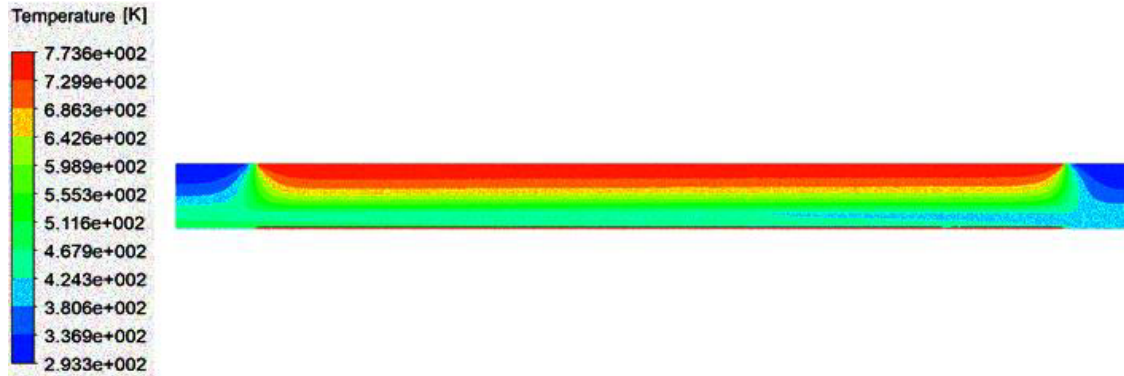


Figure 6. Temperature distribution of the liquid in extended rotary kiln

4. CONCLUSION

The objective of this study was to improvement of a rotary kiln system was performed by using different alternative material and designs. Titanium Gr 2 materials were investigated throughout the study. According to experiments and results, following summarizes were brought out:

- The results of numerical analyses indicated that the output temperature of the product is 216.9°C,
- Due to the stability temperature of titanium Gr 2 the outside temperature of rotary kiln was decreased to 500°C. Thereby the output temperature of the product reduced to 191.5 °C, which is not in the desired temperature range.
- A hybrid material was performed in the model which is the combination of titanium Gr 2 material and 316L (1.4404) quality steel at the inside and outside of the rotary kiln shell, respectively. However, the model showed that the usage of the hybrid materials without another material between them is impossible to use due to the high thermal stress.

- In the final, solely titanium Gr 2 material was used as the material of rotary kiln again. However, the kiln was extended by 4600 mm in order to obtain desired product output temperature.

5. REFERENCES

1. Janati, K.I., 2020. Thermo-elastic Behavior Study of Rotary Kilns for Cement Plants. *Engineering Failure Analysis*, 118, 104896.
2. Karamarković, V., Marašević, M., Karamarković, R, Karamarković, M., 2013. Recuperator for Waste Heat Recovery from Rotary Kilns. *Appl Therm Eng*, 54, 470–480.
3. Zhang, Z, Wu, Y., Li, H., Li, X., Gao, X., 2018. A Simple Step-change Method to Determine Mean Residence Time in Rotary Kiln and a Predictive Model at Low Inclination. *Powder Technol*, 333, 30–37.
4. Minyou, C., Qijian, Z., 1992. A Real Time Expert Controller for Industrial Rotary Kilns. *IFAC Proc*, 25, 53–57.
5. Wirtz, S., Pieper, C., Buss, F., Schiemann, M., Schaefer, S., Scherer, V., 2020. Impact of Coating Layers in Rotary Cement Kilns: Numerical investigation with a Blocked-off

- Region Approach for Radiation and Momentum. *Therm Sci Eng Prog*, 15, 100429.
6. Haziq Uddin, M., Tafaghodi Khajavi, L., 2020. The Effect of Sulfur in Rotary Kiln Fuels on Nickel Laterite Calcination. *Miner Eng*, 157, 106563.
 7. Kowalski, Z., Kulczycka, J., Wzorek, Z., 2007. Life Cycle Assessment of Different Variants of Sodium Chromate Production in Poland. *J Clean Prod*, 15, 28–37.
 8. Wang, J.L., Hu, G.R., Peng, Z.D., Du, K., 2015. Novel Method to Prepare Sodium Chromate from Carbon Ferrochrome. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 25, 3820–3826.
 9. Gao, N., Jia, X., Gao, G., Ma, Z., Quan, C., Naqvi, S.R., 2020. Modeling and Simulation of Coupled Pyrolysis and Gasification of Oily Sludge in a Rotary Kiln. *Fuel*, 279, 118152.
 10. Wulandari, W., Subagjo, S., Tri Mursito, A., Juanjaya, F.J., Alwi, M.F., 2018. Performance of Dolomite Calcination in a Bench-Scale Rotary Kiln. *MATEC Web Conf*, 156, 1–5.
 11. Vijayan, S.N., Sendhilkumar, S., 2014. Industrial Applications of Rotary Kiln in Various Sectors-A Review. *International Journal of Engineering Innovation and Research*, 3, 342-345.
 12. Witt, P.J., Sinnott, M.D., Cleary, P.W., Schwarz, M.P., 2018. A Hierarchical Simulation Methodology for Rotary Kilns Including Granular Flow and Heat Transfer. *Miner Eng*, 119, 244–62.
 13. Yin, H., Zhang, M., Liu, H., 2014. Numerical Simulation of Three-dimensional Unsteady Granular Flows in Rotary Kiln. *Powder Technol*, 253, 138–145.
 14. Gunnarson, A., Andersson, K., Adams, B.R., Fredriksson, C., 2020. Full-scale 3D-modelling of the Radiative Heat Transfer in Rotary Kilns with a Present Bed Material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 147, 1-10.
 15. Boateng, A.A., Barr, P.V., 1996. A Thermal Model for the Rotary Kiln Including Heat Transfer within the Bed. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39, 2131-2147.
 16. Barr, P.V., Brimacombe, J.K., Watkinson, A.P., 1989. A Heat-transfer Model for the Rotary Kiln: Part II. Development of the Cross-section Model. *Metall Trans B*, 20, 403–419.
 17. Uhrčík, M., Sapieta, M., Stankovičová, Z., Palček, P., Oravcová, M., 2016. The Stress Detection of Stainless Steel AISI 304, AISI 316L and AISI 316Ti During Three-point Bending Cyclic Loading. *Mater Today Proc*, 3, 1189–1194.
 18. Agrawal, A., Ghoshdastidar, P.S., 2017. Numerical Simulation of Heat Transfer During Production of Rutile Titanium Dioxide in a Rotary Kiln. *Int J Heat Mass Transf*, 106, 263–279.
 19. Sadighi, S., Shirvani, M., Ahmad, A., 2011. Rotary Cement Kiln Coating Estimator: Integrated Modelling of Kiln with Shell Temperature Measurement. *Can J Chem Eng*, 89, 116–125.
 20. Gorog, J.P., Adams, T.N., Brimacombe, J.K., 1982. Regenerative Heat Transfer in Rotary Kilns. *Metall Trans B*, 13, 153–163.

Toz Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilen Parçada İç Vida Geometrisinin Elde Edilmesinin Araştırılması

Mehmet SUBAŞI*¹

¹Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Ankara

Geliş tarihi: 16.09.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Toz enjeksiyon kalıplama (TEK), metal ve seramik tozlarından hassas geometriye parçaların üretimi için kullanılan ideal bir tekniktir. TEK yönteminde parçanın iç kısmında vida geometrisi elde etmek için hareketli maça sistemine ihtiyaç vardır. Fakat bu sistemin yapılması hem zor hem de zaman alıcıdır. Bu çalışmada iç vida geometrisi, parça içerisindeki insört ile elde edilmeye çalışılmıştır. Bunun için, 316L paslanmaz çelik besleme stoku kalıp içerisine enjekte edilerek parça üretilmiş sonrasında uygun matkapla delik delinmiş ve M4 vida çekilmiştir. Parça içerisine konulacak vida geometriye insörtler yüksek sıcaklığa dayanıklı hegzagonal bor nitrür ve krom ile kaplanmıştır. Böylece besleme stoku bölgesindeki vida geometrisinin insört ile difüzyonunun engellenmesi amaçlanmıştır. Hazırlanan numuneler iki farklı sinterleme sıcaklığı (1260 °C - 1340 °C) ve süresin de (30-90 dakika) sinterlenmiştir. Çalışma da insört üzerine uygulanan ara katmanların vida geometrisine etkisi araştırılmıştır. Deneyler sonucunda vidalı insört üzerindeki hegzagonal bor nitrür ve krom ara katmanlarının difüzyonu engellemediği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Toz enjeksiyon kalıplama, Vida geometrisi, Ara katman, Krom, Hegzagonal bor nitrür, Sinterleme, 316 L besleme stoku

Investigation of Achieving Internal Screw Geometry in Part Produced by Powder Injection Molding

Abstract

Powder injection molding (PIM) is an ideal technique for the production of precision geometry parts from metal and ceramic powders. In PIM method, a moving core system is needed to obtain screw geometry inside the part. However, making this system is both difficult and time-consuming. In this study, the internal screw geometry in the part has been tried to be obtained with the insert. For this, the part was produced by injecting 316L stainless steel feedstock into the mold, then a hole was drilled with a suitable drill and the M4 screw was pulled. Screw geometry inserts to be placed in the part are coated with hexagonal boron nitride and chrome resistant to high temperature. Thus, it is aimed to prevent the diffusion of the screw geometry in the feedstock area with the insert. The samples prepared were sintered

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Mehmet SUBAŞI, msubasi@gazi.edu.tr

at two different sintering temperatures (1260 °C - 1340 °C) and time (30-90 minutes). In the study, the effect of intermediate layers applied on the insert on screw geometry was investigated. As a result of the experiments, it was determined that hexagonal boron nitride and chromium interlayers on the screwed insert did not prevent diffusion.

Keywords: Powder injection molding, Screw geometry, Interlayer, Chrome, Hexagonal boron nitride, Sintering, 316 L feedstock

1. GİRİŞ

Toz enjeksiyon kalıplama (TEK) da ilk olarak metal ve seramik tozları bağlayıcı bir sistem ile karıştırılarak besleme stoku hazırlanır. Hazırlanan besleme stoku kalıp boşluğuna enjeksiyon yapılarak ham parçalar elde edilir. Kalıptan çıkan ham parçalar kimyasal ve ısıl olmak üzere iki aşamalı bağlayıcı giderme işlemine tabi tutulurlar. Bağlayıcı giderme aşamasından sonra parçalar besleme stokunun özelliğine bağlı olarak atmosfer kontrollü ortamda veya hem atmosfer kontrollü hem de vakum ortamında sinterleme işlemine tabi tutulurlar. Sinterleme işleminden sonra parçada nihai yoğunluk ve şekil elde edilir.

TEK yönteminin prensipleri plastik enjeksiyon kalıplama tekniğine dayandığı için parça üzerindeki girintiler için erkek, çıkıntılar için dişi maçalar kullanılması gereklidir. Eğer parça üzerinde kalıbın açılma yüzeyinden farklı bir düzlemde geometri elde edilmesi gerekiyor ise hareketli bir maça sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. TEK yöntemi ile içi vida geometrisine sahip bir parçayı elde etmek için hareketli bir maça sistemi gereklidir.

Bir parçanın, silindirik iç veya dış yüzeyleri üzerine açılan helisel girinti ve çıkıntılara vida denir. Delik içerisine vida geometrisi oluşturma işleminde farklı zorluklar olmasına rağmen tasarımlarda yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Bir makine sistemini oluşturan elemanlar hangi yöntem ile üretilir ise üretilsin sistemin ortaya çıkması için montaj edilmeleri gerekmektedir. Parçaların montajında da kullanılan en yaygın yöntem civata ve somun bağlantı şeklindedir. Bu yöntem kullanılarak birleştirilen sistemlerin hedeflenen bağlantı kalitesinde olması da vida geometrisinin, yüzeyinin toleranslar içinde olmasını gerektirir [1,2].

Literatürde bir parçanın ya da içerisindeki vida geometrisinin talaşlı imalat ile elde edilmesine yönelik birçok çalışma bulunmaktadır [3,5]. Ancak TEK yöntemi, talaşlı imalat yöntemi ile karşılaştırıldığında üretilen parça sayısı ve parça geometrisi karmaşıklığı arttıkça avantajlı bir konuma geçmektedir. Ayrıca parça geometrisi karmaşıklığı arttıkça TEK yöntemin de üretim maliyeti azalmaktadır [6,7].

İç ve dış kısmı farklı malzemeden olması istenen parçaların üretiminde difüzyon kaynağı yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntem ile farklı malzemelerden yekpare parçalar üretilebilmektedir. Difüzyon kaynağı birleşmelerinde sıcaklık, süre ve basınç temel faktörlerdir. Ayrıca yapılan çalışmalarda birleşmenin kalitesini arttırmak için ara katman kullanılması gerektiği tespit edilmiştir [8].

Aust ve arkadaşları [9], TiAl6Nb7'den karmaşık geometri bir kemik vida implantının imalatına yönelik çalışma yapmışlardır. TEK yöntemi ile hazırlanan parçaya mikro yapısal analizler ve mekanik testler yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre bir kemik vidası implantının enjeksiyon kalıplama ve sinterleme parametreleri optimize edilmiştir. Çalışma sonucunda, kemik vidası implantının çekme mukavemetini, akma dayanımını, plastik uzama ve burulmaya karşı direnç değerlerini tespit etmişlerdir.

Meng ve arkadaşları [10] toz enjeksiyon kalıplama ile alüminadan mikro kanallı parçanın imal edilmesi ile ilgili çalışma yapmışlardır. Hammaddenin termal ve reolojik özelliklerini incelemişlerdir. Kalıplama işleminden sonra mikro kanallı parçaları farklı sıcaklıklarda ve vakum ortamında sinterlemişlerdir. Kalıplama, bağlayıcı giderme ve sinterleme aşamalarının her birinin ardından yaptıkları incelemelerde mikro

kanallı parçalarda herhangi bir çarpılma, eksiklik ve çatlama tespit etmemişlerdir.

Bianchi ve arkadaşları [11] çalışmalarında geleneksel enjeksiyon kalıplama yöntemine benzer bir şekilde seramik matriksli kompozit malzemeden rod üretmişlerdir. Çalışmalarında ergimiş hammaddeyi basınç ile kalıp içerisinde sıkıştırmışlardır. Çalışma sonucunda rodun mekanik özelliklerinde artış olduğunu belirlemişlerdir. Rodun vida profilinde de hedeflenen özellikleri elde edebilmişlerdir.

Joon ve arkadaşları [12] yaptıkları çalışmada toz enjeksiyon kalıplama yöntemi ile 316L paslanmaz çelik mikro ve nano tozlardan hazırlanmış besleme stoklarından numuneler üretmişlerdir. Deneyler sonucunda numunelerin yoğunluk ve tane büyüme davranışları ile birlikte mikro yapısal farklarını incelenmişlerdir. Nano tozların tane büyümesini azalttığını yoğunluğu ise arttırdığını belirlemişlerdir.

Urtekin ve arkadaşları [13] Ti-6Al-4V besleme stokundan kemik vida implantının imalatına yönelik çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında kemik vida implantının üretilebilmesi için gerekli optimum kalıplama ve sinterleme parametrelerini tespit etmişlerdir.

Yılmaz ve arkadaşları [14] toz enjeksiyon kalıplama yöntemi ile küresel şekilli, hareketli ve kendinden montajlı parça üretimini araştırmışlardır. Parçayı oluşturan bileşenler arasındaki hareketin krom ara yüzey kullanarak elde edilebileceğini belirlemişlerdir.

Koçak ve arkadaşları [15] insörtlü toz enjeksiyon kalıplama yöntemi ile WC parça üretiminde ara katmanın etkisini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda nikel ara katman ile kusursuz parça üretimini gerçekleştirebilmişlerdir.

Literatürde yapılan çalışmalarda yaygın olarak besleme stokunun hazırlandığı toz ve bağlayıcı maddelerin nihai parçanın mekanik özelliklerine etkisi üzerine odaklanılmıştır. TEK yöntemi ile hazırlanan parçanın içinde vida geometrisi elde edilmesi üzerine çok fazla çalışma

bulunmamaktadır. Bu çalışmada maçalı kalıp kullanmadan iç kısmı vida geometriye sahip parçanın üretilebilirliği araştırılmıştır. Ayrıca besleme stoku bölgesinin çekmesi (büzülmesi) ile insört üzerindeki vida geometrisinin kusursuz olarak elde edilmesi hedeflenmiştir. İlk olarak silindirik geometriye sahip numuneler TEK yöntemi ile hazırlanmıştır. Bu numunelerin iç kısmına M4 kılavuz çekilmiştir. Vida profili elde edilmiş numunelerin içlerine dış profiline bozulmaması için insörtler yerleştirilerek sinterleme deneyleri yapılmıştır. Parça içerisine yerleştirilen insörtler ile enjeksiyon bölgesi arasındaki difüzyonu önlemek için insörtler krom ve hegzagonal bor nitrit katmanları ile kaplanmıştır. Deneyler sonucunda insört ile besleme stoku bölgeleri arasındaki difüzyon engellenerek maça kullanmaksızın iç vida geometrisinin elde edilebilirliği araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Sinterlenmiş parçaların iç kısmındaki vida geometrisinin elde edilmesi için insörtler kullanılmıştır. İnsört olarak AISI 1050 çeliğinden hazırlanmış krom kaplı M4 cıvata ve M4 saplama (Tij) kullanılmıştır (Şekil 1). AISI 1050 çeliğinin kimyasal özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. M4 saplama hegzagonal bor nitrit ile kaplanmıştır.



Şekil 1. M4 saplama ve cıvatalar

Çizelge 1. AISI 1050 çeliğin kimyasal özellikleri [16]

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	P	S
Kimyasal içerik (%)	0,500	0,400	0,800	.	.	.	.	.	0,035	0,035

Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılan 316L besleme stoku Almanya da bulunan eMBe (eMBe Products and Service GmbH, Thierhaupten, Germany) firmasından temin edilmiştir. Firma tarafından paylaşılan bilgiler çerçevesinde 316L besleme stokunun kimyasal bileşimi Çizelge 2’de, içindeki tozların özellikleri Çizelge 3’de verilmiştir.

Çizelge 2. 316L besleme stokunun kimyasal özellikleri

C (%)	P (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Mn (%)	Si (%)	Fe
0,03	0,045	16-18	12-15	2-3	<2	≤1,0	Geri kalan

Çizelge 3. Besleme stokunda kullanılan tozun özellikleri

Üretim yöntemi	Boyut	Toz yükleme oranı (ağırlıkça %)
Su atomizasyon	D ₅₀ : 7µm, D ₉₀ : 13µm	% 92,5- 93,1

2.2. İnsörtlerde Kullanılan Ara Katmanlar

Toz enjeksiyon kalıplama da insört üzerine besleme stoku enjekte edildiği zaman sinterleme sonrası insört ile besleme stoku bölgesi arasında bir difüzyon meydana gelmektedir. Bu çalışmada insört ile besleme stoku arasındaki difüzyonu engellemek için insörtler üzerinde bir ara yüzey oluşturulmuştur. İnsörtler üzerindeki ara yüzeyler krom ve hegzagonal bor nitür ile elde edilmiştir. İnsörtler üzerindeki ara yüzeyler (krom ve hegzagonal bor nitür) 5-7 µm kalınlığındadır. Krom arayüzey, sinterleme aşamasında difüzyonu engelleyici bir tabaka olarak işlev görmektedir. Kromun sinterleme aşamasında difüzyonu engelleyecek özellikleri bulunmaktadır (Çizelge 4).

Çizelge 4. Kromun difüzyon özellikleri [17-19]

0,166	Atom yarıçapı (nm)	
1907	Erime sıcaklığı (°C)	
547	Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)	Tungsten içerisinde
10 ⁻¹⁰	Difüzyon katsayısı (cm ² /s)	
291,8	Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)	Demir içerisinde
10,8	Difüzyon katsayısı (cm ² /s)	
70	Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)	Kobalt içerisinde
7,3x10 ⁻³	Difüzyon katsayısı (cm ² /s)	

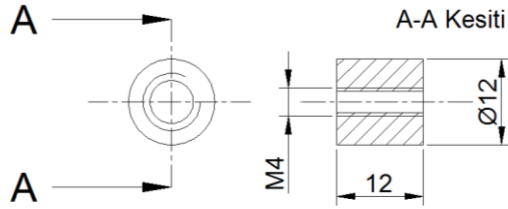
Hegzagonal bor nitür (h-BN) fiziksel özellikleri ve kimyasal kararlılığı sebebiyle birçok uygulamada kullanılmaktadır. h-BN, bor ve azotun bir araya getirilmesiyle hazırlanan bir malzemedir. Bu malzeme, sıcaklık ve basınç etkisiyle kübik bor nitüre dönüşür ve elmasın özelliklerini gösterir. Bor nitür’ün tabakalar arası bağları zayıf olduğundan, düzensiz tabakalaşma çok kolay olur. Birbirine paralel veya dik yönde geliş güzel dizilmiş olan bu tabakalar arasında boşluklar oluşur. Oluşan boşluklar ise, kullanım sırasında malzemenin ısıl şok direncini artırır [20-25].

Krom ve hegzagonal bor nitürün bu özelliklerinden dolayı insörtler, bu malzemeler ile kaplanmış parçaya yerleştirilmiş, parça içerisindeki iç vida profilinin kalıpta maça kullanmadan oluşturabilmek için deneyler yapılmıştır.

2.3. Toz Enjeksiyon Kalıplama, Bağlayıcı Giderme ve Sinterleme İşlemi

Deney numuneleri toz enjeksiyon kalıplama tezgahında basıldıktan sonra bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemlerine tabi tutulmuşlardır (Şekil 2). Toz enjeksiyon kalıplama parametreleri Çizelge 5’te verilmiştir. Bağlayıcı giderme işlemi 60 °C sıcaklıkta etanol çözeltisinde 24 saat bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sinterleme işlemi atmosfer kontrollü tüp fırın içerisinde yapılmıştır. Numuneler 1260 °C-1340 °C

sinterleme sıcaklıklarında ve 30 ve 90 dakika sürelerde sinterlenmişlerdir. Sinterleme deneyleri 4,5 °C/dakika ısıtma hızında ve 95% N₂+5% H₂ karışım gaz atmosferinde yapılmıştır. Numunelerin soğutma hızı ise 5 °C/dakika'dır.



Şekil 2. Toz enjeksiyon kalıplamada hazırlanan numuneler

Çizelge 5. Toz enjeksiyon kalıplama parametreleri

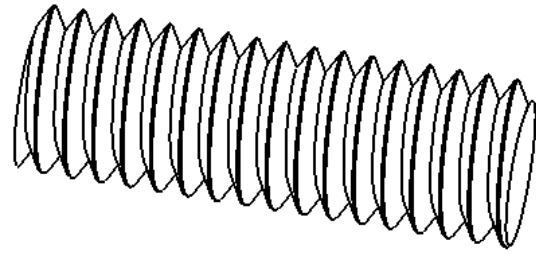
1	Enjeksiyon hızı (cm ³ /s)
120	Enjeksiyon basıncı (bar)
3	Enjeksiyon süresi (s)
50	Ütüleme basıncı (bar)
150	Enjeksiyon sıcaklığı (°C)
45	Kalıp sıcaklığı (°C)
5	Soğutma süresi (s)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışmada ilk olarak 316L besleme stokundan Çizelge 5 de belirtilen parametrelerde numuneler hazırlanmıştır. Kalıptan çıkan numunelere M4 kılavuz çekilmiştir (Şekil 3). Kılavuz çekilmiş numunelerin içerisine insörtler yerleştirilmiştir (Şekil 4). İnsörtler üzerinde krom ve hegzagonal bor nitür kullanarak ara yüzeyler oluşturulmuştur. Krom ara yüzeyin, diğer ara yüzey elementlerine göre (Nikel, bakır gibi) sinterleme aşamasındaki yüksek aktivasyon enerjisi (547 kJ/mol), büyük atom çapı (0,332 nm), yüksek difüzyon katsayısı (10-10 cm² /s) ve yüksek erime sıcaklığı (1907 °C) özellikleri sebebiyle [14] 316L besleme stoku ile AISI 1050 malzemesi arasındaki birleşmenin olmasını en aza indirmektedir. Hegzagonal bor nitür ara yüzeyi ile de besleme stoku bölgesi ile insört arasındaki difüzyon ortadan kaldırılmak amaçlanmıştır.

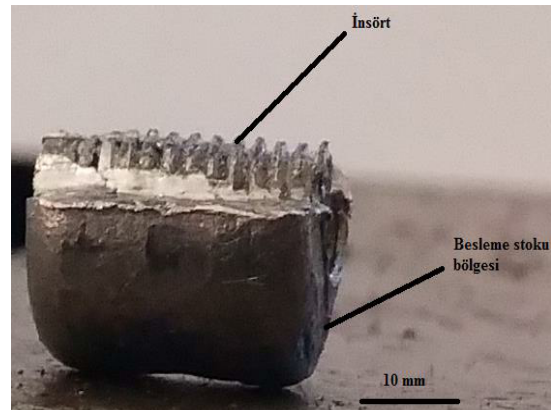


Şekil 3. M4 kılavuz takımı



Şekil 4. İnsört (Ölçek 5/1)

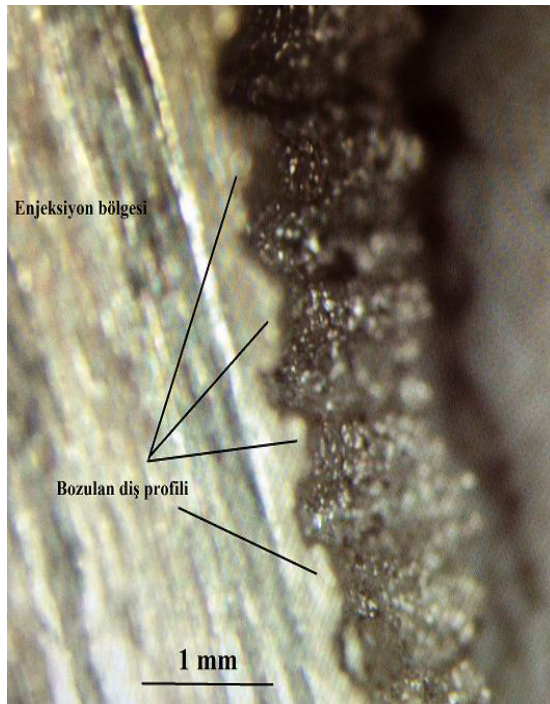
İnsörtlü numuneler 1260 °C ve 1340 °C sıcaklıklarda 30 ila 90 dakika sürelerde sinterlenmişlerdir (Şekil 5).



Şekil 5. 1340 °C sıcaklıkta sinterlenmiş numune

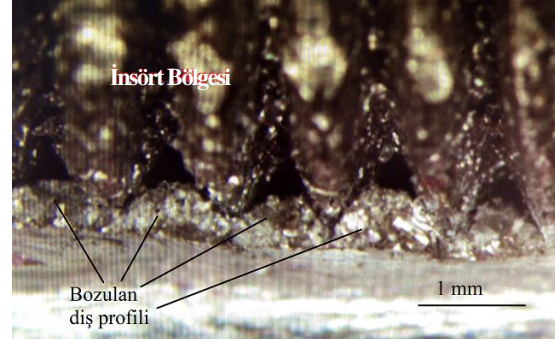
İki farklı ara yüzey (krom ve hegzagonal bor nitür) kullanılarak hazırlanan insörtlü numunelerde vida geometrisi elde edilememiştir. Deneyler sonucunda kullanılan ara katmanların insört ile besleme stoku bölgesi arasındaki difüzyonu engelleyemediği belirlenmiştir.

Sinterleme deneyleri sonrası numunelerin optik mikroskop görüntüleri çekilmiştir. Elde edilen görüntülerde bazı diş profillerinin sinterleme sonrası bozulduğu belirlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Sinterlenmiş numunelerdeki bozulmuş diş profili

Numunelerdeki diş profilinin bozulmasının iki temel sebebi olduğu düşünülmektedir. Birinci sebebin numuneler kalıptan çıktıktan sonra ham malzemeler kılavuz çekme işlemine tabi tutulmuştur. Bu aşamada parçaların mukavemet değerleri oldukça düşüktür. Kılavuzların çekilmesi aşamasında dişlerde belirli bir miktar bozulma oluşabileceği düşünülmektedir. İkinci bir sebep ise insörtlerin numunelere takılması esnasında dişlerin profilinde bir bozulma oluşabileceği düşünülmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. İnsörtlü parçada bozulmuş diş profili

Numunelerde bozulmuş diş profili sayısı toplam diş sayısının yaklaşık %20 ila %30 kadardır. Bir diş profili bile bozulduğunda arada oluşturulan ara katman görevini tam olarak yerine getiremediği için besleme stoku bölgesi ile insört arasında bir difüzyon oluşmaktadır. Bu difüzyonda sinterleme sonrası insörtün parçadan uzaklaştırılmasını engellemektedir.

Aust ve arkadaşları [9] Ti6Al7Nb besleme stokundan, Urtekin ve Taşkın [13]'de Ti6Al4V besleme stokundan TEK yöntemi ile implantlarda kullanılan kemik vidasını başarılı bir şekilde üretebilmişlerdir. Fakat her iki çalışmada da vida profili parçanın dışında ve kalıp üzerindeki bir maça tarafından elde edilmiştir. Sinterleme işlemi sonrasında ise vida geometrilerinde herhangi bir değişiklik olmadığı belirtilmiştir. Bu çalışmada ise vida geometrisi parçanın iç kısmında elde edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca iç vida geometrisinin elde edilmesi için maçalı bir kalıp tasarımı kullanılmamıştır.

Literatürde TEK yöntemi ile kendinden montajlı parçaların üretiminde sinterleme aşamasında koybolan ara katmanlar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [26-28]. Yılmaz ve arkadaşları [14] bu tekniğin maliyet ve zaman açısından kullanışlı olmadığını ortaya koyarak krom ara yüzeyini kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada küresel geometriye sahip parçalarda krom ara yüzeyinin aktivasyon enerjisi, atom çapı, difüzyon katsayısı ve erime sıcaklığı değerlerinden dolayı parçanın kısımları arasında birleşmeyi engellediğini tespit etmişlerdir. Bu çalışmada da insört ile enjeksiyon bölgesi arasında birleşmeyi

engellemek için krom ara yüzeyi kullanılmıştır. Fakat dış profillerindeki bozulmadan dolayı birleşmenin engellenemediği sonucuna ulaşılmıştır.

Bianchi ve arkadaşları [11] seramik matrisli kompozit malzemeden otomobil rotu üretimini araştırdıkları çalışmada dış geometrilerinin hedeflenen özellikte çıkması için bor nitrür kullanmışlardır. Dış geometrilerini bor nitrür ile kaplayarak kusursuz parça üretmeyi amaçlamışlardır. Yaptıkları çalışmada milin dış yüzeyinde vida geometrisi elde etmeye çalışmışlardır. Fakat çalışma sonucunda vida geometrilerinde bölgesel bozulmalar oluştuğunu belirlemiştir. Örneğin vida geometrisinin keskin kenarlarında eksilmeler tespit etmişlerdir. Bu çalışmada da elde edilmek istenen vida geometrinde bozulmalar olmuştur. Vida geometrilerindeki bozulmalardan dolayı ara katman ile elde edilmek istenen boşluk elde edilememiştir.

İnsörtlü toz enjeksiyon kalıplama yöntemi ile parça üretiminde, hacimsel çekmeden faydalanılmaktadır. Hacimsel çekme, insört üzerinde basınç oluşturularak difüzyonun sağlanmasına etki eder [8,15]. Ancak bu çalışmada ara bölgede boşluk elde edebilmek ve hacimsel çekmenin etkisini azaltmak için krom ve hegzagonal bor nitrür ara katmanlar kullanılarak difüzyon engellenmeye çalışılmıştır. Çalışmada hazırlanan numunelerin dış profillerinde bozulma olduğu optik görüntülerde belirlenmiştir. Dış profilindeki bozulmalar ara katmanın birleşmeyi engelleyici özelliğinin ortadan kaybolmasına sebep olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

4. SONUÇLAR

İç ve dış kısmı farklı malzemelerden insörtlü toz enjeksiyon kalıplama yöntemi ile parça üretiminde malzemelerin hacimsel büzülmeleri önemli bir faktördür. İç ve dış kısım arasındaki hacimsel büzülme farkı difüzyonu pozitif yönde etkiler. Çalışmada besleme stoku bölgesi ile insört arasında boşluk elde edebilmek ve hacimsel büzülmenin etkisini azaltmak için krom ve

hegzagonal bor nitrür ara katmanlar kullanılmıştır. Çalışmada insörtler üzerine uygulanan ara katmanların teorik olarak sinterlemede atomik geçiş gibi durumlara izin vermemesi ve bundan dolayı difüzyon oluşmasını engellemesi gerekmektedir. Fakat krom ve hegzagonal bor nitrür ara yüzeylerinin malzeme ve difüzyon karakterleri, boşluk oluşumu için yeterli olmamıştır. Ayrıca parçanın iç kısmında oluşturulan vida geometrilerinin bozulmasından dolayı ara katmanlar difüzyonun oluşumuna engel olamamıştır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma TUBİTAK (113M125) ve Gazi Üniversitesi BAP birimi (07/2013-03) tarafından desteklenmiştir.

6. KAYNAKLAR

1. Çakır, M.C., 2006. Modern Talaşlı İmalatın Esasları, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
2. Uzun, G., 2013. Ti6Al4V Titanyum Alaşımında Kılavuz ile Vida Açma Problemlerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 110.
3. Şahinoğlu, A., Rafighi, M., 2020. Investigation of Vibration, Sound Intensity, Machine Current and Surface Roughness Values of AISI 4140 During Machining on The Lathe, Arabian Journal For Science And Engineering, 45(2), 765–778.
4. Şahinoğlu, A., Rafighi, M., 2020. Optimization of Cutting Parameters with Respect to Roughness for Machining of Hardened AISI 1040 Steel, Materials Testing, 62 (1), 85-95.
5. Tulu, Ş., Kulesza, S., Bramowicz, M., Sağlam, H., Kus, R., 2020. Fractal Geometry of Internal Thread Surfaces Manufactured by Cutting Tap and Rolling Tap, Manufacturing Letters, 23, 34-38.
6. Karataş, Ç., Sarıtaş, S., 1998. Toz Enjeksiyon Kalıplama: Bir Yüksek Teknoloji İmalat Metodu, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 13(2), 193.
7. German, R.M., Bose, A., 1997. Injection Molding of Metals and Ceramics (First

- Edition). Metal Powder Industries Federation. New Jersey: Princeton, 5-280.
8. Koçak, H., Subaşı, M., Karataş, Ç., 2019. Sinter Bonding of AISI 4340 and WC-Co Using Ni Interlayer by Inserted Powder Injection Molding, *Ceramics International*, 45, 22331-22335.
 9. Aust, E., Limberg, W., Gerling, R., Oger, B., Ebel, T., 2006. Advanced TiAl6Nb7 Bone Screw Implant Fabricated by Metal Injection Moulding, *Advanced Engineering Materials*, 8, 5, 365-370.
 10. Meng, J., Ngiap, H.L., Gang, F., Bee, Y.T., Shu, B.T., 2011. Micro Powder Injection Moulding of Alumina Micro-Channel Part, *Journal of the European Ceramic Society*, 31, 1049-1056.
 11. Bianchi, G., Vodermayr, A., Ortona, A., 2018. Net Shape CMC Components Produced by Composite Flow Moulding, Pyrolysis and Reactive Silicon Infiltration, *Ceramics International*, 44, 12204-12209.
 12. Joon-Phil, C., Geon-Yong, L., Jun-Il, S., Won-Sik, L., Jai-Sung, L., 2015. Sintering Behavior of 316L Stainless Steel Micro Nanopowder Compact Fabricated by Powder Injection Molding, *Powder Technology*, 279, 196-202.
 13. Urtekin, L., Taskin, A., 2017. Ti-6Al-4V Alloy Cortical Bone Screw Production by Powder Injection Molding Method, *Materials Express*, 7(4), 245-252.
 14. Yılmaz, O., Samet, K., Koçak, H., Karataş, Ç., 2019. Toz Enjeksiyon Kalıplamada Krom Arayüzeyi Kullanılarak Montajlı Parça İmalatının Araştırılması, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(2), 621-634.
 15. Koçak, H., Samet, K., Yılmaz, O., Karataş, Ç., 2018. Nikel Ara Katman Kullanılarak İnsörtlü Toz Enjeksiyon Kalıplama Yöntemiyle WC-Co/HSS Kompozit Parça Üretiminin Araştırılması, *GU J Sci, Part C*, 6(2), 374-384.
 16. Subaşı, M., Samet, K., Karataş, Ç., 2020. İnsörtlü Toz Enjeksiyon Kalıplamada İnsört Malzemesinin Araştırılması, *GU J Sci, Part C*, 8(2), 475-485.
 17. Sun, R., 1958. Diffusion of Cobalt and Chromium in Chromite Spinel, *The Journal of Chemical Physics*, 28(2), 290-293.
 18. Gale, W.F., Totemeier, T.C., 2003. *Smithells Metals Reference Book*. Butterworth-Heinemann.
 19. Takasawa, K., Yamazaki, Y., Takaki, S., Abiko, K., Iijima, Y., 2002. Diffusion of Cr and Fe in a High-purity Fe-50 Mass% Cr-8 Mass% W Alloy, *Materials Transactions*, 43(2), 178-181.
 20. Handan, A., 2018. Nanopowdrlı Hegzagonal Bor Nitrür Üretimi ve Karakterizasyonu, *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*, 30(2), 269-275.
 21. Pease, R.S., 1952. An X-ray Study of Boron Nitride, *Acta Crystall*, 5, 356-361.
 22. Dreissig, D.H., 2002. Synthesis of BN Powders, *Doktora tezi*, Chemistry Dep. of The University of New Mexico, 295.
 23. *Materials Handbook for Refractories*, 2002. Traditional & Advanced Ceramics, Ceramic Industry, January, 26-136.
 24. *Gmelins Handbook of Inorganic Chemistry*, 1988. Boron Compounds BN Special Issue, 8th edition, Springer Verlag, 1-89.
 25. Lide, B.D.R., 1995. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, Student Edition, 76th Edition, CRC Press, 1550.
 26. Chartier, T., Delhomme, E., Baumard, J., Veltl, G., Ducloux, F., 2001. Injection Moulding of Hollow Silicon Nitride Parts Using Fusible Alloy Cores. *Ceramics International - CERAM INT*. 27, 821-827.
 27. Attia, U., Hauata M., Walton I., Annicchiarico D. ve Alcock J., 2014. Creating Movable Interfaces by Micropowder Injection Moulding, *Journal of Materials Processing Technology*, 214(2), 295-303.
 28. Williams, N., Whittaker, P., 2010. PM2010: Case Studies Highlight Global Success of Metal and Ceramic Injection Moulding. *Powder Injection Moulding International*, 4(4), 48-54.

Hastelloy C276/UNS S32205 Malzeme Çiftinin Birleştirilmesinde ER 316 L İlave Metal Kullanımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi

Tuba KARAHAN*¹

¹*İstanbul Gedik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul*

Geliş tarihi: 09.09.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Bu çalışmada, Hastelloy C276 nikel bazlı süper alaşım ile UNS S32205 dubleks paslanmaz çelik benzer olmayan malzeme çifti, MAG (metal aktif gaz) yöntemi ve ER 316L ilave metali kullanılarak birleştirilmiştir. Kullanılan ilave metalin kimyasal özellikleri her iki ana malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerinden farklıdır. Kaynaklı bağlantının genel mikro yapısı optik mikroskop ile incelenmiştir. Benzer olmayan birleştirmenin, ergime sınırlarında meydana gelen geçiş bölgesinin elementel karakterizasyonu yapılarak, bu bölgede seyrelme sonucu meydana gelen değişimler elementel haritalama ile açıklanmıştır. İlave metalin Nikel içeriği nedeni ile tüm çentik darbe testi numunelerinde yüksek tokluk değerleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ni alaşımları, Dubleks paslanmaz çelik, Kaynak metalürjisi, Mekanik özellikler, Mikroyapı karakterizasyonu

Influence of ER 316 L Filler Metal to Microstructure and Mechanical Properties of Hastelloy C276/UNS 32205 Dissimilar Welds

Abstract

In this study, the dissimilar combinations of Hastelloy C-276 nickel-based super alloy and UNS 32205 duplex stainless steel are welded using MAG (metal active gas) method and ER 316L filler metal. The chemical properties of the filler metal are different from the mechanical and chemical properties of both base materials. The general microstructure of the weldment was examined with an optical microscope. The elemental characterization of the transition region between the base metal, weld metal and the fusion line is performed by using elemental mapping and by explaining the elemental mapping in this region with dilution. High toughness results had been obtained because of the nickel content of the filler metal.

Keywords: Ni alloy, Duplex stainless steel, Welding metallurgy, Mechanical properties, Microstructural characterization

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Tuba KARAHAN, tuba.karahan@gedik.edu.tr

1. GİRİŞ

Nikel bazlı alaşımlar, yüksek sıcaklıklar da dahil olmak üzere çok çeşitli ortamlar için mühendislikte kullanılan ve korozyona karşı mükemmel dayanım gösteren malzemelerden biridir [1]. Hastelloy C276, nikel bazlı tek fazlı bir süper alaşımdır. Ana alaşım elementleri Cr, Mo, Fe ve W'dır. Alaşım katı çözelti güçlendirmesine dayanarak tasarlanmıştır ve bu alaşımda çökeltme sertleşmesi meydana gelmemektedir [2]. Nikel bazlı süper alaşımlar, yüksek korozyon direnci ve yüksek mukavemet nedeniyle kimyasal, petrokimya, havacılık ve nükleer santral vb. çeşitli endüstrilerin gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır [3].

Dubleks paslanmaz çelikler yüksek tokluğa ve mekanik mukavemete sahip korozyona dayanıklı alaşımlardır [4]. Dupleks paslanmaz çeliklerin kullanımı, özellikle kimya ve petrokimya endüstrilerinde kullanılan ısı eşanjörleri ve kimyasal reaktörler gibi sıcaklığa duyarlı bileşenlerde, mükemmel mekanik ve korozyon önleme özelliklerinin kombinasyonu sayesinde giderek yaygınlaşmaktadır [5]. Önemli alaşım elementlerinde meydana gelen segregasyonlar korozyon performansını yerel olarak düşürebilmektedir. Özellikle molibden zengin çökelmelerin, östenitik yüksek alaşımlı kaynak metallere oyuk korozyon direncini azalttığı bilinmektedir [6].

Pahalı bir malzeme olan Hastelloy C276, alaşım maliyetlerini azaltmak için orta riskli koşullarda nispeten düşük fiyatlı paslanmaz çelik malzemeler ile yer değiştirebilir [7]. Bu durum benzer olmayan birleştirmelere olan ilgiyi artırmaktadır. Benzer olmayan birleştirmelerde yapılan kaynak işlemi nikel bazlı süper alaşımlarla ilişkili metalürjik zorlukları beraberinde getirmektedir. Değişken parametreler, seyrelme ve yüksek soğutma hızı nedeniyle, mikro yapı oldukça karmaşıktır ve bu nedenle mikro yapının tahmin edilmesi zordur [8]. Kimyasal bileşimde mevcut olan farklılığın yanında, ana metallere termal genişleme katsayıları da birbirinden farklıdır. Bu ilgili farklılıklar, ısıdan etkilenen bölgede (ITAB) katılaşma çatlağı, ikincil fazların oluşumu ve karışmamış bölgenin varlığı gibi metalürjik

problemlere yol açacaktır. Tüm bu sorunlara rağmen, farklı metallere birleştirilmesi lokal performans isteyen bölgelerde ekonomik açıdan sağlayacağı avantajlar nedeni ile tercih edilmektedir. Tasarımda esneklik ve performansa iyileşme sağlamaktadır [9].

Farklı iki malzemenin birleştirilmesi ve bunun için en uygun ilave metal seçilmesi kaynak metalinin tokluk özellikleri açısından önemli bir koşuldur. Aynı iki cins malzemenin birleştirilmesi sonucu elde edilen kaynak dikişi yalnız ilave metalden meydana gelmemektedir, aynı zamanda iki ana malzemeden de önemli miktarda alaşım elementi bulundurmaktadır. Genel olarak kaynak metalinin ana malzemelerin mekanik özelliklerinin üstünde bir performans sergilemesi beklenmektedir. Bu durum benzer olmayan malzemelerin birleştirilmesinde seyrelme ile kaynak metalinin elementel değişime uğramasına ve mikroyapıda çökelmeler oluşmasına neden olmaktadır ve birçok defa kaynak bölgesinin istenmeyen özelliklere sahip olması ile sonuçlanır.

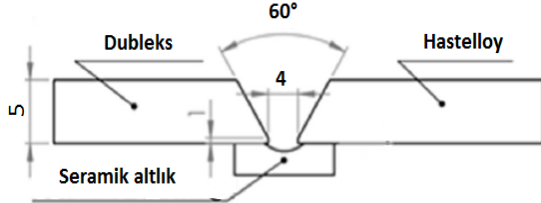
Bu çalışmanın temel amacı; UNS S32205 dupleks paslanmaz çelik (Dubleks) ile Hastelloy C276 nikel bazlı süper alaşım (Hastelloy) arasındaki birleştirmenin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini araştırmaktır. Bu çalışmada, ER316L ilave metali ile birleştirme işlemi yüksek ergime ve seyreltme gücüne sahip MAG birleştirme yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen kaynaklı bağlantı tokluk, mikro yapı elementel karakterizasyon testleri ile incelenerek birleştirmenin uygunluğu test edilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Hastelloy ve Dupleks ana metallere kimyasal içerikleri Çizelge 1'de verilmiştir. İlave metal olarak 1,0 mm çapında, kimyasal kompozisyonu Çizelge 2'de verilen ER 316L ilave metali kullanılmıştır.

Birleştirme MAG kaynak yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Birleştirilen plakaların boyutu 200x100x5 mm olarak belirlenmiş ve 30° tek taraflı kaynak ağzı açılarak kaynak işlemine hazırlanmıştır. Seramik altlık ile ve 4 mm kök

aralığı bırakılarak elde edilen kaynaklı birleştirmenin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. V-kaynak ağız geometrisine sahip kaynaklı birleştirmenin şematik gösterimi

İki pasolu olarak gerçekleştirilen birleştirmede uygulanan kaynak parametreleri ve ısı girdileri Çizelge 3'de verilmiştir. Birleştirme esnasında koruyucu gaz olarak %98 Argon+%2 CO₂ gazı kullanılmıştır. Kök gazı seramik altlık kullanıldığı için kullanılmamıştır.

Çentik darbe deneyleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Her bir bölge için 3 parça kesilmiş ve daha sonra 5x10x55 mm boyutunda çentik darbe numuneleri talaşlı işlem ile hazırlanmıştır. Charpy V çentik darbe test numunesi, TS EN ISO 9016 uyarınca kaynak metaline uygulanmış ve TS EN ISO 148-1'e göre test edilmiştir.

Kaynaklı plakalardan elde edilen numuneler mikro yapı incelemeleri için zımparalama ve parlatma işlemine tabi tutulmuş, %20 oksalik asit solüsyonunda, 10,5 V'da 30 saniye boyunca elektrolitik olarak dağlanmış. Kaynak metalinin mikro yapısı optik mikroskop ile incelenmiştir. Metalografik inceleme için hazırlanan numuneler üzerinden sertlik ölçümleri alınmıştır.

Birleştirilen kaynaklı levhanın enine kesitinden çıkarılan numuneler kullanılarak kaynak metalinin elementel kompozisyonu Rigaku - ZSX Primus II X-Ray Spektrometresi ile tespit edilmiştir.

Thermo Scientific ARL OES 8860 marka optik emisyon spektrometresi ile kaynak metalinin ve ana malzemelerin kimyasal içerikleri belirlenmiştir.

Mikro sertlik işlemi, görüntü kontrollü Microbul marka cihaz ile görüntü kontrollü, 10 kgf yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. Ana malzemelerin kimyasal kompozisyonu

Elementler	Hastelloy	Dupleks
Ni	Kalan	4,85
Cr	16,01	22,16
C	0,004	0,02
Mn	0,44	1,48
Si	0,05	0,40
Mo	15,38	3,38
Fe	5,8	67,29

Çizelge 2. ER316L ilave metali kimyasal kompozisyonu

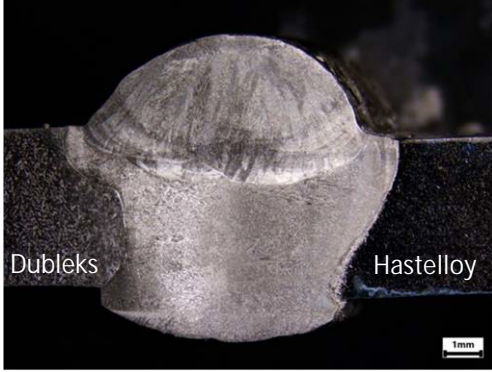
Elementler (%Ağırlık)	Ni	11,8
	Cr	18,7
	Mn	1,7
	Si	0,45
	Mo	2,3
	C	0,02
	Fe	Kalan

Çizelge 3. Kaynak parametreleri

Paso Sayısı	Akım (A)		Gerilim (V)		Kaynak hızı (mm/s)	Isı Girdisi (kJ/mm)
	1	113	120	25,1		
2	117	123	25,2	25,3	3,23	0,94

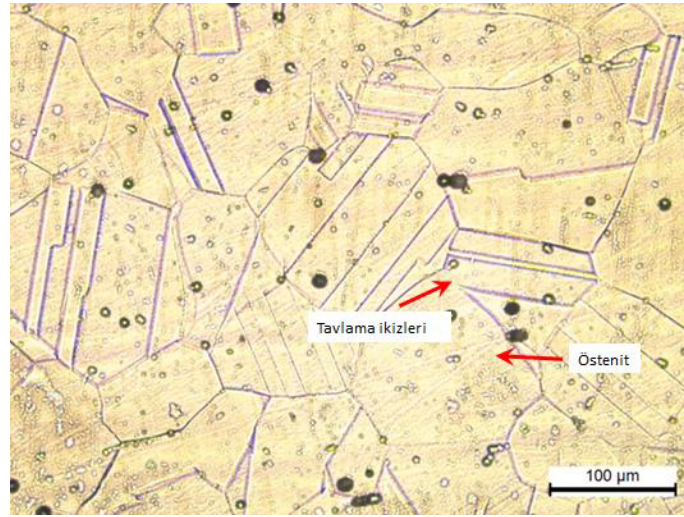
3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

ER 316L ilave metali ile birleştirilen Dupleks ve Hastelloy malzemelerin kaynak metalinin makro yapısı Şekil 2'de verilmiştir. Kesit olarak makro görüntünün alındığı bölgede, çatlak, yetersiz ergime, yanma oluşu vb. hatalar tespit edilmemiştir. Proses parametrelerinin de uygun olduğu görülmektedir. Ayrıca yapılan radyografik muayene sonucu kaynak metalinde yüzey altı inklüzyon, gözenek gibi hatalara rastlanmamıştır.

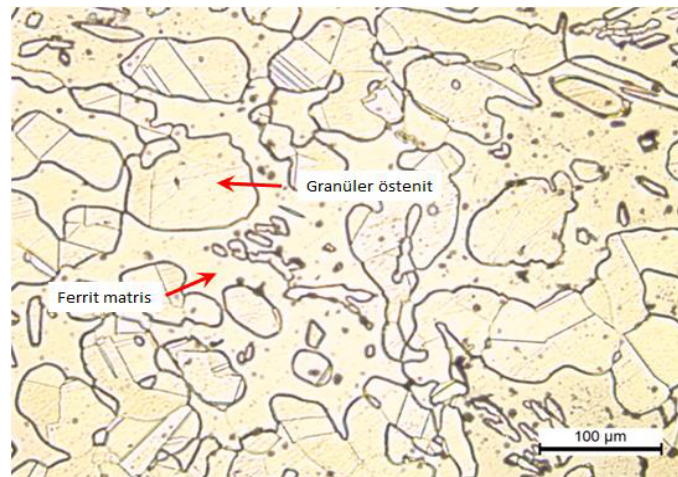


Şekil 2. Makro yapı

Hastelloy ve Dupleks malzemelere ait mikro yapı görüntüleri Şekil 3a ve Şekil 3b'de verilmiştir. Hastelloy büyük ostenit taneleri ve tavlama ikizleri içermektedir. Ayrıca mikro yapı içerisinde metalografik işlemler sonucu oluşan oyuklar haricinde yer alan segregasyonlar göze çarpmaktadır. Dupleks malzemenin mikro yapısı granüler ostenit adacıklarına sahip ferrit matristen oluşmaktadır.



Şekil 3a. Hastelloy C276 mikroyapısı-20x



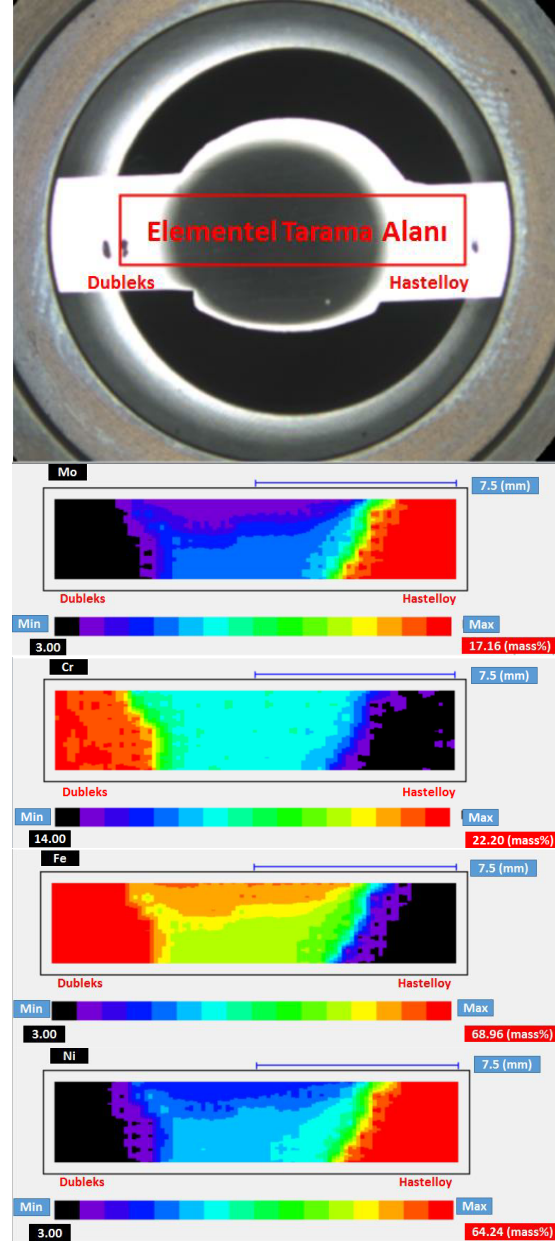
Şekil 3b. Dupleks malzemenin mikroyapısı-20x

Hastelloy–Dubleks malzeme çiftinin ER316L ilave metal ile birleştirilmesi sonucu elde edilen kaynak metaline yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4’de verilmiştir. Hastelloy malzeme tarafından meydana gelen seyrelme kaynak metali içerisinde nikel ve molibden oranını arttırmıştır.

Çizelge 4 Kaynak metali elementel analizi

Elementler	Kaynak metali
Ni	19,89
Cr	17,51
C	0,02
Mn	1,46
Si	0,44
Mo	5,84
W	0,69
Fe	53,77

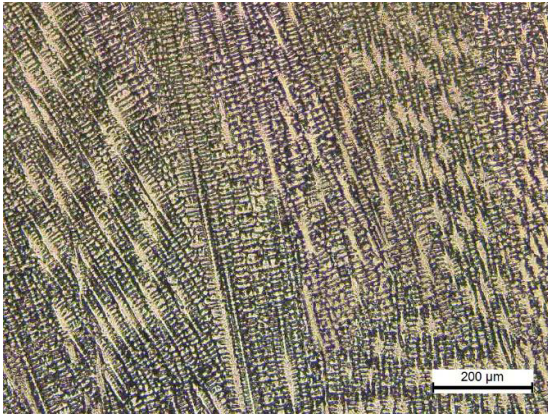
Matris içerisinde yer alan ve kaynak metali mikro yapısında önemli rol oynayan Ni, Cr, Mo ve Fe elementlerinin ana malzemeler arasında kaynak metalini de içine alarak oluşturulan elementel haritalama Şekil 4’de verilmiştir. Nikel elementinin ağırlık oranının kaynak metalinin Hastelloy ergime sınırına yakın bölümlerinde %30’lara kadar yaklaştığı görülmektedir. Kaynak metalinin orta bölgesinde meydana gelen aşırı seyrelme bu bölgede Ni artışına neden olmuştur. Bu artış Dubleks malzemeye yaklaştıkça etkisini kaybetmektedir. Kaynak metali içerisinde östenitik paslanmaz çelik ilave metalinin içerdiği Ni miktarının yaklaşık 1,5 katına çıkan Ni miktarının bu bölgedeki faz yapılarının ve oranlarının değişimine neden olması kaçınılmazdır. Cr elementi incelenen alan içerisinde diğer elementlere göre daha dengeli bir orantıya sahiptir. Dubleks malzemenin ilave metale göre yüksek olan Cr oranı ergime sınırı yanında bu elementin oranını arttırmıştır. Kaynak metali içerisindeki intermetalik faz oluşumunda önemli bir görev üstlenen Mo, Hastelloy tarafında meydana gelen seyrelme ile kaynak ilave metalinin içerdiği miktarın yaklaşık iki katına ulaşmıştır. Hastelloy ergime sınırı boyunca, kaynak metali ~11% civarında Mo içermektedir. Mo miktarı özellikle Hastelloy tipi malzemelerde oluşturduğu intermetalik çökelmeler nedeni ile birçok çalışmaya konu olmuştur [2,3,7,9–12].



Şekil 4. Elementel haritalama

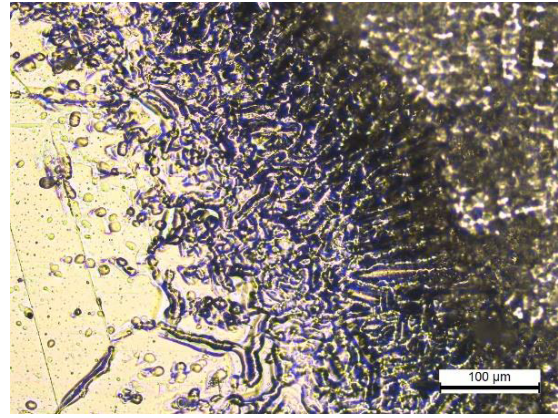
Klasik ergitme kaynak yöntemlerinde özellikle dendritik kolonsal yapı mikro yapı içerisinde kendine geniş bir alanda yer bulmaktadır. Çok pasolu birleştirmelerde sıcaklık gradyanı nedeni ile bu durum kaynak metalinde belli oranlarda mikro yapısal değişimlere neden olur. Bu nedenle, daha

düşük korozyon direncine, mekanik özelliklere ve ayrıca katılma çatlama karşı daha yüksek hassasiyete neden olmaktadır. Kaynak metalinin yapısı genel olarak hücresel, kolonsal dendritler ve eş eksenli dendritlerden oluşmaktadır. Yüksek oranda Ni içeren kaynak metalinin mikro yapısında yer alan ve özellikle dendritler arasında kendine yer bulan intermetalik çökelmelere mikro yapı içinde rastlanmamıştır. Şekil 5a ve 5b’de kaynak metalinin farklı büyütme ölçeklerinde mikroyapısı görülmektedir.

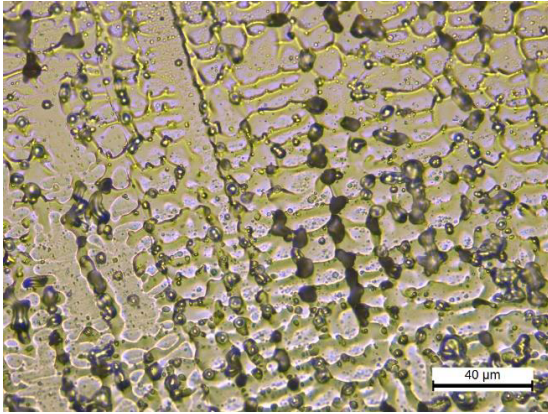


Şekil 5a. Kaynak metali mikro yapısı-10X

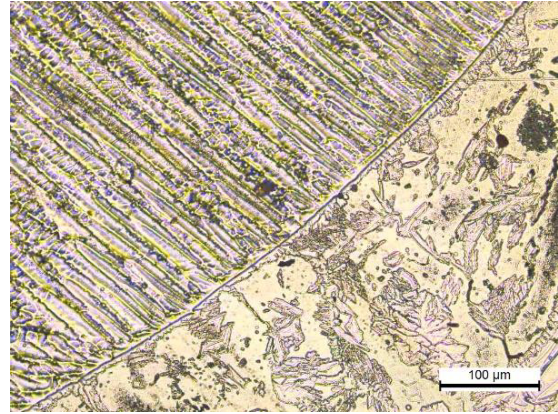
görülen Hastelloy tarafında, kaynak ara yüzeyine bitişik tane sınırı kalınlaşması mevcuttur. Ayrıca benzer olmayan malzeme çiftlerinin kaynak uygulamalarında çok görülen iki farklı kimyasal kompozisyonun oluşturduğu veya kısmen ergimiş bölge (PMZ-Partially Melted Zone) oluşumu mevcuttur. Şekil 6b’de Dupleks tarafında ise tane sınırına dik olarak kolonsal şekilde uzama gösteren östenit taneleri görülmektedir. ITAB bölgesi kısmen büyümüş ferrit matris içerisinde asiküler ve ikincil östenit taneleri içermektedir.



Şekil 6a. Hastelloy ITAB mikro yapısı-20X



Şekil 5b. Kaynak metali mikro yapısı-50X



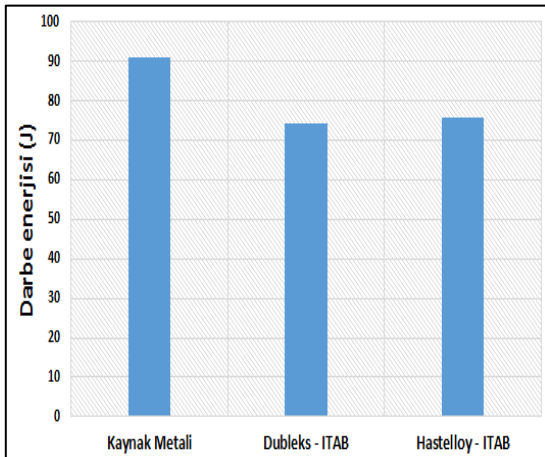
Şekil 6b. Dupleks ITAB mikro yapısı-20X

Şekil 6a ve 6b’de benzer olmayan ana malzemelerin ergime sınırı ve ITAB bölgelerinden alınan mikro yapıları görülmektedir. Şekil 6a Hastelloy, Şekil 6b ise Dupleks malzemeye ait ergime sınırı ve ITAB bölgesinde meydana gelen değişimleri ortaya koymaktadır. Şekil 6a’da

ER316L ilave metalinin ana metalden gelen elementlerle modifiye edilen elementel içeriği sayesinde mikro yapıda yüksek ısı girdisi ile çökelmeler oluşmadığından, birleştirilen parçaların tokluk değerlerine etkisi olmamıştır. Birleştirme esnasında meydana gelen intermetalik fazlar ve

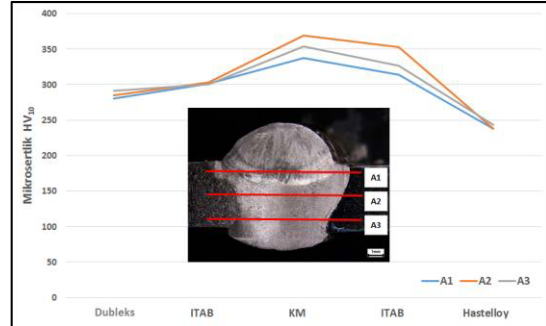
inklüzyonlar birleştirmenin çentik darbe tokluk değerini düşürebilmektedir. Şekil 7’de kaynak metali ve ana malzemelerin ITAB bölgelerine oda sıcaklığında uygulanan çentik darbe testi sonuçları verilmiştir. Kaynak metaline uygulanan testlerde ortalama 90J çentik darbe enerjisi elde edilmiştir. Bu değer oda sıcaklığında yüksek miktarda ostenit fazı içeren bir mikro yapı için yeterlidir. Dupleks ITAB ve Hastelloy ITAB bölgelerine uygulanan testlerde elde edilen sonuçlar sırası ile 77J ve 75,8J olarak gerçekleşmiştir. Elde edilen sonuçlara göre önceki çalışmalarda bahsedilen dupleks ilave metaller ile elde edilen düşük çentik darbe değerleri meydana gelmemiştir [13,14].

Bu durum intermetalik faz çökelmelerinin oluşmadığı ve sonuçları etkilemediği anlamına gelmektedir.



Şekil 7. Darbe enerjileri

Ana malzeme, ITAB ve kaynak metalini takip eden 3 paralel çizgi boyunca, 5 sertlik ölçümü alınmış ve sertlik dağılımı Şekil 8’de makro yapı üzerinde verilmiştir. Dupleks ana malzemenin sertlik değeri $285,3 \pm 4,4$ HV10 iken Dupleks ana malzeme tarafında yer alan ITAB’da $301,1 \pm 1,4$ HV10, kaynak bölgesinde $353,13 \pm 13,1$ HV10, Hastelloy ana malzeme tarafındaki ITAB’da $331,3 \pm 16,2$ HV10 ve Hastelloy ana malzemede ise $239 \pm 2,35$ HV10 sertlik değerleri tespit edilmiştir. Kaynak metalinde kök ve orta pasalarda meydana gelen Mo artışı kaynak metalinde sertlikte bir miktar artışa neden olmuştur.



Şekil 8. Kaynaklı birleştirmenin sertlik dağılımı

3. SONUÇLAR

Nikel alaşımlarının, paslanmaz çelikler ile birleştirilmesinde genel olarak ERNiCrMo3, ERNiCr3, ERNiCrMo4 gibi nikel alaşımlı ilave metaller önerilmektedir. Bunun yanı sıra Dupleks teller birçok çalışmada denenmiş ve başarısız olmuştur [13–16]. Bu nedenle bu çalışmada kullanılan ER 316L teli, özellikle tokluk açısından yeterli değerleri sağlamıştır. Kaynak metalinin mikro yapısındaki özellikle dendritler arasında beklenen intermetalik faz çökelmelerinin oluşmaması çentik darbe değerlerinin düşmesini engellemiştir. Ancak Hastelloy tarafındaki seyrelme sebebiyle kaynak metalinin ~11% civarında Mo içermesi kaynak metalinde sertliğin bir miktar artmasına neden olmuştur. Hastelloy C276 ve UNS S32205 dupleks paslanmaz çelikler arasında yapılan birleştirmelerde östenitik ilave metallerin kullanımı düşünülebilir. Fakat seyrelmenin meydana getirdiği yeni kimyasal kompozisyon korozyon açısından değerlendirilmelidir.

4. TEŞEKKÜR

Yazar, bu çalışmada kullanılan sarf malzemeler için Gedik Kaynak A.Ş.’ye teşekkürü borç bilir.

5. KAYNAKLAR

1. Silva, C.C., Afonso, C.R.M., Ramirez, A.J., Marcelo, F.M., Hélio, C., Jesualdo, P.F., 2016. Assessment of Microstructure of Alloy Inconel 686 Dissimilar Weld Claddings. J Alloys

- Compd 684, 628–642. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.05.231>
2. Manikandan, M., Arivazhagan, N., Nageswara, Rao, M., Madhusudhan, R.G., 2015. Improvement of Microstructure and Mechanical Behavior of Gas Tungsten arc Weldments of Alloy C-276 by Current Pulsing. *Acta Metall Sin (English Lett)* 28:208–215. <https://doi.org/10.1007/s40195-014-0186-4>
 3. Sharma, S., Taiwade, R.V., Vashishtha, H., 2017. Effect of Pulsed Current Gas Tungsten Arc Process on the Dissimilar Weldments Between Nickel-based Superalloy/Austenitic Stainless Steel. *J Mater Eng Perform* 26, 1146–1157. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2570-5>
 4. Westin, E.M., Olsson, C.A., Hertzman, S., 2008. Weld Oxide Formation on Lean Duplex Stainless Steel. 50, 2620–2634. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.06.024>
 5. Otero, E., Utrilla, M.V., 2007. Weldability of a 2205 Duplex Stainless Steel Using Plasma Arc Welding. 182, 624–631. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.08.030>
 6. Westin, E.M., Hertzman, S., 2014. Element Distribution in Lean Duplex Stainless Steel Welds, 143–160. <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0108-5>
 7. Sharma, S., Taiwade, R.V., Vashishtha, H., 2017. Effect of Continuous and Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding on Dissimilar Weldments Between Hastelloy C-276/AISI 321 Austenitic Stainless Steel. *J Mater Eng Perform* 26, 1146–1157. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2570-5>
 8. Maltin, C.A., Galloway, A.M., Mweemba, M., 2014. Microstructural Evolution of Inconel 625 and Inconel 686CPT Weld Metal for Clad Carbon Steel Linepipe Joints: A Comparator Study: The Effect of Iron Dilution on the Elemental Segregation of Alloying Elements in Nickel Based Filler Metals. *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci* 45, 3519–3532. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2308-z>
 9. Ramkumar, K.D., Joshi, V., Pandit, S., Agrawal, M., Oza, S., Periwal, S., Mano, M., Arivazhagan N., 2014. Investigations on the Microstructure and Mechanical Properties of Multi-pass Pulsed Current Gas Tungsten Arc Weldments of Monel 400 and Hastelloy C276. *Mater Des* 64, 775–782. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.08.055>
 10. Li, G., Huang, J., Wu, Y., 2014. An Investigation on Microstructure and Properties of Dissimilar Welded Inconel 625 and SUS 304 Using High-power CO₂ Laser. *Int J Adv Manuf Technol* 76, 1203–1214. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6349-7>
 11. Madhusudhana, R.G., Srinivasa, M.C.V., Srinivasa, R.K., Prasad, R.K., 2009. Improvement of Mechanical Properties of Inconel 718 Electron Beam Welds-influence of Welding Techniques and Postweld Heat Treatment. *Int J Adv Manuf Technol* 43, 671–680. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1751-7>
 12. Manikandan, M., Arivazhagan, N., Rao, M.N., Reddy, G.M., 2015. Microstructure and Mechanical Properties of Alloy C-276 Weldments Fabricated by Continuous and Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding Techniques. *J Manuf Process* 16, 563–572. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.08.002>
 13. Tümer, M., Karahan, T., Mert, T., 2020. Evaluation of Microstructural and Mechanical Properties of Dissimilar Inconel 625 Nickel Alloy–UNS S32205 Duplex Stainless Steel Weldment Using MIG Welding. *Weld World* 64, 21–35. <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00825-x>
 14. Tümer, M., Mert, T., Karahan, T., 2020. Investigation of Microstructure, Mechanical, and Corrosion Behavior of Nickel-based Alloy 625/duplex Stainless Steel UNS S32205 Dissimilar Weldments Using ERNiCrMo-3 Filler Metal. *Weld World*. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-01011-0>
 15. Ramkumar, K.D., Oza, S., Periwal, S., Arivazhagan, N., Sridhar, R., Narayanan, S., 2015. Characterization of Weld Strength and Toughness in the Multi-pass Welding of Inconel 625 and Super-duplex Stainless Steel UNS S32750. *Cienc e Tecnol dos Mater* 27, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.ctmat.2015.04.004>
 16. Kangazian, J., Shamanian, M., 2017. Mechanical and Microstructural Evaluation of SAF 2507 and Incoloy 825 Dissimilar Welds. *J Manuf Process*, 26, 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.03.006>

Merkezi Bir Isıtma Sisteminde Enerji ve Ekserji Analizinin Eksergoekonomik Yönden Değerlendirilmesi

İrfan UÇKAN^{*1}, Erkan ULUSOY²

¹Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Van

²Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, Van

Geliş tarihi: 22.09.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Bu çalışmada Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi kampüsünde toplam 20 ton/saat buhar üreten merkezi ısıtma sisteminin ekonomik ve Eksergoekonomik analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda sistemin en önemli bölgesi olan kazanlardaki toplam enerji verimi ortalama olarak %90, ekserji verimi ise %31 olarak bulunmuştur. Tüm sistemin ekserjetik verimi ise %29 olarak bulunmuştur. Eksergoekonomik analiz sonucunda sistemin yıllık yakıt tüketim bedeli, yıllık ürün maliyeti bedeli, sisteme giren ve çıkan parametrelerin birim ekserji maliyet bedelleri hesaplanmıştır. Hesaplar sonucunda ürünün saatlik maliyeti: 291,78 \$/h, yakıtın saatlik maliyeti: 252,30 \$/h, olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Enerji, Ekserji, Eksergoekonomik

Exergoeconomic Evaluation of Energy and Exergy Analysis in a Central Heating System

Abstract

In this study, the economical and exergoeconomic analysis of the central heating system which produces a total of 20 tons/hour of steam was conducted in in the Van Yüzüncü Yıl University campus. As a result of the analysis, the total energy efficiency of the boilers, which is the most important part of the system, was found to be 90% and the exergy efficiency as 31%. The exergetic efficiency of the whole system was found to be 29%. As a result of the exergoeconomic analysis, the annual fuel consumption cost of the system, the annual product cost price, the unit exergy cost of the parameters entering and leaving the system were calculated. As a result of the calculations, the hourly cost of the product was found to be: 291.78 \$/h, the hourly cost of fuel: 252.30 \$/h.

Keywords: Energy, Exergy, Exergoeconomic

*Sorumlu Yazar (Corresponding author): İrfan UÇKAN, irfanuckan@yyu.edu.tr

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızlı bir şekilde artmasıyla birlikte insanların sınırsız bir şekilde artan kişisel ihtiyaçları için, nüfusa paralel bir şekilde hızlıca artan ve artmaya devam eden sanayileşme, beraberinde çok ciddi enerji ihtiyaçları doğurmuştur. Rekabet, enerji ve üretim maliyetlerinin üretim alanında artması, üreticileri yüksek kaliteli ve standartlaştırılmış ürünleri düşük maliyetle sunmanın yollarını aramaya zorlamaktadır. Herhangi bir üretim organizasyonunun büyümesi ve hayatta kalması, ekonomisini ne kadar iyi yönetebileceğine bağlı olduğundan, maliyet yönetimi zorunlu hale gelmektedir [1].

Ancak, toplam kalite yönetim sistemi, hat rasyonelizasyonu, bütçe kontrolü, maliyet hacmi analizi, standart maliyet analizi ve süreç otomasyonu gibi mevcut maliyet yönetim teknikleri üretimle ilgili gizli maliyetleri belirlemek için yetersiz kalmaktadır [2]. Bu tekniklerin hiçbirisi, üretim sürecinde kullanılan makinelerin, ekipmanın veya sürecin kendisinin tanımlanmasına odaklanmaz. Eğer bir sistem termodinamik sınırlar içerisinde enerji ekserji analizleri yapılmazsa büyük miktarda enerji ve yakıt tüketecektir ve daha sonra yüksek maliyet ve düşük verimlilikle çalışacaktır [3].

Eksergoekonomik analiz, bir makinenin, işlemin veya sistemin termodinamik sınırlamalarını ve bunun altında yatan maliyet etkilerini belirlemede yararlı bir araçtır. Sanayi proseslerindeki birçok sistemde enerji verimsiz kullanılmaktadır. Bu durum da yakıt masraflarının yükselmesine, ürün maliyetlerinin artmasına ve ülkelerin dışa bağımlı hale gelmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple kurum ve kuruluşlar işletmelerinde enerji tasarrufu sağlamak adına enerji ve ekserji analizi ile birlikte eksergoekonomik analiz de yapmaya yönelmişlerdir.

Eksergoekonomik analizlerin genel amacı;

- (i) Birden fazla ürüne sahip bir sistemde her ürün maliyetini ayrı ayrı hesaplamak,
- (ii) Sistemin maliyet akışını ve şeklini anlamak,

- (iii) Sistemin temel elemanlarının spesifik değişkenlerini belirlemek ve bu değişkenleri optimize etmek,
- (iv) Sistemi bir bütün olarak ele alıp optimizasyonunu yapmaktır [4].

Chejne ve Restrepo [5] çalışmalarında; çeşitlilik içeren üretim yöntemlerinin Eksergoekonomik metotlarına yeni bir bakış getirerek; sistemdeki kayıp enerji ve ekserjilerin birim maliyet kayıpları üzerinde çalışmışlardır. Üretimin verimi adına yapılmış olan bu çalışma eski ve yeni metotlarla kıyaslanmıştır.

Erlach ve arkadaşları [6] yapmış oldukları çalışma ile kojenerasyon sisteminde kullanılan yakıt tasarrufu ve maliyetin düşürülmesi için Eksergoekonomik analiz yapmışlar. Çalışmada ürün olarak buhar ve elektrik üretimi üzerinde durulmuştur. Ekserjetik maliyet yöntemi ile çalışmalarını yapmışlardır. Çalışma sonucunda bu yöntemin esnek bir analiz yöntemi olduğunu ve güç santrallerinde uygulanabilir olduğuna değinmişlerdir.

Sevilgen [7], gaz türbini ile çalışan kojenerasyonlu bir tesisin eksergoekonomik analizini yaparak rejeneratör verimi, atık ısı kazanı sıcaklık farkı ve kompresör basıncının sistem üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada yapılan iş ile buharın ekserjisinin toplam ekserji üzerine etkileri araştırılmıştır.

Seyyedi ve arkadaşları [8] çalışmalarında ısı güç tesislerinin eksergoekonomik analizlerini ekserji bozum maliyeti ve ilk yatırım maliyeti şeklinde bir yöntem kullanarak araştırmışlardır. Bu kullanılan yöntemin avantajı olarak, gerçek ve karmaşık görünen güç tesislerinde de uygulanabilir olduğunu ve detaylı sayısal analizler yapılabilmesi olarak özetlemişlerdir.

Termoekonomi birçok uygulamada mühendisliğin bir dalı olarak görülmektedir. Termoekonomi, ekonomik değerlendirmelerde enerji analizleri ile birlikte ekserji analizleri yapılarak sistemin verimini arttırmak ve sistemin ekonomik prensipleri de içermektedir [9].

Knoche ve Hesselmann, bir ısı değiştirgecinin ilk yatırım maliyeti ile ısı değiştirgecinde meydana gelen ekserji kaybı ilişkisi detaylandırılmıştır [10]. Zubair ve arkadaşları 1987, yaptıkları çalışmada bir termoekonomik sistem geliştirerek, çift akışlı ısı değiştirgecinde geçen optimum ısı geçiş birimi miktarını ikinci yasaya dayalı termodinamik çalışma yaparak bulmuşlardır [11].

Bu çalışmada Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi kampüsü bir tek sistem olarak düşünülmüştür. Çalışmada kampüs ısıtma sisteminin enerji ve ekserjisini etkileyen faktörlerin bulunup ortaya çıkarılması ve bu faktörlerin ekonomik analizlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

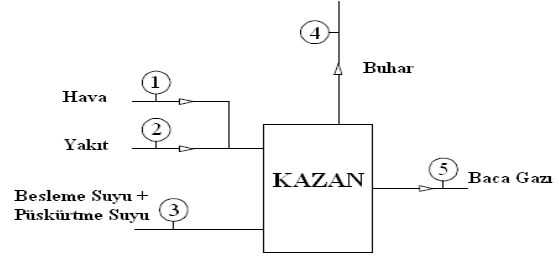
2. MATERYAL ve METOD

Bu çalışmada Van Yüzüncü Yıl Üniversitesinde merkezi ısıtma sisteminin farklı lokasyonlarda bulunan binaların ısıtılması için kullanılan merkezi ısıtma sisteminin eksergoekonomik analizi yapılmıştır. Çalışmada Van iklim şartları için altı aylık ısıtma sezonu verileri analiz edilmiştir. Bu değerlendirme yapılırken kazanlar, boru ağları ve eşanjör sistemleri gibi ana ekipmanların her biri için ayrı analizler yapılarak sistem dört ayrı bölgeye ayrılmıştır. Daha sonra alınan verilerden yararlanılarak sistemin eksergoekonomik yönden değerlendirilmesi yapılmıştır.

2.1. Sistemin Tanıtılması

Çalışılan sistemde enerji ve ekserji verimliliğini etkileyeceği düşünülen 4 önemli bölge mevcuttur.

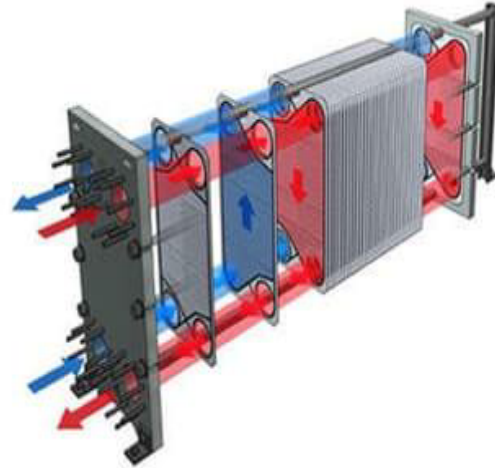
1. bölge, buhar kazanları. Bu kazanlar tüm kampüsün buhar ihtiyacını karşılayan alev borulu, gaz yakıtla çalışan kazanlar olup; 6 bar ve 8 bar basınçta, saatte 8,5 ton ve 12 ton buhar üretebilmektedir. Kazanın giriş ve çıkış parametreleri Şekil 1'de gösterilmektedir. Kazan besleme suyu sıcaklığı yaklaşık olarak 60-70 °C aralığında alınarak kazandan 2,5 bar basınçta ve 130 °C sıcaklığında sisteme buhar verilmektedir. Bu buhar yaklaşık 8 km'lik galerilerde izolasyonlu siyah borular aracılığı ile fakülte ve idari binaların eşanjörlerinde primer devre kısmını tamamlamaktadır.



Şekil 1. Sistemde kullanılan sürekli açık, sürekli akışlı buhar kazanına giren ve çıkan elemanlar

2. bölge, boru ağlarından oluşmaktadır. Sistemde ortalama 8 km'lik galeri ağları mevcut olup bu galerilerde buhar ve yoğuşum hatları dolaşmaktadır. Bu borular çeşitli yoğuşum hatları ile taşınmış olup; taş yünü ve galvaniz sac izolasyonları ile enerji kaybının azaltılması sağlanmıştır.

3. bölge, eşanjörler. Sistemde toplam 49 adet eşanjör dairesi mevcut olup buralarda kullanılan ısı değiştirgeçleri buhar eşanjörleridir. Eşanjörlerde eşanjör ceketleri ve çeşitli kimyasallar ile kireçlenmenin önüne geçilerek verimin artırılması istenmiştir.



Şekil 2. Plakalı buhar eşanjörü [12]

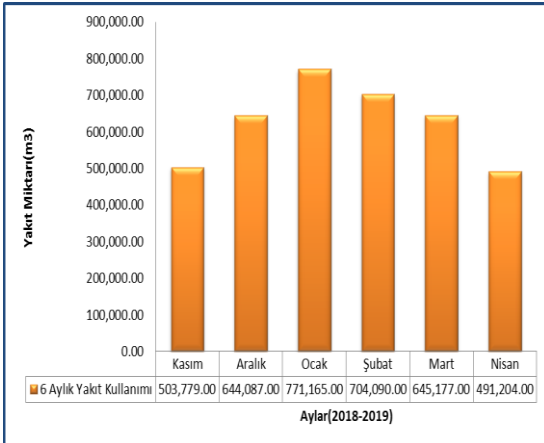
4. bölge ise elektrik motorları. Bu motorlar brülör, taze hava fan motorları ve yoğuşum pompalarından oluşmaktadır.



Şekil 3. Kondens Pompası şeması [13]

2.2. Sistemin Ekonomik Analizi

Bu çalışma, ısıtma sisteminin faal olduğu altı aylık süre içerisinde değerlendirilmiştir. Bu süre içerisinde 3.759.028 m³ yakıt (Doğalgaz) kullanılmıştır.



Şekil 4. Isıtma sezonundaki aylık yakıt tüketimi

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi ısıtma sistemi Kasım 2018-Nisan 2019 arasında 180 gün çalışmıştır. Mevcut zaman aralığında yakıt tüketiminin en fazla olduğu ay yaklaşık olarak 772.000m³ değeri ile Ocak ayında görülmüştür. Ocak ayında yakıt tüketiminin diğer aylara göre fazla olmasının en önemli nedeninin bu aydaki dış ortam sıcaklığının diğer aylara göre düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla bu aydaki binaların ısı kaybının da fazla olması nedeniyle yakıt tüketimi diğer aylara göre daha

fazla ölçülmüştür. Ancak Nisan ve Kasım aylarında tüketilen yakıt miktarı yaklaşık olarak 500.000 m³ değeri ile birbirlerine yakın çıkmıştır (Eşitlik 1-4).

$$\dot{C}_{ürün} = \dot{C}_{yakıt} + \dot{Z}_{ilk.yat.oranı} \quad (1)$$

$$\dot{Z}_{ilk.yat.oranı} = \frac{a}{t_{op}} C_k \quad (2)$$

$\dot{C}_{ürün}$ = Ürünün maliyeti

$\dot{C}_{yakıt}$ = Yakıt maliyeti

$\dot{Z}_{ilk.yat.oranı}$ = Yatırım maliyet oranı

$$a = \frac{f_r(1+f_r)^N}{(1+f_r)^N - 1} \quad (3)$$

a = Yatırım dönüşüm oranı

f_r = Faiz oranı

N = Ödeme periyodu

C_k = Proses toplam maliyeti

t_{op} = Kazanın yıllık çalışma saati = 4320 saat

$$C_k = C_{sis} + Z_m \$$$

C_{sis} = Sistemin ilk yatırım maliyeti

Z_m = Bakım onarım maliyetleri

C_y = Bakım onarım gerektiren elemanın yat. mal.

$$Z_m = Z_b + Z_s + Z_f \quad (4)$$

$$Z_b = 0,13 \frac{C_y}{N} \text{ (bakım onarım giderleri)}$$

$$Z_s = 0,53 \frac{C_y}{N} \text{ (yedek parça giderleri)}$$

$$Z_f = 0,02 \frac{C_y}{N} \text{ (nakil montaj giderleri)}$$

$$\dot{Z}_{ilk.yat.oranı} = \frac{a}{t_{op}} C_k$$

2.3. Sistemin Eksergoekonomik Analizi

Sistem için ekserji maliyet dengesi (Eşitlik 5);

$$\sum \dot{C}_g + \dot{Z} = \sum \dot{C}_ç \quad (5)$$

Ekserji maliyeti (Eşitlik 6-7);

$$\dot{C}_x = c_x \dot{E}_{xx} \quad (6)$$

$$\dot{C}_x = \left(\frac{\$}{h} \right) \quad (7)$$

$\dot{C}_x = \left(\frac{\$}{h} \right)$ cinsinden ekserji akışlarının maliyet akımlarını göstermektedir.

$c_x = \left(\frac{\$}{kl} \right)$ cinsinden ekserji akışlarının birim maliyetlerini göstermektedir.

Yakma havası sisteme vantilatör ile sağlanmaktadır. Yakma havası için birim ekserji maliyeti aşağıda verilen Eşitlik 9 ile ifade edilebilir.

$$c_1 = \frac{\dot{C}_1}{\dot{E}_{X1}} \quad (9)$$

Yakıt için birim ekserji maliyeti (Eşitlik 10):

$$c_2 = \frac{\dot{C}_2}{\dot{E}_{X2}} \quad (10)$$

Besleme suyu için birim ekserji maliyeti (Eşitlik 11):

$$c_3 = \frac{\dot{C}_3}{\dot{E}_{X3}} \quad (11)$$

Buhar için birim ekserji maliyeti (Eşitlik 12):

$$c_3 = c_4 \quad (12)$$

Buhar kazanına, yakıt, besleme suyu ve yakma havası giren akım, buhar ve baca gazı çıkan akımlardır. Buna göre, buhar kazanı için baca gazı birim ekserji maliyeti denklemleri aşağıdaki eşitlik ile elde edilir (Eşitlik 13).

$$c_1 \dot{E}_{x1} + c_2 \dot{E}_{x2} + c_3 \dot{E}_{x3} + \dot{Z} = c_4 \dot{E}_{x4} + c_5 \dot{E}_{x5} \quad (13)$$

Sistemin kayıp ekserji (tersinmezlik) maliyeti (Eşitlik 14):

$$\dot{C}_{kayıp} = c_y \dot{E}_{xkayıp} \quad (14)$$

Maliyet Farkı Oranı (Eşitlik 15):

$$r_k = \frac{\dot{C}_{ürün} - \dot{C}_{yakıt}}{\dot{C}_{yakıt}} \quad (15)$$

Eksergoekonomik faktör: Bir sistemin yatırım maliyeti ile karşılaştırıldığında gizli maliyetin etkisinin bir ölçüsüdür. Herhangi bir sistemin eksergoekonomik faktörü şu şekilde hesaplanabilir [14] (Eşitlik 16 ve 17).

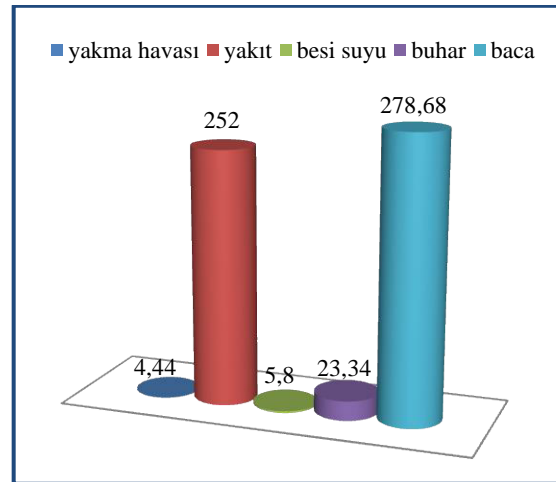
$$f = \frac{\dot{Z}_{sis}}{\dot{Z}_{sis} + \dot{C}_{kayıp}} \quad (16)$$

Ekserjetik Verim:

$$\mu = 1 - \frac{\dot{E}_{Xkayıp}}{\dot{E}_{Xyakıt}} \quad (17)$$

3. BULGULAR

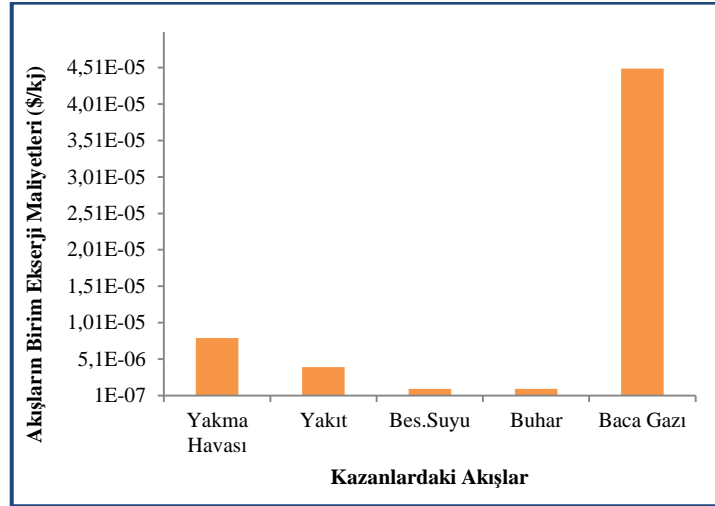
Şekil 5'te görüleceği üzere kazana giren ve kazandan çıkan akışların saatlik maliyetleri \$/h cinsinden değerlendirildiğinde en düşük akış maliyetinin 4,44 \$/h ile yakma havası maliyetleri olduğu, en büyük maliyetin ise 278,68 \$/h ile baca gazı maliyeti olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise bacalardaki ekserjinin fazla olmasıdır. Baca gazı sıcaklığının fazla olması ve yakıt maliyetinin optimum seviyelere çekilememesidir.



Şekil 5. Sistemi oluşturan akımların maliyet tablosu (\$/h)

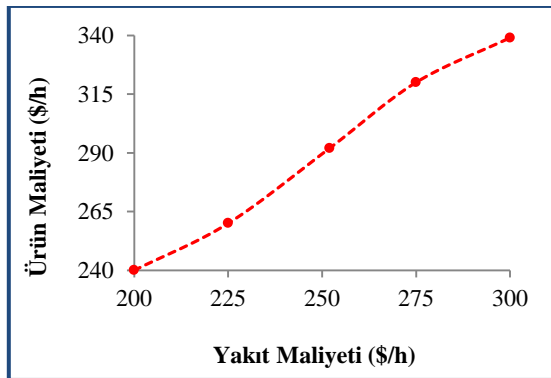
Şekil 6'da kazanda meydana gelen akımların birim ekserji maliyetleri görülmektedir. Birim ekserji, akımın yakıt maliyetinin, akımın ekserjisine oranı ile belirlenmektedir. Burada da görüleceği üzere yakma havası birim ekserji maliyeti 8×10^{-6} \$/kj, yakıtın birim ekserji maliyeti 4×10^{-6} \$/kj, besi suyu

birim ekserji maliyeti 1×10^{-6} \$/kj, buharın birim ekserji maliyeti 1×10^{-6} \$/kj ve baca gazı birim ekserji maliyeti ise 45×10^{-6} \$/kj olduğu görülmektedir. Burada en büyük maliyetin baca gazı maliyeti, en düşük birim maliyetin ise besi suyu ve buhar maliyetleri olduğu görülmüştür.



Şekil 6. Sistemi oluşturan akımların birim ekserji maliyet tablosu (\$/h)

Şekil 7'de ürün maliyetinin yakıt maliyeti ile doğrudan ilgisi olduğu görülmektedir. Maliyetler \$/h cinsinden verilmiştir. Ürün maliyeti, yakıt maliyeti ve ilk yatırım maliyetinin toplamıdır. Yakıt maliyeti ise yakıtın cinsine ve çalışma şartlarına göre farklılık göstermektedir. Maliyet farkı oranı ise ürün maliyeti ile yakıt maliyetinin oranı sonucunda ortaya çıkmaktadır.



Şekil 7. Ürün maliyetinin yakıt maliyeti ile değişimi

4. SONUÇ

Sistem bir bütün olarak ele alındığında, sistemin en önemli elemanı olan kazanlardaki toplam enerji verimi ortalama olarak %90, ekserji verimi ise %31 olarak bulunmuştur. Tüm sistemin ekserjetik verimi ise %29 olarak bulunmuştur. Sistemdeki ekserji kayıplarının yaklaşık olarak %95'i kazanlarda olmaktadır. %2,8'i boru hatlarında, %1,6'sı eşanjörlerde gerçekleşmektedir. Bunların temel sebepleri; baca gazı ısı ile doğaya bırakılan enerjinin fazlalığı, hava fazlalık katsayısının optimum düzeyde tutulmaması ve besi suyu sıcaklığının istenen seviyede olmamasıdır.

Tüm açıklanan sebeplerle sistemin verimini ve buna bağlı olarak ekonomik iyileşmesini daha iyi bir hale getirmek için aşağıdaki maddelerin uygulanması gerekmektedir.

- Kazanlarda, yakma havası sıcaklığının ekserji verimine etkisini arttırmak için ön ısıtıcı kullanılması gerekmektedir.

- Kazanlarda yanma sırasında yakıt/hava karışımının doğru ayarlanması gerekmektedir. Aksi takdirde tam yanma olmayacağı için verimde olumsuz etkiler görülecektir. Bu sebeple hassas elektronik algılama cihazları kullanılmalı ve sürekli bakımları yapılmalıdır.
- Baca gazlarının ısılarından daha fazla faydalanılabilmesi için ekonomizerlerin sağlıklı bir şekilde takip edilmesi ve bakımlarının yapılması gerekmektedir.

5. KAYNAKLAR

- 1 Ben-Caleb, E., Otekunrin, A., Rasak, B., Adewara, S., Oladipo, O., Eshua R. 2019. Cost Reduction Strategies and the Growth of Selected Manufacturing Companies in Nigeria, *Int. J. Mech. Eng. Technol.* 10, 305–312.
- 2 Sailaja, A., Basak, P., Viswanadhan, K. 2015. Costs of Quality: Exploratory Analysis of Hidden Elements and Prioritization Using Analytic Hierarchy Process, *Int. J. Supply Oper. Manag.* 1, 489–506.
- 3 Ghannadzadeh, A., 2013. Exergetic Balances and Analysis in a Process Simulator: a Way to Enhance Process Energy Integration.
4. Tsatsaronis, G., Moran, M., 1997. Exergy-Aided Cost Minimization” *Energy Conversion Management*, 38(15-17), 1535-1542.
5. Chejne, F., Restrepo, J.A., 2003. New Rules for the Exergo-economic Optimization Methodology, *Energy*, 28, 993-1003.
6. Erlach, B., Tsatsaronis, G., Cziesla, F., 2001. A New Approach for Assigning Costs and Fuels to Cogeneration Products, *In. J. Applied Thermodynamics*, 4(3), 145-156.
7. Sevilgen, S.H., 2004. Exergoeconomic Analysis of Cogeneration System, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 4, 234-248.
8. Seyyedi, S.M., Ajam, H., Farahat, S., 2010. A New Approach for Optimization of Thermal Power Plant Based on the Exergoeconomic Analysis and 751 Tructural Optimization Method: Application to the CGAM Problem, *Energy Conversion and Management*, 51(11), 2202-2211.
9. Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M., 1996. *Thermal Desing and Optimizasyon*. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley&Sons, Inc., New York.
10. Knoche, K.F., Hesselmann, K., 1985. Exergoökonomische Bewertung Einer Luftzerlegungs Anlage, *Chem.-Ing. Tech.* 57, 602-609.
11. Zubair, S.M., Kadaba, P.V., Evans, R.B., 1987. Second-Law Based Thermoeconomic Optimization of two-phase Heat exchangers, *Journal Heat Transfer*, 109, 287-294.
12. Alfa lawal. <https://www.alfalaval.com.tr/>
13. Ayvaz Vana <https://www.ayvaz.com/>
14. G. Tsatsaronis. 2011. Exergoeconomics and Exergo Environmental Analysis, in: B.R. Bakshi, T.G., Gutowski, D.P., Sekulic (Eds.), *Thermodynamics and the Destruction of Resources*, Cambridge University Press, USA, 377–388.

Türkiye’deki Şirketlerin Müşteri Şikayetlerini Değerlendirme Sistemlerinin Araştırılması ve Analizi

Vedat ÇEKİCİ*¹, Oya Hacire YÜREGİR¹

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 30.08.2020 Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Şirketler, müşterilerini memnun ettiği sürece ürün ve servis sunmaya devam etmektedir. Müşteri memnuniyetini etkileyen en önemli faktörlerden biri de müşteri şikayetlerini çözmektir. Bu çalışmada, anket ile Türkiye’deki şirketlerin müşteri şikayet değerlendirme sistem süreçlerine ait veri toplanmış ve sektör bazında şirketlerin kaç adet şikayet aldığı ve ne kadar sürede çözdüğü gibi sorulara yanıt aranmıştır. Veriler istatistiksel olarak analiz edilerek hipotezlerin testleri ve yorumları gerçekleştirilmiştir. Hipotezlerin testinde Ki-Kare testi, Mann Whitney U Testi, işaret testi ve korelasyon analizi uygulanmıştır. Sonuçlara göre müşteri şikayetini sadece hızlı bir şekilde değerlendirmeye başlamak yeterli değildir, aynı zamanda şikayete hızlı ve doğru çözüm bulmakta önemlidir. Ayrıca, şikayetleri değerlendirmek için sistemde görev alan personelin sürekli eğitilmesinin sağlanması ve müşterilerin şikayet değerlendirme süreçlerine dahil edilmesi gerektiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Müşteri şikayeti, Müşteri memnuniyeti, İstatistiksel analiz, Anket

Investigation and Analysis of Customer Complaints Handling System of the Companies in Turkey

Abstract

Companies can offer products and services as long as they satisfy their customers. One of the most significant factors affecting customer satisfaction is to resolve customer complaints. In this study, the survey data was collected related to the customer complaints process evaluation system of Turkish companies and answers were sought for questions such as how many complaints companies received on an industry basis and how long they resolved the complaints. The data was analyzed statistically, and the tests of the hypotheses were carried out. Chi-Square test, Mann Whitney U Test, sign test and correlation analysis were applied for testing hypotheses. According to the results, it is not enough just to start evaluating the customer complaint quickly, it is also very important to get a quick and accurate resolution to the complaint for customer satisfaction. Additionally, it has been found that personnel working in the complaint system should be trained continuously and customers should be involved in the complaint handling processes.

Keywords: Customer complaint, Customer satisfaction, Statistical analysis, Survey

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Vedat ÇEKİCİ, vedat.cekici5@gmail.com

1. GİRİŞ

Müşteriler satın aldıkları ürün ve servisin kullanışlı olması, bakımının kolay, güvenli ve ekonomik olması, belirlenen garanti süresinden önce sorun yaratmaması, sorun yarattığında ise beklenen sürede çözüm bulunması durumunda memnun olmaktadır. Müşteri bu ve benzer özellikleri karşılayan ürün ve servis durumlarında beklentilerine olumlu yanıt alarak memnuniyet duymaktadır. Memnun olan müşteri oranını yüksek tutmak şirketlerin var olması için önemlidir. Bu durum hem ürün-servis satış amacıyla hem de satış sonrasında ürünün şikayetini giderme açısından geçerlidir. Araştırma sonuçlarına göre, memnun olmayan müşteriler aynı şirketten tekrar satın almayı düşünmemektedir. Bu kapsamda, müşteriye memnun etmenin bir yolu da şikayetleri çözmektir.

Müşteri memnuniyeti, uzun dönemde şirket için hayati öneme sahiptir [1]. Müşteri memnuniyet seviyelerini geliştirmek, şirket güvenliğini sağlamak için uygun bir seçenektir [1]. Bir seçenek de, müşteri şikayetlerini etkin ve hızlı değerlendirme ile memnun olmayan tüketicileri geri kazanmaktır. Bunun için şikayeti çözmek istemek ve tüketici memnuniyetini yeterli seviyelere çıkarmak esastır [1]. Memnun olan müşteri, firmaya şikayet bildirdikten sonra, şikayetine tatminkar bir çözüm bulunduğunda, memnuniyetsizliğini gidererek yeniden satın almaktadır ve şirkete sadık kalmaktadır. Her ürün-servis hatası, müşterinin üreticiye doğrudan şikayet bildirmesine neden olmayabilir. Gerçekte ürün/servis hatalarının %5’ten daha azı müşteri şikayetine neden olmaktadır [1]. Bu şikayetlerin de sadece yarısına yakınına tatminkar çözümler üretilmektedir [1]. Müşteri şikayetini çözmek için doğru yönetim süreçlerinin uygulanması ve yeterli kaynak ayrılması ile şikayetler kısmi olarak çözülmektedir [1]. Müşteri kayıplarını karşılayacak geri ödeme, ürün değiştirme veya memnun olmayan müşteriye ilk karşılayacak personelin eğitimi gibi politikaların etkili olduğu kanıtlanmıştır [1]. Tüketicinin firmaya şikayeti, şirket tarafından değerlendirilmez ve şikayetin tatminkar çözümünü gerçekleştirmez ise müşterinin

kaçma durumu söz konusudur ve müşteri o şirketten tekrar satın almamaktadır. Bu durumda şirket eldeki müşterisini kaçırdığı için yeni müşteri kazanma yolunu seçmek zorunda kalacaktır. Fazla sayıda memnun olmayan müşterisi olan şirketler, etkin bir müşteri şikayet yönetimi uygulayarak bu müşterilerden bir kısmını tekrar kazanma şansına sahip olabilirler.

Araştırmalara göre yeni müşteri kazanmak mevcut müşteriye elde tutmaktan daha maliyetlidir. Yapılan bir çalışma, firmaların %47’sinin şikayet e-postalarına yanıt verdiğini ve bu durumun da daha yüksek müşteri memnuniyeti ve satın alma ile sonuçlandığını belirlemiştir. Posta, telefon ve yüz yüze görüşme ile şikayetin ele alınmasının müşteri memnuniyetini artırdığı ve müşteri ile uzun vadeli ilişkiler kurulduğu gösterilmiştir [2].

Müşteri ile uzun vadeli ilişkiler kurmak isteyen işletmeler, müşterilerin şikâyetlerini kolaylıkla yapmaları için çeşitli imkânlar sunmalıdır. İşletmeler kendilerine ulaşan şikâyetleri analiz etmek, değerlendirmek, çözmek ve müşteriye geri bildirim yapmak zorundadır. İşletmeler, müşteri şikâyetlerini, kendileri ve müşterileri açısından fayda sağlayacak şekilde yönetmelidir. Bu süreç, müşterinin hangi beklentiler içerisinde olduğunun işletme tarafından bilinmesini sağlayacaktır. İşletmeler aynı zamanda, ürünlerini geliştirme fikrini, müşteri şikâyetleri ile ortaya çıkarmaktadır. Bu kapsamda Türkiye’deki şirketlerin sahip oldukları müşteri şikayet değerlendirme sistemlerinin mevcut durumunu belirlemek önem arz etmektedir. Bu amaçla Türkiye’deki şirketlerin sahip oldukları müşteri şikayet değerlendirme sistemlerinin mevcut durumunu, önceliklerini ve sorunlarını belirlemek için anket yolu ile veri toplanmış ve istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Şirketlerin sahip olduğu bölümler, şikayet sisteminde yer alması gerekli parametreler ve aktiviteler, şikayetleri değerlendirmek ve çözmek için kullanılan kişi sayısı ve bu kişilerin günlük çalışma zamanı, şirketlerin şikayetleri tüm süreçler dahil ortalama kaç günde çözüp kapattığı ve şikayetlerin % kaçını doğru olarak çözdüğü, kök nedenini bulma ekibinin kaç kişiden oluştuğu, kök nedeni bulma süreleri ve kök nedeni ilk seferde doğru bulma yüzdeleri, şirketlere yılda ortalama

kaç adet şikayet geldiği ve yılda ortalama kaç adet şikayet kapandığı konularında veri toplanmış ve veriler değerlendirilerek şirketlere öneriler sunulmuştur. Bu kapsamda çalışmamızda müşteri şikayet süreçleri ile ilgili olarak belirlediğimiz 7 adet ana hipotez için şirketlerin görüşleri toplanmış ve test edilmiştir. Daha sonra da elde ettiğimiz tüm sonuçlar literatür ile karşılaştırılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Geçmişte yapılan çalışmaların ağırlıklı olarak müşteri servis kalite modeli oluşturma ile ilgili olduğu görülmüştür. Servis kalitesine verilen önem sayesinde, model çeşitleri gelişmiş ve literatür sürekli yenilenmiştir. Bu çalışmada Türkiye'deki şirketlerin sahip oldukları şikayet değerlendirme sistemlerine ait süreçlerin mevcut durumunu, önceliklerini ve sorunlarını belirlemek için anket yolu ile veri toplanmış ve analiz edilmiştir.

Mattila ve Mount [3], çalışmalarında, şikayete cevap verme süresinin, e-şikayet memnuniyeti üzerine etkisini araştırmıştır. Sonuçlar, problemi yanıtlamanın müşterinin memnun olarak yeniden satın alma niyetini etkilediğini göstermektedir.

Seth ve Deshmukh [4], çalışmalarında literatürden 19 farklı servis kalite modelini incelemiş, farklı servis modellerinin birbiri ile bağlantısını araştırmış, güçlü ve zayıf yönleri tartışmıştır. Tüm modeller tüketici pazarına veya ön saftaki personelin desteklenmesi noktasına odaklanmıştır.

Kulaklı ve Birgün [5], çalışmalarında müşteri merkezli operasyonel bilgi yönetimi için veri yönetimini araştırmıştır. Araştırma sonucunda, iyileştirme hızının, müşteri elde etme hızından daha yüksek olması gerektiği belirlenmiştir. Çünkü müşteri sayısı artarken, sonradan yapılacak geliştirmelere ayrılacak kaynak fazla olmaktadır.

Demir ve Kırdar [6] tarafından müşteri ilişkileri ve sadakati için şirket tarafından yapılması gerekenler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, gelecek kuşaklara servis sunacak işletmelerin müşterileriyle ilgili veri tabanları geniş olacak ve

gelişmiş bilgi teknolojileriyle daha fazla bilgiye ulaşarak müşteri ilişkilerini yönetebileceklerdir.

Chan [7], çalışmasında analitik veri modeli yardımıyla müşteri veri ambarındaki veriler analiz edilmiştir. Sonuçta müşterinin sürece dahil edilerek katma değer yaratmasının önemli bir parametre olduğu ortaya çıkmıştır.

Sharma ve diğerleri [8], çalışmalarında, müşterinin ürünü kullanımı sırasında karşılaştığı problemlerin, garanti kapsamında değerlendirilerek problemin giderilme süreci tespit edilmiştir. Şikayet ortalama ürün performansından önce gelmiş ise memnuniyetsizlik bildireceği için garanti kapsamında değerlendirilecek ve kayıp olarak dikkate alınacaktır. Çalışma sonunda kalite kayıplarını gidermek için, önlemlerin üretim sırasında alınmasının gerektiği belirlenmiştir.

Homburg ve diğerleri [9], araştırmalarında şikayet sistemine ait çerçeve oluşturmayı amaçlamıştır. Sonuçlar, şirketin şikayet değerlendirme tasarımının, o firmayla çalışan şikayetçi müşterilere göre değiştiğini göstermektedir.

Henneberg ve arkadaşları [10], anket ile veri toplayarak, büyük ve küçük şirketlerin müşterilere verdiği değerleri ve şikayetleri hangi yöntemle değerlendirdiği karşılaştırmıştır. Sonuçlara göre, büyük şirketler, müşteri memnuniyeti olarak küçük şirketlerden daha iyi, daha fazla rekabete avantajına sahip ve daha az şikayet ile karşılaşacaktır.

Kayabaşı [11], çalışmasında, lojistik faaliyetlerine yönelik şikâyetleri araştırmıştır. Anket yöntemi ile toplanan veriler analiz edilmiştir. Sonuçlar lojistiğin 7 doğrusu olan doğru ürün, doğru miktarda, doğru müşteriye, uygun koşullarda, uygun maliyette, doğru zamanda ve doğru yerde sağlanması tanımlarıyla uyumlu olmuştur.

Estelami [1], yaptığı iki çalışmada, çeşitli pazar faktörlerinin şikâyetlere olan etkisini incelemiştir. Şikâyetine olumlu tepki alan tüketicilerin, şikâyet etmeyen veya firma tepkisini olumsuz bulanların aksine, yüksek sadakat gösterdiği belirlenmiştir. Çalışmada, şikâyetleri etkili olarak değerlendiren

firmaların şikayetlerden yararlanarak ürünlerini geliştirme şansını elde ettikleri belirlenmiştir.

Johnson ve Mehra [12], şikayet yönetimi uygulaması gerçekleştirmiş ve müşteri şikayetine hızlı yanıt vermenin, müşteri memnuniyeti için hayati olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Davidow [13], müşteri şikayetlerine yanıt verilmesinde, organizasyonların şikayet sonrası müşteri davranışını etkileyen 6 boyut belirtmiş ve deneysel olarak ta test etmiştir. Bunlar, zamanındalık, basitleştirme, hatayı tamir etme, özür dileme, güvenilirlik, dikkatlilik.

Lee ve arkadaşları [14], müşteri şikayetlerinin akıllı kullanımı için bilgiye dayalı metodoloji ve kendi kendine öğrenme özelliği ile şikayetleri çözmek için işletmelere çözüm sunmuştur.

Faed ve arkadaşları [15], sürücülerden toplanan şikayetleri analiz etmiştir. Analizde, bakış açıları sıralanmış ve müşteriye fayda sağlamak ve verimliliği artırmak için optimize edilmiştir.

Einwiller ve Steilen [16], büyük şirketlerin sosyal medyadaki Facebook ve Twitter sayfalarında yer alan şikayetleri çözmek için çalışma yapmış ve şikayetlerin nasıl ele alındığı analiz edilmiştir. Sonuçlar müşteriye düzeltici çalışma yapmayı,

probleme çözüm bulacak biriyle ilişkilendirmeyi ve teşekkür etmeyi içermektedir.

Liu ve Yen [17], büyük veri analizi ile otobüs yolcularının şikayetlerini toplamış ve şikayet yönetim süreçlerini iyileştirmiştir. Geliştirilmiş kamu sektörü yönetimi için sistem önermişlerdir.

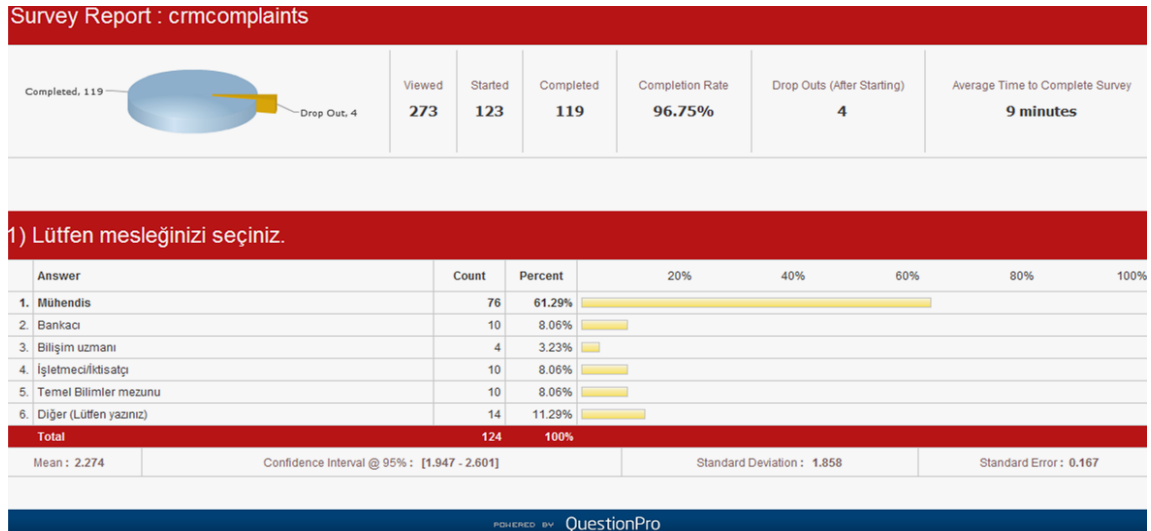
Strenitzerová ve Gana [18], Slovak elektronik iletişim pazarında müşteri memnuniyeti için çalışma yapmıştır. Çalışmada müşteri tabanlı kurumsallaşmanın boyutları tanımlanmıştır.

İbiş ve arkadaşları [19], otel işletmelerine yönelik internette yapılan müşteri yorum ve şikâyetlerini incelemiştir. En fazla şikâyetin sunulan yiyecek-içecek ve genel hizmet kalitesi ile ilgili olduğu anlaşılmış ve işletmelere öneriler sunulmuştur.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Türkiye'deki şirketlerde müşteri şikayet değerlendirme sistemleri ile ilgili olarak gerçekleştirdiğimiz anketten elde edilen veriler kullanılarak istatistiksel analiz yapılmıştır.



Şekil 1. Anket yanıtlarını internetten online izleme ekranı

Anket Türkiye'deki üretim ve servis işletmelerine internet yolu ile gönderilmiş veya yüz yüze görüşerek gerçekleştirilmiştir. Anket internet yolu ile "www.questionpro.com" adresinden 1000 kişiye ulaştırılmış olup 51 kişi tamamlamıştır. Ayrıca, 68 farklı şirketten 68 uzman kişi ile yüz yüze görüşülmüştür. Sonuçlar "www.questionpro.com" adresinden sisteme kaydedilmiştir. Anketi 273 kişi incelemiş, 123 kişi başlamış ve 119 kişi ortalama 9 dakikalık bir sürede yanıtlamıştır. Ankete başlayanların %96,75'i anketi tamamlamıştır (Şekil 1).

3.2. Metot

Türkiye'deki şirketlerin müşteri şikayet değerlendirme sistemlerinin incelenmesi için öncelikle literatürde yapılan çalışmalar incelenmiş ve boşluklar tespit edilmiştir. Boşluklara yanıt bulacak şekilde anket maddeleri ve hipotezler belirlenmiştir. Daha sonra anket yolu ile veriler toplanmıştır. Ayrıca, şirketlerin şikayet yönetim uzmanlarıyla yapılan yüz yüze görüşmelerden elde edilen bilgiler SPSS ile istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Daha sonra hipotezlerin test edilmesinde Ki-Kare testi, Mann Whitney U Testi, işaret testi ve korelasyon analizi uygulanmıştır.

3.2.1. Anket Örnek Büyüklüğünün Hesabı

Araştırmanın geçerliliği için anket geri dönüş sayısı doğru seçilmelidir. Türkiye'deki şirket sayısı (ana kütle) bilinmiyor ve çok büyükse anket geri dönüş sayısı Eşitlik 1 ile gibi hesaplanır [20].

$$n=(t^2 * p * q) /d^2 \quad (1)$$

n=Anket geri dönüş sayısı

t: Belirli serbestlik derecesinde ve saptanan yanılma düzeyinde t tablosundan bulunan teorik değerdir. Örnek alırken % 95 olasılık düzeyi kabul edildiğinden, çift yönlü t tablosundan %95 olasılığa karşılık gelen t değeri 1,96 alınmıştır.

(p) incelenen özelliğin toplumda "yaklaşık" sıklığını gösterir, (q) = (1-p)

Formülde örnek büyüklüğünü maksimum yapabilmek için p=0,5 seçilmiştir.

(d) incelenen özelliğin sıklığı olarak bulunması düşünülen değerdeki kabul edilebilir yanılma payıdır. Hata payı d, belirlenen, 0,01'den 0,1'e kadar olan değerdir (Bu çalışmada d değeri 0,10 alınmıştır). 1 nolu formülden n=96,07 bulunur.

Fiili anket geri dönüş sayısı 119 adettir. 119 sayısı formülden bulunan 96 sayısından büyük olduğu için anket geri dönüş sayısı yeterlidir.

N= Ana kütle biliniyorsa ve çok büyük değilse anket geri dönüş sayısı Eşitlik 2 ile hesaplanır [20].

$$n=(N * t^2 * p * q)/((N-1) * d^2) + (t^2 * p * q) \quad (2)$$

N: Türkiye'deki şirket sayısının ~3.500.000 olduğunu kabul edersek (Ana kütle) 2 numaralı formülden n=96,03 bulunur. Bu sonuca göre 119 olan anket dönüşü sayısı yeterlidir.

3.2.2. İstatistiksel Analizlerde Kullanılan Testler

İstatistiksel analizlerde kullanılan testler aşağıda verilmektedir.

1. Ki-Kare Testi: Örnek alınan değerlerin, hipotezdeki esas dağılıma uyup uymadığı ölçülür.

a. Uygunluk testi: Beklenen değer ile gözlenen değer arasındaki uygunluk karşılaştırılır.

b. Homojenlik testi: Birbirinden bağımsız olarak seçilen iki veya daha fazla örneklemin aynı ana kütlede çekilip çekilmediğinin belirlenmesinde kullanılır. Hipotezler:

H₀: Örnekler aynı ana kütlede seçilmiştir.

H_A: Örnekler aynı ana kütlede seçilmemiştir.

c. Bağımsızlık testi: İki veya daha çok değişken grup arasındaki ilişki incelenir. Değişkenlerin birbirinden bağımsız olup olmadığı araştırılır. Hipotezler:

H₀: Değişkenler birbirinden bağımsızdır.

H_A: Değişkenler birbirinden bağımsız değildir.

Ki-kare bağımsızlık testinin yapılabilmesi için, gözlenen sonuçlar gruplanmalıdır. Bu gruplandırmaya kontenjans tablosu denmektedir. Tabloda değişken sınıflarına ait satır ve sütunlar bulunur. Satır sayısını r ve sütun sayısı c ile tanımlanırsa, r x c 'lik bir tablo oluşur. Bu tablo ile herhangi bir satırdaki ve sütundaki veri arasındaki ilişki incelenir. Her satır ve sütundaki elemanların beklenen (E_{ij}) ve gözlenen frekansları (Q_{ij}) karşılaştırılır. Test istatistiğinin hesabında aşağıdaki 3 ve 4 ifadelerinden faydalanılır [21].

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{(Q_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad (3)$$

$$v = \text{Serbestlik derecesi} \quad v = (r-1)(c-1) \quad (4)$$

H_0 hipotezi ret, H_A hipotezi kabul edilir ise aşağıdaki 5 ifadesi geçerlidir [21].

$$\chi^2 > \chi^2_{\alpha; (r-1)(c-1)} \quad (5)$$

H_0 hipotezi kabul, H_A hipotezi ret edilir ise aşağıdaki 6 numaralı ifade geçerlidir [21].

$$\chi^2 < \chi^2_{\alpha; (r-1)(c-1)} \quad (6)$$

Ankette yer alan herhangi 2 soruya verilen cevapların birbiri ile olan ilişkisinin karşılaştırılması ve birbirinden bağımsız olup olmadığını belirlemek amacıyla kare testi kullanılmıştır ve anlam düzeyi belirlenmiştir.

2. Spearman Rank Order Korelasyonu: İki sürekli nümerik değişken arasındaki ilişkinin derecesini hesaplamak için kullanılır. Pearson korelasyon katsayısının nonparametrik alternatifidir [21]. Sürekli değişkenler bazı ölçümler sonunda elde edilen verilerin değerlerini alır. Bu nedenle her zaman tam değeri vermezler. Örneğin; şirketlerde çalışan eleman sayısı, şirketlere gelen şikayet sayısı, kapanan şikayet sayısı sürekli değişkendir. Ankette yer alan herhangi 2 soruya verilen cevapların birbiri ile olan ilişkisinin zayıf, orta veya kuvvetli olup olmadığını belirlemek amacıyla Spearman testi kullanılmıştır. Spearman Korelasyon katsayı değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Spearman korelasyon katsayıları [22].

Korelasyon	Negatif	Pozitif
Düşük	-0,29'dan -0,10 a	0,10'dan 0,29 a
Orta	-0,49'dan -0,30 a	0,30'dan 0,49 a
Yüksek	-0,50'den -1'e	0,5'den 1'e

3. Mann Whitney U-Testi: Sürekli ölçülen iki bağımsız grup arasındaki farklılıkların testinde kullanılan nonparametrik bir testtir. Student t testinin uygulanmadığı durumlarda t testinin nonparametrik alternatifi olan Mann Whitney U testi kullanılır. t testinde iki grubun ortalamaları karşılaştırılır, Mann Whitney U testinde ise grupların medyanları karşılaştırılır. Değişkenlerin iki grup içerisinde değerleri sıralı hale dönüştürülür ve sıralamadaki farklılık incelenir [21]. Ankette yer alan herhangi 2 soruya verilen cevapların birbiri ile olan ilişkisinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek amacıyla ve student t testi şartları sağlanmadığı için çalışmada nonparametrik bir test olan Mann Whitney U testi kullanılmıştır.

4. İşaret Testi: Parametrik bir test olan tek örnekleme t testi yapılamadığında bunun yerine alternatif olarak kullanılır. t testindeki varsayımlar karşılanamıyor veya örneklem sayısı az veya normal dağılıma uymuyorsa işaret testi kullanılır.

Parametrik olmayan bir istatistiksel tekniktir, dağılımın ortancasını esas alarak hesaplar, değişkenin gerçek değerlerini dikkate almaz sadece toplum ortalamasından büyük mü küçük mü olduğuna bakar. İşaret testi, düzenlediğimiz anketteki hipotezlere katılanlar ile katılmayanların sayısı arasında anlam açısından fark olup olmadığını belirlemek amacıyla kullanılmıştır. İşaret testine ait formüller aşağıda verilmektedir.

I. Yöntem:

α = anlamlılık düzeyi (0,05), $w_{\alpha/2}$ (t tablosundan bulunur), n=örneklem sayısı.

$$t = (1/2) * (n + w_{\alpha/2}) * n^{1/2} \quad (7)$$

II. Yöntem:

$n' \leq 10$ ise işaret testi değeri $r = n'$ alınır.

$n' = n - 1$ n = örneklem sayısı.
 $n' > 10$ ise z hesabı yapılır n' = toplam veri sayısı
 r = negatif işaretli veri sayısı, ortalamanın altında olan sayılar,
 n' = ortalama dan farklı olan sayılardır.
 r = toplum ortalamasından küçük olan sayılardır.

$$z = \frac{|r - (n'/2)| - (1/2)}{[(n')^{1/2}/2]} \quad (8)$$

Formülden hesaplanan z değeri bir teorik dağılım olan z dağılımı ile yani normal dağılımla karşılaştırılır. %5 anlamlılık düzeyinde çift yönlü p değerinin nereye karşılık geldiğini belirlemek için tabloya bakılır, p değeri 0,05'ten büyükse H_0 sıfır hipotezi kabul edilir [23].

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Anketin hazırlanma amacı: Türkiye'deki şirketlerin sahip oldukları müşteri şikayet değerlendirme sistemlerinin mevcut durumunu belirlemek için veri toplamak ve anketteki hipotezler yardımıyla uzmanların görüşünü değerlendirmektir. Analiz işlemleri öncelikle anket çalışmasına katılanların kişisel bilgileri ve işletmeleriyle ilgili bilgileri içeren tanımlayıcı istatistikleri, ikinci olarak ise hipotez testlerini kapsamaktadır. Hipotezler, 7 adet ana hipotez ve 8 adet yardımcı hipotezden oluşmaktadır.

7 adet ana hipotez aşağıda verilmiştir.

- H_1 = Müşteri şikayetlerine bulunan kök nedenin doğruluğu şikayet kapatma süresini kısaltmaktadır.
 H_2 = Müşteri şikayetlerine bulunan çözümün doğruluğu şikayet kapatma süresini kısaltmaktadır.
 H_3 = Müşteri şikayetlerine çözüm bulan eleman sayısının artırılması, aynı oranda çözüm süresini kısaltmaktadır.
 H_4 = Müşteri şikayet değerlendirme sürecinde çalışan eleman sayısını artırmak, aynı elemanları fazla saatle çalıştırmaktan daha etkilidir.
 H_5 = Müşteri şikayetlerini çözen elemanların çizelgeli (günde 4-5 saat) çalışması, sabit

sürede (günde 9 saat) çalışmasından daha avantajlıdır.

- H_6 = Bir müşteri şikayet sisteminde, çalışan elemanların sayısı arttırıldığında, artan eleman sayısı oranında, elemanların çalışma saati doluluğu azalmaktadır.
 H_7 = Müşterinin şikayet yönetim sürecine katılması, şikayetin kapanma süresini kısaltmaktadır.

8 adet yardımcı hipotez aşağıda verilmiştir.

- H_8 = Şirketlerde çalışan eleman sayısının az veya çok olması ile şirketlerin CRM veri tabanı yazılımına sahip olması arasında bir ilişki yoktur.
 H_9 = Şirketlerde çalışan eleman sayısının az veya çok olması ile şirketlerde şikayetleri değerlendiren ayrı bir birim olması arasında bir ilişki yoktur.
 H_{10} = Şirketlerin "Müşteri Şikayet Yönetimi" uygulaması ile şirketlerde CRM /Müşteri şikayetlerini değerlendiren ayrı bir birim olması arasında bir ilişki yoktur.
 H_{11} = Şikayetin kök nedeni ilk seferde %85 ve üzeri oranda doğru bulan şirketlerin aynı zamanda Müşteri Şikayetlerini de %85 ve üzeri oranda doğru çözmesi arasında anlamlı bir ilişki yoktur.
 H_{12} = İşletmede müşteri şikayet değerlendirme biriminin olması ile yıllık gelen şikayetlerin %100'ünün kapanması arasında anlamlı bir ilişki yoktur.
 H_{13} = İşletmede şikayet değerlendirme biriminin olması ile yıllık gelen müşteri şikayetlerinin %90 ve üzeri bir oranda doğru çözülmesi arasında anlamlı bir ilişki yoktur.
 H_{14} = Kalifiye eleman sıkıntısı çeken şirketler ile şirketlerin üretim/servis süreçlerinde daha fazla zaman harcaması arasında anlamlı bir ilişki yoktur.
 H_{15} = Mali kaynak sıkıntısı çeken şirketler ile şirketin ARGE süreçlerinde daha fazla zaman harcaması arasında anlamlı bir ilişki yoktur.

Çalışmamızda konsolide bilgiler inceleneceği için ankete katılan firma isimleri yayınlanmamıştır. Önem sırasının belirlenmesinde beşli Likert ölçeği kullanılmıştır. 1: Katılmıyorum, 2: Az katılıyorum,

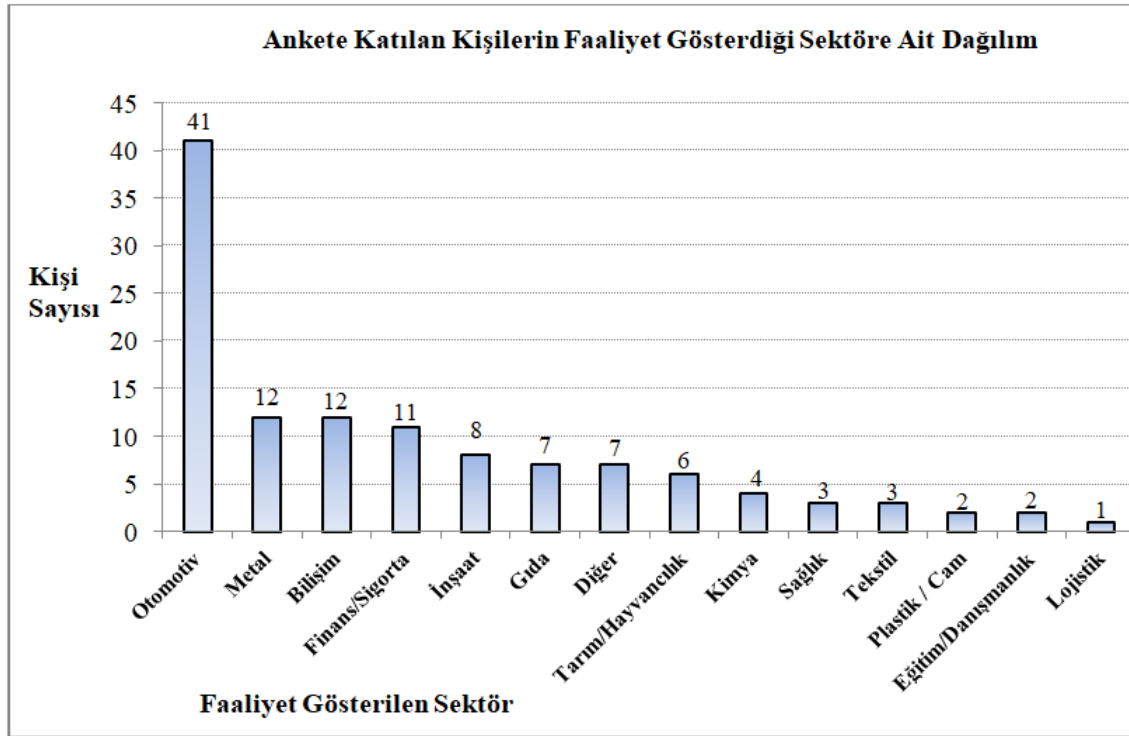
3: Orta derecede katılıyorum, 4: Çoğunlukla katılıyorum, 5: Kesinlikle katılıyorum olarak tanımlanmıştır. 1 ve 2 değerleri katılmıyorum, 4 ve 5 değerleri katılıyorum ve 3 değerini alanların yarısı katılıyorum diğer yarısı da katılmıyorum olarak alınmıştır. Ayrıca üçlü puanlama sisteminde En çok önemli 3 puan, önemli 2 puan ve kısmen önemli 1 puan olarak alınmıştır.

4.1. Tanımlayıcı İstatistikler

Ankette yer alan sorulara verilen yanıtlar aşağıda özetlenmiştir. Anketi yanıtlayan 119 kişinin 72’si (%60,50’si) mühendis, 10’u (%8,4’ü) bankacı/sigortacı, 13’ü (%10,92’si) temel bilimler mezunu, 15’i, (%12,61’i) işletmeci/iktisatçı, 4’ü (%3,36’sı) bilişim/telekomünikasyon uzmanı ve 5’i (%4,2’si) diğer işaretlenmiştir. Ankete katılanların 87 kişisi

erkek, 32 kişisi bayandır. Grafikte ilk sırayı 41 şirket ile otomotiv/otomotiv yan sanayi, daha sonra 12’şer şirket ile metal ve bilişim almıştır, finans/sigorta 11 şirket, inşaat 8 şirket ve gıda 7 şirkettir. Diğer seçeneğini işaretleyenler arasında enerji, çevre, doğrudan satış ve dayanıklı tüketim sektörlerine ait işletmeler bulunmaktadır (Şekil 2).

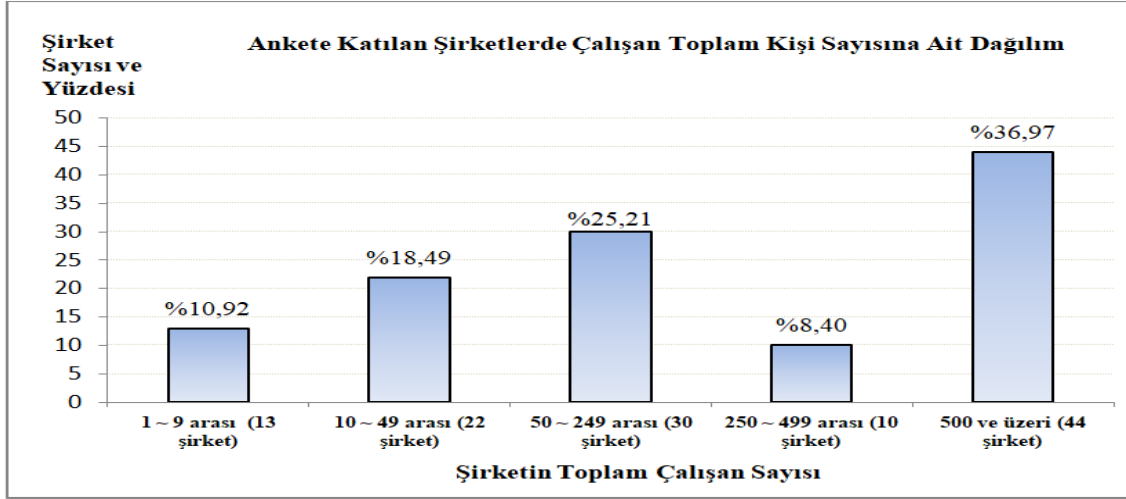
Yukarıda açıklanan tanımlayıcı istatistikler nitel (kalitatif) ve kesikli verilerdir. Anket verilerinden bazıları ise nicel (kantitatif) ve sürekli değişken sayısal verilerdir. Örneğin şirkete gelen şikayet sayısı, kapanan şikayet sayısı, şikayete çözüm bulma süresi, şikayetin kök nedenini bulma süresi, şikayeti kapatma süresi, şirkette çalışan sayısı, şikayetleri değerlendirmek/ çözmek için kullanılan kişi sayısı ve kişinin günlük çalışma zamanı vs, özellikler nicel ve süreklidir.



Şekil 2. Ankete katılan şirketlerin faaliyet gösterdiği sektör dağılımı

Ankete katılan işletmelerdeki toplam çalışan sayısına göre şirket oranlarının dağılımı Şekil 3’te

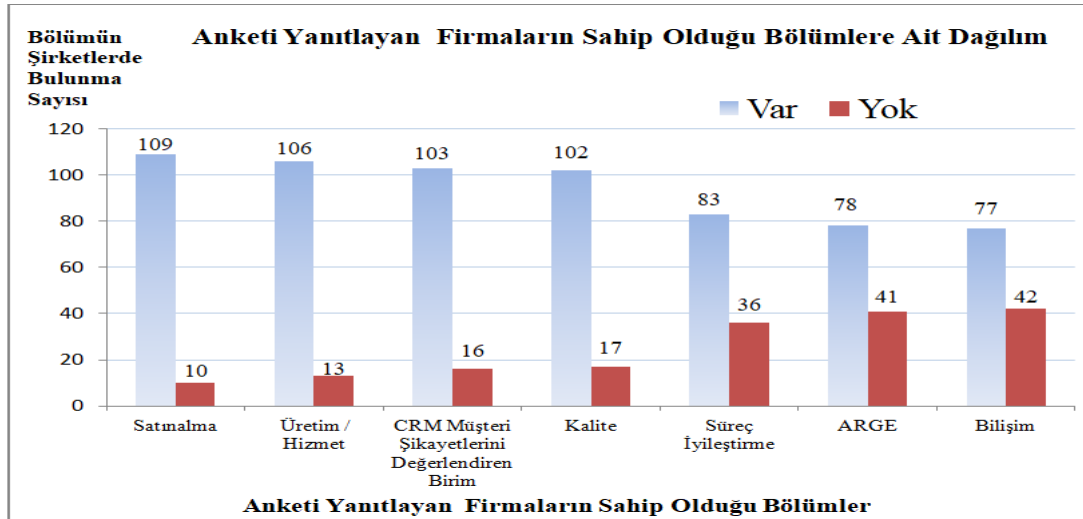
verilmektedir. 119 şirketin 44’ü “500 ve üzeri çalışan” sayısına sahiptir.



Şekil 3. Şirketlerdeki toplam çalışan sayısına göre şirket oranları

Ankete katılan işletmelerin çoğunda, Satınalma, kalite, üretim/servis, ARGE, süreç iyileştirme, bilişim ve CRM müşteri şikâyetlerini değerlendiren birimler vardır (Şekil 4). En yaygın olan bölüm 109 adet ile Satınalma birimidir. Bazı şirketlerde ARGE, üretim veya bilişim birimi

olmasa bile Satınalma birimi bulunabilmektedir. İkinci sırada 106 adet ile üretim/hizmet birimleri, üçüncü sırada 103 adet ile müşteri şikâyetlerini değerlendiren birimler yer almaktadır. ARGE çalışması yapan şirketlerin sayısı ise daha azdır.



Şekil 4. Ankete katılan şirketlerin sahip olduğu bölümlere ait dağılım

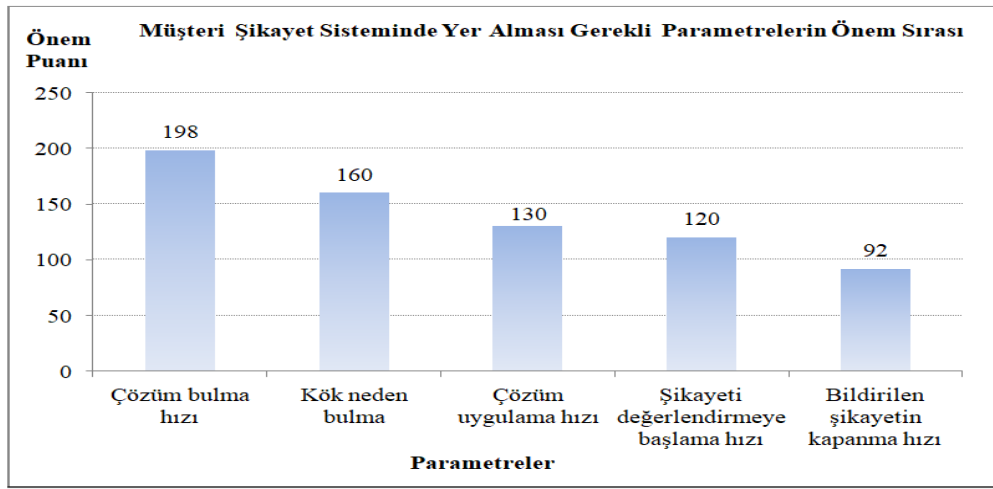
Şikâyet sisteminde olması gerekli parametrelerin önem sırasına verilen yanıtlarda, en önemli parametre 198 puanla çözüm bulma hızı, ikinci sırada 160 puanla kök neden bulma hızı olmuştur. Yüz yüze gerçekleştirilen anket görüşmelerinde

uzmanlar öncelikle şikâyete çözüm bulma hızını öne çıkarmıştır (Şekil 5). Sadece şikâyeti hızlı değerlendirmeye başlamak yeterli değildir, aynı anda şikâyete hızlı ve doğru çözüm bulmak ta

önemlidir. Bunun için kalifiye elemanların çözüm bulma ekibine dahil edilmesi önerilmektedir. Şikayet sisteminde olması gerekli parametrelerin önem sırasının hesabı ise Çizelge 2’de verilmiştir.

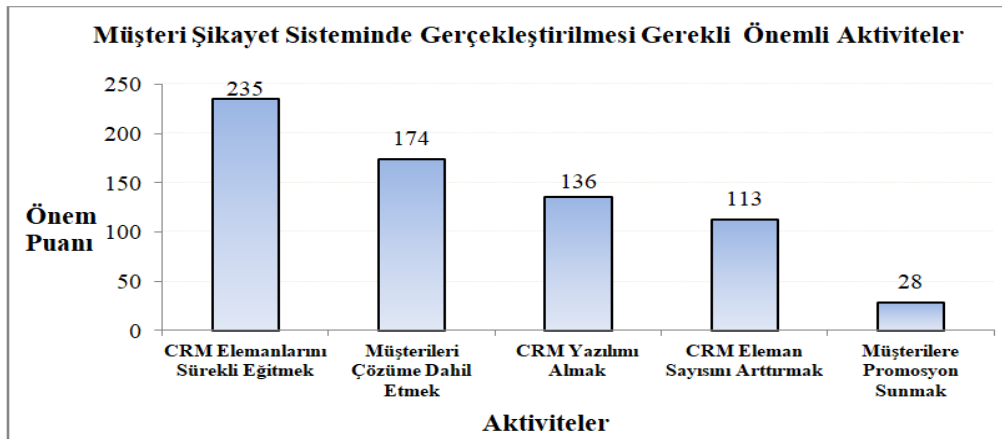
Çizelge 2. Şikayet sisteminde olması gerekli parametrelerin önem sırası

Şikayet sisteminde olması gerekli en önemli parametre	En Çok Önemli (3 puan)	Önemli (2 puan)	Kısmen Önemli (1 puan)	Toplam Kişi Sayısı	Ağırlıklı Puan
Çözüm bulma hızı	35	39	15	89	198
Kök neden bulma hızı	33	21	19	73	160
Çözüm bulma hızı	8	32	42	82	130
Şikayeti değerlendirmeye başlama hızı	29	13	7	49	120
Şikayetin kapanma hızı	12	11	34	57	92

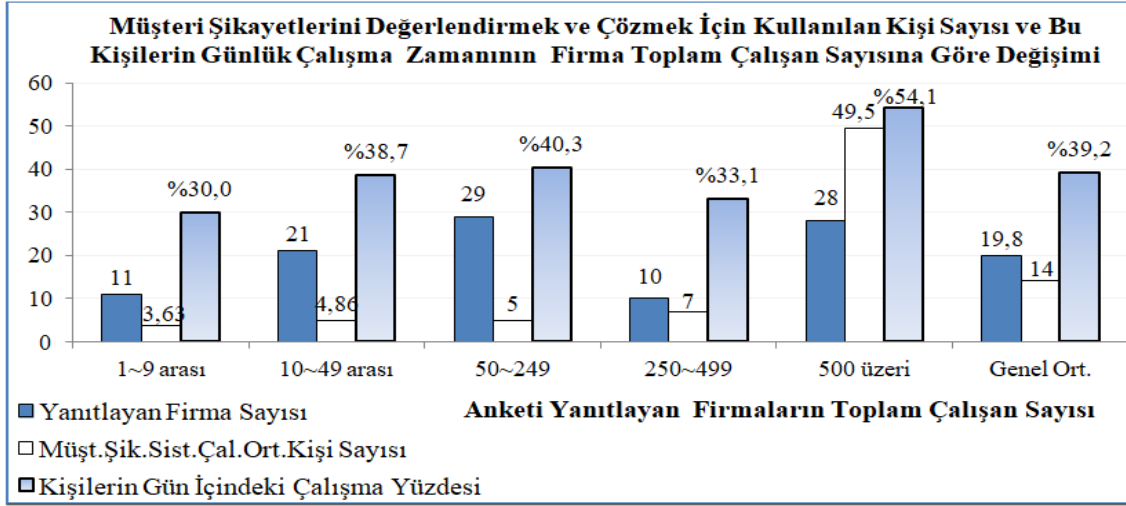


Şekil 5. Şikayet sisteminde olması gerekli parametrelerin önem sırası

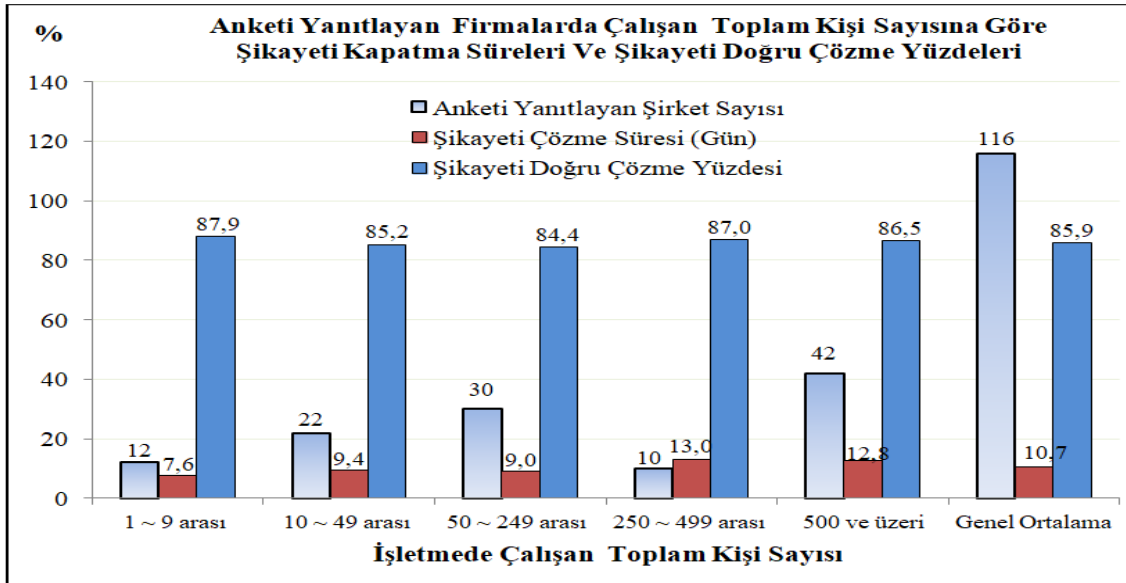
“Müşteri şikayet sisteminde gerçekleştirilmesi gerekli önemli aktiviteler nelerdir” sorusuna verilen yanıtlarda CRM elemanlarını eğitmek ve müşterileri çözüme dahil etmek en önemli çıkmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Şikayet sistemindeki gerekli aktiviteler



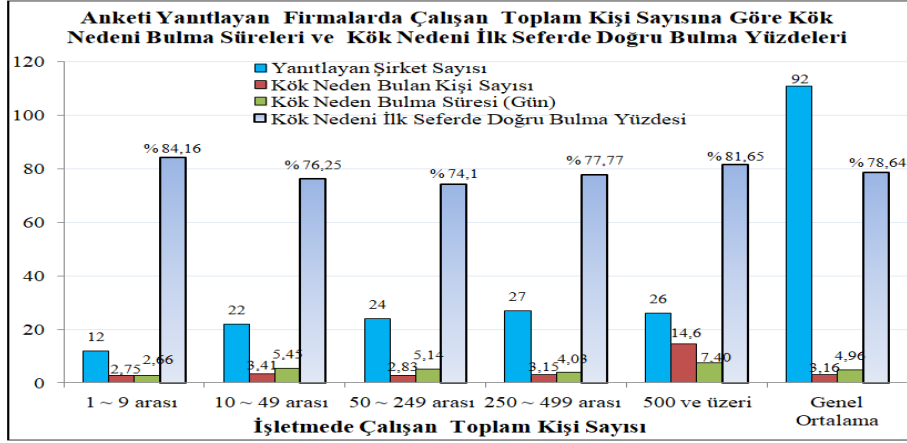
Şekil 7. Şikayetleri değerlendirmek ve çözmek için kullanılan kişi sayısı ve çalışma yüzdesi.



Şekil 8. Firmada çalışan kişi sayısına göre şikayeti kapatma süreleri ve doğru çözme yüzdesi

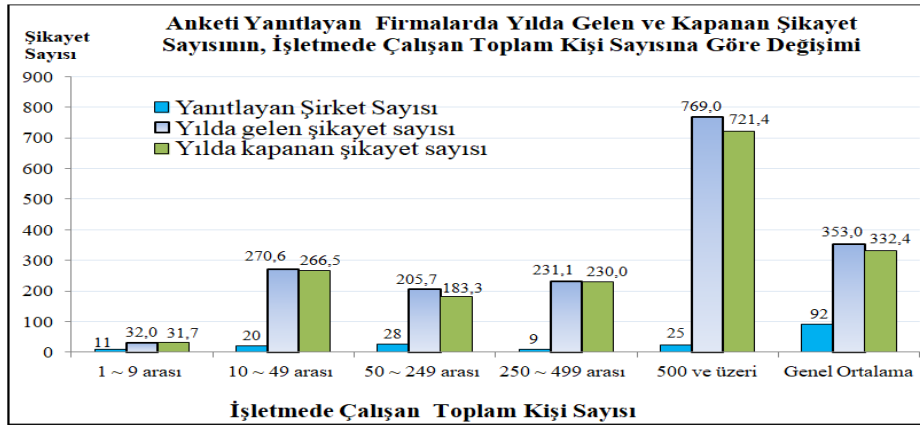
Şikayetleri çözmek için firmaların toplam kaç kişi çalıştırdıkları ve bu kişilerin mesailerinin yüzde kaçını bu iş için harcadıkları Şekil 7'de verilmiştir. Şirketlerin şikayetleri tüm süreçler dahil ortalama kaç günde çözüp kapattığı ve şikayetlerin yüzde kaçını doğru olarak çözdüğüne ait bilgiler Şekil 8'de verilmektedir. Şirketlerin şikayetlerin kök nedenini ortalama kaç günde bulduğu, yüzde

kaçını ilk seferde doğru bulduğu ise Şekil 9'da verilmiştir. Şikayetlerin kök nedenini bulma süresi ve ilk seferde doğru bulma yüzdesi şikayetin kapanma süresini etkilediği için şirketin kritik başarı faktörleri olarak alınabilir ve hedefler konulabilir. Bazı şirketler ortalama kök neden bulma süresini müşteri beklentisine uygun olarak örneğin en fazla 3 gün ile sınırlayabilir.



Şekil 9. Firmada çalışan kişi sayısına göre kök neden bulma süresi ve ilk seferde doğru bulma yüzdesi

Şirketlere yılda ortalama kaç adet şikayet geldiği ve kaç adedinin kapandığı Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 10. Firmalara bir yılda gelen/kapanan şikayet sayısının, işletmede çalışan sayısına göre değişimi

4.2. Temel Hipotezler ve Sonuçları

Anketteki 7 adet hipotez 1 (en küçük) ile 5 (en büyük) arasındaki puanlar ile değerlendirilmiştir.

Hipotezlerin tamamı 5 üzerinden 3’ü geçmiş ve hipotezlere katılanlar ile katılmayanlar arasında anlamlı bir fark çıkmıştır (Çizelge 3).

Çizelge 3. Hipotezlere verilen yanıtlar

Hipotez	İşletmelerin hipotezlere verdiği puan					Ortalama Puan	Cevap sayısı	İşletmelerin hipotezi kabul durumu	
	1	2	3	4	5			Kabul	Ret
H1	9	5	6	22	77	4,286	119	102	17
H2	6	4	5	35	69	4,319	119	106	13
H3	10	15	38	32	24	3,378	119	75	44
H4	13	9	24	34	39	3,647	119	85	34
H5	19	15	24	32	29	3,311	119	73	46
H6	17	17	21	42	22	3,294	119	74	45
H7	12	4	19	36	48	3,874	119	93	26

Ankette yer alan 7 adet hipotezin yanıtları ile literatür çalışmaları Çizelge 4’de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4. Ankette yer alan ana hipotezlere ait sonuçların literatür ile karşılaştırılması

No	HİPOTEZ	Anket Önem Puanı	LİTERATÜRDEKİ BENZER ÇALIŞMALAR
1	H ₁ ="Müşteri şikayetlerine bulunan kök nedenin doğruluğu şikayet kapatma süresini kısaltmaktadır."	Katılmayan=17 Katılan=102 H ₁ =Kabul / 4,286	1) Şikayeti değerlendirme hatası, müşteri beklentilerini olumsuz etkilemektedir. Müşteri şikayetini etkin olarak inceleme ve yanıtlama, müşterinin tekrar satın almasına etkilidir [13]. 2) Tamir etme, düzeltme, araştırma ve şikayeti ele alma parametreleri, yeniden satın almaya ve dedikoduya etki etmektedir. Dağıtım, adil değerlendirme, hatayı giderme sonrasındaki memnuniyeti arttırmaktadır. Sadece özür dilemek etkili değildir Düzeltme ile birlikte yapılmalıdır. Hızlıca düzeltmek tercih edilir. 4) Problemi ele alma ve yanıtlamanın müşterinin memnun olarak yeniden satın alma niyetini doğrudan etkilediğini göstermektedir (r =0,77) [13]. 3) Dikkat, tazminat ödemekten de güçlü etkiye sahiptir. Çözme hızı, müşteriyi sevindirme açısından ve hayal kırıklığını önleme için anlamlıdır (p=0,08) [1].
2	H ₂ ="Müşteri şikayetlerinde bulunan çözümün doğruluğu şikayet kapatma süresini kısaltmaktadır."	Katılmayan=13 Katılan=106 H ₂ =Kabul / 4,319	1) Açıklama yapmak, tamir etmek ve hızlı çözüm memnuniyet ve yeniden satın alınmayı, tamir etmek, hız ve özür dilemek ise memnuniyet üzerine doğrudan olmayan etkiye sahiptir. Hatayı giderme hızı ve tamir etme yeniden satın alma oranını arttırmaktadır. Şikayeti gidermek, yeniden satın almaya pozitif etkilemektedir. Şikayete yanıt verme hızı kritik önemdedir [13]. 2) Şikayete hızlı yanıt vermenin, müşteri memnuniyeti için hayati olduğu ortaya çıkmıştır [12].
3	H ₃ ="Müşteri şikayetlerine çözüm bulan kişi sayısının artırılması, aynı oranda çözüm süresini kısaltmaktadır."	Katılmayan=44 Katılan=75 H ₃ =Kabul / 3,378	1) Servis iyileştirme stratejisine hızlı bir başlangıç yüksek memnuniyet ile ilişkilidir. Hatayı tamir etmek ve hatayı çözmek için algılanan hız, memnuniyet üzerine pozitif etkiye sahiptir [13]. 2) İyileştirme hızının, müşteri elde etme hızından daha yüksek olması gerektiği ortaya çıkmıştır. Artan müşteri sayısı ile daha sonra yapılacak iyileştirmeler için harcamalar da büyüyecektir [5].
4	H ₄ ="Şikayet sürecinde çalışan sayısını artırmak, aynı kişilerin fazla saatle çalışmasından etkilidir."	Katılmayan=34 Katılan=85 H ₄ =Kabul / 3,647	1) Şikayeti çözmek için doğru yönetim süreçlerinin uygulanması ve yeterli kaynak ayrılması ile şikayet kısmi olarak çözülmektedir [1]. 2) Şirketlerinin şikayeti değerlendirmede uygun olmayan enerji ve kaynakların tahsisini önlemek için uyarlanabilir bir yaklaşım sergilemelidir Homburg ve diğerleri [9].
5	H ₅ ="Müşteri şikayetlerini çözen elemanların çizelgeli (günde 4-5 saat) çalışması, sabit sürede (günde 9 saat) çalışmasından daha avantajlıdır. "	Katılmayan=46 Katılan=73 H ₅ =Kabul / 3,311	1) Firmalar müşterinin şikayet etmesini kolaylaştırmalı ve telafi etmek için cömert olmalıdır [24]. 2) Zamanındalık, kolaylaştırma ve tamir etme memnuniyet üzerine olumlu etkilemektedir. Ses tonu ve harekete geçme, müşteri davranışı ve yeniden müşteri olması üzerinde pozitif etkiye sahiptir. Zamanında davranmamak WOM üzerine negatif etkiye sahiptir [13]. 3) Şikayet yönetim süreçlerindeki kişilerin günlük çalışma saatlerini arttırmak verimli olmamaktadır. Fakat toplam çalışma saatleri daha fazla kişiye dağıldığında, çözüm süresi, şikayet kapanma süresi ve kuyrukta bekleme süresi azalmaktadır [25].
6	H ₆ ="Şikayet sistemde. Çalışan sayısı artırılırsa, artan sayı oranında çalışma saati doluluğu azalmakta."	Katılmayan=45, Katılan=74 H ₆ =Kabul/3,294	1) Müşteri şikayetlerine yanıt vermede, müşteri davranışlarını etkileyen 6 boyut vardır, bunlar, Zamanındalık, Basitleştirme, Tamir etmek, Özür dilemek, Güvenilirlik, Dikkatlilik [13]. 2) Sistemde çalışan kişi sayısı azalınca, işgücü kullanım oranı artmaktadır ve şikayet kapanma süresi uzamaktadır [25].
7	H ₇ ="Müşterinin, şikayet yönetim sürecine katılması, şikayetin kapanma süresini kısaltmaktadır."	Katılmayan=26 Katılan=93 H ₇ =Kabul / 3,874	1) Bir şirketin şikayet değerlendirme tasarımının, önemli ölçüde o firmayla çalışan şikayetçi müşterilerin özelliklerine göre değişmektedir [9]. 2) Müşterilerin üretim sürecine dahil edilerek katma değer yaratmasının müşteri şikayetini önlemede çok önemli bir parametre olduğu ortaya çıkmıştır [7]. 3) Şirketler etkili müşteri kazanma sistemi kurmalıdır. İnternet bankacılığı servis kalite modelinde, müşteri katılımının servis kalitesi üzerine olumlu etkidiği belirtilmiştir [4]. 4) Servis kalitesini geliştirmek isteyen bir firmanın, ürün ve servislerini alan dış müşterilerini, kendisine kazandırmak istediği rakip müşterilerini ve müşterilere servis veren kendi servis çalışanlarını dinlemesi gerektiği önerilmiştir [26]. 5) Müşteri ile konuşma, şikayeti çözmeye memnuniyet için anlamlıdır, özür dilemek etkili ama anlamlı değildir. Müşterinin şikayet etmesini cesaretlendirmek, müşterilerin memnuniyetini arttırmaktadır. Tamir mekanizması kurmak şikayet olasılığı üzerine pozitif etkilidir [13].

Anketteki ana hipotezlere katılan ve katılmayan sayısına ait işaret testi sonuçları Çizelge 5’te verilmiştir.

Çizelge 5. Ankette yer alan ana hipotezlere katılan ve katılmayan sayısına ait işaret testlerinin sonuçları

No	HİPOTEZ	Anket Sonucu / 5 Üzerinden Önem Puanı	İşaret Test Sonucu 1.YÖNTEM (t tablosuna göre)	İşaret Test Sonucu 2.YÖNTEM (z tablosuna göre)
1	H ₁₀ ="Müşteri şikayetlerine bulunan kök nedenin doğruluğu şikayet kapatma süresini kısaltmaktadır, hipotezine katılan sayısı ile katılmayan sayısı arasında anlamlı bir fark yoktur". (H ₁₁ = Anlamlı bir fark vardır).	Katılmayan=17, Katılan=102 $\alpha=0,05=p$ H ₁₀ =Ret / 4,286	t=1/2*(n+ w $\alpha/2$ * \sqrt{n}) n=119 formülden t=50,55 bulunur. 17 veri <50,55 formül H ₁₀ Ret edilir.	$z = [ |r - (n^{-1}/2) | - (1/2)] / [(n^{-1})/2]$ formülden hesaplanan z=7,6 için z tablosundan p=0 bulunur. H ₁₀ Ret edilir.
2	H ₂₀ ="Müşteri şikayetlerine bulunan çözümün doğruluğu şikayet kapatma süresini kısaltmaktadır, hipotezine katılan sayısı ile katılmayan sayısı arasında anlamlı bir fark yoktur". (H ₂₁ = Anlamlı bir fark vardır).	Katılmayan=13 Katılan=106 $\alpha=0,05=p$ H ₂₀ =Ret / 4,319	Formülden t=50,55 bulunur. n=119 13 veri <50,55 formül H ₂₀ Ret edilir.	Formülünden hesaplanan z=8,37 için z tablosundan p=0 bulunur. H ₂₀ Ret edilir.
3	H ₃₀ ="Müşteri şikayetlerine çözüm bulan eleman sayısının artırılması, aynı oranda çözüm süresini kısaltmaktadır, hipotezine katılanların sayısı ile katılmayanların sayısı arasında anlamlı bir fark yoktur". (H ₃₁ = Anlamlı fark vardır).	Katılmayan=44 Katılan=75 $\alpha=0,05=p$ H ₃₀ =Ret / 3,378	Formülden t=50,55 bulunur. n=119 44 veri <50,55 formül H ₃₀ Ret edilir.	Formülden hesaplanan z=2,67 için z tablosundan p=0,003 bulunur. H ₃₀ Ret edilir.

Çizelge 5 (devam)

4	H ₄₀ = "Müşteri şikayet değerlendirme sürecinde çalışan eleman sayısını arttırmak, aynı elemanları fazla saatle çalıştırmaktan daha etkilidir, hipotezine katılan sayısı ile katılmayan sayısı arasında anlamlı bir fark yoktur". (H ₄₁ = Anlamlı bir fark vardır).	Katılmayan=34 Katılan=85 $\alpha=0,05=p$, H ₄₀ =Ret / 3,647	Formülden t=50,55 bulunur. n=119 34 veri <50,55 formül H ₄₀ Ret edilir	Formülden hesaplanan z=4,51 için z tablosundan p=0,00 bulunur. H ₄₀ Ret edilir.
5	H ₅₀ = "Müşteri şikayetlerini çözen elemanların çizelgeli (günde 4-5 saat) çalışması, sabit sürede (günde 9 saat) çalışmasından daha avantajlıdır, hipotezine katılan sayısı ile katılmayan sayısı arasında anlamlı bir fark yoktur". (H ₅₁ = Anlamlı bir fark vardır).	Katılmayan=46 Katılan=73 $\alpha=0,05=p$, H ₅₀ =Ret / 3,311	Formülden t=50,55 bulunur. n=119 46 veri <50,55 formül H ₅₀ Ret edilir.	Formülden hesaplanan z=2,301 için z tablosundan p=0,0094 bulunur. H ₅₀ Ret edilir.
6	H ₆₀ = "Bir müşteri şikayet sisteminde, çalışan elemanların sayısı arttırıldığında, artan eleman sayısı oranında, elemanların çalışma saati doluluğu azalmaktadır, hipotezine katılan sayısı ile katılmayan sayısı arasında anlamlı bir fark yoktur". (H ₆₁ = Anlamlı bir fark vardır).	Katılmayan=45 Katılan=74 $\alpha=0,05=p$, H ₆₀ =Ret / 3,294	Formülden t=50,55 bulunur. n=119 45 veri <50,55 formül H ₆₀ Ret edilir.	Formülden hesaplanan z=2,485 için z tablosundan p=0,0054 bulunur. H ₆₀ Ret edilir.
7	H ₇₀ = "Müşterinin, şikayet yönetim sürecine katılması, şikayetin kapanma süresini kısaltmaktadır hipotezine katılan sayısı ile katılmayan sayısı arasında anlamlı bir fark yoktur". (H ₇₁ = Anlamlı bir fark vardır).	Katılmayan=26 Katılan=93 $\alpha=0,05=p$, H ₇₀ Ret / 3,874	Formülden t=50,55 bulunur. n=119 26 veri <50,55 formül H ₇₀ Ret edilir.	Formülden hesaplanan z=5,98 için z tablosundan p=0 bulunur. H ₇₀ Ret edilir.

Anketten elde edilen diğer 8 adet göstergenin hipotez test sonuçları Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Ankette yer alan diğer 8 adet göstergenin hipotez test sonuçları

HİPOTEZ / KARŞILAŞTIRILAN ANKET SORULARI	χ^2 /df	χ^2 Sonucu	χ^2 Anlam Düzeyi (p)	MAN WHITNEY U Asymp.Sig (2-tailed) değeri	İlişkinin Gücü / Spearman Değeri
H ₆ = "Şirketlerde çalışan eleman sayısının az veya çok olması ile şirketlerin CRM veri tabanı yazılımına sahip olması arasında bir ilişki yoktur".	9,731/1	Ret	0,002	Ret: Anlamlılık: 0,002<0,05 sonuç istatistiksel olarak anlamlıdır ve zayıf bir ilişki vardır. Z=-3,106	Zayıf / 0,286
H ₇ = "Şirketlerde çalışan eleman sayısının az veya çok olması ile şirketlerde şikayetleri değerlendiren ayrı bir birim olması arasında bir ilişki yoktur".	0,011/1	Kabul	0,565	Kabul: Anlamlılık: 0,08>0,05 sonuç istatistiksel olarak anlamlı değildir ve ilişki yoktur. Z=-1,752	Zayıf / - 0,010
H ₈ = "Şirketlerin "Şikayet Yönetimi" uygulaması ile şirketlerde CRM /Müşteri şikayetlerini değerlendiren ayrı bir birim olması arasında bir ilişki yoktur".	38,386/1	Ret	0,000	Ret: Anlamlılık: 0,000 0,000<0,05 sonuç istatistiksel olarak anlamlıdır ve yüksek bir ilişki vardır. Z=-6,17	Yüksek/ 0,568
H ₉ = "Şikayetin kök nedeni ilk seferde %85 ve üzeri oranda doğru bulan şirketlerin aynı zamanda Müşteri Şikayetlerini de %85 ve üzeri oranda doğru çözmesi arasında anlamlı bir ilişki yoktur" bulmaktadır?" karşılaştırılmıştır.	18,278/1	Ret	0,000	Ret: Anlamlılık: 0,000<0,05 sonuç istatistiksel olarak anlamlıdır ve orta derece ilişki vardır. Z=-4,255	Orta / 0,415
H ₁₀ = "İşletmede müşteri şikayet değerlendirme biriminin olması ile yıllık gelen şikayetlerin % 100' ünün kapanması arasında anlamlı bir ilişki yoktur".	0,151/1	Kabul	0,456	Kabul: Anlamlılık: 0,699>0,05 sonuç istatistiksel olarak anlamlı değildir, ilişki yoktur. Z=-0,386	Zayıf / 0,038
H ₁₁ = "İşletmede şikayet değerlendirme biriminin olması ile yıllık gelen müşteri şikayetlerinin %90 ve üzeri bir oranda doğru çözülmesi arasında anlamlı bir ilişki yoktur".	0,270/1	Kabul	0,401	Kabul: Anlamlılık: 0,605>0,05 sonuç istatistiksel olarak anlamlı değildir, ilişki yoktur. Z=-0,518	Zayıf / 0,048
H ₁₂ = "Kalifiye eleman sıkıntısı çeken şirketler ile şirketin üretim/servis süreçlerinde daha fazla zaman harcaması arasında anlamlı bir ilişki yoktur".	0,008/1	Kabul	0,548	Kabul: Anlamlılık: 0,929>0,05 sonuç istatistiksel olarak anlamlı değildir, ilişki yoktur. Z=-0,089	Zayıf/ -0,008
H ₁₃ = "Mali kaynak sıkıntısı çeken şirketler ile şirketin ARGE süreçlerinde daha fazla zaman harcaması arasında anlamlı bir ilişki yoktur".	1,094/1	Kabul	0,205	Kabul: Anlamlılık: 0,298>0,05 sonuç istatistiksel olarak anlamlı değildir, ilişki yoktur. Z=-1,042	Zayıf / 0,096

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ülkemizdeki şirketlerin müşteri şikayet değerlendirme sistemleri üzerine yapılan bir anketin sonuçları istatistiksel yöntemlerle analiz edilmiştir. Çalışma ile ülkemizdeki şirketlerin müşteri şikayet sistemlerinin seviyesi ölçülmüş ve uluslararası düzeyde karşılaştırmaların daha sağlıklı yapılmasına destek verilmiştir.

Çalışmamızda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- 1) Yüz yüze yapılan anket görüşmelerinde uzmanlar öncelikle şikayete çözüm bulma hızını ön plana çıkarmıştır. Sadece şikayeti ele almaya hızlı başlamak yeterli olmamaktadır, aynı zamanda hızlı çözüm bulmak da önemlidir. Bunu sağlamak için şirketlerin eğitilmiş ve kalifiye elemanlarını çözüm bulma ekibine dahil etmesi önerilmiştir.
- 2) Ankete katılan işletmelerin çoğunda, ARGE, Satılma, kalite, üretim-servis ve şikayetleri

değerlendiren birim vardır. En fazla bulunan ise Satınalma bölümüdür.

- 3) Şikayetleri değerlendirmek için en önemli parametreler olarak CRM elemanlarını eğitmek ve müşterileri çözüme dahil etmek gelmektedir.
- 4) Kurumsal şirketlerin, müşteri şikayet değerlendirme sistemine atadığı eleman sayısı fazladır ve bu elemanlar çalışma zamanlarının yaklaşık olarak yarısını bu iş için harcamaktadır.
- 5) Ankete katılan Türkiye'deki şirketler şikayetin kök nedenini ortalama ~5 günde bulmaktadır.
- 6) Ankete katılan Türkiye'deki şirketler müşteri şikayetini ortalama ~11 günde çözmektedir.
- 7) Çalışan sayısı fazla olan kurumsal şirketler daha fazla şikayet almakta ve şikayeti çözerek müşteriyi memnun etme şansı yakalamaktadır. Bunun nedeni ise kurumsal şirketlerin müşteri şikayet değerlendirme sistemine önem vermesi ve müşteriye şikayetini bildirme için çeşitli kolaylaştırıcı yollar sunmasıdır.

Anket verileri ile oluşturulan yardımcı hipotezler de test edilmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- 1) Çalışan sayısı fazla olan şirketler çalışan sayısı az olan şirketlere göre, bir miktar daha fazla oranda CRM veritabanı yazılımına sahiptir.
- 2) Çalışan sayısına bağlı olmaksızın şirketlerde şikayetleri değerlendiren bir birim bulunmaktadır.
- 3) Şirketlerin ‘‘Müşteri Şikayet Yönetimi’’ uygulaması ile şirketlerde müşteri şikayetlerini değerlendiren ayrı birim olması arasında pozitif yönde yüksek bir ilişki belirlenmiştir.
- 4) Şikayetin kök nedenini ilk seferde yüksek oranda doğru bulan şirketlerin aynı anda şikayeti de ilk seferde doğru çözdüğü belirlenmiştir.
- 5) İşletmede ayrı bir şikayet değerlendirme biriminin olması ile yıllık gelen şikayetlerin tamamının kapanması arasında anlamlı bir ilişki belirlenmemiştir. Ayrı bir şikayet değerlendirme birimi olsa da olmasa da şirketler şikayetleri kapatmakta ve büyük oranda doğru çözmektedir.

6. TEŞEKKÜR

Çalışmamızı MMF2011D1 nolu proje ile destekleyen Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkürlerimizi sunarız.

7. KAYNAKLAR

1. Estelami, H., 2000. The Profit Impact of Consumer Complaint Solicitation Across Market Conditions, *Journal of Professional Services Marketing*, 20(1), 165- 195.
2. Strauss, J., Hill, D.J. 2001. Consumer Complaints By E-mail: An Exploratory Investigation of Corporate Responses and Customer Reactions. *Journal of Interactive Marketing*, 15(1), 63-73.
3. Mattila, A.S., Mount, D.J., 2003, The impact of selected customer characteristics and response time on E-complaint satisfaction and return intent. *Hospitality Management*, 135-145.
4. Seth, N., Deshmukh, S.G., 2004. Indian Institute of Technology, Service Quality Models: a review. New Delhi, India, and Prem Vrat Indian Institute of Technology, Roorkee, India, Revised July 2004. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 22(9), 2005. 913-949. Emerald Group Publishing Ltd. 0265-671X, DOI10.1108/02656710510625211.
5. Kulaklı, A., Birgün, S., 2005, Müşteri Merkezli Operasyonel Bilgi Yönetimi İçin Veri Yönetiminin Ölçülmesi, İTÜ İşletme Fakültesi, İşletme Mühendisliği Bölümü, 34357, Maçka, İstanbul, itüdergisi/bsosyal bilimler, 2(1), 37-48.
6. Demir, F.O., Kırdar, Y., 2012. Müşteri İlişkileri Yönetimi: CRM Review of Social, Economic & Business Studies, 7(8), 293-308. (fbe.emu.edu.tr /journal/ doc/78/16.pdf.
7. Chan, J.O., 2005. Toward a Unified View of Customer Relationship Management. *Journal of American Academy of Business*, Cambridge; Mar 2005; 6(1); ABI/INFORM Complete. 32-38.

8. Sharma, N.K, Drain, D., Cudney, E.A., Ragsdell, K.M., Paryani, K., 2008. Predicting Customer Expectation-Based Warranty Cost for Smaller The-Better and Larger- the-Better Performance Characteristics, 97-113.
9. Homburg,C., Fürst, A., Koschate, N., 2009. On the importance of complaint handling design: a multi level analysis of the impact in specific complaint situations. *J. of the Acad. Mark. Sci.* DOI .10.1007/s11747-009-0172- y. 1-51.
10. Henneberg, S.C., Thorsten G., Reppel, A., Ashnaib,B., Naude, P. 2009. Complaint management expectations: An Online Laddering analysis of small versus large firms. *Industrial Marketing Management* 38, 584–598.
11. Kayabaşı, A. 2010, Elektronik (online) Alışverişte Lojistik Faaliyetlere Yönelik. Müşteri Şikayetlerinin Analizi ve Bir Alan Araştırması Dumlupınar Üniversitesi, İşletme Araştırmaları Dergisi 2(2) (2010), 21-42.
12. Johnson, R., Mehra, S., 2002. Best-practice Complaint Management Academy of Management Executive. 16(4), 1-7.
13. Davidow, M., 2003. University of Haifa, Organisational Responses to Customer Complaints: What Works and What Doesn't. *Journal of Service Research*, 5(3). February 2003 225-250 DOI: 10.1177/1094.670502238917, 2003 Sage Publications.
14. Lee, C.H., Wang, Y.H., Trappey, A.J.C., 2014. Ontology-Based Reasoning for the Intelligent Handling of Customer Complaints. *Computers & Industrial Engineering*, 84 (2015),144–155.
15. Faed, A., Chang, E., Saberki, M., Hussain, O.K., Azadeh, A., 2015. Intelligent Customer Complaint Handling Utilising Principal Component and Data Envelopment Analysis (PDA), *Applied Soft Computing*, G Model ASOC-2800; No. of Pages 17. Model for Customer Complaint Management Source: *Marketing Science*, Vol. 7, No. 3 (Summer), 287-298 (12),
16. Einwiller, S.A., Steilen, S., 2015, Handling Complaints on Social Network Sites. An Analysis of Complaints and Complaint Responses on Facebook and Twitter Pages of Large US Companies. *Public Relations Review* 41 (2015), 195–204.
17. Liu, W.K., Yen, C.C., 2016. Optimizing Bus Passenger for Improved Public Sector Management. *Sustainability* 2016, 1319; 1-21
18. Strenitzerova, M., Gana, J., 2018, Customer Satisfaction and Loyalty as a Part of Customer-Based Corporate Sustainability in the Sector of Mobile Communications Services, *Sustainability*, 10(5), 1657.
19. İbiş, S., Kızıldemir, Ö., Çöp, S., 2019. Afyonkarahisar’da Faaliyet Gösteren Beş Yıldızlı Otel İşletmelerine Yönelik Yapılan Yorumların ve Şikayetlerin Değerlendirilmesi *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi Temmuz* (2019),18(7), ISSN: 1304-0278(1315-1324).
20. Bilir, N., Ergör, G., 2005, Saha Araştırmaları, Toraks Derneği Antalya File. toraks.org.tr/.../1513/O4QGBG64IKUZ70D. ppt Erişim tarihi:21.06.2012. 1-10.
21. Kalaycı, Ş., 2009. SPSS Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Teknikleri, Editör: Doç. Dr. Şeref Kalaycı, 4. Baskı, Asil Yayın Dağıtım Ltd.Şti. 426 sayfa.
22. Shukla, P, University of Brighton, Correlation and regression, *Marketing Research*,<http://www.pauravshukla.com/marketing/research-methods/correlationregression.pdf> 1-31.
23. Aktürk, Z., Acemoğlu, H., 2011. Örnek Problemler ve SPSS Çözümleri, 330 sayfa <http://www.aile.net/img/dosyaakturkzsaglikcalisanlariicinpratikistatistik.pdf>dokuman.
24. Fornell, C., Wernerfelt, B., 1988. A Model for Customer Complaint Managemnt Source: *Marketing Science*, 7(3). (Summer),287-298, Published by Informa.
25. Çekici, V. 2013. Müşteri Şikayet Değerlendirme Süreçleri İçin Kavramsal Bir Model ve Simülasyon Optimizasyon Yöntemi ile Değerlendirilmesi Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Kod no:1488, Adana-2013,247 sayfa, BAP No:MMF2011D1.
26. Berry, L., Parasuraman, A., 1997. Listening to the customer–The concept of a service–Quality information System. *Sloan Management Rewiew*, 65-76.

Endüstriyel Uygulamalarda Güneş Enerjisinden Termal Olarak Yararlanma

Burcu KOÇAK¹, Halime PAKSOY*¹

¹Çukurova Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 14.09.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Endüstride güneş enerjisi kullanımı ile fosil yakıtlara bağımlılık azalırken, verimlilik ve rekabet gücü artabilmektedir. Güneş enerjisinin endüstriyel uygulamalarda ekonomik olarak uygulanabilmesi için termal enerji depolama (TED) sistemlerinin kullanımı gereklidir. TED sistemleri endüstride güneş enerjisi uygulamalarının verimliliğini artırmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda TED sistemlerinin performansı kullanılan teknolojiye, endüstriyel süreç türüne ve uygulama sıcaklık aralığına bağlıdır. Bu çalışmada güneş enerjisi endüstriyel uygulamaları ve TED sistemleri ele alınmıştır. Güneş enerjisinin ve TED sistemlerinin entegre edilebileceği endüstriyel prosesler, güneş enerjisi teknolojileri, bunların sürdürülebilirlikleri araştırılmıştır. Süt pastörizasyon prosesi örnek alınarak, güneş enerjisi ve TED sistemi entegrasyonu incelenmiştir. Yıkıntı atıklarından geliştirilen duyuur ısı depolama malzemeleri ile dolu TED sistemi entegrasyonunda %52,5 verim sağlanabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, Endüstriyel uygulamalar, Termal enerji depolama, Süt pastörizasyon

Using Solar Thermal Energy in Industrial Applications

Abstract

Industrial productivity and competitiveness can increase with decreasing dependency on fossil fuels by using solar energy in the industry. Using TES together with solar energy is needed for cost-effective solar heat industrial applications. TES systems that are used in industrial solar applications can increase the energy efficiency in industry. Performance of thermal energy storage systems mainly depends on type of TES technology, industrial process and temperature levels of processes. This study is focused on solar heat industrial processes and TES systems. Suitable industrial processes for solar and TES systems, solar energy technologies and sustainability of TES were investigated. Integration of solar energy and TES system were analyzed in a milk pasteurization process as a case study. Energy efficiency of 52,5 % was achieved by integration of TES system filled with sensible thermal energy storage materials developed from demolition wastes.

Keywords: Solar Energy, Industrial applications, Thermal energy storage (TES), Milk pasteurization

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Halime PAKSOY, hopaksoy@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Türkiye'deki endüstriyel enerji tüketimi hızla artmakta olup, endüstriler toplam enerji tüketiminde %37'lik paya sahiptir [1]. Ancak endüstride enerji tüketiminde ağırlıklı olarak dış kaynaklı fosil yakıtların kullanılması, CO₂ salınımını artırmakla birlikte, ürünlerin birim fiyatlarını artırmakta ve küresel pazardaki rekabeti azaltmaktadır. Bu sebeple, endüstride güneş enerjisi uygulaması ve termal enerji depolama (TED) sistemleri entegrasyonunun önemi her geçen gün artmaktadır.

Türkiye'de güneş enerjisinin endüstride kullanımı sınırlı olup, 380 TWh'lik güneş enerjisi teknik potansiyelinin sadece %2'sinden yararlanılmaktadır. Bunun %91'i konutlar, %4'ü turizm sektörü, %3'ü ticari binalar ve %2'si endüstri için sıcak su üretiminde kullanılmaktadır [2]. Enerji, endüstriyel üretimlerde ürün maliyetlerinin %4-5'ini oluşturmaktadır [3]. Bu da endüstride enerji kullanım maliyetlerinin azaltılmasının önemini göstermektedir. Enerji ihtiyacının ancak %23'ü yerli kaynaklardan sağlanan Türkiye'de, güneş enerjisinden verimli bir şekilde yararlanılması hem ülke ekonomisine hem de çevreye önemli katkılar sağlayacaktır.

Endüstride enerji, üretim, montaj, sıcak su eldesi, proses ısıtma ve soğutma, bina ısıtma ve soğutma, aydınlatma gibi birçok faaliyetlerde kullanılabilir [4]. Endüstride tüketilen enerjinin yaklaşık %30'u gıda, kimya ve petrokimya endüstrilerinde kullanılmaktadır [5]. Enerji kullanımının en yoğun olduğu prosesler ise sterilizasyon, pastörizasyon, kurutma, hidrolize, damıtma ve buharlaşma, yıkama ve temizlik ve polimerizasyon gibi proseslerdir [6]. Sanayide 200°C'nin altındaki prosesler, özellikle gıda sektörü, güneş enerjisi kullanımı için uygundur. Prosesinin yaklaşık %90'ının 100-200 °C arasında olduğu yiyecek ve içecek endüstrisi güneş enerjisi uygulamaları için büyük potansiyele sahiptir [3].Güneş enerjisinin entegre edildiği endüstriyel uygulamalar çoğunlukla İspanya, Avusturya, İtalya, İsviçre gibi ülkelerde görülmektedir [3]. Türkiye'de yüksek potansiyel olmasına rağmen sanayide güneş enerjisi kullanımı yaygın değildir.

Literatürde güneş enerjisinin sanayiye entegrasyonu ile ilgili farklı çalışmalar bulunmaktadır. Kalogirou [6]'nın yaptığı bir çalışmada, 5 farklı kolektör türünün endüstride farklı proseslerdeki uygulamaları incelenmiş ve uygun kolektör türü ve proses sıcaklık aralığına göre yıllık enerji tasarrufunun 0,015 ila 0,028 £/kWh arasında olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Bolognese ve ark. [7] makarna endüstrisinde farklı kolektör tiplerinin entegrasyonunu simule ederek, karşılaştırma çalışması yapmışlardır. Buscemi ve arkadaşları [8] İtalya'da bir makarna endüstrisine doğrusal fresnel kolektör alanı ve beton TED sistemi entegre ederek makarna kurutma prosesinde 40% enerji verimliliği sağlamışlardır. Beath [9] Avustralya'da çeşitli alanlarda 2498 adet endüstriyel tesisi incelemiş, proses sıcaklıkları, endüstri tipleri, enerji kullanım karakteristikleri üzerine detaylı çalışma yapmıştır. Bu çalışmanın sonucunda proses sıcaklıkları 200°C'nin altında olan gıda, tekstil ve ağaç sanayinde güneş enerjisi kullanımının uygun olabileceği ve bu alanlarda doğal gaz tüketiminin azaltılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Sharma ve arkadaşları [10] Hindistan'da bir süt üretim tesisinin enerji tüketim dağılımını analiz edip, proseslerin %70'inin 50-200 °C arasında yer aldığı süt üretim tesisinin güneş enerjisi entegrasyonu için uygun olduğunu tespit etmişlerdir.

Güneş enerjisi, enerji maliyetlerini düşürmek için etkin bir kaynaktır. Ancak, güneş enerjisinin verimliliği mevsimlere ve günün farklı saatlerine göre değişkenlik göstermektedir. Güneş enerjisinin kesintili bir kaynak olması, endüstri uygulamaları için bir dezavantaj oluşturmaktadır. TED sistemleri, çeşitli sektörlerde ısıtma ve soğutma taleplerini karşılamak ve yenilenebilir enerji kaynaklarını sürekli ve etkin kullanmak için alternatif çözümler sunmaktadır [11]. Duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termo-kimyasal depolama olmak üzere 3 çeşit TED yöntemi bulunmaktadır. TED sistemleri daha çok binalarda ısıtma ve soğutma uygulamalarında kullanılmaktadır [12]. Yüksek sıcaklıktaki TED uygulamaları daha çok duyulur ısı yöntemiyle yapılmaktadır.

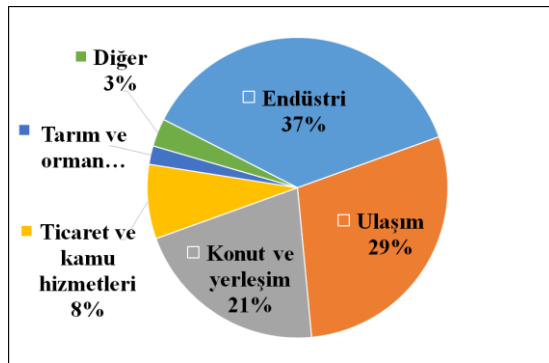
Bu çalışmanın amacı endüstride güneş enerjisinden yararlanacak sistemleri araştırarak, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak, endüstride verimliliği ve rekabet gücünü artırmaktır. Bu amaçla, güneş enerjisinden öncelikli olarak yararlanabilecek endüstriyel sektör ve prosesler belirlenmiş, güneş enerjisinin farklı endüstriyel proseslerde entegrasyonu için gerekli teknolojiler ve uygulama koşulları araştırılmıştır. Güneş enerjisinden yararlanmada kullanılacak termal enerji depolama sistemleri belirlenip, gıda endüstrisi örnek uygulamaları olarak süt pastörizasyon prosesinde enerji analizi yapılmış, güneş enerjisi ve TED sistemi entegrasyonunun teknik ve ekonomik uygulanabilirlikleri incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Teknik ve Ekonomik Uygulanabilirlik

2.1.1. Öncelikli Endüstriyel Sektör ve Prosesler

Uluslararası Enerji Ajansı'na göre, küresel enerji tüketimi son kırk yılda iki kattan fazla artmıştır. 1973 yılında 4661 Mtep enerji tüketimi 2017 yılında 9717 Mtep'e ulaşmıştır [13]. Şekil 1'e göre endüstri sektörü, dünya toplam enerji tüketiminin %37'sini oluşturmaktadır.



Şekil 1. Sektörlere göre enerji tüketim oranları [13]

Dünyada büyük endüstri grupları farklı türlere göre sınıflandırılmış, enerji tüketim payları Çizelge 1'de verilmiştir. Endüstriyel sektörlerde güneş enerjisinden yararlanma teknik potansiyelinin belirlenebilmesi için farklı proseslerin sıcaklık

gereksinimlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Çizelge 2'de farklı proseslerdeki sıcaklık gereksinimleri verilmiştir.

Çizelge 1. Dünya endüstri sektörü: endüstri türleri, büyük endüstri grupları ve enerji tüketim payları (EP) [14]

End. Tipi	End. Grubu	EP,%
Enerji-Yoğun İmalat	Gıda, kağıt hamuru ve kağıt, temel kimyasallar, rafine, demir ve çelik, demir dışı metaller, metal olmayan mineraller	%27
Enerji-Yoğun Olmayan İmalat	İlaç, boya ve kaplamalar, yapıştırıcılar, deterjanlar, elektrik ve elektronik endüstrisi	%39
İmalat Dışı	Tarım, ormancılık, balıkçılık, madencilik, inşaat	%34

Çizelge 2. Farklı prosesler için gerekli sıcaklık aralıkları [15]

Sektör	Proses Türleri	Sıcaklık Aralığı, °C
Yiyecek ve İçecek	Pastörizasyon	60-140
	Sterilizasyonu	40-140
	Kurutma	40-200
	Buharlaştırma	40-130
	Yıkama	30-200
Kimya	Biyokimyasal Reaksiyonlar	30-50
	Destilasyon	100-220
	Pişirme	90-110
	İnceltme	110-140
Kağıt	Ağartma	40-150
	Pişirme	110-180
	Kurutma	90-200
Plastik	Ön Isıtma	50-70
	Kurutma	50-150
Tekstil	Ağartma	40-100
	Boyama	40-130
	Kurutma	80-110
	Yıkama	50-110

IEA tarafından [13] verilen dünya enerji kaynaklı CO₂ emisyon değerleri incelendiğinde, 2017 yılında 33 milyar ton olan CO₂ emisyonunun yaklaşık 20%'sinden endüstrilerin sorumlu olduğu görülmektedir. Yenilenebilir enerjinin endüstriye entegre edilmesi ile zararlı emisyonların azaltılabileceği bilinmektedir. Örneğin, UNEP 2015 raporuna göre, bulunduğu bölgeye bağlı olarak, 1,4 MW (2000 m²)'lık bir güneş enerjisi sistemi, yaklaşık 175 ton CO₂ emisyonu tasarrufu sağlayabilmektedir.

Elde edilen enerji tüketim payları ve proseslerin sıcaklık verileri incelendiğinde, mevcut güneş enerjisi toplacılarıyla öncelikli olarak yiyecek, içecek ve tekstil sektörlerinin güneş enerjisinden yararlanmaya uygun olabileceği belirlenmiştir.

2.1.2. Güneş Enerjisi Teknolojileri ve Uygulama Koşulları

Endüstriyel güneş enerjisi uygulamalarında proses sıcaklık aralığına göre kullanılacak güneş enerjisi kolektör tipleri Çizelge 3'de listelenmiştir. Sistem maliyetleri kolektör tipine, boyutuna ve panel kalitesine göre değişebilmektedir. Firmaların internet sitelerinden derlenen verilere göre, kolektörlerin ortalama maliyet verileri Çizelge 4'deki gibidir.

Çizelge 3. Proses sıcaklık aralığına göre kolektör tipleri [6]

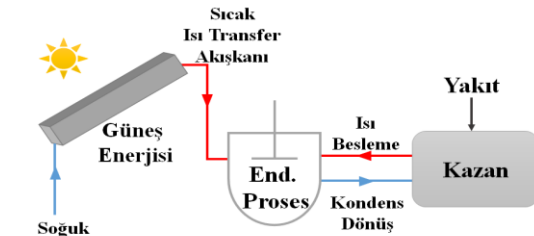
Sıcaklık Aralığı	Kolektör Tipi
80 °C'ye kadar	Güneşle hava ısıtıcı kolektör Düz plaka kolektör (FPC) Vakumlu tüp kolektör (ETC) Düz Plaka ve tüp kolektörler
150 °C'ye kadar	Şeffaf yalıtım malzemeli düz plaka kolektörler Çok camlı düz plaka kolektörler FPC İnert gaz ve ultra yüksek vakumlu tüp kolektörler
400 °C'ye kadar	Parabolik çanak kolektörler Parabolik oluklu kolektörler Doğrusal Fresnel kolektörler

Çizelge 4. Kolektör tip ve maliyetleri

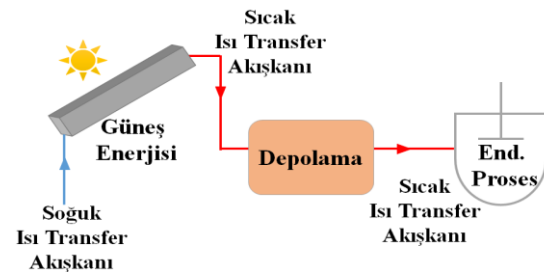
Kolektör Tipi	Marka	Fiyat
Güneşle hava ısıtıcı	Solar Engine	~700 \$/m ²
FPC	Sun Rain	~300 \$/m ²
ETC	Thermoflux	~220\$/m ²
Parabolik çanak	Dezhou Gaia	~100\$/m ²
Parabolik oluklu	Dezhou Gaia	~170 \$/m ²

Güneş enerjinin endüstriyel proseslere entegrasyonunda doğrudan proses seviyesinde entegrasyon ve/veya dolaylı entegrasyon yapılabilir. Doğrudan entegrasyonda güneş enerjisiyle ısıtılan buhar, hava, su veya yağ gibi ısı transfer akışkanları prosesde dolaşmaktadır. Dolaylı uygulamalarda ise buhar kazanları için besleme suyunun ön ısıtması, ısıtma, kurutucu ve evaporatör gibi ünitelerde uygulamalar yapılabilmektedir.

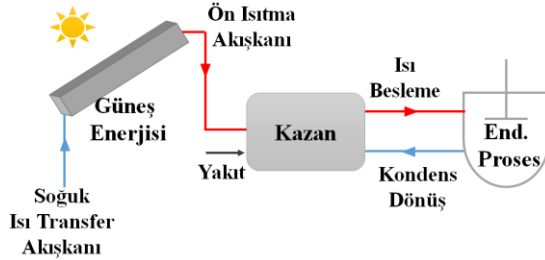
Şekil 2'de proses seviyesinde güneş enerjisinin doğrudan entegrasyonu, Şekil 3'de depolama ünitesi ile prosese doğrudan entegrasyon ve Şekil 4'te ise güneş enerjisinin buhar kazanı için besleme suyuna dolaylı entegrasyonu, IRENA 2015 teknoloji raporuna [15] göre yeniden çizilerek verilmiştir.



Şekil 2. Proses seviyesinde doğrudan entegrasyon [15]



Şekil 3. Depolama ünitesi ile doğrudan entegrasyon [15]



Şekil 4. Dolaylı entegrasyon [15]

2.1.3. Termal Enerji Depolama Sistemleri

Gizli ısı depolama, duyulur ısı depolama ve termokimyasal depolama olarak 3 çeşit termal enerji depolama yöntemi bulunmaktadır. Duyulur ısı depolama yönteminde maddenin sıcaklık değişiminde depoladığı ısıdan faydalanılırken, gizli ısı depolama yönteminde faz değiştiren maddelerin (FDM) faz değişimi esnasında alıp/verdikleri ısıdan faydalanılmaktadır. Termokimyasal depolama yönteminde ise kimyasal reaksiyonlar esnasında maddelerin depoladıkları ısıdan yararlanılmaktadır [16,17].

Kısa süreli depolamalarda daha çok istenilen sıcaklıkta faz değiştiren (katı-sıvı, katı-katı) çeşitli organik ve inorganik FDM'ler kullanılmaktadır. Bunlar arasında en yaygın kullanılanlar olarak su-buz, parafinler ve çeşitli tuz hidratları sayılabilir.

Uzun süreli depolamalarda ise daha çok Akiferde Termal Enerji Depolama (ATED), Kanallarda Termal Enerji Depolama (BTES), Yer altı mağaraları, Çukur ve Tanklarda Termal Enerji Depolama (CTES) gibi duyulur ısı depolama tekniklerinden faydalanılır [18]. Kısa süreli duyulur ısı depolamada dolgulu yataklar ve tanklar tercih edilmektedir. Bu sistemlerde alüminyum, taş, tuğla, magnezyumun gibi doğal malzemeler kullanılabilirdiği gibi, son yıllarda çeşitli atık ürünler de duyulur ısı depolama malzemesi olarak kullanılabilir.

Uygun termal enerji depolama yönteminin seçiminde proses türü ve sıcaklıkları önemli parametrelerdir. Termokimyasal depolama yöntemi halen araştırılmakta olan bir konu olup sanayide yaygın kullanımı bulunmamaktadır. Gizli

ısı depolama yöntemi, faz değiştiren maddelerin teknik zorlukları ve yüksek maliyeti nedeniyle, sanayide yaygın olarak kullanılmamakta, düşük sıcaklık aralığında bina uygulamalarında tercih edilmektedir. Duyulur ısı depolama teknolojileri ise yüksek sıcaklık aralığında ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir [17].

Bu sebeple çalışmanın bu aşamasında endüstriyel uygulamalar için duyulur ısı depolama sistemleri ve depolama malzemeleri üzerine odaklanılmıştır. Duyulur ısı depolama sistemlerinin entegre edilebileceği proses seçenekleri ve sıcaklık aralığı ise Çizelge 5'de listelenmiştir.

Çizelge 5. Duyulur ısı depolama sistemlerinin entegre edilebileceği endüstriyel prosesler ve sıcaklık aralıkları [15]

Sektör	Proses	Sıcaklık Aralığı, °C
Gıda	Kurutma	30-90
	Yıkama	60-90
	Pastörizasyon	60-80
	Kaynatma	95-105
	Sterilizasyon	110-120
	Isı kazanımı	40-60
İçecek	Yıkama	60-80
	Sterilizasyon	60-90
	Pastörizasyon	60-70
Kağıt	Piştirme ve kurutma	60-80
	Kazan besleme suyu ısıtma	60-90
	Ağartma	130-150
Metal	Elektrokaplama	30-80
Tekstil	Ağartma	60-100
	Boyama	70-90
	Kuruta	100-130
	Yıkama	40-80
	Dikme	160-180
	Presleme	80-100
Kimya	Proses Isıtma	120-180
	Su ön ısıtma	60-90
Plastik	Distilasyon	140-150
	Ayırma	200-220
	Kurutma	180-200

Çizelge 5'de görüldüğü üzere sanayide 200 °C'nin altındaki prosesler, özellikle gıda sektörü, güneş

enerjisi kullanımı için uygundur. Endüstriyel uygulamalarda ekonomik çözümler sağlanabilmesi için ucuz duyulur ısı depolama malzemelerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Literatürde araştırma yapılmış olan bazı duyulur ısı depolama malzemelerinin termal özellikleri Çizelge 6'da verilmiştir. Bazalt, alüminyum, karbon çeliği ve demir bilinen duyulur ısı depolama malzemeleri arasındadır. Ayrıca, son zamanlarda, madencilik ve metalurji endüstrisi yan ürünleri, asbest içeren atıklar (Kofalit) ve cürüf gibi endüstriyel atık ürünler yüksek sıcaklıktaki uygulamalar için geliştirilmektedir.

Çizelge 6. Duyulur ısı depolama malzemelerinin özellikleri

Malzeme	P, kgm^{-3}	Cp, $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	T, °C	Ref.
Su	1000	4190	<100	[19]
Beton	2200	850	<600	[20]
Silis	2500	0,90	<1000	[21]
Alüminyum	3350	902	<550	[22]
Bazalt	2644	770	<1000	[23]
Kofalit	3120	800	<1100	[24]
Cürüf	3500	930	<1000	[25]

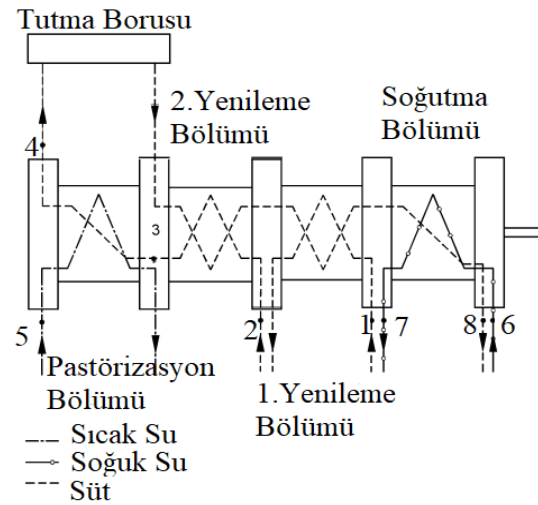
Ucuz ve enerji yoğunluğu yüksek depolama malzemelerinin kullanılması, düşük maliyetli ve yüksek verimli termal enerji depolama sistemleri için çok önemlidir. Bu nedenle, atık malzemelerin depolama malzemesi olarak kullanılması, depolama sistemlerinde daha iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Bu amaçla, bu çalışmada ele alınacak örnek endüstri uygulamasında, kentsel dönüşümde açığa çıkan yıkıntı atıklarından geliştirilen depolama malzemesi TED sisteminde değerlendirilecektir.

2.2. Endüstriyel Uygulama

Çalışmanın bu aşamasında süt endüstrisinde pastörizasyon prosesindeki enerji tüketimi ele alınarak, bu proste güneş enerjisi ve TED sistemi entegrasyonu incelenmiştir. Süt pastörizasyon prosesi, sütü minimum 100 °C'ye ısıtarak içerisindeki zararlı mikroorganizmaların %90-99'unun yok edildiği önemli bir prostedir. Süt pastörizasyon prosesine ilişkin veriler

Kazimirova'nın [26] süt pastörizasyon prosesinde enerji tüketimi ile ilgili yaptığı çalışmadan alınmıştır. Bu çalışmada, 20000 L/saat kapasiteli PPM 2010 AN pastörizasyon cihazı, santrifüj, homojenleştirme ve tutma borusu, şamandıralı dengeleme deposu, sıcak su tankı, sıcak su pompası, su buharı karıştırıcısı, bağlantı boruları ve armatürler, pastörizasyon sisteminin elemanlarıdır [26].

PPM 2010 AN Pastörizasyon cihazı 0,5 m² yüzey alanında 0,6-0,8 mm kalınlığında plakalardan oluşmaktadır. Plakalarda ters yönde 110 °C'ye kadar sıcak su geçişi olmaktadır [26]. Aynı cihazın soğutma bölümünde ise soğuk su girişi bulunmaktadır. Sistemde soğutma ünitesinde ısı geri kazanımı bulunmaktadır. Bu sayede ısıtma için harcanan enerjinin %82'si soğutma ünitesinden kazanılabilmektedir. Pastörizasyon cihazının şeması Şekil 5'deki gibidir.



Şekil 5. Pastörizasyon cihazının şematik gösterimi [26]

Şekil 5'de belirtilen numaralara karşılık sıcaklık ölçüm noktaları şöyledir;

- 1: Ham süt girişi (T_1)
- 2: Birinci ve ikinci yenileme bölümündeki süt sıcaklığı (T_2)
- 3: Pastörizasyon bölümü giriş süt sıcaklığı (T_3)
- 4: Pastörizasyon sıcaklığı ($T_4=T_p$)

- 5: Sıcak su giriş sıcaklığı (T_5)
 6: Soğuk su giriş sıcaklığı (T_6)
 7: Soğutma suyu çıkış sıcaklığı (T_7)
 8: Soğutma ünitesi çıkışında süt sıcaklığı (T_8)

Bu ölçüm noktalarındaki örnek sıcaklık ölçümleri Çizelge 7’de verilmiştir.

Çizelge 7. Pastörizasyon ünitesi sıcaklıkları [26]

Ölçüm Noktaları	Sıcaklıklar, °C		
	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm
1:	5,7	5,1	5,4
2:	48,2	48,0	48,0
3:	60,1	60,0	61,0
4:	72,4	72,2	72,1
5:	85,3	84,6	84,8
6:	1,5	1,6	2,1
7:	6,7	6,4	6,8
8:	4,6	4,8	5,3

Pastörizasyon cihazında ham sütün sıcaklığının (T_1) pastörizasyon sıcaklığına (T_p) çıkartılması için harcanan ısı enerjisi Eşitlik 1’den hesaplanır:

$$Q_1 = m_1 \cdot C_{p1} \cdot (T_p - T_1) \quad (1)$$

Ele alınan PPM 2010 AN süt pastörizasyon cihazında süt debisi (m_1) 5,72 kg/s, sütün 40 °C’de özgül ısısı (C_{p1}) 4300 J/kgC olarak alınmıştır. Süt ısıtmada kullanılan sıcak suyun debisi (m_{su}) 11,1 kg/s’dir. Suyun özgül ısısı 4186 J/kgC’dir [26].

Süt pastörizasyon prosesindeki ısı ihtiyacını karşılamak için doğal gaz kazan, güneş enerjisi ve TED entegrasyonlu güneş enerjisi olmak üzere 3 ayrı senaryo tasarlanıp, enerji-maliyet analizi yapılmıştır. 3 senaryo için de prosesin günde 16 saat, haftada 7 gün süre ile çalıştığı ve sistemin Adana bölgesinde yer aldığı varsayılmıştır.

2.2.1. Senaryo 1: Doğal Gaz Kazan Isıtma Sistemleri

Süt pastörizasyon prosesinde sıcak su ihtiyacı sıcak su tankından karşılanmaktadır. Senaryo 1’de, sıcak su tankının ısıtılması için gerekli enerjinin tamamı doğal gaz kazanından sağlanmaktadır.

%90 verimle çalışan doğal gaz kazan sistemi için enerji-maliyet verileri Çizelge 8’de verilmiştir.

Çizelge 8. Doğal gaz kazan sistemi verileri

Özellikler	Veriler	Kaynak
1 m ³ doğal gazın düşük ısıtma değeri	9,16 kW saat	[27]
Doğal gaz tüketim bedeli	1,393 TL/Sm ³	[28]
Emisyon faktörü, EF	1,92 kg/m ³	[29]

Doğal gaz kazan ısıtma sisteminde, doğal gazın yanması ile açığa çıkacak CO₂ emisyon miktarı Eşitlik 2’den hesaplanır [30].

$$CO_2 \text{ emisyonu} = \text{Isıtma talebi} \times \text{Çalışma saati} / \text{yıl} \times EF \quad (2)$$

2.2.2. Senaryo 2: Güneş Enerjisi ile Doğrudan Isıtma Sistemleri

Senaryo 2’de süt pastörizasyon prosesine güneş enerjisi sistemi entegre edilmiştir. Güneş enerjisi sistemi için, 200 °C sıcaklığa kadar çıkabilen, yüksek verimlilikte Solitem PTC1100 parabolik oluk tipi güneş kolektörü seçilmiştir. Solitem PTC1100 parabolik oluk tipi kolektörün özellikleri Çizelge 9’da verilmiştir.

Çizelge 9. Solitem PTC1100 parabolik oluk tipi güneş kolektörlerinin özellikleri [31]

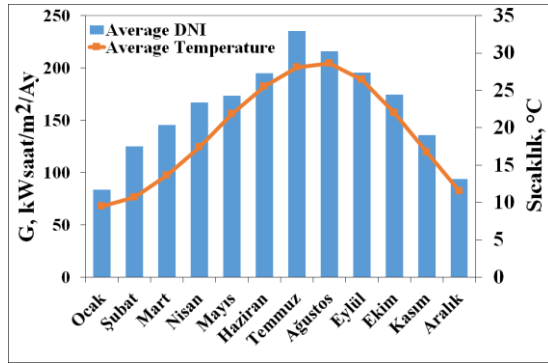
Özellikler	Değerler
Kollektör açıklığı, W_A	: 4,0 m
Kollektör boyu, L_A	: 5,0 m
Optik verim, $\eta_{0,hem}$	: 0,75
Isı kaybı katsayısı, a_1	: 0,1123 Wm ⁻² K ⁻¹
Sıcaklığa bağlı ısı kaybı katsayısı, a_2	: 0,00128 Wm ⁻² K ⁻²
Emici boru iç çapı	: 66 mm
Işın gelme açısı, θ	: 45 ° (varsayılan)
Işın gelme açısı düzeltme faktörü, K_{hem}	: 0,92 ($\theta:45^\circ$ için)

PTC 1100 parabolik oluk tipi kolektörde ısı transfer akışkanı olarak Therminol 66 sentetik yağ tercih edilmiştir.

IEA SHC Task 49 A.2.1 nolu teknik rapora göre, endüstriyel prosesler için kolektör alanı Eşitlik 3'den yapılır [32].

$$A = \frac{Q_{\text{proses}}}{G \eta_{0,\text{hem}} K_{\text{hem}} \cdot a_1 (T_{\text{yağ}} - T_{\text{çevre}}) - a_2 (T_{\text{yağ}} - T_{\text{çevre}})^2} \quad (3)$$

Işın gelme açısının, θ , 45° olduğu varsayılmıştır. Bu açıda, ışın gelme düzeltme faktörü (K_{hem}) 0,92'dir [33]. Eşitlik 3'te G , doğrudan ışınım değerini göstermektedir. Kolektör alanı ve kolektörden elde edilebilecek enerji hesabında, G değeri için Adana bölgesi doğrudan ışınım değerleri kullanılmıştır. Adana bölgesi için aylık ortalama ışınım değerleri ve güneşlenme süresi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Adana bölgesi için aylık ortalama ışınım miktarları ve güneşlenme süreleri [34, 35]

Güneş enerjisi sisteminin yatırım maliyeti hesabında kolektör birim fiyatları Bölüm 2.1.2'de araştırılmıştır. Sistemde bulunan pompa, boru, eşanjör, depolama tankı, yalıtım malzemesinin yaklaşık maliyetleri Çizelge 10'da verilmiştir.

Çizelge 10. Güneş enerjisi sistemi parçalarının ortalama maliyeti [36]

Sistem parçaları	Maliyet (\$)
Pompa	15100
Eşanjör	36300
Boru	2340
İzolasyon	4160

2.2.3. Senaryo 3: Depolama Ünitesi ile Doğrudan Entegrasyon

Senaryo 3'de güneş enerjisi sistemi, TED sistemi ile birlikte süt pastörizasyon prosesine entegre edilmiştir. Güneş enerjisi sistemi için Senaryo 2'deki veriler kullanılmıştır. TED sistemi dolgulu yatakta duyulur ısı depolama olarak tasarlanmıştır. Dolgulu yatak içerisinde, Türkiye'de son yıllarda artan kentsel dönüşümden açığa çıkan ve depolamasında zorluklar yaşanan yıkıntı atıkları, aday termal enerji depolama malzemesi olarak değerlendirilmiştir. Yıkıntı atıklarından duyulur ısı elde edebilmek için uygulanan prosesler ve elde edilen depolama malzemesinin termal ve mekanik özellikleri daha önceki çalışmada ele alınmıştır [37]. Bu çalışmaya göre; yıkıntı atıklarından geliştirilen duyulur ısı depolama malzemelerinin özellikleri Çizelge 11'deki gibidir.

Çizelge 11. Yıkıntı atıklarından geliştirilen depolama malzemelerinin özellikleri [37]

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	2855	Kgm ⁻³
Özgül Isı	1280@50-100 °C 1457@100-400 °C	Jkg ⁻¹ K ⁻¹
Mukavemet	5,4	MPa
İletkenlik	0,53	Wm ⁻¹ K ⁻¹

TED sistemi içerisinde ısı transfer akışkanı olarak Therminol 66 sentetik yağ kullanılmıştır. Sentetik yağın fiziksel ve termal özellikleri sıcaklıkla değişebilmektedir. Teknik veri sayfasına göre [38], Therminol 66 sentetik yağın sıcaklığa bağımlı yoğunluk ve özgül ısı bağıntıları Eşitlik 4 ve 5'de verilmiştir.

$$\rho_{\text{yağ}} = -0,614254 T - 0,000321 T^2 + 1020,62 \quad (4)$$

$$C_{p_{\text{yağ}}} = 0,003313 T + 0,000008970785 T^2 + 1,496005 \quad (5)$$

Senaryo 3'te entegre edilen dolgulu yatak TED sisteminin verimi %67 olup, maliyet verileri Çizelge 12'deki gibidir.

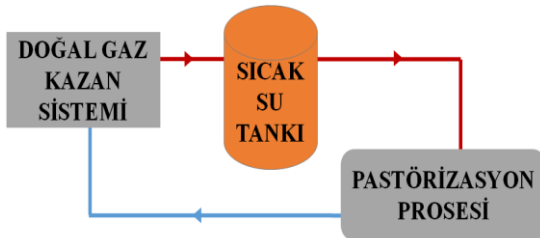
Çizelge 12. TED sistemi parçalarının ortalama maliyeti

Sistem parçaları	Maliyet	Kaynak
Depolama tankı	7000 \$ (4m ³) - 13000 \$ (12m ³)	[36]
Therminol 66 Isı transfer yağı	8,85 \$/kg	[31]
İnşaat atıklarından depolama malzemesi	0,0012 \$/kg	[39]

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Senaryo 1: Doğal Gaz Kazan Sistemleri

Senaryo 1'de pastörizasyon prosesinin ihtiyacı olan ısı doğal gaz kazan sisteminden karşılanmaktadır. Şekil 7'de doğal gaz kazan sisteminin pastörizasyon prosesine entegrasyonu gösterilmektedir. Doğal gaz kazanı pastörizasyon ünitesine sıcak su besleyen sıcak su tankını ısıtmaktadır.

**Şekil 7.** Doğalgaz kazan ısı besleme sistemi

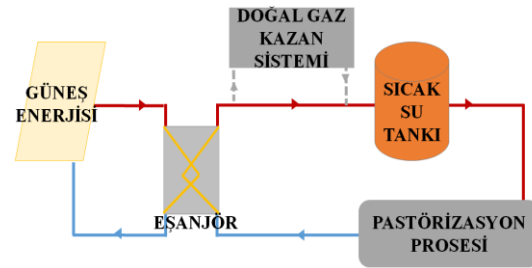
Ele alınan örnek süt pastörizasyon prosesinde, Eşitlik 1'e göre, süt ısıtmak için ihtiyaç duyulan enerji 1641 kW'tır. Soğutma ünitesinden sağlanan geri kazanım (%82) dikkate alındığında, pastörizasyon prosesine için gerekli olan ısı miktarı; 295 kW'tır. Ele alınan işletmede günde 16 saat çalışan pastörizasyon cihazı için gerekli enerji ihtiyacı günlük 4725 kWsaat/gün, yıllık 1700 MWsaat/yıl dır.

Süt ısıtmada kullanılan sıcak suyun debisi (m_{su}) 11,1 kg/s'dir. Suyun özgül ısısı 4186 J/kg°C'dir. Suyun çıkış sıcaklığı (t_{10}) eşitlik 1'den 78,9 °C hesaplanmıştır.

%90 kazan verimli doğal gaz ısıtma sistemlerinde, 1 m³ doğal gazın düşük ısıtma değeri ortalama 9,16 kWsaat'dir [27]. Buna göre, süt pastörizasyon prosesinin 1,7 GWsaat/yıl'lık enerji ihtiyacı için gerekli doğal gaz miktarı yıllık ortalama 185.700 Sm³/yıl'dır. Botaş 2020 yılı Ağustos ayı verilerine göre sanayi bölgesi için doğal gaz tüketim bedeli 1,393 TL/Sm³'dir [28]. Buna göre, ele alınan süt pastörizasyon prosesi için doğal gaz maliyeti 258.680 TL/yıl'dır. Eşitlik 2'ye göre, doğal gazın yanması ile doğaya salınacak CO₂ emisyon miktarı 357 ton/yıl'dır.

3.2. Senaryo 2: Güneş Enerjisi ile Doğrudan Isıtma Sistemleri

Senaryo 2'de süt pastörizasyon prosesi enerji ihtiyacı için güneş enerjisinin prosese doğrudan entegrasyonu incelenmiştir. Şekil 8'de güneş enerjisi sisteminin pastörizasyon prosesine entegrasyonu gösterilmektedir. Kolektörlerden gelen ısı transfer yağlarındaki ısı proses çıkış suyuna eşanjör ile aktarılmaktadır. Güneş enerjisinden gün içerisinde fayda sağlanabilecek süre güneşlenme süresi ile sınırlıdır. Doğal gaz kazan sistemi, güneş enerjisinin etkin kullanılmadığı saatlerde kullanılmak üzere yedek ısıtıcı olarak sistemde bulunmaktadır.

**Şekil 8.** Güneş enerjisi proses seviyesinde doğrudan entegrasyon

Soliterm PTC 1100 parabolik oluk tipi kolektörlerden oluşan alanın büyüklüğü, sistemden yüksek verim sağlanabilmesi için, güneşlenme süresi ve doğrudan ışıma değerinin en düşük olduğu Ocak ayına göre hesaplanmıştır. Şekil 6'da (Bölüm 2.2.2) verildiği üzere Adana bölgesinde Ocak ayında ortalama güneşlenme süresi 4,5 saat, kolektör yüzeyine gelen ortalama doğrudan ışıma

değeri (G) ise 83,48 kWsaat/m²/ay'dır. Minimum ışıma değeri ve güneşlenme süresi dikkate alındığında, Eşitlik 3'e göre, gerekli olan kolektör alanı 770 m²'dir. 770 m² güneş kolektöründen sağlanabilecek enerji miktarı 1030 MWsaat/yıl'dır. 90% eşanjör verimi dikkate alındığında, süt pastörizasyon prosesinin ihtiyacı olan 880 MWsaat/yıl enerji güneş enerjisinden karşılanabilmektedir. Güneşlenme süresi ve ışıma miktarının yüksek olduğu dönemlerde prosesin enerji ihtiyacından fazla gelen 150 MWsaat/yıl enerji ise sistemde depolama olmadığı için kullanılmamaktadır. Güneşin etkin olmadığı dönemlerde, süt pastörizasyon prosesi için geri kalan 900 MWsaat/yıl enerji ise doğal gaz kazan sisteminden sağlanmaktadır.

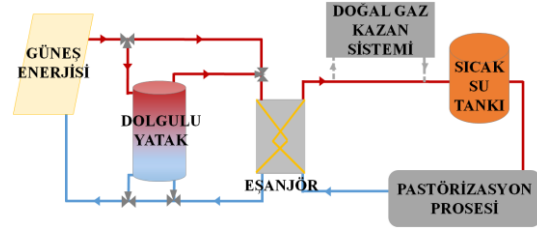
Bu senaryoda 770 m² parabolik oluk kolektör sistemi ile %46,6 enerji verimliliği sağlanabilmektedir. Sağlanan enerji verimliliği doğal gaz tüketimini de aynı oranda azaltarak, doğal gaz maliyetini ve CO₂ emisyonunu sırasıyla 138.200 TL/yıl ve 191 ton/yıl'a düşürmektedir.

Çizelge 4 ve Çizelge 10'daki maliyet verileri dikkate alındığında, süt pastörizasyon prosesi için entegre edilebilecek 770 m² parabolik oluklu güneş kolektör sisteminin maliyeti yaklaşık 1.380.000 TL'dir (\$/TL: 7,3 alınmıştır). Bu sistemde doğal gaz maliyetinden sağlanan yıllık 120.500 TL tasarruf ile güneş enerjisi yatırım maliyeti yaklaşık 11,5 yılda amorti edilebilmektedir.

3.3. Senaryo 3: Depolama Ünitesi ile Doğrudan Entegrasyon

Senaryo 3 ile dolgulu yatakta duyulur ısı depolama sistemi güneş enerjisine entegre edilmiştir. Şekil 9 güneş enerjisinin prosese TED sistemi ile doğrudan entegrasyonunu göstermektedir.

Senaryo 3, Senaryo 2'de olduğu gibi 770 m² PTC1100 parabolik oluk tipi kolektör ile tasarlanmıştır. Senaryo 2'de kayıp olarak belirtilen 150 MWsaat/yıl enerji, bu senaryoda dolgulu yatak depolama tankında depolanmaktadır.



Şekil 9. Depolama ünitesi ile doğrudan entegrasyon

%67 depolama tankı verimi dikkate alındığında, TED sisteminden 100 MWsaat/yıl enerji güneşin etkin olmadığı saatlerde tekrar prosese kazandırılabilir. Bu sayede, enerji verimliliği 46,6%'dan 52,5%'e çıkarılmaktadır. Sağlanan enerji verimliliği ile doğal gaz maliyeti ve CO₂ emisyonu sırasıyla 123.000 TL ve 169 ton/yıl'a düşmektedir.

TED sisteminde depolanan ısı miktarı Eşitlik 6 ve 7'de gösterildiği gibi dolgulu yatak içinde yer alan depolama malzemesi, ısı transfer yağı ve depolama tankını oluşturan diğer malzemelerin (çelik tank vb) depoladıkları toplam enerjidir [40].

$$Q_{\text{sistem}} = Q_{\text{dm}} + Q_{\text{yağ}} + Q_{\text{tank}} \quad (6)$$

$$Q_{\text{sistem}} = (V_{\text{tank}} * (1-\epsilon) * \rho_{\text{dm}} * C_{p_{\text{dm}}} * \Delta T_{\text{dm}}) + (V_{\text{tank}} * \epsilon * \rho_{\text{yağ}} * C_{p_{\text{yağ}}} * \Delta T_{\text{yağ}}) + (m_{\text{tank}} * C_{p_{\text{tank}}} * \Delta T_{\text{tank}}) \quad (7)$$

%30 boşluk oranında yıkıntı atıklarından geliştirilen depolama malzemeleri ile dolu depolama tankında, Therminol 66 sentetik yağı ısı transfer akışkanı olarak kullanılmıştır. Eşitlik 7'ye göre, yatak boşluk oranı, depolama malzemesi ve yağ özellikleri dikkate alındığında, 150 MWsaat/yıl kapasiteli depolama tankının hacmi 4 m³ olmalıdır. TED sisteminin özellikleri Çizelge 13'te verilmiştir.

Özellikleri verilen bu TED sisteminin ısı depolama kapasitesi günlük 417 kWsaat olup, güneşin etkin olmadığı saatlerde süt pastörizasyon ünitesinin enerji ihtiyacına katkı sağlayabilecektir.

Çizelge 13. TED sistem parametreleri

TED sistem özellikleri	Değer	Birim
Depolama Tankı Çapı, D_T	1,2	m
Depolama Tankı Yüksekliği, h_T	3,6	m
Duyulur ısı depolama malzemesi yoğunluğu, ρ_{dm}	2180	Kg/m^3
Duyulur ısı depolama malzemesi özgül ısı, C_{pdm}	1,457	kJ/kgC
Isı transfer yağı yoğunluk, $\rho_{vağ}$	892,8@ 175°C	Kg/m^3
Isı transfer yağı özgül ısı, $C_{pvağ}$	2,103@ 175 °C	kJ/kgC
Yatak boşluk oranı, ϵ	0,30	-
En yüksek sıcaklık, T_{max}	200	°C
En düşük sıcaklık, T_{min}	100	°C

Çizelge 4, 10 ve 12'deki maliyet verilerine göre, Senaryo 3'te ele alınan 770 m² güneş kolektör alanı ve 4 m³ hacimli TED sisteminin toplam maliyeti 1.488.000 TL'dir. Bu sistemde TED maliyeti 109.800 TL olup, bunun 58.600 TL'sini yüksek birim fiyatı nedeni ile Therminol 66 ısı transfer yağı oluşturmaktadır. Bu sistemde doğal gaz maliyetinden sağlanan 135.800 TL/yıl tasarruf ile TED sistemi entegre edilmiş güneş enerjisi yatırımı yaklaşık 11 yılda kendini amorti edebilmektedir.

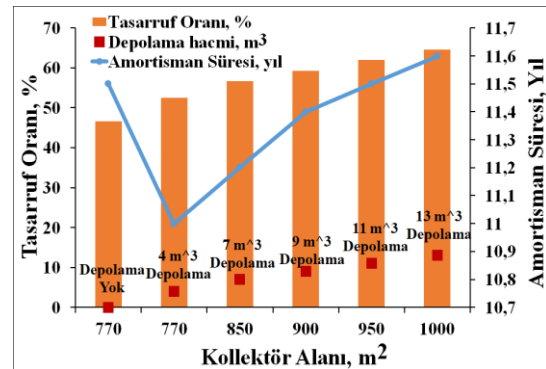
İncelenen senaryoların çevresel ve maliyet analizleri Çizelge 14'de özetlenmiştir. Senaryo 3'ün hem ekonomik hem de CO₂ salınımların azaltımı bakımından en önemli seçenek olduğu görülmektedir.

Çizelge 14. Örnek gıda uygulaması senaryolarının karşılaştırılması

Senaryolar	1	2	3
Enerji tüketimi (TL/yıl)	259.000	138.000	123.000
CO ₂ salınımı, (ton/yıl)	357	191	169
Tasarruf, (%)	-	46,6	52,5
Amortisman süresi (yıl)	-	11,5	11

TED sistemi entegrasyonlu güneş enerjisi sistemlerinde sağlanan tasarruf ve yatırım maliyeti

kolektör alanı ve TED hacmine göre değişebilmektedir. Senaryo 3, farklı güneş kolektör alanı büyüklüğüne göre incelenmiş, sağlanan tasarruf ve yatırım maliyetindeki değişim Şekil 10'da gösterilmiştir. Sistemde güneş enerjisi kolektör alanı ve buna bağlı olarak TED hacmi artırılarak tasarruf oranı artırılabilir. Ancak beraberinde amortisman süresi de artmaktadır. Senaryo 3'te 770 m² kolektör alanı ve 4 m³ depolama hacmi ile sağlanan 52,5% tasarruf, 1000 m² kolektör alanı ve 13 m³ depolama hacmi ile 60%'ın üzerine çıkabilmektedir. Benzer şekilde, Tsuc ve arkadaşları [41]'nin Meksika'da yaptığı bir çalışmada parabolik oluk tipi kolektörlerin endüstriyel proseslere entegrasyonunda proses türü, yedek ısıtıcı türü, iklim türü, kolektör alanı ve depolama kapasitesine bağlı olarak 40-80% arası enerji verimliliği sağlanabileceğini belirtmişlerdir.

**Şekil 10.** Kolektör alanına göre tasarruf oranı ve amortisman süresindeki değişim

4. SONUÇ

Bu çalışmada, endüstride güneş enerjisinin farklı proseslerde uygulanabilmesi için gerekli teknolojiler araştırılmıştır. Güneş enerjisinden öncelikli olarak yararlanılabilecek endüstriyel sektörler ve prosesler belirlenmiştir. Özellikle proseslerin %90'ının 200 °C'nin altında olduğu gıda ve tekstil endüstrileri güneş enerjisi uygulamaları için en uygun endüstri dalları olarak belirlenmiştir. Çalışmada, duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal ısı depolama sistemleri araştırılmış ve gerek kolay teknolojisi gerekse ekonomik uygulanabilirliği açısından

duyulur ısı depolama yöntemi endüstriyel uygulamalarda en uygun yöntem olarak belirlenmiştir.

Endüstride güneş enerjisi ve TED sistemlerinin entegrasyon yöntemleri belirlenmiştir. Güneş enerjinin endüstriyel proseslere entegrasyonunda doğrudan proses seviyesinde entegrasyon, TED sistemi ile doğrudan entegrasyon ve/veya dolaylı entegrasyon yapılabileceği tespit edilmiştir.

Örnek endüstri uygulaması olarak gıda endüstrisinde süt pastörizasyon prosesi incelenmiştir. Süt pastörizasyon prosesinde ısı ihtiyacının karşılanması için 3 örnek entegrasyon senaryosu sunulmuştur. Bu yöntemler şöyledir:

1. Doğal gaz kazanı ısıtma sistemleri
2. Güneş enerjisi ile doğrudan ısıtma sistemleri
3. Depolama ünitesi ile doğrudan entegrasyon

Bu sistemlerin birbiri ile karşılaştırıldığında, doğal gaz kazan sistemleri 259.000 TL/yıl ile en yüksek enerji tüketim masrafına sahiptir. Doğal gaz tüketim miktarının yüksek olması sebebi ile CO₂ salınımı diğer senaryolara göre çok yüksektir. Amortisman süreleri arasında büyük fark bulunmamasına rağmen, gerek tasarruf oranının yüksek olması gerekse CO₂ salınımının düşük olması sebebi ile TED entegrasyonlu Senaryo 3 endüstriyel uygulamalarda sürdürülebilir faydalar sağlamaktadır.

Bu sonuçlar endüstride güneş enerjisinin termal enerji depolama sistemleriyle beraber kullanıldığında çevreyi koruyan, düşük maliyetli ve sürdürülebilir enerji kaynağı olabildiğini göstermektedir. Özellikle endüstride artan enerji maliyetlerine çözüm sunarak, ürünlerin küresel pazarda yer almasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca dışa bağımlı olmayan yerel kaynakların kullanılması enerji güvenilirliği ve ülke ekonomisine katkı açısından da önemlidir.

Bu çalışmada ele alınan TED sisteminde yıkıntı ve inşaat atıklarından elde edilen duyulur ısı depolama malzemesinin kullanımı ile atık malzemelerin değerlendirilip doğal kaynakların korunabildiği çevreci ve ekonomik sistemlerin

kurulabileceği görülmektedir. %30 yatak boşluk oranlı TED sisteminde kullanılan Therminol 66 ısı transfer yağı, yüksek birim fiyatı nedeni ile TED sistemi toplam maliyetinin yarısından fazlasını oluşturmaktadır. Bu durum, dolgulu yatak TED sistemlerinde ucuz ve sürdürülebilir depolama malzemelerinin kullanımı ile ısı transfer yağı kullanım miktarının azaltılmasının önemini gözler önüne sermektedir. İleriki çalışmalar için yüksek maliyetli ısı transfer yağları yerine, düşük maliyetli farklı ısı transfer akışkanları üzerine araştırmalar yapılması önerilmektedir.

5. TEŞEKKÜR

“Endüstriyel uygulamalarda güneş enerjisinden termal olarak yararlanma” başlıklı FBA-2017-6366 bireysel projeye verdiği destekten ötürü, “Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimine” teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. International Energy Agency, Key World energy statistics, 2018.
2. Enerji Verimliliği Çevresi ve Daire Başkanlığı, Yenilenebilir enerji, <http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir.aspx> (Erişim Tarihi:07.01.2020).
3. Lauterbach, C., Schmitt, B., Jordan, U., Vajen, K., 2012. The Potential of Solar Heat for Industrial Processes in Germany, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 5121-5130.
4. Ramos, C., Ramirez, R., Beltran, J., 2014. Potential Assessment in Mexico for Solar Process Heat Applications in Food and Textile Industries, Energy Procedia 49, 1879-1884.
5. Baniassadi, A., Momen, M., Amidpour, M., 2015. A New Method for Optimization of Solar Heat Integration and Solar Fraction Targeting in Low Temperature Process Industries, Energy 90, 1674-1681.
6. Kalogirou, S., 2003. The Potential of Solar Industrial Process Heat Applications, Applied Energy 76, 337-361.
7. Bolognese, M., Viesi, D., Bartali, R., Crema, L., 2020. Modeling Study for Low-carbon Industrial Processes Integrating Solar Thermal

- Technologies. A Case Study in the Italian Alps: The Felicetti Pasta Factory, *Solar Energy*, 208, 548-558.
8. Buscemi, A., Panno, D., Ciulla, G., Beccali, M., Lo Brano, V., 2018. Concrete Thermal Energy Storage for Linear Fresnel Collectors: Exploiting the South Mediterranean's Solar Potential for Agri-food Processes, *Energy Conversion and Management*, 166, 719-734.
 9. Beath, A.C., 2012. Industrial Energy Usage in Australia and the Potential for Implementation of Solar Thermal Heat and Power, *Energy*, 43, 261-272.
 10. Sharma, A.K., Sharma, C., Mullick, S.C., Kandpal, T.C., 2017. Potential of Solar Industrial Process Heating in Dairy Industry in India and Consequent Carbon Mitigation, *Journal of Cleaner Production*, 140, 714-724.
 11. Paksoy, H.Ö., 2007. Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption Fundamentals, Case Studies and Design, (Editor: Paksoy H.Ö.), Part of the NATO Science Series, ISBN 978-1-4020-5290-3, 234, 428, Springer, Dordrecht.
 12. Konuklu, Y., Ostry, M., Paksoy, H.O., Charvat P., 2015. Review on Using Microencapsulated Phase Change Materials in Buildings, *Energy and Buildings*, 106, 134-155.
 13. IEA, International Energy Agency, 2019a. World Energy Balances Overview, <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview> (Erişim Tarihi:07.01.2020)
 14. EIA, International Energy Outlook, 2016, DOE/EIA-0484(2016), [www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf). (Erişim Tarihi:07.01.2020)
 15. IRENA, Solar Heat for Industrial Processes Technology Brief, 2015, http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_ETSAP_Tech_Brief_E21_Solar_Heat_Industrial_2015.pdf, (Erişim Tarihi: 26.01.2020)
 16. Alva, G., Liu, L., Huang, X., Fang, G., 2017. Thermal Energy Storage Materials and Systems for Solar Energy Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 693-706.
 17. Palacios, A., Barreneche, C., Navarro, M.E., Ding Y., 2020. Thermal Energy Storage Technologies for Concentrated Solar Power. A review from a materials perspective, *Renewable Energy*, 156, 1244-1265, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.127>
 18. IEA-International Energy Agency, 2015. TCP on Solar Heating and Cooling, Task 45, Seasonal Thermal Energy Storage: Report on State of the art and Further Necessary R&D, (Erişim tarihi: 01.08.2020).
 19. Ayappan, S., Mayilsamy, K., Sreenarayanan, V.V., 2016. Performance Improvement Studies in a Solar Greenhouse Drier Using Sensible Heat Storage Materials. *Heat Mass Transf.*, 52, 459-467.
 20. Prasad, L., Muthukumar, P., 2013. Design and Optimization of Lab-scale Sensible Heat Storage Prototype for Solar Thermal Power Plant Application. *Solar Energy*, 97, 217-229.
 21. Bruch, A., Fourmigue, J.F., Couturiebr, R., 2014. Experimental and Numerical Investigation of a Pilot-scale Thermal Oil Packed Bed Thermal Storage System for CSP Power Plant, *Solar Energy*, 105, 116-125.
 22. Cascetta, M., Cau, G., Puddu, P., Serra, F., 2015. A Study of a Packed-bed Thermal Energy Storage Device: Test Rig, Experimental and Numerical Results, *Energy Procedia* 81, 987-994.
 23. Tiskatine, R., Aharoune, A., Bouirden, L., Ihlal, A., 2017. Identification of Suitable Storage Materials for Solar Thermal Power Plant Using Selection Methodology. *Applied Thermal Engineering*, 117, 591-608.
 24. Calvet, N., Gomez, J.C., Faik, A., Roddatis, V.V., Meffre, A., Glatzmaier, G.C., Doppiu, S., Py, X., 2013. Compatibility of a Post-industrial Ceramic with Nitrate Molten Salts for Use as Filler Material in a Thermocline Storage System, *Applied Energy*, 109, 387-393.
 25. Motte, F., Falcoz, Q., Veron, E., Py, X., 2015. Compatibility Tests Between Solar Salt and Thermal Storage Ceramics from Inorganic Industrial Wastes, *Applied Energy*, 155, 14-22.
 26. Kazimirova, V., 2013. Heat Consumption and Quality of Milk Pasteurization, *Acta Technologica Agriculturae*, 16, 55-58.
 27. Meyers, S., Schmitt, B., Chester-Jones, M., Sturm, B., 2016. Energy Efficiency, Carbon Emissions and Measures Towards Their

- Improvement in the Food and Beverage Sector For six European Countries, *Energy*, 104, 266-283.
28. www.botas.gov.tr (Erişim Tarihi: 17.08.2020)
29. EPA- United States Environmental Protection Agency, <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch01/final/c01s04.pdf> (Erişim tarihi: 12.06.2020)
30. Sivasakthivel, T., Murugesana, K., Sahoo, P.K., 2012. Potential Reduction in CO₂ Emission and Saving in Electricity by Ground Source Heat Pump System for Space Heating Applications-A Study on Northern Part of India, *Procedia Engineering* 38, 970-979.
31. Horta, P., 2015. Process Heat Collectors: State of the Art and Available Medium Temperature Collectors. Technical Report A.1.3, IEA SHC Task 49, 33.
32. Giovenetti, F., Horta, P., 2016. Comparison of Process Heat Collectors with Respect to Technical and Economic Conditions. IEA SHC Task 49 Technical Report A.2.1, 36.
33. Fischer, S., Kovacs, P., Lampe, C., Serrats E.M., 2013. IEA-SHC TASK 43: Solar Rating and Certification Procedures-White Paper on Concentrating Collectors, International Energy Agency (IEA), Technical report, 74, 2013.
34. Climate-Data, <https://tr.climate-data.org/asya/tuerkiye/adana/adana-239/#climate-graph> (Erişim tarihi: 01.06.2020)
35. Global solar atlas, www.globalsolaratlas.info (Erişim tarihi: 01.06.2020)
36. Costo, A.A., 2016. Integration of a Concentrating Solar Thermal System in an Expanded Cork Agglomerate Production Line. *Yüksek Lisans Tezi, Tecnico Lisboa*, 92, 2016.
37. Koçak, B., Paksoy, H., 2019. Using Demolition Wastes from Urban Regeneration as Sensible Thermal Energy Storage Material. *Int J Energy Res.*, 43, 6454-6460.
38. Therminol 66 teknik veri sayfası, <https://www.therminol.com/product/71093438> (Erişim tarihi: 01.06.2020)
39. Kocak, B., Fernandez, A.I., Paksoy, H., 2021. Benchmarking Study of Demolition Wastes with Different Waste Materials as Sensible Thermal Energy Storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 219, 110777.
40. IEA-ECES, 2018. Applications of Thermal Energy Storage in the Energy Transition-Benchmarks and Developments, [Gibb et al., German Aerospace Center (DLR)], IEA Technology Collaboration Programme on Energy Conservation through Energy Storage (IEA-ECES), 154.
41. Tzuc, O.M., Bassam, A., Ricalde, L.J., Jaramillo, O.A., Flota-Bañuelos, M., Soberanis, M.A.E., 2020. Environmental-economic Optimization for Implementation of Parabolic Collectors in the Industrial Process Heat Generation: Case Study of Mexico, *Journal of Cleaner Production*, 242, 118538.

Killi Zeminlerin Donma-Çözülme Davranışlarında Cam Atık Çamurunun Etkisi

Barış MAHMUTLUOĞLU¹, Baki BAĞRIAÇIK^{*2}

¹Mersin Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Mersin
²Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 22.09.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Son yıllarda, atık malzemelerin ekosistem için ciddi bir tehlike oluşturması sebebiyle, birçok sektör, bu malzemelerin farklı alanlarda kullanılabilirliğini sorgulamaya başlamıştır. Bu bağlamda, araştırmacılar, atıkların zemin iyileştirme uygulamalarında da değerlendirilebileceğini, yapmış oldukları çalışmalarla vurgulamışlardır. Cam atık çamuru (CAÇ) ise, cam üretimi için kullanılan hammaddenin işlenmesi sırasında ortaya çıkan bir atıktır. Bu atık, doğada ciddi miktarlarda birikmektedir. Literatürde, bu atığın kullanılmasına yönelik çalışmalar çok kısıtlıdır. Bu çalışmada ise, cam atık çamuru (CAÇ) ve çimentonun (ÇMT), kil bir zeminin dayanım ve konsolidasyon parametrelerine etkisi, donma-çözülme davranışı altında araştırılmıştır. Donma-çözülme etkisi altında, CAÇ ilavesiyle, kil zeminin daha kararlı bir hale geldiği, zeminin dayanım parametrelerinin arttığı ve konsolidasyon davranışlarında ise iyileşmelerin olduğu gözlemlenmiştir. Buna ilaveten, çimento eklenmesi ile de, bu iyileşmelerin daha da arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Zemin iyileştirme, Cam atık çamuru, Donma-çözülme, Serbest Basınç Mukavemeti, Konsolidasyon

Effect of Glass Waste Sludge on the Freezing-Thawing Behavior of Clayey Soils

Abstract

In recent years, since waste materials constitute a serious degree of hazard to the eco-system, several sectors have started to question the usability of these materials in different fields. In this regard, researchers have pointed out by means of the performed studies that wastes can also be utilized in soil improvement applications. Glass waste sludge (GWS) is a waste generated during the processing of the raw material used for glass production. This waste accumulates in serious amounts in nature. Studies on the use of this waste are very limited in the literature. In this study, the effect of glass waste sludge (GWS) and cement (CMT) on the strength and consolidation parameters of a clay soil was investigated under freeze-thaw behavior. Under the effect of freezing-thawing, with the addition of GWS, the clay soil

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Baki BAĞRIAÇIK, bbagriacik@cu.edu.tr

became more stable, strength parameters increased and consolidation behavior improved. In addition, these improvements have been found to be further enhanced by the addition of cement.

Keywords: Soil improvement, Glass waste sludge, Freezing-thawing, Unconfined compressive strength, Consolidation

1. GİRİŞ

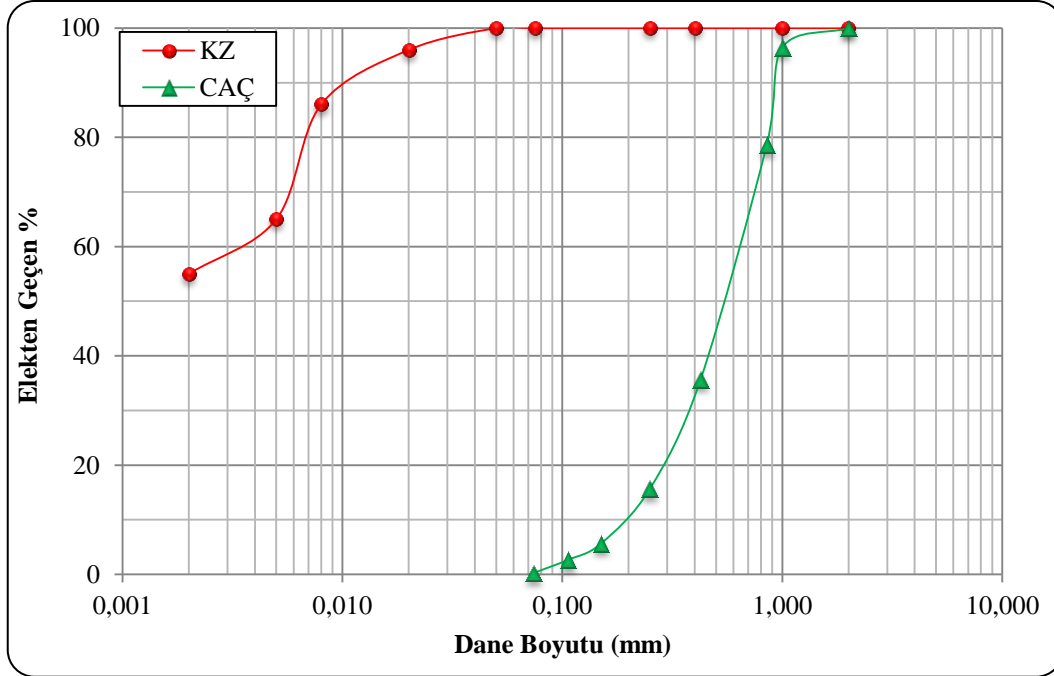
Son yıllarda, atık malzemelerin bertaraf edilmeleri önemli gündem maddelerinden biri haline gelmiş durumdadır. Çevresel koruma, atık malzemelerin depolanması, dönüştürülmesi, imha edilmesi ve vergi masrafları bu atıklarla ilgilenmenin önemini gözler önüne sermektedir [1-5]. Bu sebeplerle, birçok sektör, ekosistemin kirlenmesini engellemek ve ilgili ağır vergi ve ücretleri düşürerek ekonomiyi canlandırmak adına, bu malzemeleri kendi bünyelerinde kullanma yoluna gitmeye başlamışlardır. Geoteknik mühendisleri, atık malzemelerin zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılabilirliğini sürekli sorgulamakta, bu malzemelerin geleneksel güçlendirme katkılarının yerine geçebilme durumlarını sürekli irdelemektedirler. Bu bağlamda, birçok atık malzemenin gerek tek başlarına gerekse diğer atık malzemeler ile kullanımının, zeminlerin yükler altındaki davranışlarını nasıl etkileyeceğini araştırmaktadırlar. Böylece, hem bu atık malzemelerin ekosisteme zararları indirgenmiş, hem de pahalı kimyasal katkı malzemelerinin karışımlardaki oranları düşürülmüş olacağı için ekonomik bağlamda da ciddi bir gelişme kaydedilmiş olacaktır.

Zemin iyileştirme çalışmaları kapsamında, birçok araştırmacı, atık malzemelerin zeminlerde kullanılabilme potansiyellerini araştırmışlardır. Örneğin, Lin ve arkadaşları [6] tarafından, atık su arıtma çamuru külü ve uçucu külün, yumuşak killi zeminlerin iyileştirilme çalışmalarında değerlendirilebileceği deneysel olarak ispatlanmıştır. Ayrıca, atık su arıtma çamuru külünün, uçucu küle alternatif bir atık malzeme olduğu gösterilmiştir. Ayodele ve arkadaşları [7] ile Zhan ve arkadaşları [8], yürütmüş oldukları çalışmalarda, zeminlerin mukavemet parametrelerinin, atık su arıtma çamuru eklenmek suretiyle dikkat çekici şekilde iyileştirilebildiğini

gözlemlemişlerdir. Başka bir deneysel çalışmada, taban külü olarak bilinen başka bir atık malzeme, Güllü [9] tarafından, ince daneli zeminlere farklı oranlarda eklenmiş ve ilgili zeminlerin serbest basınç mukavemeti, şekil değiştirme oranı, elastik özellikleri ve enerji emme kapasitelerinin ne derece etkilendiği araştırılmıştır. Çalışma sonunda, %30 atık eklenmesi durumunda en iyi sonuçların elde edildiği ifade edilmiştir. Ayininuola ve Ayodeji [10] tarafından, %7 oranında atık su çamuru külünün zeminlere ilave edilmesinin, çimentolaşma etkisi oluşturarak zemin tanelerini birbirlerine bağladığı ve bu şekilde zeminlerin kesme mukavemet parametrelerinin iyileştirilebildiği gösterilmiştir. Fauzi ve arkadaşları [11] tarafından, killi zeminlere, plastik yüksek yoğunluklu polietilen atıklar ile kırılmış cam parçaları karıştırılmıştır. Çalışma sonunda, karışımlardaki atık yüzdeleri arttırıldıkça, numunelerin CBR değerlerinin yükseldiği belirlenmiştir. Şeker kamışı küspesi külü ve sönmüş kireç, Hasan ve arkadaşları [12] tarafından, karayolu temel-altı zemini stabilizasyonunda değerlendirilmiş ve zeminin mukavemet değerlerinin iyileştiği saptanmıştır. Brooks [13] tarafından yürütülen bir çalışmada, zemin örneklerine uçucu kül ve mısır külü ilave edilmiş ve numunelerin mukavemet değerlerinde yükselmeler olduğu belirlenmiştir. Ramakrishna ve Pradeepkumar [14] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, zemin örneklerine çimento ile pirinç kabuğu eklenmiştir. Sonuçta, zeminlerin serbest basınç mukavemeti, CBR, plastiklik özellikleri iyi yönde değişirken bu tür atıkların kullanımının, ilgili uygulamaların ekonomilerini de iyileştirilebileceği ifade edilmiştir. Kireç, kalsiyum klorür ve pirinç kabuğu külü, Sharma ve arkadaşları [15] ile Ramakrishna ve Pradeepkumar [14] tarafından killi zeminlerin stabilizasyonunda kullanılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Başka bir katkı maddesi olan obsidyenin farklı sektörlerde kullanılması ile de birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yürütülmüştür [16-18].

Volkanik bir kayaç türü olan obsidyen, zeminlerin iyileştirilmesinde de yaygınca kullanılmaktadır [19,20]. Ustabaş ve Kaya [3], bu malzemenin, çimento içerisinde puzolan bir malzeme olarak kullanılabilceğini belirtmişlerdir. Urhan [2] tarafından, bünyesinde obsidyen bulunduran perlitin, sık ve düzenli atom örgüleri içeren bir yapıya sahip olması nedeniyle, çözünme etkilerine karşı dirençli olduğu ifade edilmiştir. Uçucu kül bazlı jeopolimerlerin, yüksek mukavemet ve termal dirençlilik ile düşük büzülme özelliklerine sahip oldukları da çalışmalarda gösterilmiştir [21]. Benzer çalışmalara ilgili literatürde sıklıkla rastlanılmaktadır. Örnek vermek gerekirse, kireç [22,23], uçucu kül [24-26], fırın dışıkları [27], pirinç kabuğu [28], sığır kazeini [29], biyoyakıt silisi [30], mermer tozu ve atığı [31,32], kenaf lifi [33], kiremit tozu [34] gibi atıklar, zeminlere karıştırılmış ve sonuçlar gözler önüne serilmiştir. Son yıllarda gerçekleştirilen bazı çalışmalara bakılmak istenirse, zemin numunelerine, Abbaspour ve arkadaşları [35] tarafından atık lastik tekstil liflerinin değişen oranlarda eklenmesi, Liu ve arkadaşları [36] tarafından çimento, pirinç kabuğu külü ve kalsiyum karbür artığı malzemelerinin karıştırılması, Shah ve arkadaşları [37] tarafından alüminyumlu kimyasal bir bileşiğin hidratlaştırılmış çift sülfat tuzlarını içeren bir tür atık su arıtma çamurunun %8 oranında şap çamuru ile güçlendirilerek karıştırılması ile Taki ve arkadaşları [38] tarafından kireçle stabilize edilmiş atık çamuru malzemesinin eklenmesi gibi çalışmalara rastlanılabilir. Zemin iyileştirme çalışmalarında hem doğal malzemeler (Hindistan cevizi lifi, palmye ağacı lifi, keten tohumu, şeker kamışı, tavuk kanadı gibi) hem de bazı kimyasal katkıları ile sentetik fiber malzemeler (Polyester, polietilen, cam, naylon, çelik tel, atık lastik gibi) kullanılmaktadır [1,39]. Akbulut ve arkadaşları [40], Chauhan [39], Demir ve arkadaşları [41], Ghazavi ve Roustaie [42], Gullu ve Hazırbaba [43], Hejazi ve arkadaşları [1], Jafari ve Esna-Ashari [44], Yarbaşı ve arkadaşları [4], Yarbaşı [45], Kalkan [46], Kalkan [47], Zaimoğlu [48], Zorluer ve Demirbaş [49] tarafından gerçekleştirilmiş olan çalışmalarda, bahis konusu katkı malzemelerinin kullanılmasının, tüm zemin türlerinin geoteknik özelliklerinde olumlu iyileştirmeler sağlamanın yanı sıra, ekonomi ve

çevre koruma gibi önemli alanlarda da kayda değer gelişmeler sağladığı vurgulanmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda yürütülen uygulamalarda, zeminlerin donma-çözülme olayları sonrasında taşıma kapasitelerini arttırmak, yanıl deformasyon ve oturma miktarlarını düşürmek amacıyla katkıları ve atıklardan yararlanılmaktadır [4,40,42,44,45,47, 50-52]. Özellikle iklimsel değişikliklerin etkili olduğu bölgelerde, zemin boşluklarında yer alan suyun bu olaylar neticesinde donması ve çözülmesi ciddi hacimsel deformasyonlara sebep olmakta ve yapılarda hasarların oluşmasına yol açarak yapı kullanım ömürlerini kısaltmaktadır. Akbulut ve arkadaşları [40] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, sentetik fiber ve atık lastik kullanılarak, ince taneli zeminler başarılı bir şekilde iyileştirilmiştir. Kalkan [46] tarafından, ince daneli zeminlere silis dumanı katılması ardından donma-çözülme mukavemetlerinde artışlar olduğu gözlemlenmiştir. Ghazavi ve Roustaie [42] tarafından yürütülen başka bir çalışmada ise, ince daneli zeminler, fiber kullanılarak güçlendirilmeye çalışılmış ve serbest basınç mukavemetlerinde, donma-çözülme sonrası azalmalar kaydedilmiştir. Mermer tozunun, zeminlerin serbest basınç mukavemetlerini yükselttiği, Demir ve arkadaşları [41] ile Zorluer ve Demirbaş [49] tarafından yürütülen çalışmalarda tespit edilmiştir. Donma-çözülme olayları esnasında zemin danelerinin dizilimlerinde meydana gelen değişimlerin, bu zeminlerin mukavemet, permeabilite, durabilite ve sıkışabilirlik gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinde değişikliklere yol açtığı, Andersland ve Ladanyi [53], Simonsen ve Isacson [54], Yarbaşı ve arkadaşları [4], Wang ve arkadaşları [55], Qi ve arkadaşları [56], Güllü ve Hazırbaba [43], Ghazavi ve Roustaie [42] ve Zaimoğlu [48] gibi araştırmacıların yürüttüğü çalışmalarda gözler önüne serilmiştir. Ek olarak, donma neticesinde ortaya çıkan donma-kabarma durumları, zeminlerin bünyesinde yapısal hasarlar oluşturmakta ve zemin yüzeylerinde kalıcı deformasyonlara yol açmaktadır. Bahsi geçen sebepler doğrultusunda, ince dane oranı, sürşarj yükü, iklim şartları ile ortamda su bulunması gibi donma kabarmasını etkileyen unsurlar, Tester ve Gaskin [57], Hermansson [58], Konrad ve Lemieux [59], Hui ve Ping [60] ve Rempel [61]



Şekil 2. Kil (KZ) ve cam atığının (CAÇ) dane çapı dağılım eğrileri

2.2. Metot

Çalışmada kullanılan numuneler, optimum su muhtevalarında ve belirlenen karışım oranlarında hazırlanarak, donma-çözülme etkilerine maruz bırakılmıştır. Numuneler, su muhtevalarında değişme olmaması için desikatörlerde bekletilmiştir. Çalışmada, donma-çözülme davranışı incelenirken, literatürdeki çalışmalarda sıcaklık, zaman dilimi ve çevrim sayıları seçilmiştir [42,50,63,64]. Buna göre, donma-çözülme çevrim sayısı 1, 3, 5 ve 10, sıcaklık değerleri donma için $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve çözülme için $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, her bir sıcaklıkta bekleme süresi ise 6 saat olarak alınmıştır. Numuneler, donma-çözülme kabineye folyo ile sarılmış ve deney süresince donma-çözülme kabineinden çıkarılmamıştır. Numuneler, donma-çözülme kabineye konulduktan sonra, ilk olarak $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye getirilerek 6 saat beklenmiş ve sonrasında $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye getirilerek 6 saat daha beklenmiştir. 12 saatin sonunda tamamlanan bu işlem ise 1 çevrim olarak kabul edilmiştir [42,50]. Çevrimler sonunda, ilgili numuneler ile mukavemet ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır.

Kil zemine karıştırılan CAÇ oranları %5, %10, %15, %20, %25, %30 olarak seçilirken, Çimento (ÇMT) oranları %2, %4, %6 ve %8 olarak alınmıştır. Serbest basınç deneylerinde, her karışım oranı için, optimum su muhtevalarında hazırlanan kohezyonlu zemin numuneleri, 50 mm çapında, boyu çapının iki katı, doygun ve kılcal çatlak içermeyecek şekilde hazırlanmıştır [65]. Zemin numunesi, iki parçalı kalıp yağlandıktan sonra çelik tüpe yerleştirilmiştir. Kalıbın iki ağzından taşan zemin numunesi, kıl testereyle kesilip atılmıştır. Oluşturulan deney numuneleri, serbest basınç deneyine tabi tutularak dayanımlar belirlenmiştir. Deneylerde, zemin numunesi, presin alt platformuna merkezlenerek oturtulduktan sonra, üst başlık numune üst yüzeyine rahatça ve tam degecek şekilde indirilmiş ve bu işlemler ilgili standartta belirtildiği şekilde gerçekleştirilmiştir [65]. Boy değişimini ölçen komparatör saati, alt ve üst başlıklar arasına yerleştirilerek sıfırlanmıştır. Yüklemeler, numunede dakikada %0,5-%2 arası birim boy kısalması oluşturacak şekilde, standartta belirtildiği gibi uygulanmıştır [65]. Sonuçta,

taşıma güçleri belirlenirken, düşey yük-deplasman eğrilerinin pik yaptığı değerler alınmış ve bu pik değerlerin yarısı alınarak kohezyon değerleri belirlenmiştir. Ayrıca, konsolidasyon deneyleri, TS 1900-2'de [65] belirtildiği şekilde yürütülmüştür.

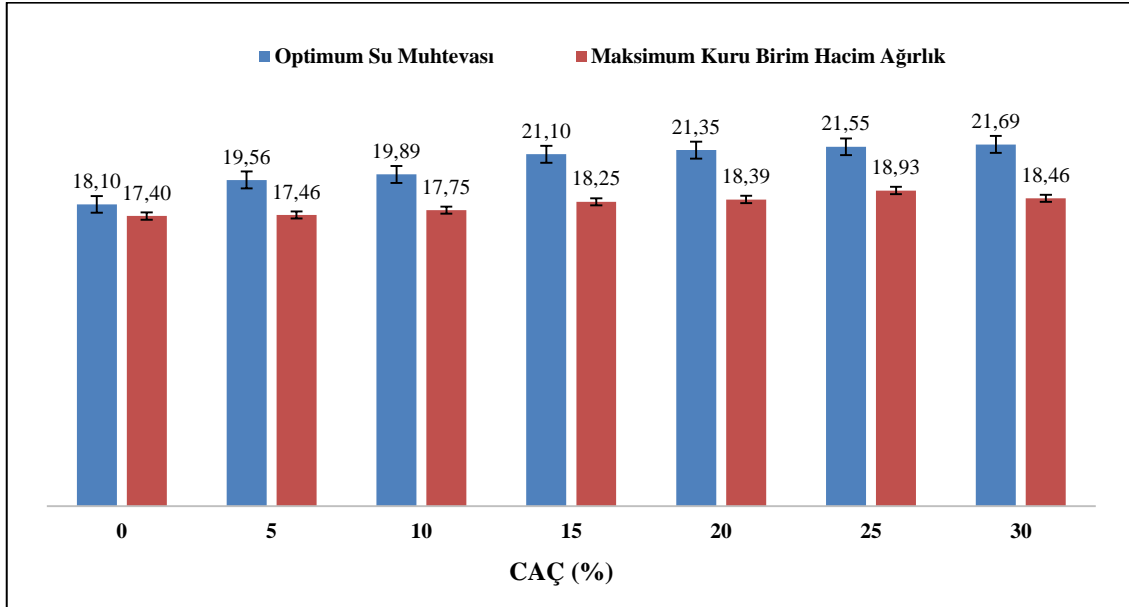
Konsolidasyon deneyi yapılacak olan numuneler, 100 kPa ön-konsolidasyon basıncı altında ön-konsolide edilen zeminden alınmış ve deneylerde iç çapı 50 mm, yüksekliği 20 mm olan ringler kullanılmıştır. Konsolidasyon hücresi içerisine doldurulan sıvı, ön-konsolide edilen zemindeki karışım sıvısı ile aynı olacak şekilde hazırlanmıştır. Hücre içerisindeki sıvının buharlaşmasını önlemek için, hücrenin üst yüzeyi

lastik bir kılıf ile kapatılmıştır. Hücre sıvısı içerisinde 1 gün süreyle bekletilerek doymun hale getirilen numunelerde, şişme basınçları ve zamana bağlı oturma değerleri hesaplanmıştır.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. Optimum Su İçeriklerinin Belirlenmesi

%5, %10, %15, %20, %25 ve %30 karışımları için optimum su miktarlarını belirlemek adına kompaksiyon deneyleri yapılmış ve sonuçları 3'te verilmiştir.



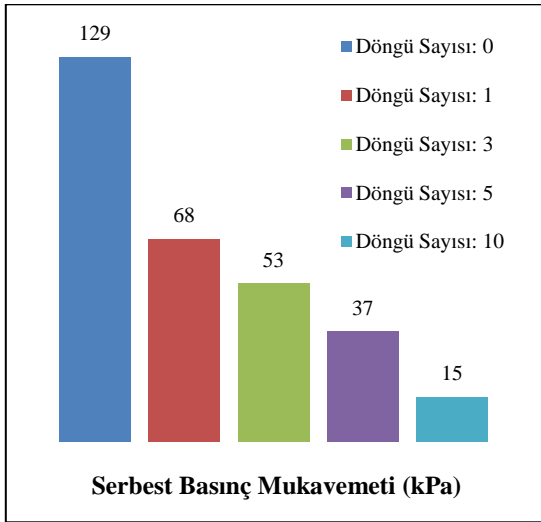
Şekil 3. Farklı CAÇ oranları için kompaksiyon deney sonuçları

3.2. Mukavemet Parametrelerinin Belirlenmesi

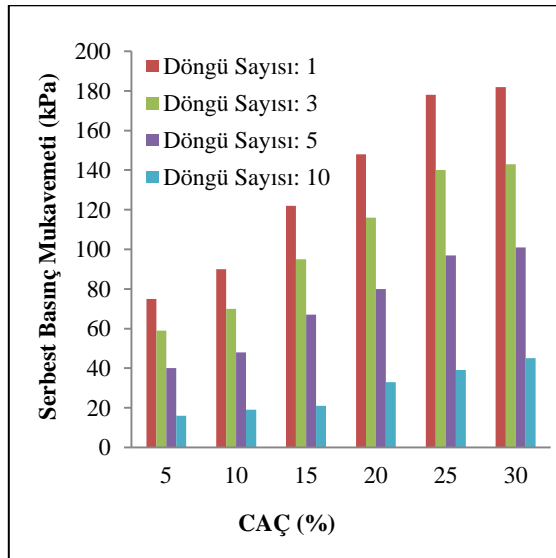
Sadece kil zemin, farklı oranlarda CAÇ eklenmiş kil zemin ve yine farklı oranlarda CAÇ-ÇMT eklenmiş kil zemin durumlarında, farklı döngüler için serbest basınç mukavemetleri belirlenmiş ve sonuçlar sırasıyla Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 4'ten de görülebileceği gibi, sadece kil zemin olması durumunda, donma-çözülmede döngü sayısı arttıkça serbest basınç mukavemetlerinde azalmalar meydana

gelmektedir. Bu aşamada, donma-çözülmenin, kil zeminin basınç dayanımı üzerine olumsuz bir etkiye sebep olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5'in incelenmesi ile CAÇ oranı arttıkça, serbest basınç dayanımlarının arttığı ve ancak artan donma-çözülme döngü sayısına bağlı olarak serbest basınç dayanımlarının yine azaldığı görülebilir. CAÇ ilavesi, donma-çözülme etkisinde, dayanımın iyileştirilmesinde kil zemini daha kararlı bir hale getirmiştir. Şekil 6'dan da gözlemlenebileceği gibi, kil zemin ve farklı CAÇ oranlarında hazırlanan

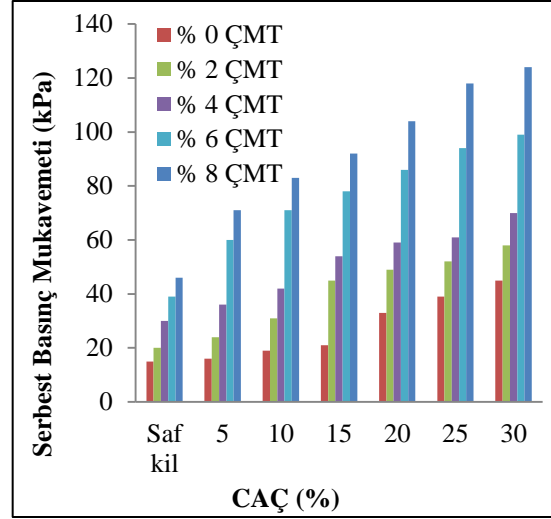
numuneler, farklı oranlarda ÇMT ilave edilmesi ile donma-çözülme etkisi altında kayda değer oranlarda daha yüksek dayanımlar sergilemişlerdir. Buradan, kil zemine CAÇ ve ÇMT ilave edilmesinin, zeminin donma-çözülme etkisi altındaki davranışını ciddi derecelerde iyileştirdiği ifade edilmiştir.



Şekil 4. Kil zeminin farklı döngüleri için serbest basınç mukavemetleri



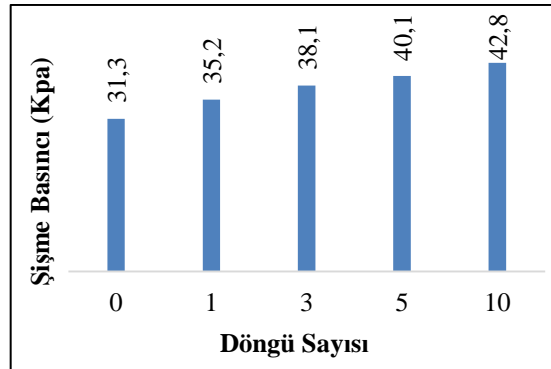
Şekil 5. Farklı CAÇ oranları ve farklı döngülerdeki numuneler için serbest basınç mukavemetleri



Şekil 6. Farklı CAÇ ve ÇMT oranları için serbest basınç mukavemetleri (Döngü sayısı:10)

3.3. Karışımların Oturma Parametrelerinin Belirlenmesi

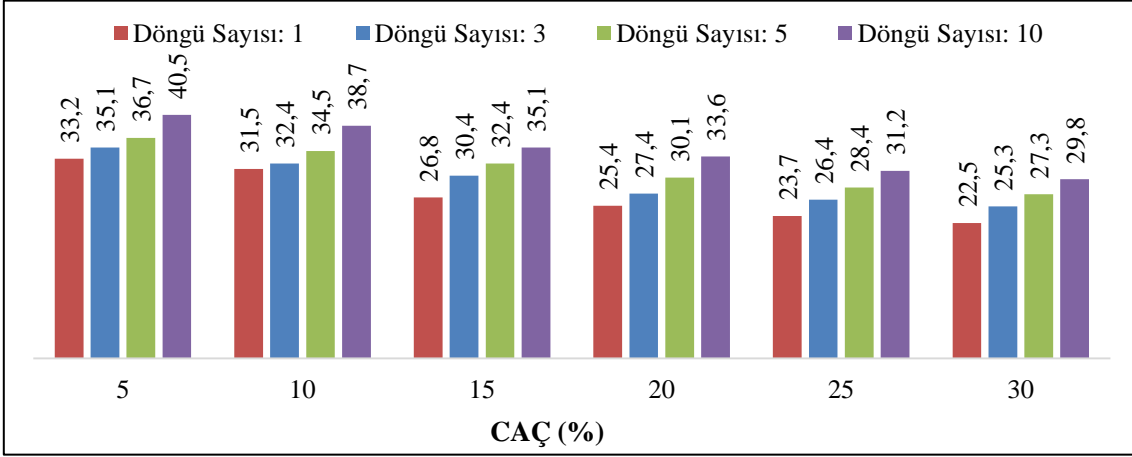
Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da sırasıyla, sadece kil zemin olması, zemine farklı oranlarda CAÇ katılması ve farklı oranlarda CAÇ-ÇMT katılması durumlarında, farklı döngüler için şişme basınçları görülmektedir. Sonuçlara göre, Şekil 7'den görülebileceği gibi, saf kil zemin olması durumunda, donma-çözülme döngü sayısının artmasına bağlı olarak şişme basınçlarının kayda değer bir şekilde arttığı görülmüştür. Buradan, kil zeminin donma-çözülme etkisinde zayıf bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir.



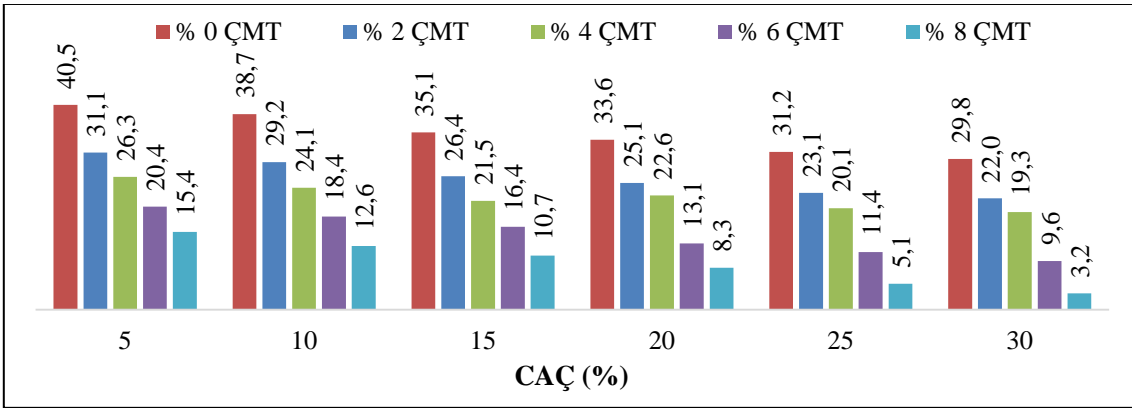
Şekil 7. Kil zeminin farklı döngü sayılarındaki şişme basınçları

Aşağıda verilmiş olan Şekil 8'in incelenmesi ile de anlaşılacağı gibi, kil zemine, artan oranlarda CAÇ eklenmesi halinde, aynı donma-çözülme döngülerinde şişme basınçlarının düştüğü belirlenmiştir. Ancak, donma-çözülme döngü sayıları arttıkça, karışımların şişme potansiyelinin

de arttığı görülmüştür. Öte yandan, aşağıda verilmiş olan Şekil 9'da görülebileceği gibi, aynı donma-çözülme döngü sayısında, kil zemine farklı oranlarda CAÇ ve farklı oranlarda ÇMT eklenmesi durumlarında, numunelerin şişme potansiyellerinin kayda değer oranlarda düştüğü saptanmıştır.



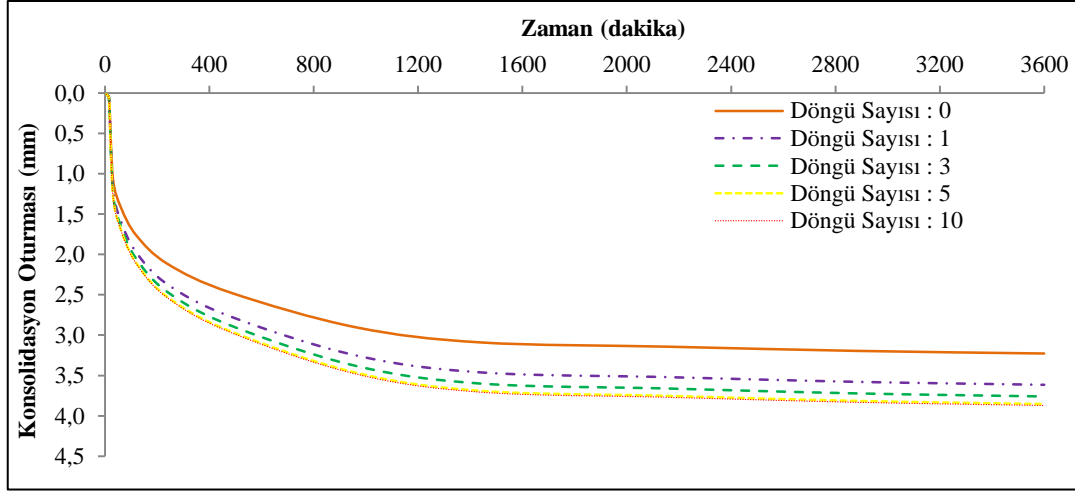
Şekil 8. Farklı döngü sayıları ve farklı CAÇ oranlarındaki numunelerin şişme basınçları



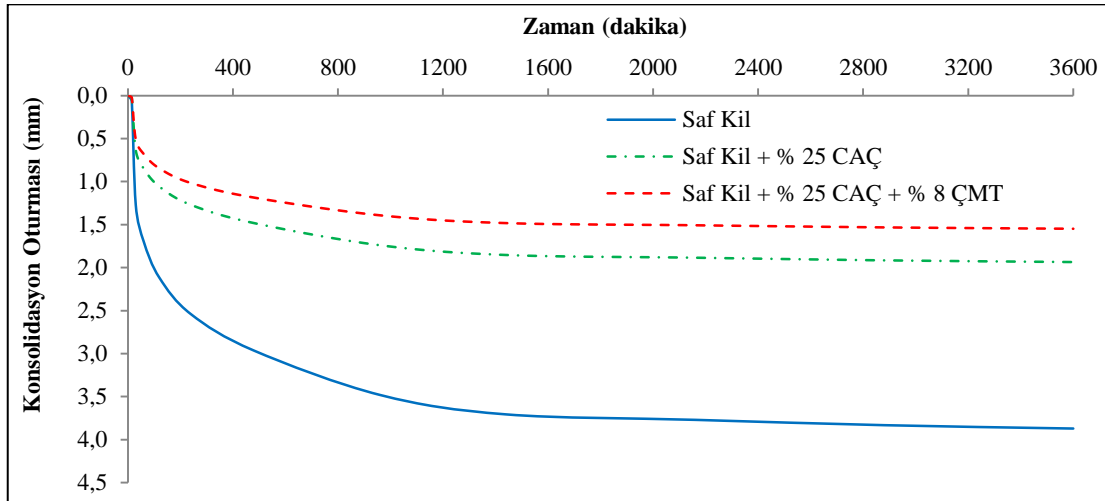
Şekil 9. Farklı CAÇ ve ÇMT oranlarındaki numunelerin şişme basınçları (Döngü sayısı:10)

Şekil 10 ve Şekil 11'de, sırasıyla, sadece kil zemin olması ve kil zemin-CAÇ-ÇMT karışımları olması durumlarında zamana bağlı oturma değerleri görülmektedir. Sonuçlara göre, Şekil 10'un incelenmesiyle görülebileceği gibi, donma-çözülme döngü sayıları arttıkça, saf kil zeminde konsolidasyon oturmalarının arttığı belirlenmiştir. Ancak, donma-çözülme sayısı 5' kadar, konsolidasyon oturmaları hızlı bir şekilde artarken, bu değerden sonra oturma değerlerinde kayda

değer artmalar olmadığı saptanmıştır. Şekil 11'de ise, kil zemine CAÇ ilave edildiğinde, konsolidasyon oturmalarının, donma-çözülme etkisi altında saf kil zemine göre kayda değer bir oranda azaldığı görülmektedir. Ayrıca, kil zemine CAÇ'ye ek olarak ÇMT eklenmesi durumlarında ise, konsolidasyon oturmalarının 4 mm mertebelerinden 1,5 mm mertebelerine kadar azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 10. Farklı döngü sayıları için konsolidasyon oturmaları



Şekil 11. Saf Kil, Kil+%25 CAÇ ve Kil+%25 CAÇ+%8 ÇMT için konsolidasyon oturmaları (Döngü sayısı:10)

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, donma-çözülme etkisi altında, kil zemine CAÇ ve ÇMT eklenmesi durumlarında mukavemet, konsolidasyon ve şişme parametrelerinde meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Kil zeminde, donma-çözülme döngü sayısı arttıkça, serbest basınç mukavemetlerinde

azalmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şişme basınçlarının ise, donma-çözülme döngü sayısının artmasına bağlı olarak kayda değer oranlarda arttığı belirlenmiştir. Buradan, donma-çözülme davranışının, saf kil zeminin basınç dayanımı üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu görülmüştür. Ayrıca, donma-çözülme döngü sayısı 5'e kadar, kil zeminde konsolidasyon oturumlarının arttığı, bu değerden sonra ise kayda değer artışların gerçekleşmediği belirlenmiştir.

- CAÇ ilavesinin, donma-çözülme etkisinde, dayanımın iyileştirilmesinde kil zemini daha kararlı bir hale getirdiği ve böylece dayanımın arttığı belirlenmiştir. CAÇ eklenmesi halinde, aynı donma-çözülme döngülerinde, şişme basınçlarının düştüğü fakat donma-çözülme döngü sayıları arttıkça numunelerin şişme potansiyellerinin de arttığı belirlenmiştir. Kil zemine CAÇ ilave edildiğinde, konsolidasyon oturumlarının, donma-çözülme etkisi altında, saf kil zemine göre kayda değer oranlarda azaldığı gözlemlenmiştir.
 - Kil zemine CAÇ ve ÇMT ilavesi ile, donma-çözülme maruz bırakılan numunelerde dayanımların kayda değer bir şekilde iyileştiği gözlemlenmiştir. Aynı donma-çözülme döngü sayısında, kil zemine farklı oranlarda CAÇ ve farklı oranlarda ÇMT eklenmesi durumlarında, numunelerin şişme potansiyellerinin ciddi oranlarda düştüğü görülmüştür. Ayrıca, kil zemine, CAÇ yanında ÇMT’de eklenmesi durumunda, konsolidasyon oturumlarının 4mm mertebelerinden 1,5 mm mertebelerine kadar azaldığı gözlemlenmiştir.
 - Bu çalışma sonucunda, donma-çözülme etkisi altında olan kil zeminlere CAÇ ve ÇMT eklenmesiyle, mukavemet, şişme ve konsolidasyon parametrelerinde kayda değer iyileşmelerin meydana geldiği belirlenmiştir.
- ## 5. KAYNAKLAR
1. Hejazi, S.M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S.M., Zadhoush, A., 2012. A Simple Review of Soil Reinforcement by Using Natural and Synthetic Fibers, *Construction and Building Materials*, 30, 100-116.
 2. Urhan, S., 1991. Silisin Alkali Ortamda Çözünmesine Etki Eden Faktörler. *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Çimento Bülteni*, 28(286), 15-21.
 3. Ustabaş, İ., Kaya, A., 2018. Comparing the Pozzolanic Activity Properties of Obsidian to Those of Fly Ash and Blast Furnace Slag. *Construction and Building Materials*, 164, 297-307.
 4. Yarbaşı, N., Kalkan, E., Akbulut, S., 2007. Modification of the Geotechnical Properties, as Influenced by Freeze-Thaw, of Granular Soils with Waste Additives, *Cold Regions Science and Technology*, 48, 44-54.
 5. Yarbaşı, N., Alacalı, M., 2018. Atık Lastik Parçalarıyla Güçlendirilmiş İri Taneli Zeminlerin Donma-çözülme Sonucu Mukavemetlerindeki Değişimin İncelenmesi. *Pamukkale Univ. Müh. Bil. Dergisi*, 24(3), 561-565.
 6. Lin, D.F., Lin, K.L., Luo, H.L., 2007. A Comparison Between Sludge Ash and Fly Ash on the Improvement in Soft Soil. *J. Air Waste Manage*, 57(1), 59-64.
 7. Ayodele, A.L., Adebisi, A.O., Kareem, M.A., 2016. Use of Sludge Ash in Stabilising Two Tropical Laterite. *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 7.
 8. Zhan, T.L., Zhan, X., Lin, W., Luo, X., Chen, Y., 2014. Field and Laboratory Investigation on Geotechnical Properties of Sewage Sludge Disposed in a Pit at Changan Landfill, Chengdu, China. *Engineering geology*, 170, 24-32.
 9. Güllü, H., 2014. Factorial Experimental Approach for Effective Dosage Rate of Stabilizer: Application for Fine-grained Soil Treated with Bottom Ash. *Soils and Foundations*, 54(3), 462-477.
 10. Ayininuola, G., Ayodeji, I., 2016. Influence of Sludge Ash on Soil Shear Strength. *Journal of Civil Engineering Research*, 6(3), 72-77.
 11. Fauzi, A., Zuraidah, D., Usama, J.F., 2016. Soil Engineering Properties Improvement by Utilization of Cut Waste Plastic and Crushed Waste Glass as Additive. *International Journal of Engineering and Technology*, 8(1), 15. <https://doi.org/10.7763/IJET.2016.V8.851>.
 12. Hasan, H., Dang, L., Khabbaz, H., Fatahi, B., Terzaghi, S., 2016. Remediation of Expansive Soils Using Agricultural Waste Bagasse Ash. *Procedia Eng.*, 143, 1368-1375.
 13. Brooks, R.M., 2019. Soil Stabilization with Fly Ash and Corn Waste Ash—improvements in Engineering Characteristics. *Int. J. Appl. Eng. Res.*, 14(4), 1025-1030.

14. Ramakrishna, A.N., Pradeepkumar, A.V., 2006. Stabilization of Black Cotton Soil Using Rice Husk Ash and Cement. In National Conference on Civil Engineering Meeting the Challenges of Tomorrow, GND Engineering College, Ludhiana, 215-220.
15. Sharma, R.S., Phanikumar, B.R., Rao, B.V., 2008. Engineering Behavior of a Remolded Expansive Clay Blended with Lime, Calcium Chloride and Rice-husk Ash. *Jnl. of Mat. in Civil Eng*, 20(8), 509-515.
16. Brown, F.H., Nash, B.P., Fernandez, D.P., Merrick, H.V., Thomas, R.J., 2013. Geochemical Composition of Source Obsidians from Kenya. *Journal of Archaeological Science*, 40, 3233-3251.
17. Campbell, S., Healey, E., 2016. Multiple Sources: The pXRF Analysis of Obsidian from Kenan Tepe, S.E. Turkey. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 10, 377-389.
18. Carter, T., Poupeau, G., Bressy, C., Pearce, N.J.G., 2006. A New Programme of Obsidian Characterization at Çatalhöyük, Turkey. *Journal of Archaeological Science*, 33(7), 893-909.
19. Çolak, A., Aygün, H., 2011. Sarıkamış (Kars) Cıvarı Obsidyenleri Bilgi Notu. MTA Maden Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı, SERKA Raporu. Kars, Türkiye, 2011.
20. Ercan, T., Yegingil, Z., Bigazzi, G., 2016. Obsidian Definition and Characteristics, Distribution and Geochemical Characteristics of Those of the Central Anatolian Obsidian in Anatolia. *Journal Geomorphol*, 17(1989), 71-83.
21. Marjanovic, N., Komljenovic, M., Baščarevic, Z., Nikolic, V., Petrovic, R., 2015. Physical-mechanical and Microstructural Properties of Alkali-activated fly Ash-blast Furnace Slag Blends. *Ceramics International*. 41, 1421-1435.
22. Bell, F.G., 1996. Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils. *Engineering Geology*, 42(4), 223-37. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.049>.
23. Mohd Yunus, N.Z., Wanatowski, D., Abdul Hassan, N., Marto, A., 2016. Shear Strength and Compressibility Behavior of Lime Treated Organic Clay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, KSCE, 20(5), 1721-1727. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-1294-x>.
24. Arulrajah, A., Mohammadjavad, Y., Mahdi, M. D., Suksun, H., Myint, W.B., Melvyn, L., 2018. Evaluation of Fly Ash and Slag-based Geopolymers for the Improvement of a Soft Marine Clay by Deep Soil Mixing. *Soils and Foundations*, 58(6), 1358-70. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.07.005>.
25. Biradar, K.B., Arun, K.U., Satyanarayana, P.V.V., 2014. Influence of Steel Slag and Fly Ash on Strength Properties of Clayey Soil: A Comparative Study. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*-(14) (2). <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V14P213>.
26. Çokca, E., Yazici, V., Ozaydin, K., 2009. Stabilization of Expansive Clays Using Granulated Blast Furnace Slag (GBFS) and GBFS-cement. *Geotech. Geol. Eng.*, 27(4), 489.
27. Kumar, A., Sivapullaiah, P.V., 2012. Improvement of Strength of Expansive Soil with Waste Granulated Blast Furnace Slag. In *Geo Congress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*, 3920(8). <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V11P254>.
28. Kumar, A., Gupta, D., 2016. Behavior of Cement-stabilized Fiber-reinforced Pond Ash, Rice Husk Ash-soil Mixtures. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3), 466-74. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.05.010>.
29. Chang, I., Jooyoung, I., Moon-Kyung, C., Gye-Chun, C., 2018. Bovine Casein as a New Soil Strengthening Binder from Dairy Wastes. *Construction and Building Materials*, 160, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.009>.
30. Jin, L.M., MohdYunus, N.Z., Hezmi, M.A., Rashid, A.S.A., Marto, A., Kalatehjari, R., Pakir, F., Mashros, N., Ganiyu, A., 2018. Predicting the Effective Depth of Soil Stabilization for Marine Clay Treated by Biomass Silica. *KSCE Journal of Civil Engineering*, KSCE, 22(11), 4316-4326. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-1294-x>.
31. Gupta, C., Sharma, R.K., 2014. Influence of Marble Dust, Fly Ash and Beach Sand on Sub-

- grade Characteristics of Expansive Soils. International Conference on Advances in Engineering and Technology, 13-18.
32. James, J., Pandian, P.K., 2016. Industrial Wastes as Auxiliary Additives to Cement/lime Stabilization of Soils. *Adv. Civ. Eng.*, 1-17.
 33. Esmailpour, S.N., Abbasali T.G., Mohammadreza, K.T., Asskar, J.C., 2019. Improvement of the Engineering Behavior of Sand-clay Mixtures Using Kenaf Fiber Reinforcement. *Transportation Geotechnics*, 19, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.01.004>.
 34. Keerthi, Y., Divya Kanthi, P., Tejaswi, N., Shyam Chamberlin, K., Satyanarayana, B., 2013. Stabilization of Clayey Soil Using Cement Kiln Waste. *Int. J. Adv. Struct. Geotech. Eng.*, 2(2), 77-81.
 35. Abbaspour, M., Aflaki, E., Nejad, F.M., 2019. Reuse of Waste Tire Textile Fibers as Soil Reinforcement. *Journal of cleaner production*, 207, 1059-1071.
 36. Liu, Y., Chang, C.W., Namdar, A., She, Y., Lin, C.H., Yuan, X., Yang, Q., 2019. Stabilization of Expansive Soil Using Cementing Material from Rice Husk Ash and Calcium Carbide Residue. *Construction and Building Materials*, 221, 1-11.
 37. Shah, S.A.R., Mahmood, Z., Nisar, A., Aamir, M., Farid, A., Waseem, M., 2020. Compaction Performance Analysis of Alum Sludge Waste Modified Soil. *Construction and Building Materials*, 230, 116953.
 38. Taki, K., Choudhary, S., Gupta, S., Kumar, M., 2020. Enhancement of Geotechnical Properties of Municipal Sewage Sludge for Sustainable Utilization as Engineering Construction Material. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119-723.
 39. Chauhan, M.S., Mittal, S., Mohanty, B., 2008. Performance Evaluation of Silty Sand Subgrade Reinforced with Fly Ash and Fibre, *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, 26(5), 429-435.
 40. Akbulut, S., Arasan, S., Kalkan, E., 2007. Modification of Clayey Soils Using Scrap Tire Rubber and Synthetic Fibers, *Applied Clay Science*, 38, 23-32.
 41. Demir, İ., Başpınar, M.S., Görhan, G., Kahraman, E., 2008. Mermer Tozu ve Atıklarının Kullanım Alanlarının Araştırılması, 6. Mermer ve Doğal taş Sempozyumu, 26-27 Haziran, Afyonkarahisar.
 42. Ghazavi, M., Roustaei, M., 2010. The Influence of Freeze-thaw Cycles on the Unconfined Compressive Strength of Fiber-reinforced Clay, *Cold Regions Science and Technology*, 61, 125-131.
 43. Güllü, H., Hazırbaba, K., 2010. California Bearing Ratio Improvement and Freeze-thaw Performance of Fine-grained Soils Treated with Geofiber and Synthetic Fluid. *Cold Regions Science and Technology*, 63, 50-60.
 44. Jafari, M., Esna-Ashari, M., 2012. Effect of Waste Tire Cord Reinforcement on Unconfined Compressive Strength of Lime Stabilized Clayey Soil Under Freeze-Thaw Condition, *Cold Regions Science and Technology*, 82, 21-29.
 45. Yarbaşı, N., 2016. Atık Lastik Parçalarıyla Güçlendirilmiş Killi Zeminlerin Donma-Çözülme Davranışı, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(6), 559-562.
 46. Kalkan, E., 2009. Effects of Silica Fume on The Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils Exposed to Freeze and Thaw, *Cold Regions Science and Technology*, 58(3), 130-135.
 47. Kalkan, E., 2013. Preparation of Scrap Tires Rubber Fiber-Silica Fume Mixtures for Modification of Clayey Soils, *Applied Clay Science*, 80-81, 117-125.
 48. Zaimoğlu, A.Ş., 2010. Freezing-thawing Behavior of Fine-grained Soils Reinforced with Polypropylene Fibers, *Cold Regions Science and Technology*, 60, 63-65.
 49. Zorluer, I., Demirbas, A., 2013. Use of Marble Dust and Fly Ash in Stabilization of Base Material, *Science and Engineering of Composite Materials*, 20(1), 47-55.
 50. Zaimoğlu, A.Ş., Hattatoğlu, F., Akbulut, R.K., 2013. Yüke Maruz İnce Taneli Zeminlerin Donma-çözülme Davranışı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(3), 117-121.
 51. Zaimoğlu, A.Ş., Akbulut, R.K., Arasan, S., 2015. Effect of Freze-thaw Cycles on Strength

- Behavior of Compacted Chicken Quill Clay Composite in Undrained Loading. *Journal of Natural Fibers*, 13(3), 299-308.
52. Zaimoğlu, A.Ş., Calik, Y., Akbulut, R.K., Yetimoglu, T., 2016. A Study on Freeze-thaw Behavior of Randomly Distributed Fiber-reinforced Soil. *Periodica Polytechnica: Civil Engineering*, 60(1), 3-9.
53. Andersland, O.B., Ladanyi, B., 1994. An Introduction to Frozen Ground Engineering. Second Edition. The American Society of Civil Engineering, John Wiley & Sons Inc., New Jersey.
54. Simonsen, E., Isacsson, U., 1999. Thaw Weakening of Pavement Structures in Cold Regions. *Cold Regions Science and Technology*, 29, 135-151.
55. Wang, D., Ma, W., Niu, Y., Chang, X., Wen, Z., 2007. Effects of Cyclic Freezing and Thawing on Mechanical Properties of Qighai-Tibet Clay. *Cold Region and Science Technology*, 48, 34-43.
56. Qi, J., Ma, W., Song, C., 2008. Influence of Freeze-thaw on Engineering Properties of a Silty Soil. *Cold Region Science and Technology*, 53, 397-404.
57. Tester, R.E., Gaskin, P.N., 1996. Effect of Fines Content on Frost Heave. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 678-680.
58. Hermansson, A., 2002. Laboratory and Field Testing on Rate of Frost Heave Versus Heat Extraction. *Cold Region and Science Technology*, 38, 137-151.
59. Konrad, J.M., Lemieux, N., 2005. Influence of Fines on Frost Heave Characteristics of a Well-graded Base-course Material. *Canadian Geotechnical Journal*, 42, 515-527.
60. Hui, B., Ping, H., 2009. Frost Heave and Dry Density Changes During Cyclic Freeze-thaw of Silty Clay. *Permafrost and Periglacial Processes*, 20, 65-70.
61. Rempel, A., 2010. Frost Heave. *Journal of Glaciology*, 56(200), 1122-1128.
62. TS 1500, 2000: İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
63. Hazirbaba, K., Zhang, Y., Hulsey J.L., 2011. Evaluation of Temperature and Freeze-thaw Effects on Excess Pore Pressure Generation of Fine-grained Soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 372-384.
64. Liu, J., Wang, T., Tian, Y., 2010. Experimental Study of the Dynamic Properties of Cement-and lime- Modified Clay Soils Subjected to Freeze-thaw Cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 61, 29-33.
65. TS 1900-2, 2006: İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri-Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Simenit Gölü Kumunun Seramik Sırlarında Renklendirici Olarak Kullanımının Araştırılması

Didem ÖGE¹, Ceren PEKŞEN^{*2}

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Anasanat Dalı, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Samsun

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Seramik Cam Bölümü, Samsun

Geliş tarihi: 21.09.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Seramik bünyeyi ince bir tabaka halinde kaplayan ve camsı yapı oluşturan sırlar, seramik yapıya koruyucu tabaka sağlaması ile birlikte sıran kimyasal bileşimine ve pişirim parametrelerine bağlı ürünün renk, parlaklık ve yüzey pürüzlülüğü gibi özelliklerini etkilemektedir. Seramik sırları için renk önemli bir faktördür. Sırların renklendirilmesi için pigmentlerden, metal oksitlerden veya doğal hammadde kaynaklarından yararlanılmaktadır. Günümüzde seramik teknolojisinin gelişimiyle birlikte doğal kaynak ve atık malzemelerin seramik ve seramik sır hammaddesi olarak kullanımı artmakta ve ticari sır üretiminin yanı sıra doğadan temin edilen malzemelerle alternatif sır kompozisyonları oluşturulmaktadır.

Bu çalışmada Samsun ili Terme ilçesinde bulunan Simenit Gölü kıyısından temin edilen kumun şeffaf sır kompozisyonunda yeni bir renklendirici kaynağı olarak kullanımı araştırılmıştır. Simenit Gölü Kumunu (SGK) öğütme işleminin ardından faz analizi için XRD ve kimyasal kompozisyonunun belirlenmesi için XRF analizlerine tabi tutulmuştur. Termal davranışlarının belirlenmesi için ısı mikroskobu ve TG/DTA analizleri gerçekleştirilen SGK farklı oranlarda şeffaf sır kompozisyonlarına ilave edilmiş ve seramik bünyelere uygulanmıştır. Farklı oranlarda SGK katkısı ile hazırlanan sırlı bünyelerin pişirimi sonrasında renk analizleri gerçekleştirilmiş ve sarıdan kırmızı kahveye renk geçişi gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Seramik, Seramik sırları, Demir oksit, Simenit Gölü

The Investigation on the Possible Use of Simenit Lake Sand as Colorant in Ceramic Glazes

Abstract

The glazes that cover the ceramic body with a thin layer and form a glassy structure, provide protective layer to the ceramic structure and affect the properties such as color, brightness and surface roughness of the product depending on the chemical composition and firing parameters of the glaze. One of the most important factors for ceramic glazes is color. Pigments, metal oxides or natural sources are used for the

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ceren PEKŞEN, cpeksen@omu.edu.tr

coloring of glazes. Nowadays, with the development of technology, the use of natural resources and waste materials as ceramic and glaze raw materials are increasing, and alternative glaze compositions are created with materials obtained from nature as well as the production of commercial glaze.

In this study, the use of sand obtained from the shore of Lake Simenit in Terme District of Samsun province as a new colorant source in transparent glaze was investigated. After grinding process of Simenite Lake Sand (SGK), XRD analysis was performed for phase analysis and XRF was used for determination of chemical composition. In order to determine thermal behavior, heat microscopy and TG/DTA analyses were performed. Then SGK was added to transparent glaze in different proportions and applied on ceramic bodies. Finally, coloring parameters of SGK added glazes were determined and the color transition from yellow to reddish-brown was observed.

Keywords: Ceramic, Ceramic glazes, Iron oxide, Simenit Lake

1. GİRİŞ

Seramik sırları, bünyeyi ince bir tabaka halinde kaplamakta ve camsı bir yapı oluşturmaktadır. Sırlar seramik yapıya koruyucu bir tabaka sağlaması, alkali ve asidik ortamlara karşı direncini arttırması, gözenekli seramik yapıyı mikroorganizmalardan koruması ve yüzey düzgünlüğü sağlamasının yanı sıra ürünün renk, parlaklık ve yüzey pürüzlülüğü gibi nihai özelliklerinin çoğunda büyük bir etkiye sahiptir. Bu özellikler genellikle sıranın kimyasal bileşimine ve pişirim parametrelerine bağlı olarak değişmektedir [1-4].

Seramik sırları için en önemli unsurlardan birisi renktir. Sırların renklendirilmesi için pigmentlerden, metal oksitlerden veya doğal hammadde kaynaklarından yararlanılmaktadır. Günümüzde seramik teknolojisinin çok hızlı bir şekilde gelişimiyle birlikte doğal kaynak ve atık malzemelerin seramik ve seramik sır hammaddesi olarak kullanımı hammadde çeşitliliğini arttırmaktadır. Ülkemizde bulunan doğal kaynaklar ve aynı zamanda endüstriyel atıkların kullanımı ile hazırlanan renkli sır kompozisyonlarına yönelik literatürde birçok çalışmaya rastlamak mümkündür. Ticari sır üretiminin yanı sıra doğadan temin edilen malzemelerle alternatif sır reçeteleri oluşturulmakta ve seramik yüzeylere uygulanmaktadır. Birçok doğal katkının sır bünyelerinde renklendirici olarak kullanılabilirliği denenmiş ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir [1,5-13].

Bu çalışmada yüksek miktarda demir oksit içerdiği saptanan Simenit Gölü kumunun sırlarda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Demir oksit en yaygın kullanıma sahip doğal pigmentlerden olup, seramik sırlarında önemli ölçüde bir kullanıma sahiptir. Demir oksit hemen hemen bütün geleneksel hammaddelerde farklı miktarlarda bulunabilen en önemli renklendirici oksitlerden biridir. Sır ve bünye rengi üzerinde etkilidir. Fırın atmosferine ve sır bileşimine bağlı olarak sarı ve kırmızıdan kahverengiye, griden siyaha değişen renkler oluşturmaktadır. Ayrıca, seladon, aventurin ve tenmoku gibi özel artistik sırların üretiminde kullanılmaktadır [14-16].



Şekil 1. Simenit gölü

Sır katkısı olarak kullanılan kum, Samsun ili Terme ilçesinde yer alan Simenit Gölünden temin edilmiştir. Simenit Gölü coğrafi konumu 41° 15' 59" Kuzey ile 36° 57' 0" Doğu GPS koordinatları olup, 41.2667 enlem ve 36.9500

boylanda bulunmaktadır. Simenit Gölü, Yeşilirmak deltasının doğu kısmında yer alan kıyı set gölüdür (Şekil 1). Gölü denizden ayıran kıyı oku üzerinde 5-6 m yüksekliğinde kumul tepeleri oluşmuştur. Bu bölgeden temin edilen kum ile yapılan çalışmada ticari sırlara alternatif olarak doğal hammadde katkısı ile seramik bünyelerde düşük sıcaklıklarda olgunlaşan renkli sır kompozisyonunun hazırlanması ve etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METHOD

2.1. Sır Uygulanacak Deneme Plakalarının Hazırlanması

SGK katkısı ile hazırlanacak farklı sırların farklı bünyelerdeki davranışını incelemek üzere döküm yöntemi ile kırmızı (K), şamotlu (S) ve beyaz vakumlu (B) çamurlardan 25x25 mm boyutlarında deneme plakaları hazırlanmıştır. Plakalar hava ortamında kurutulduktan sonra elektrikli fırında 10°C/dk ısıtma hızıyla 800 °C'de pişirilmiştir (Şekil 2). Pişirim sonrası plakaların faz analizleri X-ışınları difraktometresi (XRD, Rigaku-Rint 2200) ile gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri 10-60° açılı arasında 2°/dk hız ile çekilmiştir.



Şekil 2. Kırmızı (K), şamotlu (S) ve beyaz vakumlu (B) çamur ile hazırlanarak pişirilen deneme plakaları

2.2. SGK Katkılı Sırların Hazırlanması

Samsun ili Terme ilçesinde yer alan Simenit Gölü kıyısından temin edilen SGK, karakterizasyon işlemleri öncesinde bilyalı değirmeninde 30 dakika süre ile öğütme işlemine tabi tutulmuştur ve 63 µm'lik elek ile elenmiştir. Şekil 3 ile kumun doğal olarak bulunuşu ve öğütme sonrası görüntüsü verilmiştir.



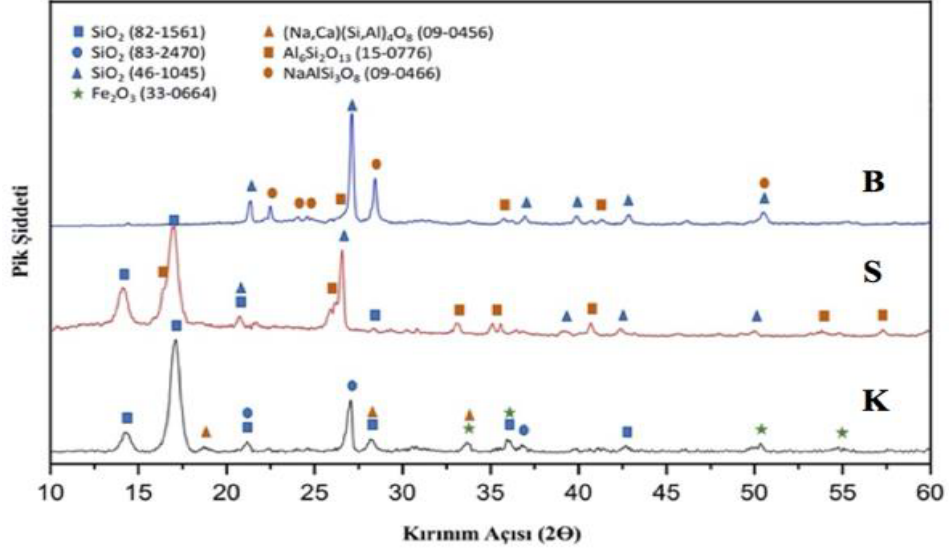
Şekil 3. (a) SGK doğal bulunuşu, (b) öğütme sonrası SGK kumu

SGK'nın faz analizini gerçekleştirmek için XRD kullanılmıştır. XRD analizleri 10-70° açılı arasında 2°/dk hız ile çekilmiştir. Kumun kantitatif analizleri X-ışınları floresans (XRF, Rigaku ZSX Primus I) cihazı ile gerçekleştirilmiş ve içerdiği metal oksit oranları belirlenmiştir. SGK'nın termal özelliklerinin belirlenmesi amacı ile ısı mikroskopu analizi (Misura, TA Instruments) ve Termogravimetrik-Diferansiyel Termal analizi (STA, 409 PC/PG, Netzsch) yapılmıştır.

Ticari olarak bulunan şeffaf sır kompozisyonuna ağırlıkça %0,5 (S05), %1 (S1), %2 (S2), %3 (S3), %4 (S4), %5 (S5) ve %10 (S10) oranlarında SGK katkısı ile hazırlanan sırlar bilyalı değirmende 30 dakika süre ile öğütülerek ve deneme plakalarına daldırma yöntemi ile uygulanmıştır. Sırlanmış plakalar 10 °C/dk ısıtma hızıyla 900 °C'de tepe sıcaklığına 1 saat bekleme süresi ile kamara tipi elektrikli seramik fırınında pişirilmiştir. Pişirim sonrasında numunelerin renk analizleri spektrofotometre (CM-2300d, Konica Minolta) ile 360 nm- 740 nm dalgaboyu aralığında gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

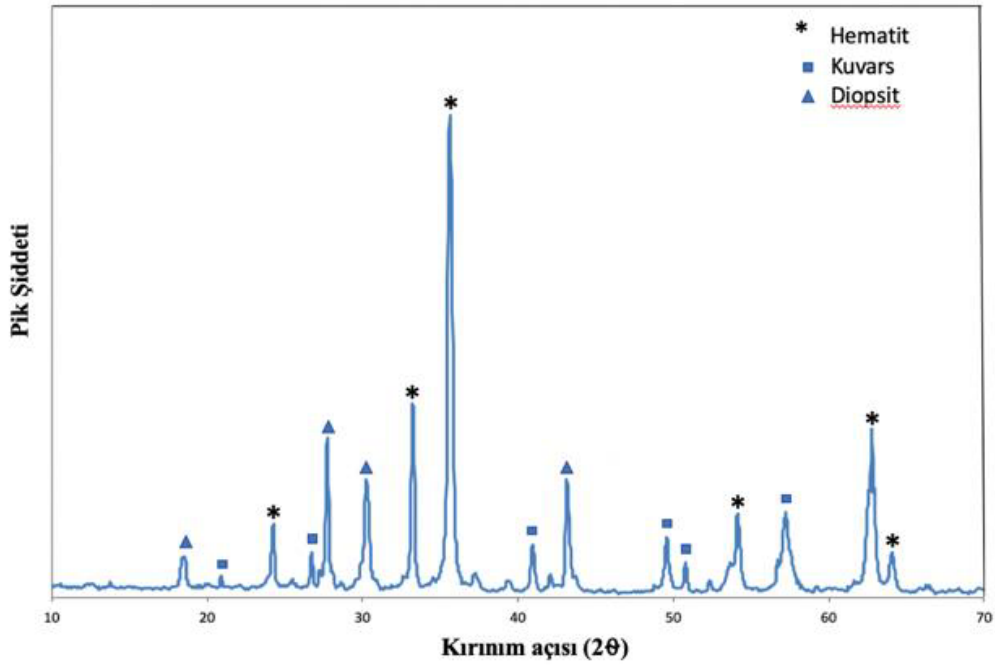
Sır uygulaması yapılacak deneme plakalarının XRD analizi sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. Kırmızı çamur bünyede kuvars, hematit ve albit kristalin fazlarını içermektedir. Şamotlu bünyede kuvars ve müllit fazları, beyaz döküm çamuru ile hazırlanmış bünyede ise kuvars, albit ve müllit fazları bulunmaktadır.



Şekil 4. Isıl işlem görmüş deneme plakalarının XRD grafiği

SGK için 10-70° açıları arasında 2°/dk ile çekilen XRD analizi sonucu elde edilen kırınımlar JCPDS kataloğundaki verilerle karşılaştırılmış ve yapının hematit fazı ve kuvars fazı içerdiği belirlenmiştir (Şekil 5). Kimyasal bileşimi belirlemek için XRF

cihazı kullanılmış ve içerdiği metal oksit oranları belirlenmiştir (Çizelge 1). SGK, XRF analizi sonuçlarına göre SGK %78,3688 oranında demir oksit içermektedir.



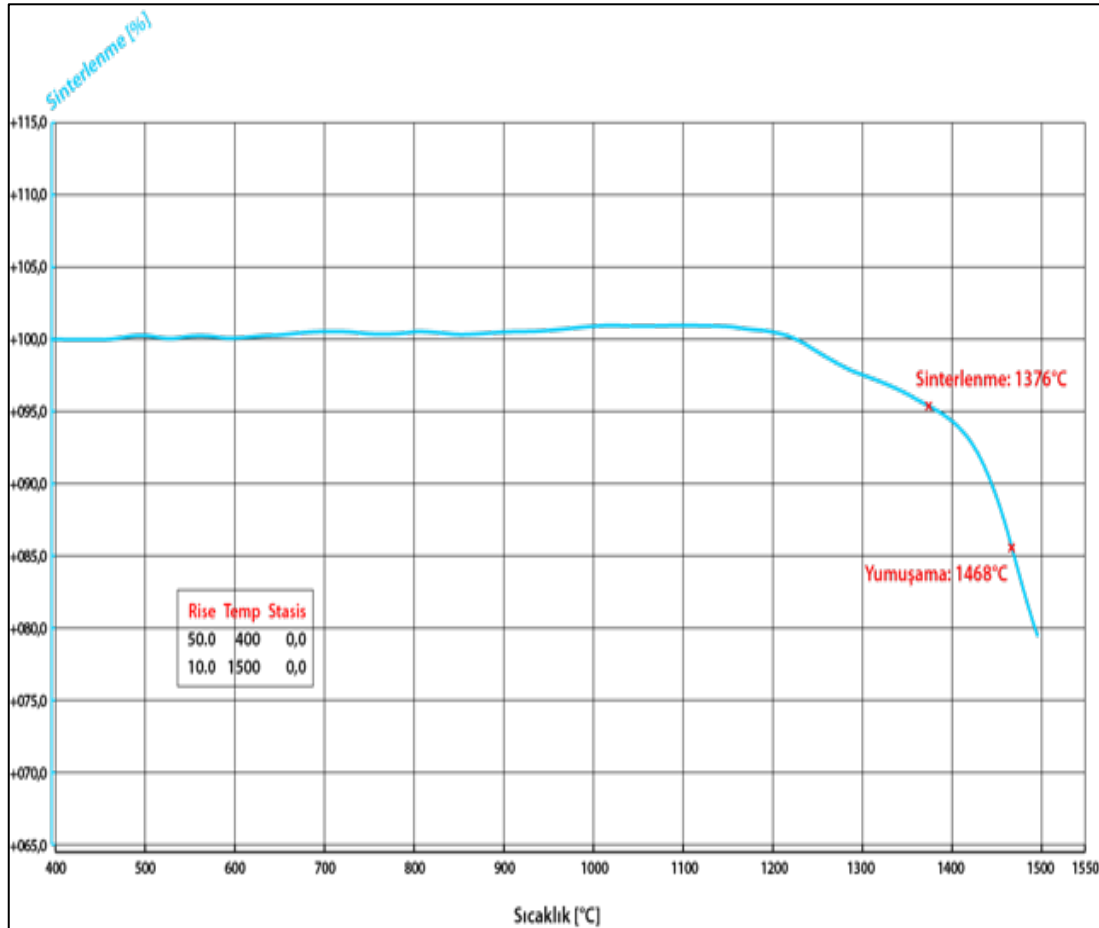
Şekil 5. SGK'nın XRD analizi sonucu

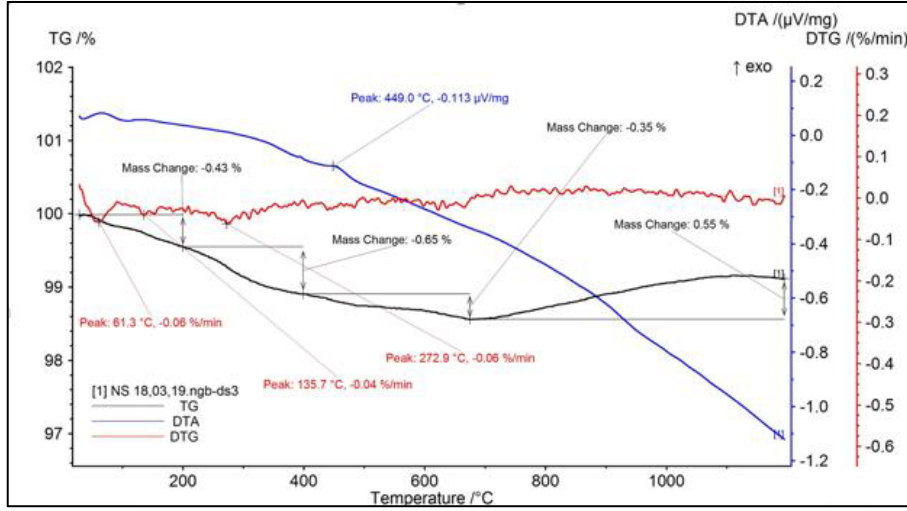
Çizelge 1. SGK'nın (% kütlece) kimyasal kompozisyonu

Oksit	SGK
MgO	1,6222
Al ₂ O ₃	3,3769
SiO ₂	5,4573
P ₂ O ₅	0,1190
SO ₃	0,0337
K ₂ O	0,1040
CaO	2,1717
TiO ₂	7,0825
V ₂ O ₅	0,5804
MnO	0,6376
Fe ₂ O ₃	78,3688
ZrO ₂	0,1042
BaO	0,34117

Isı mikroskobu analizi sonucu ile SGK'nın sinterleme ve yumuşama sıcaklıkları belirlenmiştir (Şekil 6). SGK, 1376 °C sinterleme sıcaklığına sahipken, yumuşama sıcaklığı 1468 °C'dir. TG-DTA eğrisinde yaklaşık 30 °C-1400 °C'ye kadar toplam %1,98 ağırlık kaybı gözlemlenmiştir. 50 °C-200 °C sıcaklık ağırlığında gözlemlenen başlangıç ağırlık kaybı kum tarafından absorblanan suyun buharlaşmasından kaynaklanmaktadır. TG-DTA eğrisinde keskin bir pik görülmemekle birlikte toplam ağırlık kaybı çok düşüktür (Şekil 7).

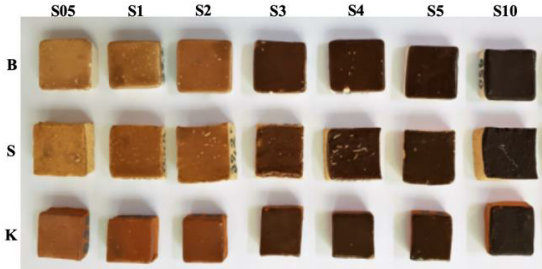
SGK katkı oranı %10 ve altında olarak hazırlanan sır kompozisyonlarının pişirim sonrasında sarıdan kahverengiye bir renk skalasına sahip olduğu

**Şekil 6.** SGK'nın ısı mikroskobu analizi grafiği



Şekil 7. SGK'nın TG-DTA analizi sonucu

gözlemlenmiştir. SGK katkı oranı %0,5-%10 arasında hazırlanan sırların pişirim sonrası dijital görüntüleri Şekil 9 ile verilmektedir.



Şekil 9. Ağırlıkça %0,5-%10 aralığında değişen oranlarda SGK katkısı ile hazırlanmış sırların sırasıyla beyaz döküm, şamotlu ve kırmızı çamur deneme plakaların pişirim sonrası görüntüsü

Beyaz döküm çamuru ile hazırlanmış deneme plakaları üzerine uygulanmış %0,5-%10 aralığında değişen oranlarda SGK katkılı sırların renk ve parlaklık değerleri Çizelge 2 ile verilmektedir. Rengin açıklık ve koyuluk değeri L*, SGK ilave miktarındaki artış ile düşerken, Kırmızılığı ifade eden a* ve sarılığı ifade eden b* değerleri, %0,5, %1 ve %2 katkı oranlarında artmakta iken ilave miktarı arttıkça düşmektedir. Şamotlu çamur ile hazırlanmış deneme plakaları üzerine sırlanmış numunelerin renk ve parlaklık değerlerine göre L*,

SGK ilave miktarındaki artış ile düşmektedir. a* değeri, %0,5, %1 ve %2 katkı oranlarında artmakta iken ilave miktarı arttıkça düşmektedir. b* değerinde ise ilave miktarı arttıkça küçük değer azalması görülmüştür (Çizelge 3). Kırmızı çamur ile hazırlanmış deneme plakaları üzerine sırlanmış sırlarda L* değeri, SGK ilave miktarındaki artış ile düşerken, a* ve b* değerleri, %0,5, %1 ve %2 katkı oranlarında artmakta iken ilave miktarı arttıkça düşmektedir (Çizelge 4). Parlaklık değerleri incelendiğinde ise tüm deneme plakaları için en yüksek SGK katkı oranına sahip sır kompozisyonlarında en düşük parlaklık değeri gözlemlenmiştir.

Çizelge 2. Beyaz döküm çamur ile hazırlanmış deneme plakaları üzerine uygulanan SGK katkılı sırların renk ve parlaklık değerleri

Numune Kodu	L*	a*	b*	Parlaklık (60°)
BT	85,32	4,48	9,25	38,5
BS05	68,09	12,21	16,2	37,8
BS1	60,16	11,57	16,01	40,6
BS2	56,47	12,85	15,41	53,1
BS3	40,51	6,89	7,13	47,2
BS4	37,91	6,68	6,29	43,6
BS5	35,87	6,03	5,14	34,3
BS10	31,46	5,45	3,33	6,3

Çizelge 3. Şamotlu çamur ile hazırlanmış deneme plakaları üzerine uygulanan SGK katkılı sırların renk ve parlaklık değerleri

Numune Kodu	L*	a*	b*	Parlaklık (60°)
ST	76,77	10,48	20,82	23,6
SS05	65,13	13,75	18,75	27,1
SS1	54,22	13,43	16,26	29,5
SS2	52,54	12,43	14,57	28,5
SS3	40,64	7,85	8,15	24,2
SS4	39,19	5,92	6,15	22,4
SS5	36,68	5,48	5,5	34,5
SS10	31,57	5,74	3,84	4,8

Çizelge 4. Kırmızı çamur ile hazırlanmış deneme plakaları üzerine uygulanan SGK katkılı sırların renk ve parlaklık değerleri

Numune Kodu	L*	a*	b*	Parlaklık (60°)
KT	60,81	17,28	14,05	24,1
KS05	56,8	15,49	14,25	36,1
KS1	49,92	17,31	16,11	41,6
KS2	49,45	15,47	14,18	39,1
KS3	40,71	8,3	8,06	38,7
KS4	37,72	7,04	6,93	35,5
KS5	36,87	6,83	6,13	44,5
KS10	31,89	5,84	3,53	7,1

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ticari şeffaf sır içerisine farklı oranlarda ilave edilen Simenit Gölü kumunun seramik sırlarında alternatif hammadde olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan analizler ile SGK'nın yüksek miktarda Fe_2O_3 içerdiği saptanmıştır. Farklı oranlarda SGK katkısı ile hazırlanan sır kompozisyonları öncelikle üç farklı seramik bünye yüzeyine uygulanmış ve sırlanmış bünyeler 900°C de pişirilmiştir. Pişirim sonrası farklı oranlarda SGK katkısı ile hazırlanan sırlar ile sırlanmış tüm deneme plakalarında sarıdan kırmızı kahverengine renk geçişi gözlemlenmiştir. SGK'nın içerdiği yüksek Fe_2O_3 nedeniyle rengin açıklık ve koyuluk değerini ifade eden L* değerinde azalma eğilimi görülmüştür. En yüksek ilave oranına sahip sırlı numunelerde en düşük L* değeri elde edilmiştir. Kırmızılığı ifade eden a* ve sarılığı ifade eden b* değerleri, düşük katkı

oranlarında artmakta iken ilave miktarı arttıkça düşmektedir. Tüm sırlanmış deneme plakaları için parlaklık değerleri incelendiğinde ise en yüksek SGK katkı oranına sahip sır kompozisyonlarında en düşük parlaklık değeri gözlemlenmiştir. Sonuç olarak; ticari olarak temin edilen şeffaf sır kompozisyonuna %0,5-%10 aralığında değişen oranlarda SGK katkısı ile renkli sır elde etmek mümkün olup hazırlanan sır kompozisyonları farklı seramik bünyelere başarılı bir şekilde uygulanmıştır. SGK katkılı sırlar ile özellikle artistik sır uygulamaları için sarıdan kırmızı kahverengi renk geçişleri elde edilmiştir.

6. KAYNAKLAR

1. Vandiver, P.B., 1990. Ancient Glazes, Scientific American, 262(4), 106-113.
2. Richerson, D.W., 2012. The Magic of Ceramics, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
3. Strecker, K., Costa, H.B., 2014. Formulation of Ceramic Glazes by Recycling Waste Glass, Materials Science Forum, 775-776, 635-641.
4. Silva, R.C, Pianaro, S.A., Tebcherani, S.M., 2012. Preparation and Characterization of Glazes from Combinations of Different Industrial Wastes, Ceramics International, 38, 2725-2731.
5. Kılınc Mirdalı, N., 2017. Inorganic Wastes in Glaze Recipes and Their Effects on Microstructure, Journal of the Australian Ceramic Society, 53(2), 713-718. <https://doi.org/10.1007/s41779-017-0084-0>.
6. Karasu, B., Çakı, M., Akgün, E., 2002. Seydişehir Alüminyum Tesisi Atığı Kırmızı Çamurdan Üretilen Pigmentlerin Yer ve Duvar Karosu Sırlarında Değerlendirilmesi, 2. Uluslararası Eskişehir Pişmiş Toprak Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 138-144.
7. Çakı, M., Karasu, B., 2007. Artvin-Borçka Bölgesi Kırmızı Kilinin Özellikleri, Seramik Çamur ve Astar Üretiminde Kullanımı, SERES IV. Uluslararası katılımlı Seramik, Cam, Emaye, Sır ve Boya Semineri Bildiriler Kitabı, 495- 503.
8. Kılınc Mirdalı, N., Daday, M., Taykurt Daday, M., 2019. Development and Characterization

- of Low Temperature Metallic Glazes in Na₂O-B₂O₃-SiO₂ (NBS) System, *Ceramics International*, 45, 21661-21667.
9. Çetin, S., Kılınç, N., 2004. Tüysüz Köyü Bazaltının Duvar Karosu Sırlarında Kullanım Olanakları Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 13, 89-96.
 10. Tizgöl, K., Gündeşlioğlu, Ö., 2016. Bir Sera Atığı Olarak Patlıcan Dalı Külünün Düşük Dereceli Seramik Sırlarında Kullanımı, *Akdeniz Sanat Dergisi*, 9(18), 11-20.
 11. Kılınç Mirdal, N., Halefoğlu, Y.Z., Sakarya, N., 2006. Almanpınarı Kırmızı Kilinin Seramikte Boya Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 15(1), 229-234.
 12. Aşkın, A., Kınalı, B., Arkon, O. M., Tatar, İ., 2019. CRT Cam Atıklarının Seramik Sağlık Gereçlerinin Bünye ve Sırlarında Değerlendirilmesi, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24, 95-101.
 13. Taçyıldız, E., 2018. Uçucu Külün Temmoku Sır Özelliklerine Etkileri, *Yedi: Sanat, Tasarım ve Bilim Dergisi*, 20, 39-44.
 14. Ovcacikova, H., Vıcek, J., Klarova, M., Topinkova, M., 2017. Metallurgy Dusts as a Pigment for Glazes and Engobes, *Ceramics International*, 43(10), 7789-7796.
 15. Genç, S., Kurt, T., 2017. Etibank Bandırma Boraks Fabrikası Atığının Aventurin Sır Bünyelerinde Alternatif Hammadde Olarak Kullanımı, *Art-E Sanat Dergisi*, 10(19), 187-202.
 16. Pekkan, K., Taşçı, E., Uz, V., 2015. Production of Metallic Glazes and Their Industrial Applications, *Journal of The Australian Ceramic Society*, 51, 110-115.

Ag-Pt-W/TiO₂ Katalizörünün SCR Aktivitesinin Araştırılması

Zeycan KESKİN*¹

¹Milli Eğitim Bakanlığı, Kimya, Adana

Geliş tarihi: 24.08.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Bu çalışmada gümüş (Ag)-platin (Pt)-tungsten (W) içeren katalizörün azot oksitlerin (NO_x) seçici katalitik indirgenmesine (SCR) etkisi araştırılmıştır. Katalizör destek materyali olarak kordiyerit kullanılmış olup katalizör üretiminde daldırma yöntemi kullanılmıştır. Kaplamadan önce kordiyerit materyali %40'lık okzalik asit çözeltisiyle ön muamele işleminden geçirilmiş ve yüzey alanı artırılarak kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Kaplama işleminden sonra BET analizi ile katalizör karakterize edilmiştir. Sentezlenen katalizör ile ön muamele işleminden geçirilmeyen kordiyeritin yüzey alanı karşılaştırıldığında, katalizörün yüzey alanının yaklaşık olarak 60,76 kat fazla olduğu tespit edilmiştir. Ag-Pt-W/TiO₂ katalizörünün aktivitesi 200 ile 270 °C sıcaklık aralığında, üç farklı akış hızında (40000 h⁻¹, 50000 h⁻¹, 60000 h⁻¹) ve dört farklı motor yükünde (1 kW, 2 kW, 3 kW, 4 kW) araştırılmıştır. Katalitik aktivitenin sıcaklık artışına bağlı olarak arttığı fakat motor yükü artışına bağlı olarak azaldığı belirlenmiştir. Katalizörün en yüksek NO_x dönüşüm oranı %86,1 olarak bulunmuştur ve bu değer 40000 h⁻¹ akış hızında, 270 °C sıcaklıkta ve 4 kW motor yükünde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Etanol, Katalizör, NO_x, SCR

Investigation on SCR Activity of Ag-Pt-W/TiO₂ Catalyst

Abstract

In this study, the effect of catalyst containing silver (Ag)-platinum (Pt)-tungsten (W) on the selective catalytic reduction (SCR) of nitrogen oxides (NO_x) was investigated. Cordierite was used as catalyst support material and catalyst production was carried out by impregnation method. Before coating, the cordierite material was pre-treated with 40% oxalic acid solution and made ready for coating by increasing the surface area. After coating, the catalyst was characterized by BET analysis. When the surface area of not pre-treated cordierite and synthesized catalyst was compared, it was found that the surface area of the catalyst was approximately 60.76 times higher. The activity of the Ag-Pt-W/TiO₂ catalyst within the temperature range of 200 to 270 °C, at three different space velocities (40000 h⁻¹, 50000 h⁻¹, 60000 h⁻¹) and four different engine loads (1 kW, 2 kW, 3 kW 4 kW) has been investigated. It was found that the catalytic activity increased with the increase in temperature but decreased with the increase in the engine load. The highest NO_x conversion ratio of the catalyst was found to be 86.1%, which was achieved at 40000 h⁻¹ space velocity, 270 °C temperature and 4 kW engine load.

Keywords: Ethanol, Catalyst, NO_x, SCR

* Sorumlu yazar (Corresponding author): Zeycan KESKİN, zeycankeskin01@gmail.com

1. GİRİŞ

Günümüzde hava kirliliği önemli boyutlara ulaşmış olup çevreyi ve insan sağlığını etkilemektedir. Hava kirliliğinin artışındaki en büyük etkenlerden biri motorlu taşıtlardan salınan egzoz gazlarıdır.

Dizel motorların benzinli motorlara nazaran yüksek verimi, yüksek dayanımı ve güvenilirlikleri nedeniyle kullanımı giderek yaygınlaşmıştır. Dizel motorlar avantajlar sunsa da önemli oranda kirletici emisyonlar salmaktadır. Kirletici emisyonların oranı %1'den az olmasına rağmen yüksek oranda NO_x emisyonu salması dizel motorların çevre açısından daha dikkatli değerlendirilmesini gerektirmektedir [1,2]. Birçok ülke tarafından uyulması gereken egzoz emisyon standartları bulunmaktadır. Egzoz emisyon standartlarının giderek daha sıkı hale getirilmesi sonucunda bu sıkı standartların sağlanması ancak emisyon kontrol sistemlerinin kullanımı ile mümkün olmaktadır [3].

Dizel motorlardan salınan NO_x emisyonlarının azaltılması amacıyla uygulanan emisyon kontrol sistemlerinden en etkili SCR sistemidir. SCR sisteminde bir indirgeyici kullanımıyla ve katalizör yardımıyla NO_x, N₂ ve H₂O'ya dönüşmektedir [1,4-7].

SCR sisteminde indirgeyici olarak amonyak, sulu üre çözeltisi (AdBlue), hidrojen ve hidrokarbonlar kullanılmaktadır [4]. İndirgeyici olarak amonyak ve amonyak kaynağı olarak sulu üre çözeltisinin kullanımı amonyağın kolayca alevlenmesi, motor parçalarının aşınması, depolanmasının zor olması gibi birçok olumsuz duruma neden olmaktadır. Hidrojenin de yanıcı ve patlayıcı özellikte olması nedeniyle SCR sisteminde indirgeyici olarak kullanımı zordur. Bu nedenlerden dolayı son zamanlarda indirgeyici olarak hidrokarbonların ve oksijenli hidrokarbonların kullanımı yaygınlaşmıştır [8,9].

SCR sistemlerinde NO_x azaltılması bir katalizör yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Katalizörler

substrat materyal, substrat kaplama materyali ve katalitik etki gösteren bileşiklerden oluşmaktadır. Substrat materyali olarak genellikle kordiyerit (2Al₂O₃.5SiO₂.2MgO) kullanılmaktadır. Kordiyerit düşük termal genleşme katsayısına sahip olup ekonomik açıdan avantajlıdır [10-12]. Substrat kaplama materyali olarak SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, aktif karbon ve zeolit kullanılmaktadır. Metal ve geçiş metallere oksitleri katalizörlerde kullanılan katalitik materyallerdir [10,13].

Ag/Al₂O₃ katalizörleri indirgeyici olarak hidrokarbon ve oksijenli hidrokarbonların kullanımıyla, özellikle etanolle yüksek aktivite göstermektedir [14,15]. Fakat bu katalizörün düşük sıcaklık aktivitesinin kötü olması en büyük dezavantajdır. Platin içeren katalizörler 200-250 °C sıcaklık aralığında aktiftir [2,16,17].

Cao ve arkadaşları yaptıkları çalışmada amonyak kullanımıyla WO₃-TiO₂-SiO₂ ve CeO₂-WO₃/TiO₂-SiO₂ katalizörlerinin yüksek sıcaklıklarda SCR performansını araştırdılar. Her iki katalizörün 450-600 °C sıcaklık aralığında NO_x dönüşüm oranının % 80'in üzerinde olduğunu tespit ettiler [18]. Chen ve arkadaşları V₂O₅-TiO₂ katalizörü ve V₂O₅/WO₃-TiO₂ katalizörü ile çalışma yaptılar. V₂O₅-TiO₂ katalizörü ile 350 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda NO_x dönüşümünün % 95'den fazla olduğunu tespit ettiler. V₂O₅/WO₃-TiO₂ katalizörünün daha düşük sıcaklıklarda daha aktif olduğunu belirlediler [19].

Bu çalışmada Ag içeren katalizörün düşük sıcaklık aktivitesinin Pt ve W kullanılarak artırılması amaçlanmıştır. Katalizör üretiminde daldırma yöntemi kullanılmıştır. Üretilen katalizörün düşük sıcaklık aktivitesinin araştırılması amacıyla testler 270 ile 200 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Değişik parametrelerde NO_x dönüşüm oranları (40000 h⁻¹, 50000 h⁻¹, 60000 h⁻¹ akış hızlarında ve 1 kW, 2 kW, 3 kW, 4 kW motor yüklerinde) tespit edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Katalizör Hazırlanması ve Karakterizasyonu

2.1.1. Kordiyerit Malzemenin Ön Muamelesi

Katalizör üretiminde kullanılan kordiyerit malzeme ticari olarak temin edilmiş olup hacmi 200 cm^3 olarak ayarlanmıştır. Kordiyerit malzemenin yüzey alanının yaklaşık olarak $0,5 \text{ m}^2/\text{g}$ olması katalizör aktif bileşenlerinin dağılımını ve dolayısıyla katalizörün SCR aktivitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle kordiyerit malzeme kaplama işleminden önce ön muameleden geçirilerek yüzey alanı artırılmıştır.

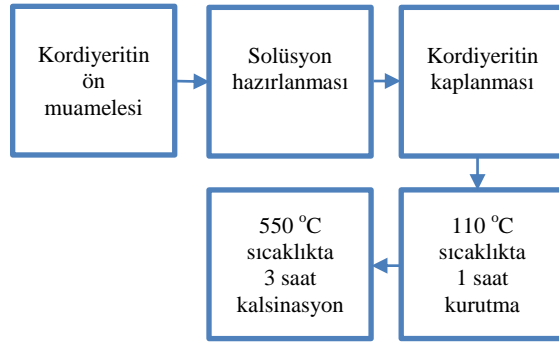
Ön muamele işlemi için %40'lık okzalik asit çözeltisi hazırlanmıştır. Okzalik asit çözeltisi ısıtılarak içine kordiyerit malzeme eklenmiş ve 3 saat boyunca sıcak çözelti içerisinde muamele edilmiştir. 3 saatin sonunda kordiyerit malzeme asitliği gidene kadar saf su ile yıkanmıştır. Daha sonra $110 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta fırında kurutulup akabinde $550 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kül fırınında kalsine edilmiştir.

2.1.2. Katalizörün Hazırlanması, Karakterizasyonu

Katalizörlerin hazırlanması için kaplama solüsyonu hazırlanmıştır. Solüsyon hazırlanması amacıyla %99,99 saflıkta Sigma-Aldrich marka amonyum (para) tungstat hidrat $[(\text{NH}_4)_{10}\text{H}_2(\text{W}_2\text{O}_7)_6]$, ≥ 50 Pt esaslı tetra amin platinum (II) nitrat $[\text{Pt}(\text{NH}_3)_4(\text{NO}_3)_2]$, titanyum dioksit (TiO_2) ve gümüş nitrat (AgNO_3) kullanılmıştır. Solüsyon hazırlanması sırasında 250 mL distile suyun içerisine, yapılan hesaplamalar doğrultusunda katalitik aktif madde içeriği kütlece % 2,5 Ag, % 0,9 Pt ve % 2,5 W olacak şekilde AgNO_3 , $(\text{NH}_4)_{10}\text{H}_2(\text{W}_2\text{O}_7)_6$, $\text{Pt}(\text{NH}_3)_4(\text{NO}_3)_2$ ve 50 g TiO_2 eklenmiştir. Katalitik maddeler ile substrat malzemenin yapışma gücünün artırılması amacıyla solüsyonun içerisine $0,5 \text{ g}$ SiO_2 ilave edilmiş ve 30 dakika boyunca ultrasonik karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır.

Hazırlanan solüsyona ön muameleden geçirilen kordiyerit malzeme daldırılarak kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından tıkanan gözenekler yavaşça üflenerek açılmıştır. Kaplanan malzeme $120 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki fırında 1 saat boyunca kurutulduktan sonra $550 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kül fırınında 3 saat boyunca kalsine edilerek kaplama işlemi tamamlanmıştır. Katalizör üretim şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.

Sentezlenen katalizörün karakterizasyonu Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında (Çümerlab)'da yapılmıştır. Yüzey alanı ve mikro gözenek ölçümü Sorptometer 1042 markalı cihaz ile Brunauer-Emmett-Teller (BET) metodu kullanılarak sıvı azotun fiziksel adsorpsiyonu tekniğine dayalı olarak analiz edilmiştir.



Şekil 1. Katalizör üretim şeması

2.2. Performans Test Sistemi

Performans test sistemi Çukurova Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Laboratuvarında kurulmuş olup kullanılan egzoz gaz numunesi 3000 devir/dk sabit devirde çalışan AKSA A2CRX08 marka iki silindirli V tipi dizel motordan elde edilmiştir. Performans test sistemi bir dizel oksidasyon katalizörü (DOC) ve bir SCR katalizöründen oluşmaktadır. İndirgeyici olarak kullanılan etanol, DOC ve SCR katalizörü arasında bulunan karışım odasına gönderilmektedir. İndirgeyicinin gönderilmesi, bir elektrikli pompa ve çok noktalı elektro-hidrolik enjektör ile kontrol edilmektedir. Farklı yüklerde egzoz gazı

içerisindeki NO_x miktarı değişmektedir. Bu değişimin etkisinin araştırılması amacıyla testler 1 kW, 2 kW, 3 kW ve 4 kW yüklerde yapılmıştır. Katalizör performansı sıcaklık değişiminden büyük oranda etkilenmektedir. Katalizörün performansına sıcaklığın etkisinin tespit edilmesi için testler 200 ile 270 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Egzoz gazı örnekleri, bir elektrikli ısıtıcı ile ısıtılmıştır. Sıcaklık değişimleri iki adet K tipi termokupl sıcaklık sensörü ile belirlenmiştir. Testler 40000 h⁻¹, 50000 h⁻¹, 60000 h⁻¹ akış hızlarında yapılmıştır. Gaz akış hızı 10000 h⁻¹ ila 100000 h⁻¹ arasında ölçüm kapasitesine sahip olan orifis delikli plaka ile ölçülmüştür. Orifis plakasındaki basınç dijital ve U manometre kullanılarak kontrol edilmiştir. NO_x dönüşüm oranlarını ölçmek için SCR katalizörü öncesi ve sonrası iki adet Continental UniNOx sensörü kullanılmıştır. NO_x dönüşüm oranları bilgisayar ekranı ile takip edilmiştir.

NO_x giriş ve NO_x çıkış SCR katalizörünün giriş ve çıkışındaki NO_x dönüşüm miktarlarını belirtmek üzere % NO_x dönüşüm oranı aşağıdaki denkleme göre hesaplanmıştır (Eşitlik 1):

$$\% \text{NO}_x \text{ dönüşüm oranı} = \left(\frac{[\text{NO}_x]_{\text{giriş}} - [\text{NO}_x]_{\text{çıkış}}}{[\text{NO}_x]_{\text{giriş}}} \right) \times 100 \quad (1)$$

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Katalizörün Karakterizasyonu

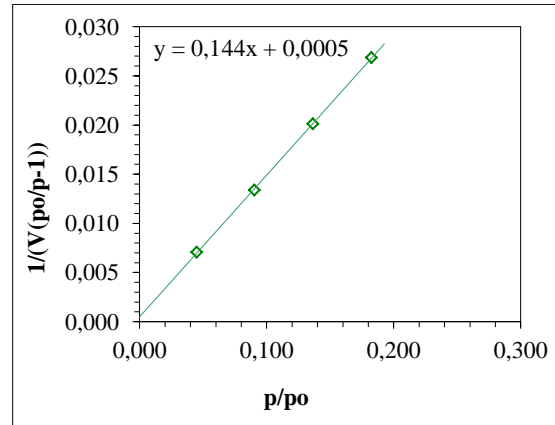
Tablo 1’de katalizörün BET yüzey alanı, Langmiur yüzey alanı, mikro gözenek alanı ve mikro gözenek hacmi değerleri verilmiştir. Kordiyerit materyalin yüzey alanı yaklaşık 0,5 m²/g’dir. Ön muamele sonrasında yapılan kaplama işlemi ile elde edilen katalizörün BET yüzey alanı 30,38 m²/g olarak tespit edilmiştir. Katalizörün yüzey alanı kaplanmamış kordiyeritin yüzey alanına göre 60,76 kat daha fazladır. Yüzey alanındaki bu artış katalizörün SCR aktivitesini olumlu yönde etkilemesi açısından önemlidir.

Çizelge 1. Katalizörün yüzey alanı, gözenek alanı ve gözenek hacmi değerleri

	BET yüzey alanı (m ² /g)	Langmiur yüzey alanı (m ² /g)	Mikro gözenek alanı (m ² /g)	Mikro gözenek hacmi (mm ³ /g)
Ag-Pt-W/TiO ₂	30,38	39,68	8,14	2,86

Langmuir yüzey alanı her zaman BET yüzey alanından daha yüksektir. Bu durum Langmuir yüzey alanı analizinin adsorplanan gazın tek tabaka halinde adsorbe olduğu, tüm yüzeye homojen biçimde dağıldığı ve adsorbe olan gazların kendi aralarında etkileşmediği varsayımına dayanmasından kaynaklanmaktadır.

Gözeneklerin yüzey alanları ve hacimleri BJH (Barrett-Joyner-Halenda) metoduyla belirlenmektedir. Katalizörün mikro gözenek alanı 8,14 m²/g bulunurken mikro gözenek hacmi 2,86 mm³/g olarak tespit edilmiştir.



Şekil 2. Katalizörün BET doğrusu

BET doğruları yüzey alanı hakkında bilgi veren doğrulardır. 0,05<P/Po<0,3 aralığındaki bağıl denge basıncının adsorplama kapasitelerinin belirlenmesiyle elde edilen katalizörün BET doğrusu Şekil 2’de gösterilmiştir. BET doğrusunun eğiminden faydalanılarak özgül yüzey alanı hesaplanmaktadır.

3.2. NO_x Dönüşüm Oranları

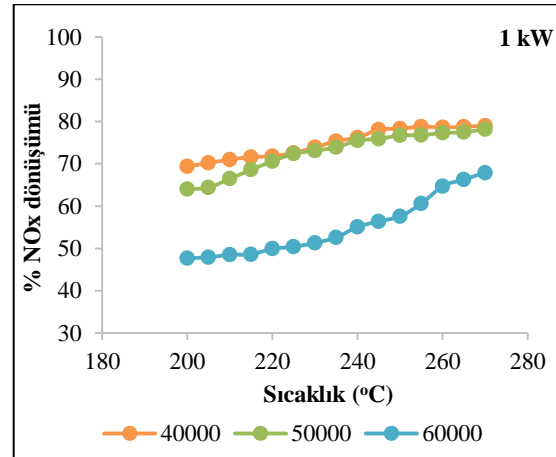
Şekil 3-6'da Ag-Pt-W/TiO₂ katalizöründe sıcaklık, akış hızı ve motor yüküne bağlı olarak etanol ile elde edilen %NO_x dönüşüm oranları verilmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi sıcaklık artışıyla birlikte katalizörün aktivitesi artmış ve en yüksek NO_x dönüşüm oranları 270 °C sıcaklıkta elde edilmiştir. 200 °C sıcaklıkta tespit edilen en yüksek NO_x dönüşüm oranı %79,9 iken 270 °C sıcaklıkta bu oran %86,1'e yükselmiştir. NO_x dönüşüm oranı verileri üretilen katalizörün SCR performansının literatürdeki çalışmalarıyla karşılaştırıldığında oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum bilimsel açıdan gelecekte yeni çalışmaların yapılmasına katkı sağlayacaktır.

Katalizör verimini etkileyen en önemli etken üretimde kullanılan katalitik aktif maddelerdir. Gümüş içerikli katalizörlerin 300 °C sıcaklıkta, Pt içerikli katalizörlerin ise 200-250 °C sıcaklık aralığında daha aktif olduğu bilinmektedir [2,16,17]. 250-270 °C sıcaklık aralığında artan katalitik aktivitenin sentezlenen katalizöre W eklenmesinden kaynaklandığı sonucuna varılabilir. Chen ve arkadaşları tarafından W ilavesinin katalizörün düşük sıcaklık performansını arttırdığı belirlenmiştir [19].

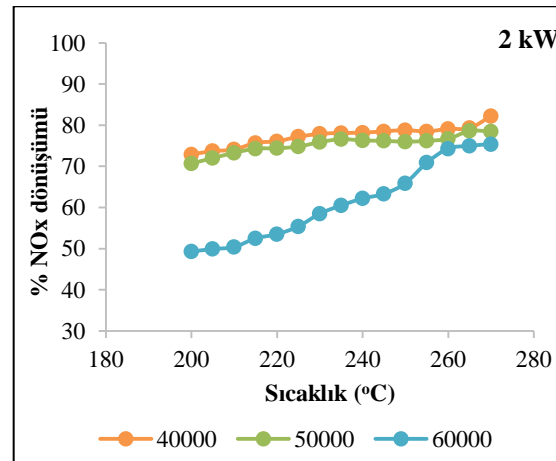
Ag-Pt-W/TiO₂ katalizörü ile 40000 h⁻¹, 50000 h⁻¹ ve 60000 h⁻¹ gaz akış hızında elde edilen maximum % NO_x dönüşüm oranları sırayla %86,1, %81,2 ve %77,1'dir. 40000 h⁻¹ ile 50000 h⁻¹ akış hızında tespit edilen % NO_x dönüşüm oranları birbirine yakın değerlerde olsa da 60000 h⁻¹'deki oranlar son derece düşüktür. Katalitik aktivitenin gaz akış hızı açısından karşılaştırılması yapıldığında artan akış hızının katalitik aktiviteyi olumsuz etkilediği ve % NO_x dönüşüm oranlarının azaldığı görülmektedir. Test sonuçları akış hızının artmasıyla katalizör ve indirgeyicinin temas süresinin azaldığını, böylece NO_x dönüşüm oranlarının düştüğünü göstermektedir. Benzer sonuçlar Dong ve arkadaşları tarafından da tespit edilmiştir [20].

Testlerde, motor yüklerinin artmasıyla birlikte genellikle NO_x dönüşüm oranlarının arttığı gözlenmiştir. En yüksek NO_x dönüşüm oranları

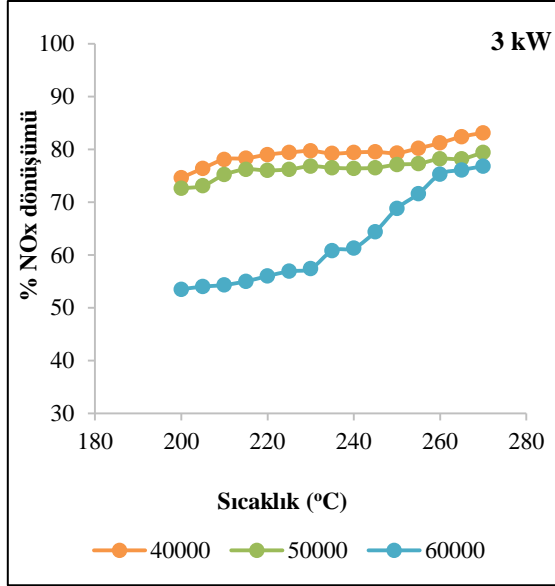
4 kW motor yükünde elde edilmiştir. Egzoz gazındaki O₂ konsantrasyonu, motor yüklerinin artmasıyla azalmaktadır. O₂ konsantrasyonundaki azalmaya bağlı olarak, test sisteminde kullanılan DOC verimliliğini kaybetmekte ve dolayısıyla SCR katalizörüne ulaşan CO ve HC konsantrasyonu artmaktadır. CO ve HC konsantrasyonunun artması ise SCR sisteminde NO_x dönüşüm oranlarının artmasına neden olmaktadır. Motor yükü artışının NO_x dönüşüm oranına etkisi Resitoglu ve arkadaşları ile Keskin ve arkadaşları tarafından da araştırılmış olup benzer sonuçlar elde edilmiştir [21,22].



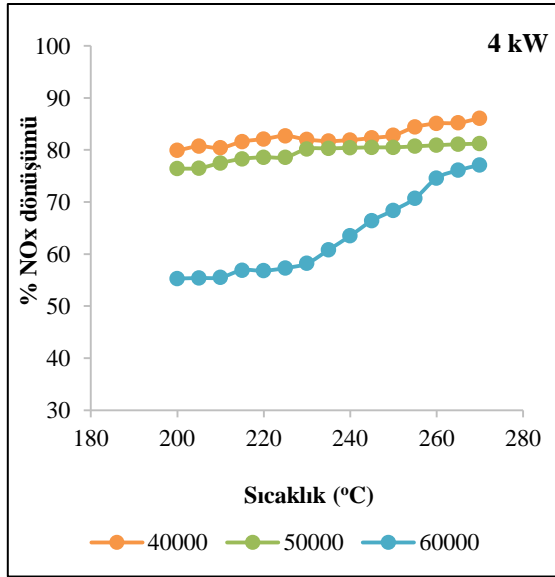
Şekil 3. 1 kW motor yükü altında gaz akış hızının NO_x dönüşümüne etkisi



Şekil 4. 2 kW motor yükü altında gaz akış hızının NO_x dönüşümüne etkisi



Şekil 5. 3 kW motor yükü altında gaz akış hızının NO_x dönüşümüne etkisi



Şekil 6. 4 kW motor yükü altında gaz akış hızının NO_x dönüşümüne etkisi

4. SONUÇLAR

Bu deneysel çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Ön muamele işlemi kordiyeritin yüzey alanının son derece artmasını sağlamıştır. Ön muamele sonrasında yapılan kaplama işlemiyle sentezlenen katalizörün yüzey alanı ön muameleden geçirilmemiş kordiyeritin yüzey alanına göre 60,76 kat daha fazladır. BET analizi ile Ag-Pt-W/TiO₂ katalizörünün tespit edilen yüzey alanı 30,38 m²/g'dır.
- Tüm testlerde reaksiyon sıcaklığının artmasıyla NO_x dönüşüm oranları artmış ve 270 °C sıcaklıkta en yüksek dönüşümler, 200 °C sıcaklıkta en düşük dönüşümler elde edilmiştir. 270 °C sıcaklıkta Ag-Pt-W/TiO₂ katalizörü ile elde edilen maksimum NO_x dönüşüm oranı % 86,1'dir.
- Gaz akış hızının artması katalizör ve indirgeyicinin temas süresini düşürmüştür ve bu nedenle NO_x dönüşüm oranları azalmıştır. Farklı gaz akış hızı ile yapılan testlerde en yüksek NO_x dönüşüm oranları 40000 h⁻¹de elde edilmiştir.
- % NO_x dönüşüm oranları motor yükündeki artışa bağlı olarak artmıştır ve 4 kW motor yükünde maksimum değere ulaşmıştır.

5. KAYNAKLAR

1. Casapu, M., Bernhard, A., Peitz, D., Mehring, M., Elsener, M., Kröcher, O., 2011. A Niobia-Ceria Based Multi-purpose Catalyst for Selective Catalytic Reduction of NO_x, Urea Hydrolysis and Soot Oxidation in Diesel Exhaust. Applied Catalysis B: Environmental, 103, 79–84.
2. Sawatmongkhon, B., 2011. Modelling of Catalytic Aftertreatment of NO_x Emissions Using Hydrocarbon as a Reductant. The University of Birmingham, Doctor of Philosophy.
3. Reşitoğlu, İ.A., Altınışık, K., Keskin, A., 2015. The Pollutant Emissions from Diesel-engine Vehicles and Exhaust Aftertreatment Systems. Clean Technologies and Environmental Policy, 17, 15–27.

4. Valanidou, L., Theologides, C., Zorpas, A.A., Savva, P.G., Costa, C.N., 2011. A Novel Highly Selective and Stable Ag/MgO-CeO₂-Al₂O₃ Catalyst for the Low-temperature Ethanol-SCR of NO. *Applied Catalysis B: Environmental*, 107, 164-176.
5. Shan, W., Liu, F., He, H., Shi, X., Zhang, C., 2012. An Environmentally-benign CeO₂-TiO₂ Catalyst for the Selective Catalytic Reduction of NO_x with NH₃ Insimulated Diesel Exhaust. *Catalysis Today*, 184, 160-165.
6. Wang, J., Liu, Z., Feng, G., Chang, L., Bao, W., 2012. In Situ Synthesis of CuSAPO-34/Cordierite and its Selective Catalytic Reduction of Nitrogen Oxides in Vehicle Exhaust the Effect of HF. *Fuel*, 109, 101-109.
7. Hsieh, M.F., Wang, J., 2011. Design and Experimental Validation of an Extended Kalman Filter-based NO_x Concentration Estimator in Selective Catalytic Reduction System Applications. *Control Engineering Practice*, 19, 346-353.
8. Mrad, R., Aissat, A., Cousin, R., Courcot, D., Siffert, S., 2015. Catalysts for NO_x Selective Catalytic Reduction by Hydrocarbons (HC-SCR). *Applied Catalysis A.: General*, 504, 542-548.
9. Zhang, C., He, H., Shuai, S., Wang, J., 2007. Catalytic Performance of Ag/Al₂O₃-C₂H₅OH-Cu/Al₂O₃ System for the Removal of NO_x from Diesel Engine Exhaust. *Environmental Policy*, 147, 415-421.
10. Li, F., Shen, B., Tian, L., Li, G., He, C., 2016. Enhancement of SCR Activity and Mechanical Stability on Cordierite Supported V₂O₅-WO₃/TiO₂ Catalyst by Substrate Acid Pretreatment and Addition of Silica. *Powder Technology*, 297, 384-391.
11. Popovych, N.O., Kyriienko, P.I., Soloviev, S.O., Orlyk, S.M., Dzwigaj, S., 2016. Influence of Partial Dealumination of BEA Zeolites on Physicochemical and Catalytic Properties of AgAlSiBEA in H₂-promoted SCR of NO with Ethanol. *Microporous and Mesoporous Materials*, 226, 10-18.
12. Wang, J., Peng, Z., Chen, Y., Bao, W., Chang, L., Feng, G. 2015. In-situ Hydrothermal Synthesis of Cu-SSZ-13/cordierite for the Catalytic Removal of NO_x from Diesel Vehicles by NH₃. *Chemical Engineering Journal*, 263, 9-19.
13. Popovych, N.O., Soloviev, S.O., Orlyk, S.M., 2016. Selective Reduction of Nitrogen Oxides (NO_x) With Oxygenates and Hydrocarbons Over Bifunctional Silver-alumina Catalysts: a Review. *Theoretical Experimental Chemistry*, 226 10-18.
14. Yeom, Y.H., Li, M., Sachtler, W.M.H., Weitz, E., 2006. A Study of the Mechanism for NO_x Reduction with Ethanol on γ -alumina Supported Silver. *Journal of Catalysis*, 238 100-110.
15. Yu, Y., He, H., Feng, Q., Gao, H., Yang, X., 2004. Mechanism of the Selective Catalytic Reduction of NO_x by C₂H₅OH Over Ag/Al₂O₃. *Applied Catalysis B: Environmental*, 49, 159-171.
16. Silva, R., Cataluna, R., Martinez-Arias, A., 2009. Selective Catalytic Reduction of NO_x Using Propene and Ethanol Over Catalysts of Ag/ Al₂O₃ Prepared by Microemulsion and Promotional Effect of Hydrogen. *Catalysis Today*, 143, 242-246.
17. Tamaldin, N., 2010. Experimental Investigation of Emission from a Light Duty Diesel Engine Utilizing Urea Spray SCR System. Coventry University, Doctor of Philosophy.
18. Cao, L., Wu, X., Xu, Y., Lin, Q., Hu, J., Chen, Y., Ran, R., Wen, D., 2019. Ceria-modified WO₃-TiO₂-SiO₂ Monolithic Catalyst for High Temperature NH₃-SCR. *Catalysis Communications*, 120, 55-58.
19. Chen, H., Xia, Y., Fang, R., Huang, H., Gan, Y., Liang, C., Zhang, J., Zhang, W., Liu, X., 2018. The Effects of Tungsten and Hydrothermal Aging in Promoting NH₃-SCR Activity on V₂O₅/WO₃-TiO₂ Catalysts. *Applied Surface Science*, 459, 639-646.
20. Dong, H., Shuai, S., Li, R., Wang, J., Shi, X., He, H., 2008. Study of NO_x Selective Catalytic Reduction by Ethanol Over Ag/Al₂O₃ Catalyst on a HD Diesel Engine. *Chemical Engineering Journal*, 135, 195-201.
21. Resitoglu, I.A., Altinisik, K., Keskin, A., Ocakoglu K., 2020. The Effects of Fe₂O₃ Based DOC and SCR Catalyst on the Exhaust

- Emissions of Diesel Engines. Fuel, 262, 116501.
- 22.** Keskin, A., Yaşar, A., Candemir, O.C., Özarlan, H., 2020. Influence of Transition Metal Based SCR Catalyst on the NO_x Emissions of Diesel Engine at Low Exhaust Gas Temperatures. Fuel, 273, 117785.

Alternatif FML Kompozitler için Titanyum ve Elyaf/Epoksi Ara Yüzey Dayanımının İncelenmesi

Mete Han BOZTEPE*¹, Melih BAYRAMOĞLU¹, Çağrı UZAY², Necdet GEREN¹

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana

²Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş

Geliş tarihi: 22.09.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Öz

Elyaf takviyeli polimer kompozit yapılar, hafifliğin yanı sıra yüksek mukavemete sahip olup nem, korozyon gibi çevresel etmenlere karşı direnç gösterirler ancak ani darbe yüklerine karşı zayıf ve kırılındır. Bu yüzden araştırmacılar özellikle uzay-havacılık ve savunma sanayi alanları için elyaf ve metal malzemeleri bir arada lamine ederek FML (Fiber Metal Laminate) kompozitleri geliştirmişlerdir. FML kompozitler elyaf ve metallerin avantajlarını bir araya getirirken dezavantajlarını ise elimine etmektedir. Fakat elyaf ve metal katmanların ara yüzey dayanımının tespiti FML kompozitin etkinliği üzerinde önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada metal olarak TiGR2 serisi titanyum ve elyaf olarak $\pm 45^\circ$ oryantasyonlu karbon ve cam kullanılarak ASTM D 5868 standardına göre üretilen kompozitlerin ara yüzey dayanımları araştırılmıştır. Vakum torbalama yöntemi ile üretilen elyaf kompozitlerde kullanılan epoksi matris malzemesi metal yüzeylerin yapıştırılmasında da kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elyaf metal katmanlı kompozit (FML), Titanyum, Ara yüzey dayanımı, Tek bindirmeli kayma testi

Investigating the Interfacial Strength of Titanium and Fiber/Epoxy for The Alternative FML Composites

Abstract

Fiber-reinforced polymer composites provide high strength to weight ratio, resist to environmental effects, but they have poor impact strength due to brittleness. Therefore, researchers have developed fiber metal laminates (FMLs) particularly for aerospace, aviation and defence industries. FML composites combine the advantages of both metal alloys and fibers but eliminate their drawbacks. However, the bonding strength of fiber-metal interface plays an important role for effectiveness of FML composites. In this study, the interfacial strength values of TiGr2 series titanium sheets and $\pm 45^\circ$ oriented fiber/epoxy composites (glass and carbon) were investigated by applying single lap shear tests based on ASTM D 5868. Epoxy based adhesive was used as a matrix during manufacturing for joining titanium sheets to composite laminates.

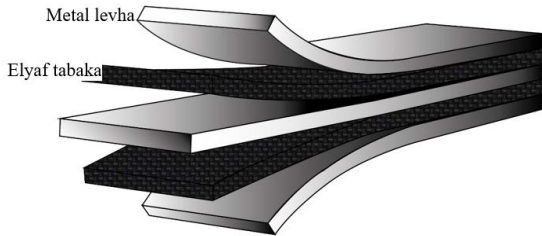
Keywords: Fiber metal laminated composite (FML), Titanium, Single lap shear test, Interfacial strength

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Mete Han BOZTEPE, mboztepe@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Elyaf takviyeli polimer kompozit yapılara olan talep onların üstün mekanik özelliklerinden dolayı gün geçtikçe artmaktadır. En az iki malzemenin bir araya gelerek avantajlarını bir yapıda birleştirdiği, dezavantajlarını elimine ettiği kompozit yapılar, genellikle uzay-havacılık, otomotiv, denizcilik, savunma, spor ekipmanları gibi endüstrilerde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır [1].

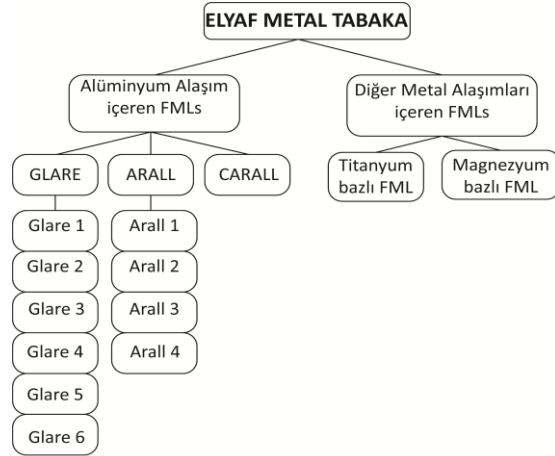
FRP (fiber-reinforced polymer) kompozitlerinin birçok avantajının yanısıra metalik malzemelere kıyasla daha düşük yük taşıma (bazı elyaf dizilimlerinde) ve düşük darbe dayanımı gibi özelliklere sahiptirler. Bu dezavantajları nedeniyle, Elyaf Metal Katmanlı (FML'ler) olarak adlandırılan ve cam, karbon, kevlar takviyeli geleneksel kompozitlere göre daha yenilikçi sayılan kompozit malzeme türü geliştirilmiştir. Elyaf metal katmanlı FML'ler yüksek performanslı hibrit yapılar olup uçakların gövde, kanat, kuyruk ve motor taşıma yapılarında yoğun olarak kullanılan malzemelerdir. Tipik bir FML, Şekil 1'de gösterildiği gibi ince metal alaşımı ile sentetik lif takviyeli polimer matrislerden oluşmaktadır [2-4].



Şekil 1. Elyaf Metal Katmanlı (FML) kompozitlerin gösterimi

FML kompozitler, literatürde ve endüstriyel uygulamalarda Glare (cam elyaf-alüminyum), Arall (aramid-alüminyum) ve Carall (karbon elyaf-alüminyum) ticari isimleri ile farklı standart kalitelere bulunmakta olup matris malzeme olarak istenilen özellikleri sağlaması sebebiyle genellikle epoksi reçine ve ona uygun sertleştirici malzemeler tercih edilmektedir. FML kompozitler ve türleri Şekil 2'deki gibi sınıflandırılmıştır [5]. Yapılan araştırmalar Arall ve Carall'ın hala

geliştirilmeye muhtaç olduğunu gösterirken, cam elyafı içeren Glare'in darbe yükü altındaki davranışının diğerlerine göre daha iyi olduğunu göstermiştir [6]. Bu da kompozit yapıdaki ara yüzey dayanımlarının FML tipine ve kullanılan malzemelere bağlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. FML kompozitlerin sınıflandırılması

FML kompozitlerde metallerin varlığı yapıya yüksek tokluk kazandırdığı için darbe dayanımı iyileştirmekte elyaflar ise dinamik yükler altında çatlak ilerlemesine engel olmaktadır. Bu durum yapılarda yorulma performansını ve hasar toleransını kayda değer artırdığından dolayı FML kompozit malzemeleri ön plana çıkarmaktadır [7-10].

Özellikle uzay-havacılık ve savunma sanayi gibi alanlarda kompozit yapının yüksek sıcaklıklarda da mekanik özelliklerini koruyabilmesi için daha kararlı yapıda olan titanyum levhaların bilinen FML kompozitlere alternatif olabileceği yönünde çalışmalar bulunmaktadır. Çünkü alüminyum bazlı FML kompozitlerin yüksek sıcaklıklarda yetersiz sürünme (creep) dirençleri sebebiyle istenilen mekanik özellikler elde edilememektedir. Ayrıca çevresel etmenlere karşı da titanyum levhaların kararlı yapıları onların diğer avantajlarından [11]. Jin ve arkadaşları [12] FML kompozitin yüksek sıcaklıklarda da yüksek darbe direnci ve yorulma dayanımı sağlaması için titanyum levha ve cam elyaftan FML üretimi yapmışlar ve farklı sıcaklıklarda katmanlar arası ayrılma hasarlarını

inceleyerek yorulma davranışını sıcaklığa bağlı denklemler ile tarif etmişlerdir. Araştırmacılar titanyum bazlı FML kompozitleri genellikle sıcaklığa bağlı yorulma yükleri altındaki davranışlarını incelemişlerdir ancak çekme, eğilme, ara yüzey bağ mukavemeti gibi diğer mekanik özellikler hakkında yapılan çalışmalar sınırlıdır. Bourlegat ve arkadaşları [13] titanyum bazlı FML kompozitin GLARE ve CARALL tipi FML malzemelere göre oldukça yüksek çekme dayanımına sahip olduğunu göstermiştir.

FML tipi kompozitlerde katmanlar arası dayanımın araştırılması için genellikle tek bindirmeli kayma testine başvurulur. Bora ve arkadaşları [14] 2024 serisi alüminyum alaşımlı levha ile tek yönlü karbon/epoksi kompozit tabakaları Loctite marka epoksi bazlı yapıştırıcı ile yapıştırmış ve kayma dayanımını test etmiştir. Yaklaşık 6,5 MPa elde edilen ara yüzey dayanımı daha sonra silan ve elyaf lazer işlemleri ile yüzey iyileştirmeleri yaparak bu dayanımı artırmışlardır. Logesh ve arkadaşları [15] cam elyaf ve alüminyum 5052 serisi alaşım levha yı epoksi matris ile FML üretimi yapmışlardır. Ayrıca çok duvarlı karbon nano tüpler (KNT) kullanarak yapıdaki mekanik değişiklikleri de incelemişlerdir. Tek bindirmeli kayma test sonuçlarına göre KNT içermeyen numuneler en fazla 908 N taşıırken, ağırlıkça %3 KNT içeren yapı 1170 N ile en fazla yükü taşımıştır, %5 KNT içeren yapı ise 210 N yük taşıdığı görülmüştür. Zhang ve arkadaşları [16] karbon elyaf ve polyamid reçine ile tabakalandırdığı komozit yapıyı TA2 serisi titanyum levha ile yapıştırmış ve kayma testinde 5,6 MPa dayanım elde etmiştir. Dayanımı artırmak için yapıya belirli oranlarda çok duvarlı KNT ilave etmiş ve testleri tekrarlamıştır. En fazla dayanım %5 KNT içeren yapının testinde ortalama 9,87 MPa olarak bulunmuştur.

Bu çalışmada, bilinen FML kompozitlere alternatif olabilmesi amacıyla $\pm 45^\circ$ elyaf oryantasyonuna sahip cam ve karbon elyaflar ile TiGr2 serisi titanyum malzemelerin ara yüzey bağ mukavemeti araştırılmıştır. Çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Öncelikle vakum torbalama yöntemi ile cam/epoksi ve karbon/epoksi kompozit tabakalar üretilmiş ardından ASTM D 5868 [17] standardına

göre hazırlanan kompozit ve metal levhalar yine aynı üretim yöntemi ile üretilen tek bindirmeli kayma numuneleri elde edilmiştir. Standartta uygun olarak yapılan testler neticesinde farklı metal içeren alternatif FML uygulamalarına örnek olabilecek sonuçlar sunulmuştur.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Çalışmada metal olarak Titanyum-TiGR2 serisi ve elyaf olarak da $\pm 45^\circ$ dizilimli karbon ve cam elyaflar kullanılmıştır. Çizelge 1'de titanyumun kimyasal kompozisyonu, Çizelge 2'de ise elyafların fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1. TiGR2 serisi titanyumun kimyasal kompozisyonu

% Ti	% C	% Fe	% N
99	0,08	0,3	0,03

Çizelge 2. Karbon ve cam elyafların fiziksel özellikleri

	Yoğunluk (g/m ²)	Kalınlık (mm)
Karbon $\pm 45^\circ$	300	0,40
Cam $\pm 45^\circ$	468	0,42

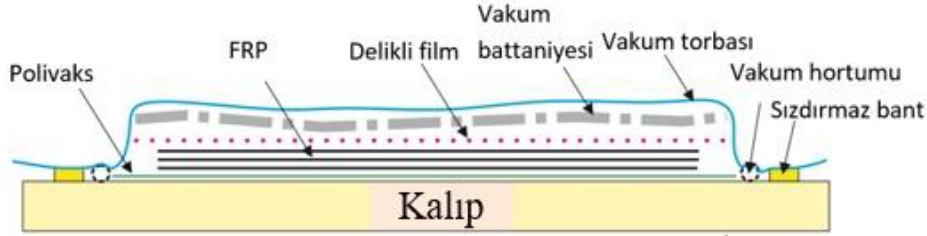
2.2. Metot

Hem elyaf takviyeli kompozitlerin hem de tek bindirmeli kayma test numunelerinin üretimi farklı aşamalarda vakum torbalama yöntemi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Aslında FML kompozitler her elyaf katmanları arasına metal plakaların yerleştirilmesi ile üretilirken bu çalışmada alternatif FML üretimine öncü olabilecek, bilinen farklı metal yüzeyin elyaf kompozitler ile arasındaki tutunma dayanımının incelenecek olmasından dolayı, iki aşamalı bir üretim yöntemi tercih edildi. Bunlardan ilki sadece elyaf katmanlarının (cam FRP ve karbon FRP) üretiminin yapılması ikincisi ise üretilen FRP plakalar ile titanyum plakaların kompozit üretiminde kullanılan bağlayıcı matris ile birleştirilmesidir.

2.2.1. Elyaf Tabakalı Kompozit (FRP) Üretimi

Vakum torbalama yöntemine göre gerçekleştirilen FRP üretimlerinde reçine olarak L160 epoksi ve H160 sertleştiricisi malzemelerin ağırlıkça 100:25 oranında karıştırılarak elde edilen matris malzemesi kullanılmıştır. Toplam kullanılacak matris miktarı ise üretilecek FRP plakaların elyaf ağırlığına eşit olacak şekilde hazırlandı. Cam ve karbon elyaf kumaşlar el yatırması ile açık düz kalıp üzerine istiflenmiştir. Bu işlem öncesinde FRP kompozitlerin kalıptan kolaylıkla ayrılabilmesi

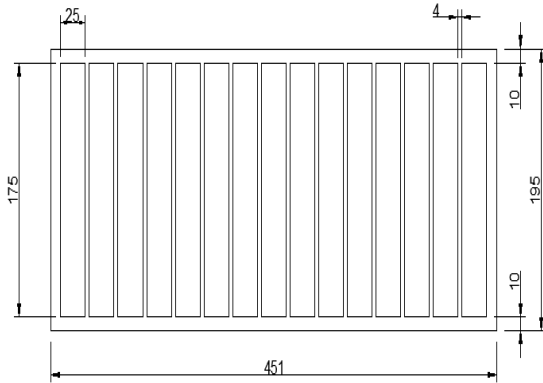
için kalıp yüzeyi Polivaks malzeme ile kimyasal işleme tabi tutulmuştur. İstiflenen FRP plakaların üzerine sırası ile delikli ayırıcı film, vakum battaniyesi ve vakum torbası serilmiştir. Delikli ayırıcı film, fazla reçinenin vakum battaniyesine geçmesine ve orada tutunmasını sağlamaktadır. FRP tabakalar sızdırmaz bant vasıtasıyla vakum torbası altında kürlenmeye bırakılmıştır. FRP kompozitlerin üretimi Şekil 3'te şematik olarak gösterilmektedir. Kürlenme işlemi oda sıcaklığında ve 24 saat süreyle gerçekleştirilmiştir.



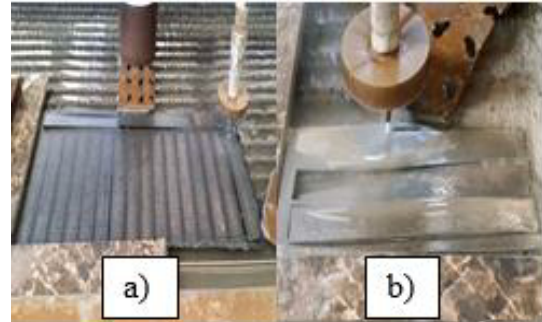
Şekil 3. Uygulanan vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi

2.2.2. FRP Plakaların ve Metal Levhaların Hazırlanması

Kürleme işleminden sonra vakum atmosferinden çıkarılan plakaların ve titanium levhanın boyut hassasiyetlerinin korunması için su jeti ile standart test numunesi (ASTM D 5868-01 "Yüzey Kayma Testi") boyutlarında kesilmiştir. Şekil 4'te şematik olarak standart test numunesi boyutları, Şekil 5'te de su jeti kesimi gösterilmiştir.



Şekil 4. FRP plakalar ve titanium levha için hazırlanan kesim şablonu



Şekil 5. Su jetinde kesimi yapılan FRP plakalar ve metal levha a) Karbon $\pm 45^\circ$ plaka, b) TiGR2 titanium levha

2.2.3. Tek Bindirmeli Kayma Test Numunelerinin Hazırlanması

Üretimin son aşaması olarak tek bindirmeli kayma test numunelerinin üretimi gerçekleştirildi. Üretim esnasında FRP numuneler ile titanium numunelerin hassas bir şekilde birleştirilmesini kolaylaştırmak ve ASTM standardında belirtilen birleşme mesafesini (25 mm) ayarlamak amacıyla, Şekil 6'da gösterilen kalıp tasarlanmış ve MDF malzemeden üretilmiştir.



Şekil 6. Tek bindirmeli kayma numunesi üretimi için tasarlanan ve MDF den üretilen kalıp

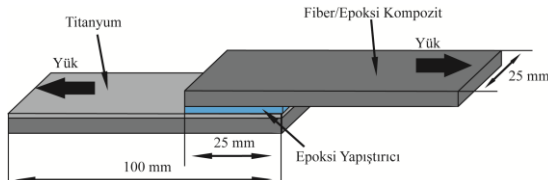
Üretimde FRP ve metal plakalara ait numuneler MDF kalıp içerisinde yine aynı epoksi matris kullanılarak vakum altında birleştirildi. Kürlenme işlemi 24 saatte ve oda sıcaklığında bekletilerek tamamlandı. Şekil 7’de kalıptan çıkarılan cam/epoksi-titanyum ve karbon/epoksi-titanyum tek bindirmeli kayma test numuneleri gösterilmektedir.



Şekil 7. Tek bindirmeli kayma testi numunesi a) cam/epoksi-titanyum, b) karbon/epoksi-titanyum

2.2.4. Numuneler için Ara Yüzey Bağ Mukavemeti Testi

Titanyum levha ve farklı türden FRP kompozit katmanların ara yüzey bağ mukavemetinin tespiti için ASTM D 5868-01 “Yüzey Kayma Testi” uygulanmıştır. Bu teste ait numunelerin şematik gösterimi Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Yüzey kayma testine ait numunelerin şematik olarak gösterimi

Test 13 mm/dk hızında çekme yönünde kuvvet uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Testler, Şekil 9’da görülen Shimadzu marka 100 kN kapasiteli çekme test cihazı kullanılarak gerçekleştirildi.



Şekil 9. Shimadzu (100 kN) test cihazı

3. BULGULAR

Farklı türden yüzeylerin oluşturduğu bağ mukavemetini araştırmak için TiGR2 serisi titanyum levha ve iki farklı FRP tipi ($\pm 45^\circ$ elyaf dizilimli) ile tek bindirmeli kayma numunesi üretildi.

Her bir örneklemden üçer adet test numunesi elde edildi. Testler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Testlerden elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 10’da verilmiştir. Yüzey ayrılma mukavemeti (LLS: Lap Shear Strength) ASTM 5868 standardına göre maksimum kopma yükünün (P_{max}), tutunma yüzey alanına ($A=625 \text{ mm}^2$) oranı ile bulunmaktadır (Eşitlik 1). Farklı elyaf türleri ve titanyum levha için elde edilen yüzey tutunma dayanımına ait bulgular Çizelge 3’te verilmiştir. Cam/epoksi-titanyum numuneler yaklaşık 677 N yük taşıırken karbon/epoksi-titanyum numuneler yaklaşık 1539 N yük

taşımıştır. Bu da polimer epoksi matrisin karbon/epoksi ve titanyum levhaların yapıştırılması durumunda daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ancak elyaf takviyeli kompozit tabakalar ile herhangi bir yüzey işlemi görmemiş titanyum levha ara yüzeyindeki bağ mukavemetinin düşük olması, kompozit üretiminde kullanılan epoksi reçinenin titanyum levhayı yapıştırmada çok da etkili olmadığını göstermiştir. Zira Tan ve arkadaşları [18] karbon elyaf ve PEEK reçine ile tabakalandırdığı

kompozit yapıyı titanyum alaşıma yapıştırmış ve taşıdığı yükü 1024 N olarak bulmuştur. Buna karşın, Bora ve arkadaşları [14] silan ve elyaf lazer işlemleri gibi yüzey iyileştirme işlemleri ile; Logesh ve arkadaşları [15], Zhang ve arkadaşları [16] ise matris yapısına çok duvarlı KNT ilave ederek ara yüzey dayanımının arttığını göstermişlerdir.

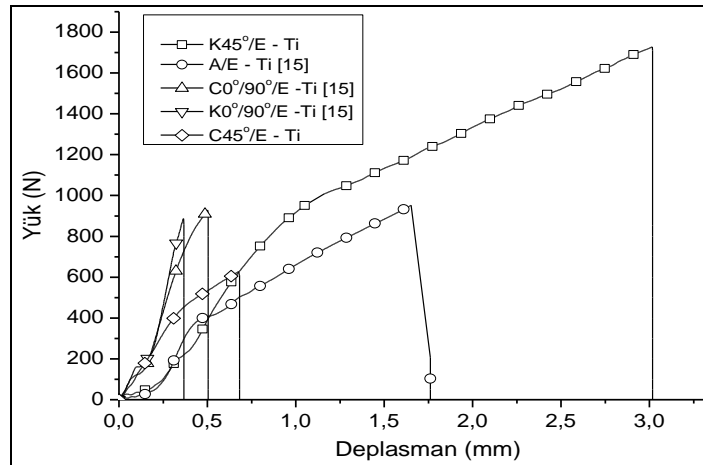
$$LSS = \frac{P_{max}}{A} \quad (1)$$

Çizelge 3. Farklı elyaf türleri ve titanyum metali için elde edilen yüzey tutunma test sonuçları

FRP plaka– Titanyum levha	P _{max} (N)	Ortalama P _{max} (N)	Yüzey Tutunma Mukavemeti (LSS) (MPa)	Ortalama LSS (MPa)	Standart Sapma
Cam/epoksi - Ti	693	677	1,11	1,08	0,11
	582		0,93		
	756		1,21		
Karbon/epoksi - Ti	1727	1539	2,76	2,46	0,26
	1563		2,50		
	1328		2,12		

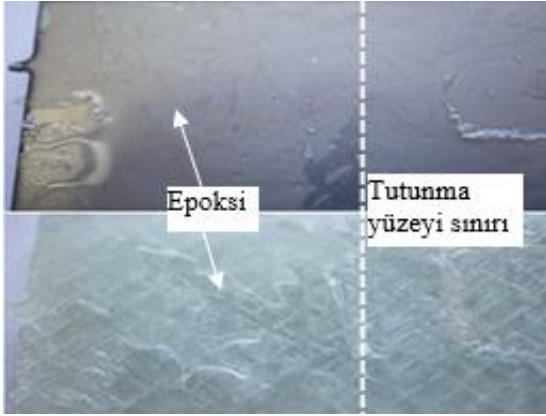
Daha önce yapılan bir araştırmada [19] titanyum bazlı levhalar ile 0°/90° elyaf dizilimli cam ve karbon kumaşlardan üretilen kompozit tabakalar ve düz dokuma aramid kumaştan üretilen kompozit tabakaların tek bindirmeli kayma testleri yapılmıştır. Test sonuçlarından elde edilen veriler bu çalışmanın sonuçları ile birlikte karşılaştırmalı

olarak Şekil 8’de sunulmaktadır. Hem elyaf türünün hem de elyaf oryantasyonunun sonuçlar üzerindeki etkisi ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışmada kullanılan ±45° dizilimli kumaşların titanyum levha ile daha iyi bir tutunma yüzeyi sağladığı ve bu sebeple kayma gerilmelerine karşı daha dirençli olduğu görülmektedir.

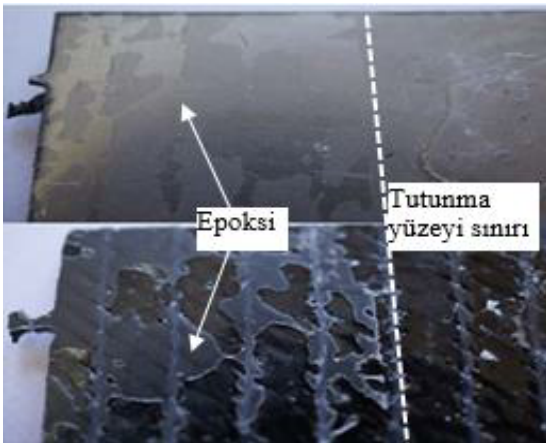


Şekil 10. Tek bindirmeli kayma testi yük-deplasman eğrileri ve literatür ile kıyaslama (K: karbon, A: Aramid, C: Cam, E: Epoksi, Ti: Titanyum)

Testler sonrasında yüzeyleri birbirinden ayrılan numuneler makro düzeyde fotoğraf makinesi ile gözlemlenmiş ve titanyum ve Cam/epoksi plakanın tutunma yüzeylerindeki epoksinin dağılımı Şekil 11 ve 12’de gösterilmiştir. Cam/epoksi tabakası üzerinde fazla epoksi biriktiği ve buna karşın karbon/epoksi tabakasında daha ince bir epoksi tabakasının olduğu ve bunun da LSS verileri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Çünkü epoksi matrisin dayanımının elyaf ve titanyum malzemelere göre nispeten daha düşük olması sebebiyle cam/epoksi tabakada biriken fazla miktardaki polimer matris malzemesi kompozit yapının dayanımını da olumsuz etkilemektedir.



Şekil 11. Titanyum ve Cam/epoksi plakanın tutunma yüzeylerindeki epoksinin dağılımı



Şekil 12. Titanyum ve karbon/epoksi tutunma yüzeylerindeki epoksinin dağılımı

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

FML kompozitlerde hasar oluşumu, malzemenin hangi yükler altında çalıştığına, ara yüzey malzemelerin uyumluluğuna ve çevresel etmenlere göre değişiklik gösterebilir. FML üzerine yapılan literatür çalışmalarına bakıldığında en fazla problemin metal ile elyaf tabaka arasındaki tutunma yüzeylerinde olduğu görülmektedir. Yüzey tabakaları arasındaki tutunma bağının fiziksel durumu, FML kompozitlerin mekanik özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Farklı türden metal levha kullanımı gibi çalışmaların yanı sıra katmanların tutunma yüzeylerini iyileştirme konusunda da çalışmalar yapılmaktadır. Ayrıca literatürdeki FML çalışmaları ağırlıklı olarak alüminyum üzerinde yoğunlaştığı ancak titanyum gibi alternatif metallerin FML’de kullanımıyla ilgili büyük bir boşluk olduğu görülmektedir. Bu çalışmanın sonuçları bilinen FML kompozitlere alternatif oluşturabilecek titanyum levhaların kullanımı noktasında araştırmacılara yol gösterici olacaktır. İlaveten, bazı yüzey iyileştirme metodlarının [20] titanyum alaşımlı levhalar ile kompozit tabakalar arasındaki bağ mukavemetine etkisinin araştırılması ve farklı türden yapıştırıcılar ile ara-yüzey bağ mukavemeti testlerinin yapılması bu çalışmanın devamı niteliğinde önerilebilir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, FBA-2017-8929 nolu proje kapsamında Çukurova Üniversitesi Bireysel Araştırma Projesi (BAP) Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

6. KAYNAKLAR

1. Shetty, N., Shahabaz, S.M., Sharma, S.S., Shetty, S.D., 2017. A Review on Finite Element Method for Machining of Composite Materials, Composite Structures, 176, 790-802.
2. Chandrasekar, M., Ishak, M.R., Jawaid, M., Leman, Z., Sapuan, S.M., 2017. An Experimental Review on the Mechanical Properties and Hygrothermal Behaviour of Fibre Metal Laminates, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 36(1), 72–82.

3. Corte's, P., Cantwell, W.J., 2006. The Prediction of Tensile Failure in Titanium-based Thermoplastic Fibre-metal Laminates, *Composites Science and Technology*, 66, 2306–2316.
4. Remmers, J.C., 2006. Discontinuities in Materials and Structures: a Unifying Computational Approach, PhD Thesis, Delft University of Technology.
5. Sinmazçelik, T., Avcu, E., Bora, M.Ö., Çoban, O., 2011. A Review: Fibre Metal Laminates, Background, Bonding Types and Applied Test Methods, *Materials and Design*, 32, 3671–3685.
6. Vlot, A., 1996. Impact Loading on Fibre Metal Laminates, *Int J Impact Eng*, 18(3), 291–307.
7. Wang, W., Rans, C., Benedictus, R., 2017. Analytical Prediction Model for Non-symmetric Fatigue Crack Growth in Fibre Metal Laminates, *International Journal of Fatigue*, 103, 546–556.
8. Vogelesang, L.B., Vlot, A., 2000. Development of Fibre Metal Laminates for Advanced Aerospace Structures, *Journal of Materials Processing Technology*, 103, 1–5.
9. Sadighi, M., Alderliesten, R.C., Benedictus, R., 2014. Impact Resistance of Fiber-Metal Laminates: A Review, *International Journal of Impact Engineering*, 49, 77–90.
10. Laliberte, J.F., Poon, C., Straznicki, P.V., Fahr, A., 2000. Applications of Fiber-Metal Laminates, *Polymer Composites*, 21, 558–567.
11. Kazemi, M.E., Shanmugam, L., Yang, L., Yang, J., 2020. A Review on the Hybrid Titanium Composite Laminates (HTCLs) with Focuses on Surface Treatments, Fabrications, and Mechanical Properties, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 128.
12. Jin, K., Chen, K., Luo, X., Tao, J., 2020. Fatigue Crack Growth and Delamination Mechanisms of Ti/CFRP Fibre Metal Laminates at High Temperatures. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. 43: 1115–1125.
13. Le Bourlegat, L., Damato, C., da Silva, D., Botelho, E., Pardini, L., 2010. Processing and Mechanical Characterization of Titanium-graphite Hybrid Laminates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 29(22), 3392–3400.
14. Akman, M.Ö., Oztoprak, B.G., Kutluk, T., 2020. Comparison of Novel Surface Treatments of Al 2024 Alloy for al/cfrp Adhesive Bonded Joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 103, 102721.
15. Logesh, K., Hariharasakthisudhan, P., Rajan, B.S., Moshi, A.A.M., Khalkar, V., 2020. Effect of Multi-walled Carbon Nano-tube on Mechanical Behavior of Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy Composites. *Polymer Composites*. 1–12.
16. Zhang, X., Hu, Y., Li, H., Tian, J., Fu, X., Xu, Y., Lu, Y., Chen, Y., Qin, L., Tao, J., 2018. Effect of Multi-walled Carbon Nanotubes Addition on the Interfacial Property of Titanium-based Fiber Metal Laminates. *Polym. Compos.*, 39: E1159–E1168.
17. ASTM D 5868-01. 2001. Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding, *Annual Book of ASTM Standards*.
18. Caiwang, T., Jianhui, S., Baohua, Z., Xiaoting, L., Laijun, W., Bo, C., Xiaoguo, S., Jicai, F., 2020. Effect of Scanning Speed on Laser Joining of Carbon Fiber Reinforced PEEK to Titanium Alloy, *Optics & Laser Technology*, 129, 1–10.
19. Boztepe, M.B., Bayramoglu, M., Uzay, C., Geren, N., 2017. Investigation of the Adhesion Bonding Capability Between Different Metals and FRP Composite Layers. *Istanbul International Conference on Progress in Applied Science, ICPAS 2017*, 1–6.
20. Nassier, A., Nassir, R.S., Birch, W.J., Cantwell, D., Rico Sierra, S.P., Edwardson, G., Dearden, Z.W. Guan., 2020. Experimental and numerical characterization of titanium-based fibre metal laminates, *Composite Structures*, 245.

24 Ocak 2020 Elazığ Depreminin Kuvvetli Yer Hareketi Verilerinin Değerlendirilmesi

Abdullah Can ZÜLFİKAR*¹

¹Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli

Geliş tarihi: 21.09.2020

Kabul tarihi: 23.10.2020

Özet

24 Ocak 2020 tarihinde yerel saatle 20.55'te Elazığ-Sivrice (Türkiye) ilinde, merkez üssü Sivrice ilçesi, Çevrimtaş köyü olan ve yaklaşık 40 saniye kadar süren M_w 6,8 büyüklüğünde deprem meydana gelmiştir. Deprem başta Elazığ ve Malatya olmak üzere, Adıyaman, Kahramanmaraş, Adana, Hatay, Osmaniye, Tunceli, Gaziantep, Şanlıurfa gibi birçok ilde hissedilerek paniğe yol açmıştır.

Bu çalışma kapsamında M_w 6,8 Sivrice depremine ait yer hareketi kayıtları incelenmiştir. Yer hareketi parametresi Maksimum Yer İvmesi (PGA), 2014 Yeni Nesil Azalım İlişkileri (Next Generation Attenuation Relations)-Yer Hareketi Tahmin Denklemleri (YHTD) kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca yer hareketi parametreleri (MMI, PGA, S_a 0,2, S_a 1,0) dağılım haritaları oluşturularak, kaydedilmiş yer hareketi kayıtları ile karşılaştırılmıştır. Bunların yanısıra, öncü/artçı depremler incelenerek Doğu Anadolu Fay Zonu depremlerinin karakteristiği ortaya konmuştur. Ortaya çıkan enerji miktarı geçmiş büyük ölçekli depremler ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: 24 Ocak 2020 M_w 6.8 Elazığ-Sivrice depremi, Yer hareketi parametreleri

Evaluation of Strong Ground Motion Records of January 24, 2020 Elazığ Earthquake

Abstract

On January 24, 2020 at 8:55 pm local time, the Elazığ-Sivrice earthquake, which was the epicenter of Sivrice with a north latitude of 39.10 east longitudes of 38.35 and a magnitude (M_w) of 6.8 occurred. The earthquake was felt especially in the nearby cities Elazığ and Malatya. Many other cities such as Adıyaman, Kahramanmaraş, Adana, Hatay, Osmaniye, Tunceli, Gaziantep, Şanlıurfa cities in the region were affected from the earthquake as well.

In this study, the ground motion records of the Elazığ-Sivrice earthquake were examined. Ground motion parameters; Spectral acceleration (SA) and Peak Ground Acceleration (PGA) have been evaluated by 2014 Next Generation Attenuation relations. In addition, the ground motion parameters (MMI, PGA, S_a 0.2, S_a 1.0) distribution maps were created and compared with the recorded ground motions. In addition to these, the characteristics of the East Anatolian fault zone earthquakes were revealed, by examining the

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Abdullah Can ZÜLFİKAR, aczulfikar@gtu.edu.tr

foreshocks/aftershocks. The amount of energy released has been compared with past large-scale earthquakes.

Keywords: January 24, 2020 M_w 6.8 Elazığ-Sivrice earthquake, Ground motion parameters

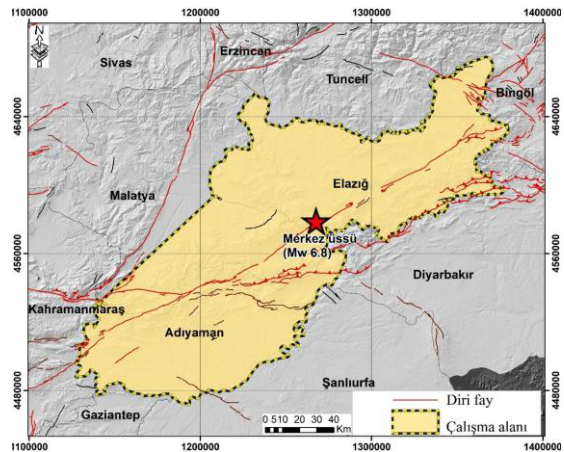
1. GİRİŞ

Türkiye dünyanın en aktif deprem kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer almaktadır. Ülke yüzölçümünün %43'ü birinci derece deprem kuşağı olarak tanımlanan beklenen ivme değeri 0,40 g'dan büyük alanlarda yer almaktadır. Geçmişten günümüze Türkiye'de gelişen depremler can ve mal kaybına yol açarak büyük hasarlara yol açmıştır.

M_w 6,8 Elazığ depremi 24 Ocak 2020 tarihinde Türkiye yerel saati 20:55'de 8 km derinlikte meydana gelmiştir [1]. Deprem başta Elazığ ve Malatya olmak üzere, Adıyaman, Kahramanmaraş, Adana, Hatay, Osmaniye, Tunceli, Gaziantep, Şanlıurfa gibi birçok ilde hissedildi. Deprem sonrasında Elazığ, Malatya, Kahramanmaraş, Diyarbakır, Şanlıurfa, Adıyaman ve Batman'da birçok binanın hasar aldığı yapılan incelemeler ile belirlenmiştir. Aynı zamanda, 37'si Elazığ, 4'ü Malatya'da olmak üzere 41 kişinin hayatını kaybetmiş, 1466 kişi ise hafif ve orta derecede yaralanmıştır [1]. Deprem sonrası yapılan odak mekanizma çözümleri ve çalışmalar ile depremin sol yanal doğrultu atım karakterli Doğu Anadolu Fay Zonu Pütürge segmenti üzerinde olduğu tespit edilmiştir [2]. 24 Ocak 2020 Elazığ depremi sonrasında, büyüklükleri 0,8 ile 5,4 arasında değişen 4322 artçı sarsıntı meydana gelmiştir. Artçı şokların 30'u 4 ve üzeri büyüklükte gerçekleşmiştir. Artçı şokların merkez üsleri Elazığ'ın Sivrice ve Baskil ilçeleri ile Malatya'nın Kale, Pütürge, Doğanşol ve Battalgazi ilçeleri olarak tespit edilmiştir. 20 Ocak Elazığ depremi, 2010'da Doğu Anadolu Fay Zonunda meydana gelen Kovancılar depreminden sonra bölgeyi etkileyen en büyük deprem olması nedeni ile önemlidir.

Bu çalışmada, Elazığ depreminin etki ettiği bölgelerin (Şekil 1) Sismo-tektonik aktivitesi, depreme ait kuvvetli yer hareketi verileri ile

detaylı olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, depremin merkezine yakın istasyonlardan alınan yer hareketi kayıtları değerlendirilmiş, yer hareketi parametrelerinin uzaklık ile değişimi ve 2014 Yeni Nesil Azalım İlişkileri [3] (NGA-Next Generation Attenuation)-Yer Hareketi Tahmin Denklemleri (YHTD) ile uyumu incelenmiştir. Depremin etki alanındaki yer hareketi parametreleri; (MMI-Modified Mercalli Intensity-Şiddet; PGA-Maksimum Yer İvmesi, S_a 0,2sn S_a 1,0sn Spektral İvme) dağılım haritaları elde edilmiştir. Ayrıca öncü ve artçı depremler değerlendirilerek orta ölçekli bölgesel depremlerinin karakteristiği ortaya konmuştur.



Şekil 1. Deprem merkez üssü ve civarına ait diri fay haritası [4]

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Sismotektonik Değerlendirme

Arabistan plakası ile Anadolu bloğu arasındaki sınırı oluşturan sol-yanal doğrultu atımlı Doğu Anadolu Fayı (DAF), kuzeydoğuda Karlıova'da Kuzey Anadolu Fay hattı (KAF) ve güneybatıda Kahramanmaraş dolayında Ölü Deniz Fayı (ÖDF) ile kesişmektedir. Genel doğrultusu KD-GB olan DAF yaklaşık 580 km uzunluğundadır [4]. Sol

yönlü doğrultu atım özelliği gösteren DAF, Karlıova, Ilica, Palu, Pütürge, Erkenek, Pazarcık ve Amanos olmak üzere 6 segmentten oluşmaktadır (Çizelge 1). Türkiye'nin tektonik yapısı açısından önemli bir yere sahip olan DAF, Anadolu Plakasının batıya hareketi nedeniyle üzerinde 4-13 mm/yıl civarı sol-yanal karakterde bir deformasyona ya da varsa sürtünmenin düşük olduğu yerlerde durağan kaymaya ev sahipliği etmektedir [5-11]. Doğu Anadolu fay zoneu, tarihsel ve aletsel dönemde, 6 ve üzeri büyüklüğünde yıkıcı birçok depreme sebep olmuştur. DAF'ı oluşturan segmentlerin uzunluklarına göre segmentler üzerinde aletsel büyüklüğü 6 ve daha büyük deprem üretme potansiyeline sahip olduğu bilinmektedir.

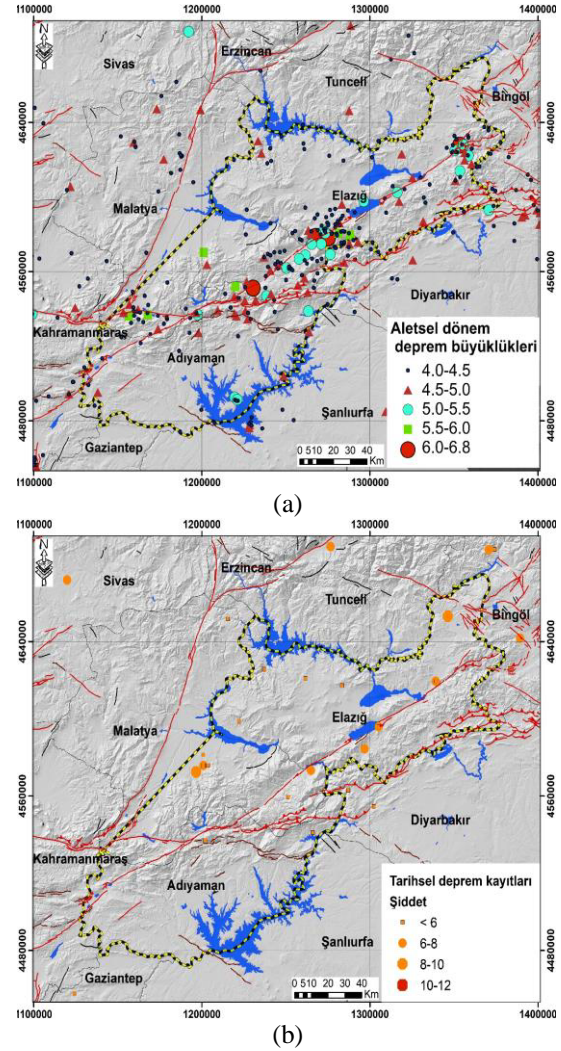
Çizelge 1. Doğu Anadolu Fay Zonu ve içerisinde yer alan segmentlere ait yapısal bilgiler[4]

		Uzunluk (km)	Aktivite	Kayma türü	Genel trend	Fay düzleminin eğim yönü ve derecesi
Fay	DAFZ	580	Holosen	SYDA		
Segment (S)	Karlıova S.	31	Holosen	SYDA	K50D	Düşey
	Ilica S.	40	DYK	SYDA	K40D	Düşey
	Palu S.	77	Holosen	SYDA	K62D	Düşey
	Pütürge S.	96	Holosen	SYDA	K60D	Düşey
	Erkenek S.	62	Holosen	SYDA	K75D	Düşey
	Pazarcık S.	82	Holosen	SYDA	K60D	Düşey
Amanos S.	112	Holosen	SYDA	K35D	Düşey	

SYDA: Sol yönlü doğrultu atımlı; DAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu; DYK: Deprem Yüzey Kırığı

Aletsel deprem kataloğuna [12], [1] $M_s=6,8$ büyüklüğünde 4 Aralık 1905 tarihinde gelişen depremden sonra bölgede gelişen en büyük deprem 24 Ocak 2020 M_w 6,8 Elazığ depremidir. Çalışma alanına ait aletsel deprem kayıtlarına göre 4 ve üzeri büyüklükte 225 adet deprem kaydı bulunmaktadır (Şekil 2a). Bu depremlerin 6'sı 6 ve üzeri, 34 tanesi 5-6 büyüklüğü arasındadır. Tarihsel deprem kayıtlarına göre çalışma alanında (Şekil 2b) 34 deprem kaydı bulunmaktadır [13]. Bu depremlerden MS 240 tarihinde Kayseri, Sivas, Malatya'da hissedildiği kayıtlarda yer alan IX şiddetindeki deprem ile MS 1046'da gelişen Diyarbakır, Elazığ ve Karakoçan'da meydana

gelen X şiddetindeki deprem büyük hasara yol açmıştır.



Şekil 2. Aletsel [12], [1] (a) ve Tarihsel (b) [13] deprem kayıtları

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Kuvvetli Yer Hareketi Kayıtları

M_w 6,8 büyüklüğündeki Elazığ/Sivrice depremi Elazığ ve çevre şehirlerde büyük yapısal hasarlarla ve can kayıplarına sebep olmuştur. Deprem yer hareketi kayıtları AFAD tarafından bölgede kurulu

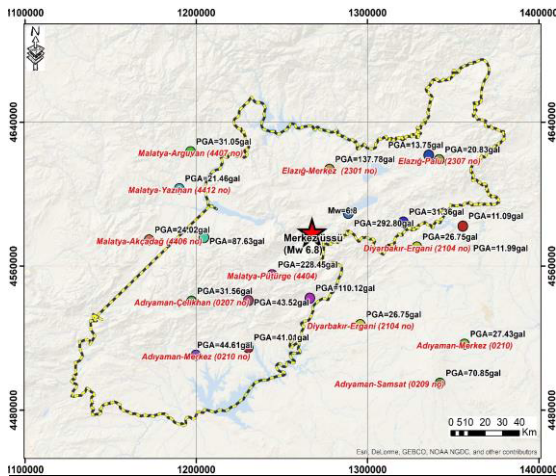
olan yer hareketi kayıt istasyonlarında kaydedilmiştir. Çizelge 2’de bölgede mevcut yer hareketi kayıt istasyonları ve yer hareketi kayıtları hakkında bilgi verilmiştir, ayrıca, Şekil 3’de istasyon konumları ve her bir istasyonda kaydedilen PGA değerleri harita üzerinde gösterilmiştir. İstasyon kayıtları [14]’den alınmıştır. AFAD’dan alınan verilere göre sadece

bazı istasyonların $V_{s,30}$ değeri bulunmamaktadır. Bu istasyonlar için $V_{s,30}$ değeri bölge için mevcut yüzey jeoloji bilgisi kullanılarak 360 m s^{-1} (zemin sınıfı ZC) kabulü yapılmıştır. Elazığ/Sivrice depremi esnasında AFAD istasyonlarından Sivrice (2308) istasyonunda maksimum yer ivmesi $2,92 \text{ m s}^{-2}$ olarak okunmuştur.

Çizelge 2. Mw 6,8 Elazığ/Sivrice açıkları depremi yer hareketi kayıt istasyon bilgileri [14]

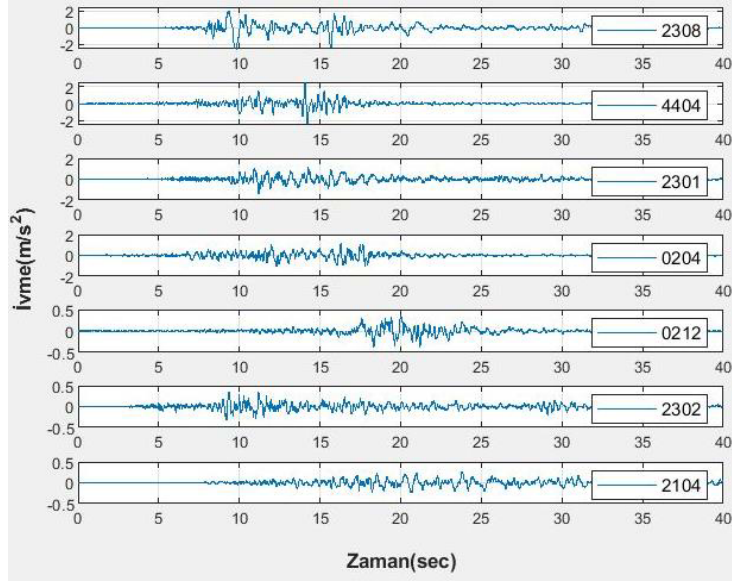
İstasyon ID	İl/İlçe	V_{s30} (m/s)	PGA(gal)	Repi (km)
2308	Elazığ-Sivrice	450	292,80(EW)	23,81
4404	Malatya-Pütürge	1380	228,44(EW)	24,55
2301	Elazığ-Merkez	407	137,78(EW)	36,39
0204	Adıyaman-Gerger	555	110,12(EW)	36,81
0212*	Adıyaman-Sincik	360	43,52(NS)	53,21
2302	Elazığ-Maden	907	31,36(EW)	53,51
2104	Diyarbakır-Ergani	360	26,75(NS)	61,64
4401	Malatya-Battalgazi	481	87,63(EW)	63,04
0205	Adıyaman-Kahta	660	41,01(EW)	74,25
0207	Adıyaman-Çelikhan	660	31,56(NS)	80,00
2304	Elazığ-Kovancılar	489	13,74(EW)	80,36
4412*	Malatya- Yazihan	360	21,46(NS)	80,96
4407	Malatya- Arguvan	435	31,05(NS)	83,78
2307	Elazığ-Palu	329	20,83(EW)	84,35
2105*	Diyarbakır-Dicle	360	11,09(EW)	87,92
6201*	Tunceli-Merkez	360	11,99(NS)	89,46
0210*	Adıyaman-Merkez	360	27,43(EW)	94,63
4406	Malatya- Akçadağ	815	24,02(EW)	95,00
0201	Adıyaman-Merkez	391	44,61(EW)	96,30
0209*	Adıyaman-Samsat	360	70,85(NS)	100,72

* $V_{s,30}$ değeri bulunmayan istasyonlar

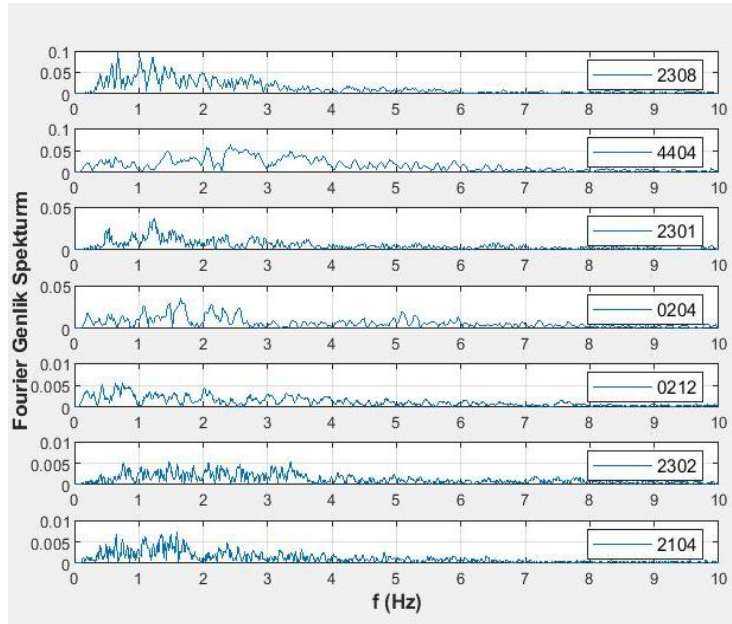


Şekil 3. Elazığ depremi AFAD istasyon kayıtlarının PGA değerleri

AFAD veri tabanından alınan istasyon kayıt bilgilerine göre deprem merkezine en fazla 50 km uzaklıkta bulunan istasyon verileri incelenmiştir. 2308, 4404, 2301, 0204, 0212, 2302, 2104 numaralı istasyonlar depremin merkezine 50 km uzaklıkta bulunan AFAD istasyonlarıdır. Sivrice depremine ait 2308, 4404, 2301, 0204, 0212, 2302, 2104 numaralı istasyonlara ait filtrelenmiş deprem ivme kayıtları zaman tanım alanında Şekil 4’de ve frekans tanım alanında Şekil 5’de görülmektedir. Şekil 4 ve Çizelge 2’de görüldüğü üzere ivme değerleri 2308-Sivrice, 4404-Pütürge ve 2301-Elazığ-Merkez istasyonlarında daha yüksek değerler göstermektedir.



Şekil 4. Filtrelenmiş yedi farklı istasyona ait ivme kayıtları



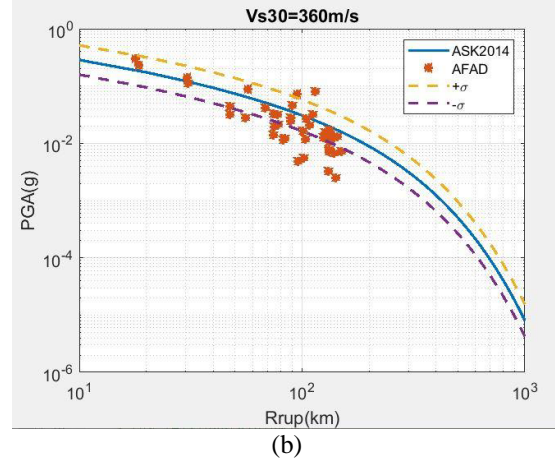
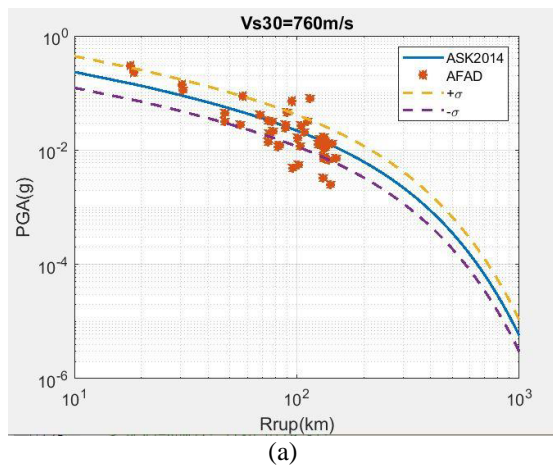
Şekil 5. Seçilen kayıtların fourier genlik spektrumu

Çalışma kapsamında 2014 yer hareketi tahmin denklemleri (2014-YHTD) [3] kullanılarak kaydedilen yer hareketi parametreleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu YHTD bölgesel yüzey jeoloji haritalarından elde edilen bölgedeki

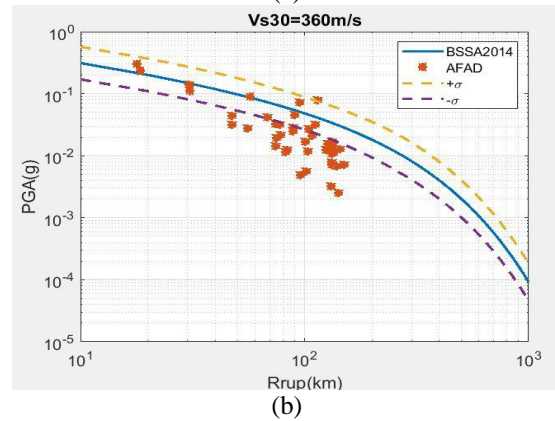
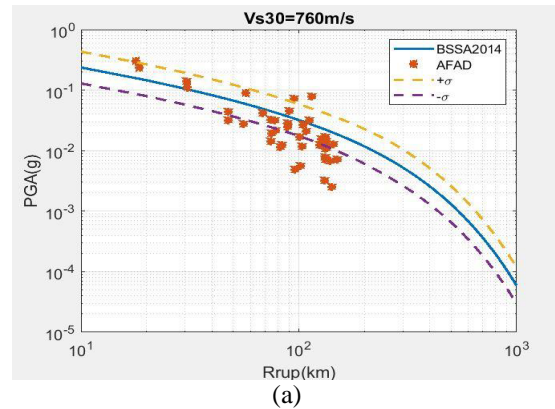
zemin yapısı ile ilişkilendirilmiş üst 30 m'deki ortalama kayma dalgası hızı ($V_{s,30}$), faya olan uzaklık, fay tipi, derinlik, fay mekanizması, deprem ve istasyon bilgileri parametrelerini kullanmaktadır.

PEER (Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi) tarafından geliştirilen NGA modelleri olarak bilinen YHDT'leri, 2014 yılında Türkiye de dahil olmak üzere bölgesel faktörler ile güncellenmiştir [15]. Bu çalışmada, AFAD tarafından işletilen Türkiye Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi Gözlem Ağı kayıtlarından elde edilen 24 Ocak 2020 Mw 6,8 Elazığ/Sivrice depremi kayıtlarının yer hareketi parametreleri (en yüksek yer ivmesi, spektral ivme) yakın zamanda güncellenen 2014 NGA ilişkileri ile uyumluluğu değerlendirilmiştir. [16] (ASK14), [17] (BSSA14) ve [18] (CY14) YHTD'leri, deprem merkez üssünden 150 km'ye kadar uzaklıkta olan istasyonlardan elde edilen yer hareketi verilerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

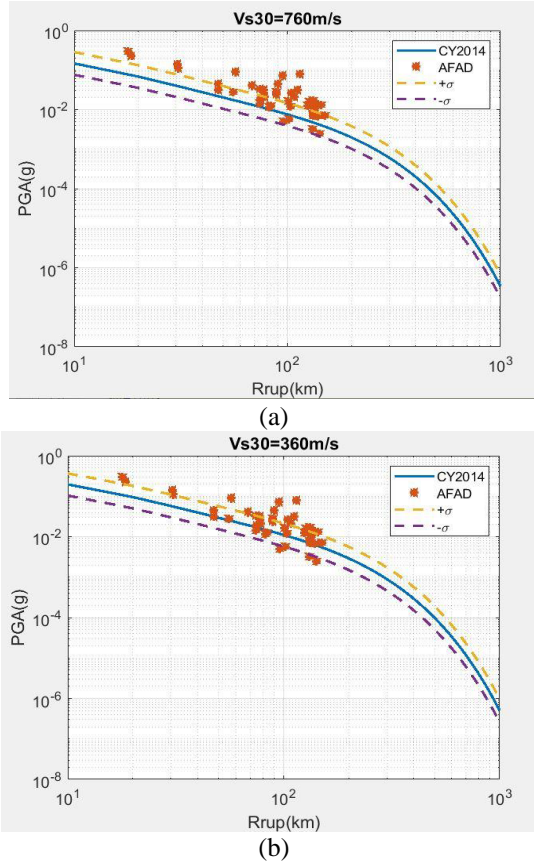
Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de Mw 6,8 Sivrice depremi için istasyon bilgileri ve NGA [15]. -2014 YHTD'leri [3] sırası ile [16]. (ASK14), [17] (BSSA14) ve [18] (CY14) kullanılarak elde edilen PGA- Rrup (fay kırığına en yakın mesafe) ilişkisi grafikleri $V_{s,30}=360$ m s⁻¹ ve $V_{s,30}=760$ m s⁻¹ değerleri için çizilmiştir. YHTD'den elde edilen PGA- Rrup ilişkisi (\pm) standart sapma değerleriyle birlikte hesaplanmıştır. Elde edilen PGA değer aralığı yatay bileşen olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan PGA değerleri, istasyon kayıtlarından elde edilen iki yatay bileşenin en büyük değeri (PGA), istasyonun fay kırığına olan en yakın mesafesi ile birlikte kıyaslanmıştır.



Şekil 6. 2020 Mw 6.8 Sivrice depremi $V_{s,30}=760$ m s⁻¹ (a) ile $V_{s,30}=360$ m s⁻¹ (b) PGA-Rrup analizi (ASK14) [16]



Şekil 7. 2020 Mw 6.8 Sivrice depremi $V_{s,30}=760$ m s⁻¹ (a) ile $V_{s,30}=360$ m s⁻¹ (b) PGA-Rrup analizi (BSSA14) [17]

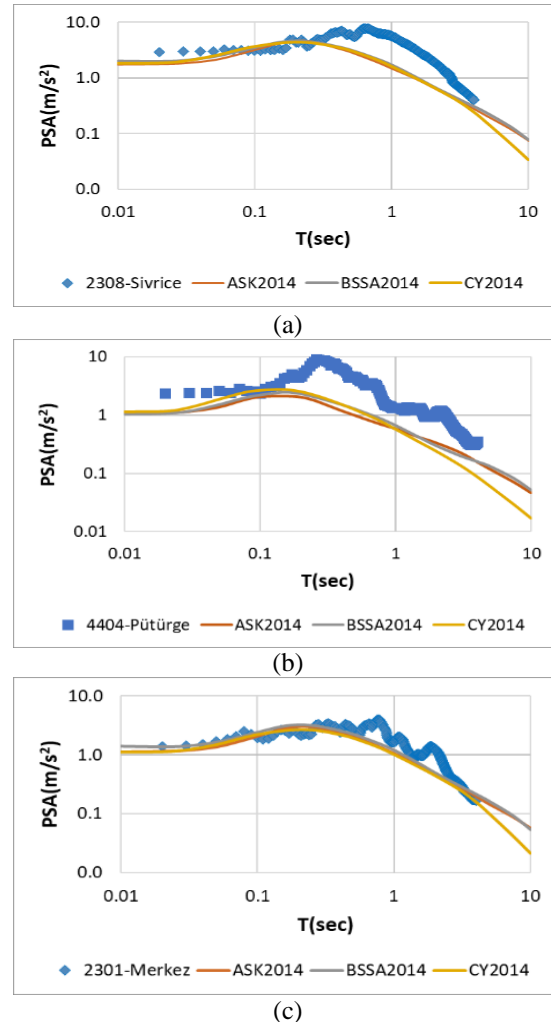


Şekil 8. 2020 Mw 6.8 Sivrice depremi $V_{s,30}=760$ m s^{-1} (a) ile $V_{s,30}=360$ m s^{-1} (b) PGA-Rrup analizi (CY14) [18]

Mw6.8 Sivrice depremine ait 150 km içindeki AFAD istasyonlarından alınan kayıtların maksimum yer ivmesi değerleri PGA-Rrup analizi sonucunda $V_{s,30}=760$ m s^{-1} olduğu durumda ASK14 [16] sonuçlarıyla daha uyumlu olduğu görülmüştür.

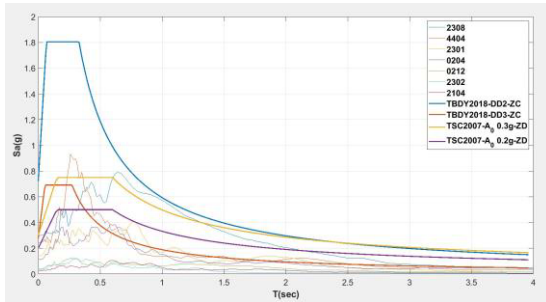
En yakın istasyonlar olan Sivrice (2308), Pütürge (4404) ve Merkez (2301) istasyon kayıtlarına ait spektral ivmeler hesaplanmış olup depreme ait bilgiler ASK14 [16], BSSA14 [17] ve [18] yer hareketi tahmin denklemlerinde kullanılarak elde edilen spektrum eğrileri, istasyon kayıtlarından elde edilen spektrum eğrileriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar Şekil 9'da sırasıyla Sivrice (2308), Pütürge (4404) ve Merkez (2301) istasyonları için gösterilmiştir. Şekil 9'da

görüldüğü gibi, Sivrice (2308) ve Pütürge (4404) istasyonlarına ait YHDT (ASK14, BSSA14, CY14)'den elde edilen spektrum eğrilerinin bu istasyonların ivme verisinin davranış spektrumu ile uyumlu olmadığı görülmektedir. 2301 Elazığ-Merkez İstasyonu için YHDT'den elde edilen spektrum eğrisinin istasyon kaydından elde edilen spektrum eğrisiyle özellikle kısa periyot alanında ($T>1,0$ saniye) daha çok uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, Elazığ-Merkez istasyonundan elde edilen kayda ait spektrum eğrisinin 2014 YHDT'leri ile daha uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 9. ASK14 [16], BSSA14 [17], CY [18] ile Sivrice depremi AFAD istasyonu PSa analizi

AFAD istasyonlarından alınan yer hareketi kayıtları davranış spektrumlarının, Sivrice (2308) istasyonu konumu için ZC zemin durumuna bağlı olarak DD-2 ve DD-3 seviyeleri [19] tasarım deprem spektrumları ve TSC2007 yönetmeliğinde ZC zemin koşullarına ait tasarım spektrumlarıyla karşılaştırmaları Şekil 10'da gösterilmiştir. İstasyonlardan alınan deprem kayıtlarından elde edilen davranış spektrumu eğrilerinin, her iki deprem seviyesi için de tüm periyotlarda [19] tasarım spektrumu eğrilerinin altında kaldığı görülmüştür. Deprem merkezine en yakın istasyonlar olan 2308 ve 4404 istasyonlarından alınan ivme verisine ait spektrum eğrisinin DD-3 seviyesindeki deprem spektrumuyla özellikle plato bölgesinde uyumlu olmadığı, spektrumun altında kaldığı gözlenmiştir. Fakat deprem merkezinden 50 km uzaklıkta bulunan istasyonların spektrumlarının deprem tasarım seviyesi olan DD-2 seviyesindeki deprem durumuna ait spektrum eğrisinin altında kaldığı gözlenmiştir. TSC2007 $A_0=0,3$ g ve $A_0=0,2$ g ZC zemin sınıfına ait spektrumlarının 2308 ve 4404 istasyonlarına ait spektrumlar tarafından aşıldığı gözlenmiştir. Sonuç olarak, [18] DD2-ZC tasarım spektrumunun, deprem merkezine maksimum 50 km uzaklıkta bulunan AFAD istasyon kayıtlarına ait spektrumları kapsadığı gözlenmiştir.



Şekil 10. DD2- ve DD-3 deprem seviyelerine ait tasarım spektrumları (2007-2018) ve kayıtlardan elde edilen davranış spektrumlarının karşılaştırılması

3.2. Deprem Yer Hareketi Parametreleri Dağılımı Analizi

Çalışma kapsamında; depremin büyüklüğü, merkez üssü konumu, kaynaktan uzaklık ve

kaynak mekanizma çözümüne ait veriler [1]'den alınmıştır. Zemin koşulları ve CY14 (Chiou ve Youngs, 2014)'deki yer hareketi tahmin denklemi kullanılarak yer hareketi parametreleri sırası ile Şiddet, En büyük ivme, Spektral ivme 0,2 s, Spektral ivme 1,0 s (MMI, PGA, Sa 0,2 s, Sa 1,0 s) dağılım haritaları elde edilmiştir. Çizelge 3'de analizde kullanılan fay mekanizma parametreleri (strike, dip, rake) değerleri [1]'den alınmıştır.

Çizelge 3.24 Ocak 2020 Mw 6,8 Sivrice (Elazığ) depremi moment tensör çözümü [1]



Tarih (UTC)	Enlem (°)	Boylam (°)	Derinlik (km)	Büyüklik (M)	Strike	Dip	Rake	Strike	Dip	Rake	Mw	Derinlik (Dreger)
24.01.2020 17:55	38,35	39,06	8,06	6,8	248	76	1	158	89	166	6,8	15,1

Kuvvetli yer hareketi kayıtlarının incelenmesinde, YHDT'den ASK14 [16], BSSA14 [17], CY14 [18] bağıntıları çalışılmış, yapılan değerlendirmeler sonucunda ASK14 [16]'ün Mw 6.8 Sivrice (Elazığ) depremi yer hareketi kayıtları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Deprem yer hareketi parametreleri dağılım analizinde de ASK14 [16] kullanılmıştır. Analizde SHARE [20] kaynaklarından Doğu Anadolu Fay zonunun üzerinde bulunan Pütürge Segmenti kullanıldı. Bu fayın sol yönlü doğrultu atımlı fay mekanizması ile uyumlu olduğu görülmüştür [1]. Analizde ayrıca mühendislik ana kayası ($V_{s,30}=760$ m/s) referans zemin koşulları kullanılmıştır.

ASK14 modeli [22] (AS08) modelinin NGA-West-2 verilerine dayanarak güncellenmiş hali şeklindedir. Modelin input parametreleri AS08 modelinden kullanılan değerlere benzer şeklindedir. Dahil edilen değişiklikler;

- Non-linear zemin etkileri için yükleme seviyesi PGA'dan ziyade ilgili periyodun spektral ivmesine dayanır,
- Tavan taşı (hanging wall, HW) etkileri için uzaklık skalası kaynak-zemin azimuttha bağlılık içerir,

- Geniş uzaklık azalımında bölge etkileri ve Kaliforniya, Çin, Japonya, Tayvan arasından zemin artım skalası birleştirilmiştir,
- HW etkileri için skalalar nümerik simülasyonların kısıtlamalarına dayanarak geliştirilmiştir,
- Standart sapma kısa periyotta daha büyük standart sapmalar ile sonuçlanan daha küçük magnitüdele magnitüde bağlıdır fakat uzun periyotlarda daha küçük standart sapmalar ve eski modelden farklı küçüklü büyüklüklü olaylar (Mw=3) güncel versiyonda dahil edilmiştir.

ASK14 denklemi Eşitlik 1’de verilmiştir.

$$\ln S_a(g) = f_1(M, R_{rup}) + F_{RV} f_7(M) + F_N f_8(M) + F_{AS} f_{11}(CR_{jb}) + f_5(S_{a1,180}, V_{s,30}) + F_{HW} f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_X, W, dip, Z_{TOR}, M) + f_6(Z_{TOR}) + f_{10}(Z_{1,0}, V_{s,30}) \text{Reg}(V_{s,30}, R_{rup}) \quad (1)$$

Burada f_1 doğrultu atımlı depremlere bağlı uzaklık ve büyüklüğün en basit formudur, f_7 ve f_8 fay modelinin stili için fonksiyonlardır, f_{11} artçı şok skala fonksiyonudur, f_5 kaya zeminde medyan spektral ivme kullanılarak oluşturulan zemin tepki modelidir, f_4 tavan taşı (hanging wall) modelidir, f_6 yarılmanın üst derinlik modeli, f_{10} zemin derinlik modelidir. Bu modelde $V_{s,30}$ 'un farklılığı ayrıca eklenmiştir.

[23],[24] çalışmalarında PGA ve PGV yer hareketi parametreleri ile Değiştirilmiş Mercalli Şiddeti (MMI^{1mm}) arasındaki dönüşüm bağıntıları, şiddet dağılımı tahmininde kullanılmıştır. Bu bağıntılar büyüklükleri 5,8 ile 7,3 arasında değişen önemli 8 farklı Kaliforniya depremleri verileri kullanılarak geliştirilmiştir [23,24]. Bu bağıntılar aşağıdaki gibidir,

Şiddet tahmini için PGA ile ilişkilendirilen, $V < I_{mm} < VIII$ aralığı için,

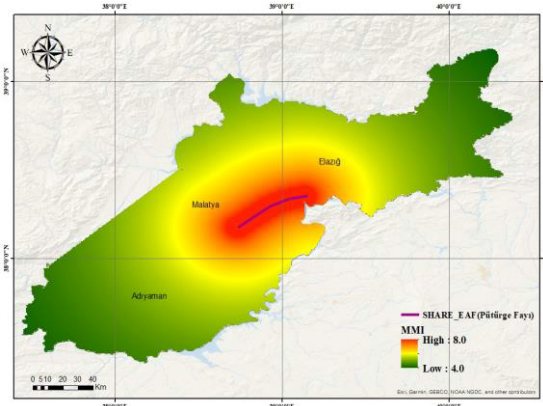
Şiddet tahmini için PGV ile ilişkilendirilen, $V < I_{mm} < IX$ aralığı için (Eşitlik 2),

$$I_{mm} = 3,66 \log(PGA) - 1,66 \quad (\sigma = 1,08) \quad (2)$$

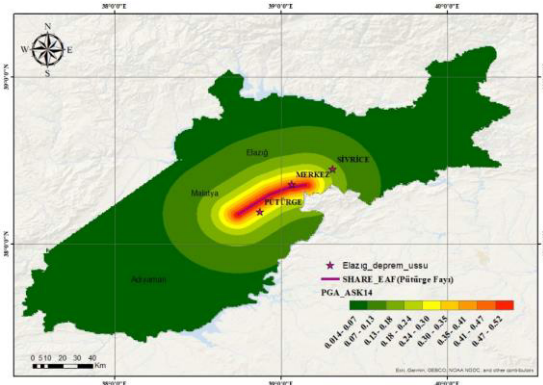
Şiddet tahmini için PGV ile ilişkilendirilen, $V < I_{mm} < IX$ aralığı için (Eşitlik 3),

$$I_{mm} = 3,47 \log(PGV) + 2,35 \quad (\sigma = 1,08) \quad (3)$$

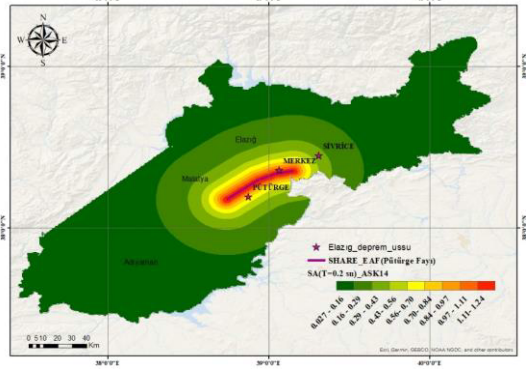
Yer hareketi parametreleri (MMI, PGA, $S_{a0,2}$, $S_{a1,0}$) dağılım analizi sonuç haritaları sırası ile Şekil 11 ile Şekil 14 arasında verilmiştir. Şekil 11’de şiddet dağılımı (MMI), Şekil 12’de PGA, Şekil 13’de S_a ($T=0,2$ s), Şekil 14’de S_a ($T=1,0$ s) dağılımları gösterilmiştir. Sonuç haritalarına göre yer hareketi parametrelerinin en yüksek değerleri merkez üssüne en yakın olan Sivrice ve çevresinde görülmüş olup, merkez üssünden uzaklaştıkça azalmıştır.



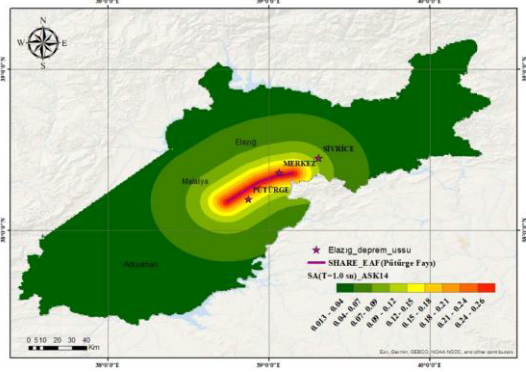
Şekil 11. Mw 6,8 Sivrice (Elazığ) depreminin ASK14 [16]’e göre hazırlanan MMI şiddet dağılım haritası



Şekil 12. Mw 6,8 Sivrice (Elazığ) depreminin ASK14 [16]’e göre hazırlanan en büyük ivme dağılım (PGA) haritası



Şekil 13. Mw 6,8 Sivrice (Elazığ) depreminin ASK14 [16]'e göre hazırlanan Sa(T=0,2 s) Spektral ivme dağılım haritası



Şekil 14. Mw 6,8 Sivrice (Elazığ) depreminin ASK14 [16]'e göre hazırlanan Sa(T=1,0 s) Spektral ivme dağılım haritası

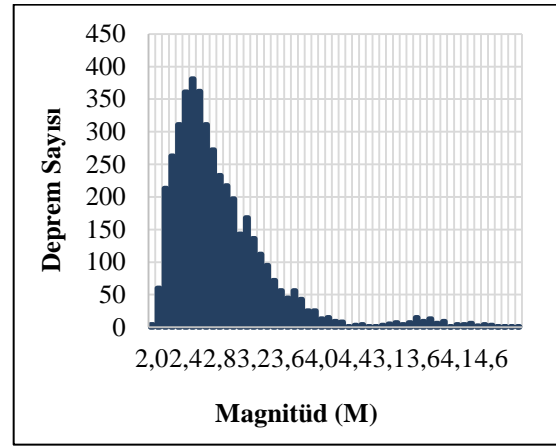
3.3. Öncü ve Artçı Depremler ile Deprem Enerjisinin Değerlendirilmesi

Bölgede 20 Ocak-27 Nisan 2020 tarihlerinde 4322 deprem meydana gelmiştir [14]². Meydana gelen bu depremlerin büyüklükleri M 0,8 ile M 6,8 arasında değişmektedir. $M \geq 4,0$ olan deprem sayısı ise 30 adettir. Depremlerin derinlikleri de incelendiğinde çoğunluğunun derinliği 7 ile 47,94 km arasındadır ve derinliklerin ortalaması da 7,0 km civarındadır. Bunları içindeki Mw 6,8 büyüklüğündeki Sivrice (Elazığ) depreminin de derinliği 8,06 km ile ortalama değer civarındadır. Şekil 15a'da söz konusu tarihler arasında meydana

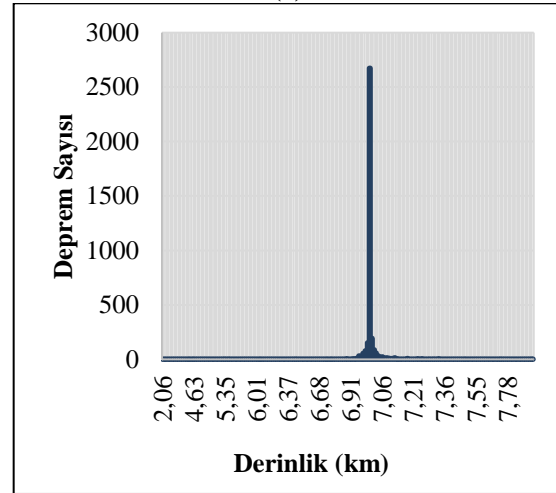
gelen deprem sayısı ve büyüklük (Magnitüd) bilgisi ve Şekil 15b'de ise deprem sayısı–derinlik bilgisi verilmiştir. AFAD'dan alınan bu depremler incelendiğinde depremlerin magnitüd değerlerinin Mw ve ML cinsinden olduğu görülmüştür. Burada Mw magnitüdü aynı alınırken ML magnitüdü ise (Eşitlik 4);

$$M_w = 0,8095(\pm 0,031)M_L + 1,3003(3,3 \leq M_L \leq 6,6) \quad (4)$$

Eşitlik 4 denklemi kullanılarak dönüşüm yapılmıştır [25].



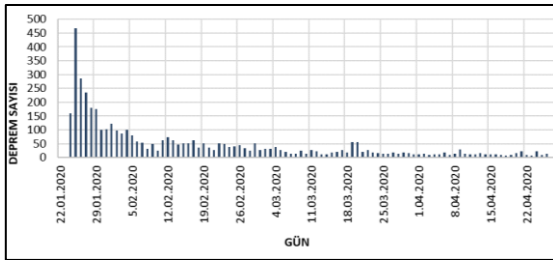
(a)



(b)

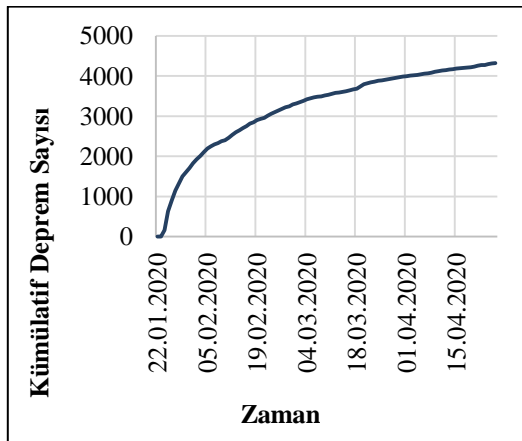
Şekil 15. Elazığ (Sivrice) bölgesi Deprem sayısı-magnitüd (a) ve deprem sayısı-derinlik (b), grafikleri

Şekil 16’de incelenen 4 aylık periyot içerisindeki deprem sayısı dağılımı verilmiştir. İlk iki günde ortalama aynı deprem sayısı meydana gelmiş, Mw 6,8’lik Sivrice depremini de içinde bulunduran sonraki on iki günde ise ciddi bir artış olmuştur ve sonrasında deprem sayısı giderek azalmıştır. 24.01.2020 günü ana şokun olduğu tarihte 159 adet irili ufaklı depremler meydana gelmiştir [14].

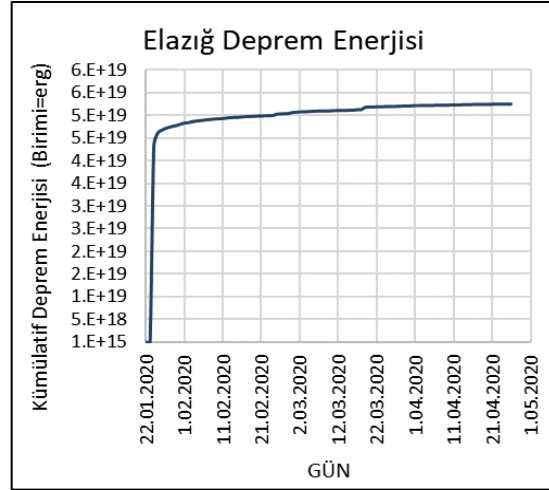


Şekil 16. Deprem sayısı-gün grafiği

Elazığ (Sivrice) depreminin dört aylık depremselliğine bakıldığında, Şekil 17a,b’de görüldüğü gibi ana şoktan sonraki zaman içerisinde kümülatif olarak deprem sayısının ve deprem enerjisinin büyük kısmının ilk zamanlarda boşaldığı görülmektedir. Burada deprem enerjisinin tespiti için $\log E = 11,8 + 1,5 M_s$ ampirik bağıntısı kullanılmış, [E, enerji birimi erg (1 erg = 10⁻⁷ joule) ve M_s ise yüzey magnitüdü temsil etmektedir [27]. Alınan verilerdeki tüm magnitüd değerleri yüzey magnitüdü olmadığından önce yüzey magnitüdüne çevrilmiş sonrasında enerji hesabı yapılmıştır.



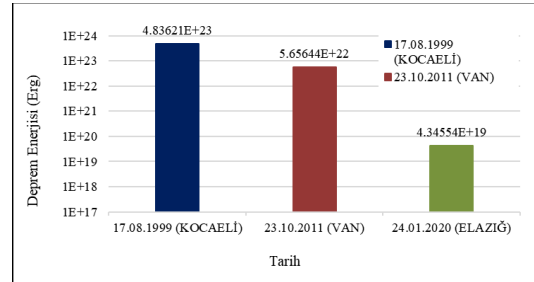
(a)



(b)

Şekil 17. Kümülatif deprem sayısı-gün (a) ve kümülatif deprem enerjisi-gün (b), grafikleri

Çalışma kapsamında Mw 6,8 Elazığ (Sivrice) depreminin ülkemizde yakın geçmişte meydana gelen büyük ve ciddi hasar yapıcı depremler olan 2011 Van Mw 7,2 [28] ve 1999 Kocaeli Mw 7,6 [14] depremlerinde açığa çıkan enerjiler ile karşılaştırılması yapılmıştır (Şekil 18).



Şekil 18. Kocaeli, Van ve Elazığ (Sivrice) depremlerinin ana şokta ortaya çıkan enerjileri

2011 Van Depremi Mw 7,2 için 3 aylık deprem verisi incelenmiştir. 23 Ekim-30 Aralık 2011 tarihleri arasında 180 adet deprem meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu depremlerin genel magnitüd aralığı M 4,0-M 5,0 arasındadır. 23 Ekim 2011 günü meydana gelen Mw 7,2 büyüklüğündeki deprem bölgede ciddi yapısal hasara sebep olmuştur. Oluşan bu depremlerle (5,66x10²²) Erg

seviyesinde ciddi bir enerji açığa çıkmış sonrasındaki artçı depremlerde ciddi bir değişiklik gözlenmemiştir. Moment enerjisinin büyük kısmı ana şokta boşalmıştır.

1999 Kocaeli Depremi Mw 7,6 için 6 aylık bir veri ele alınmıştır. 01 Haziran-30 Kasım 1999 tarihleri arasındaki veriler incelenmiştir. Bu tarihler arasında AFAD verilerine göre 324 deprem ölçülmüştür. Bu depremlerin magnitüd aralığı M 2,9 ile M 7,6 arasında değişmektedir ve ortalama olarak oluşan depremlerin magnitüd değeri M 4,7'dir. 17 Ağustos 1999'da meydana gelen M 7,6 büyüklüğündeki depremin açığa çıkardığı enerji (4,83x10²³) Erg seviyesinde olup, enerjisinin büyük kısmının ana şok ile boşaldığı görülmektedir.

1999 Kocaeli Mw 7,6 depremi, 2011 Van Mw 7,2 depremi ve 2020 Elazığ (Sivrice) Mw 6,8 depreminin meydana getirdiği kümülatif enerji karşılaştırması yapıldığında 7,6 büyüklüğündeki Kocaeli depreminin enerjisinin 10²³Erg, 7,2 büyüklüğündeki Van depreminin enerjisinin 10²²Erg, 6,8 büyüklüğündeki Elazığ-Sivrice depreminin enerjisinin de 10¹⁹Erg mertebelerinde olduğu hesaplanmıştır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında 24 Ocak 2020 günü Elazığ-Sivrice merkezli meydana gelen Mw 6,8 büyüklüğündeki depremin en çok etkilediği bölgelere ait tarihsel ve aletsel dönem depremselliği ve bu deprem sırasında kaydedilen kuvvetli yer hareketi kayıtları incelenmiştir. Ms=6,8 büyüklüğünde 4 Aralık 1905 tarihinde gelişen depremden sonra bölgede gelişen en büyük deprem 24 Ocak 2020 Mw 6,8 Elazığ depremi olması sebebiyle önem arz etmektedir.

Deprem Elazığ başta olmak üzere Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerindeki bir çok ilde hissedilmiştir. Çalışma kapsamında bölge sismo-tektoniği gözden geçirilmiş, bölgede tarihsel ve aletsel dönemde meydana gelen depremler değerlendirilmiştir. Deprem sırasında kaydedilen Maksimum Yer ivmesi-PGA değerleri ASK14 [16], BSSA14 [17], ve CY14 [18] NGA2014

YHTD kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca CY14 YHTD kullanılarak yer hareketi parametreleri (MMI, PGA, Sa0,2, Sa1,0) dağılım haritaları oluşturulmuş ve kaydedilmiş yer hareket parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın son kısmında ana şok öncesi ve sonrası öncü ve artçı depremler ve açığa çıkan enerji değerlendirilmiş ve ülkemizde yakın geçmiş zamanda meydana gelen yıkıcı depremler 1999 Kocaeli (Mw 7,6) ve 2011 Van (Mw 7,2) depremleri ile karşılaştırılmıştır.

5. TEŞEKKÜR

Çalışmaya verdikleri katkılarından dolayı araştırmacılar Dr. Senem TEKİN, Yüksek İnşaat Mühendisi Seyhan OKUYAN AKCAN ve Yüksek İnşaat Mühendisi Methiye GÜNDOĞDU GÖK'e teşekkür ederim.

6. KAYNAKLAR

1. T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2020. 20 Ocak 2020 Sivrice Elazığ Depremi Mw 6,8 Depremine İlişkin ön Değerlendirme Raporu.
2. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2020. 20 Ocak 2020 Sivrice Elazığ Depremi Bilgi Notu, 1-5.
3. Douglas, J., 2019. Ground Motion Prediction Equations, United Kingdom, Glasgow: University of Strathclyde, 1964.
4. Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., Şaroğlu, F., 2013. Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası. Ölçek 1:1.250.000, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara-Türkiye, 89.
5. Hempton, M.R., 1985. Structure and Deformation History of the Bitlis Sture Near Lake Hazar, South Eastern Turkey. Geol.Soc.Am.Bull. 96, 233-243.
6. Arpat, E., Şaroğlu, F., 1972. Doğu Anadolu Fayı ile İlgili Gözlemler ve Düşünceler. Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Dergisi, 78, 44-50.
7. Dewey, J.F., Hempton, M.R., Kidd, W.S.F., Saroglu, F., Sengör, A.M.C., 1986. Shortening of Continental Lithosphere: the Neotectonics of Eastern Anatolia: A Young Collision Zone. In: Coward, M.P., Ries, A.C. (Eds.), Collision

- Tectonics. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 19, 3-36.
8. Allen, M., Jackson, J., Walker, R., 2004. Late Cenozoic Reorganization of the Arabia-Eurasia Collision and the Comparison of Short-term and Long-term Deformation Rates. *Tectonics* 23 (1), TC2008.
 9. Westaway, R., 1994. Present-day Kinematics of the Middle East and Eastern Mediterranean. *J. Geophys. Res.* 99, 12071-12090.
 10. Aksoy, E., İnceöz, M., Koçyiğit, A., 2007. Lake Hazar Basin: A Negative Flower Structure on the East Anatolian Fault System (EAFS), SE Turkey, *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16, 319-338.
 11. Bulut, F., Bohnhoff, M., Eken, T., Janssen, C., Kl, T., Dresen, G., 2012. The East Anatolian Fault Zone: Seismotectonic Setting and Spatiotemporal Characteristics of Seismicity Based on Precise Earthquake Locations *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, 117 (7), Art. no. B07304.
 12. Kadirioğlu, F.T., Kartal, R.F., Kılıç, T., Kalafat, D., Duman, T.Y., Eroğlu Azak, T., Özalp, S., Emre, Ö., 2016. Türkiye ve Yakın Çevresi için Geliştirilmiş Aletsel Dönem (1900-2012) Deprem Katalogu ($M \geq 4.0$). Türkiye Sismotektonik Haritası (Ed. T.Y. Duman), MTA Özel Yayınlar Serisi-35, 249.
 13. Başarır Baştürk, N., Özel, N.M., Altınok, Y., Duman, T.Y., 2016. Türkiye ve Yakın Çevresi için Geliştirilmiş Tarihsel Dönem (MÖ 2000-MS 1900-) Deprem Katalogu. Türkiye Sismotektonik Haritası Açıklama Kitabı, MTA Özel Yayınlar Serisi-35, 249.
 14. Anonim1, 2020. <https://deprem.afad.gov.tr/>, T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı, (Erişim Tarihi:30.10.2020).
 15. Bozorgnia, Y., Abrahamson, N.A., Atik, L.A., Ancheta, T.D., Atkinson, G.M., Baker, J.W., Baltay, A., Boore, D.M., Campbell, K.W., Chiou, B.S.J., Darragh, R., Day, S., Donahue, J., Graves, R.W., Gregor, N., Hanks, T., Idriss, I.M., Kamai, R., Kishida, T., Kottke, A., Mahin, S.A., Rezaeian, S., Rowshandel, B., Seyhan, E., Shahi, S., Shantz, T., Silva, W., Spudich, P., Stewart, J.P., Watson-Lamprey Wooddell, K., Youngs, R., 2014. NGA-West2 Research Project. *Earthquake Spectra*, 30, 973-987.
 16. Abrahamson, N.A., Silva, W.J., Kamai, R., 2014. Summary of the ASK14 Ground Motion Relation for Active Crustal Regions. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1025-1055.
 17. Boore, D.M., Stewart, J.P., Seyhan, E., Atkinson, G.M., 2014. NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5% Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1057-1085.
 18. Chiou, B.S.J., Youngs, R.R., 2008. An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 24(1), 173-215.
 19. TBDY-2018. Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar, <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2-1.pdf>, 416.
 20. Woessner, J., Laurentiu, D., Giardini, D., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G., Valensise, G., Arvidsson, R., Basili, R., Demircioglu, M.B., Hiemer, S., Meletti, C., Musson, R.W., Rovida, A.N., Sesetyan, K., Stucchi, M., 2015. The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results. *Bull Earthquake Eng* 13, 3553-3596.
 21. Paganı, M., Monelli, D., Weatherill, G., Danciu, L., Crowley, H., Silva, V., Henshaw, P., Butler, L., Nastasi, M., Panzeri, L., Simionato, M., Vigano, D., 2014. OpenQuake Engine an Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model, *Seismological Research Letters*, 85(3), 692-702.
 22. Silva, W.J., 2005. Site Response Simulations for the NGA Project. Report Prepared for the Pacific.
 23. Earthquake Engineering Research Center.
 24. Wald, D.J.V., Quitoriano, T.H., Heaton, H., Kanamori, C.W., Scrivner, C.B., Worden, T.S., 1999a. Rapid Generation of Instrumental Ground Motion and Intensity Maps for Earthquakes in Southern California, *Earthquake Spectra*, 15, 537-556.
 25. Wald, D.J.V., Quitoriano, T.H., Heaton, H., Kanamori, C.W., 1999b. Relationship Between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity for

- Earthquakes in California, *Earthquake Spectra*, 15(3), 557-564.
26. Kadirioğlu, F.T., Kartal, R.F., 2016. The New Empirical Magnitude Conversion Relations Using an Improved Earthquake Catalogue for Turkey and its Near Vicinity (1900–2012). *Turkish Journal of Earth Sciences* 25(4), 300-310.
27. Gutenberg, B., Richter, C.F., 1956. Earthquake Magnitude, Intensity, Energy, and Acceleration: (Second paper). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 46(2), 105-145.
28. Kramer, S.L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering, Environmental & Engineering Geoscience*, 653.
29. KRDAE, 2011. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, 2011. 23 Ekim 2011 Van Depremi (Mw= 7,2) Değerlendirme Raporu, 1-3, 2011.

Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi Yazım Kuralları

Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi mühendislik bilimlerindeki güncel bilimsel ve teknik gelişmeleri araştırmacılara ve mühendislere ulaştırmayı hedeflemektedir. Tüm mühendislik alanları ile ilgili teorik/deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar Dergi'nin ilgi alanındadır. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi daha önce başka hiçbir yerde yayımlanmamış, özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları içeren makale ve kısa bildirimleri ile Dergi'de daha önce yayımlanmış makalelerle ilgili tartışmaları kabul etmektedir. Çeviri ve derleme makaleler kabul edilmemektedir. Makaleler Türkçe veya İngilizce olabilir. Dergi'ye gönderilen yazılar yayınlansın veya yayınlansın iade edilmez. Makaleleri yayınlama yetkisi dergi yayın kuruluna aittir.

Makalenin tamamı bilgisayar ortamında hazırlanmalı baskıya hazır biçimde iki adet (birisinde yazar adları ve adresleri olmamak üzere) **Dergi web sayfasında verilen örnek şablona uygun hazırlanmış olarak elektronik ortamda veya e-posta ekinde gönderilmelidir.**

Makale, A4 (210x297 mm) boyutlu kağıda, Windows uyumlu Word ortamında, Times New Roman font kullanılarak, birer aralıkla yazılmalı, ana başlıklar 12 Punto (koyu), yazar adları 12 Punto (koyu), alt başlıklar ve metin 10 punto olmalıdır.

Çizimler ve çizelgelerle birlikte, makaleler 15 sayfadan, kısa bildirimler 4 sayfadan daha uzun olmamalıdır. **Makale Türkçe ise: Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Öz, Anahtar Kelimeler, Abstract** (İngilizce öz), **Keywords, Metin, Semboller** (gerekliyse), **Teşekkür** (gerekliyse) ve **Kaynaklar,**

Makale İngilizce ise: İngilizce Başlık, Türkçe Başlık, Abstract, Keywords, Öz (Türkçe öz), **Anahtar Kelimeler, Text, Notations** (gerekliyse), **Acknowledgments** (gerekliyse) ve **References** sırası içinde düzenlenmelidir.

Başlık kısa ve açık olmalı, içeriği yansıtılabilmelidir. **Öz** (ve **Abstract**) çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 150 kelimeyi aşmamalıdır. En az üç, en fazla beş tane anahtar kelime verilmelidir. Başlık, Öz ve İngilizce başlıklı Abstract birinci sayfaya sığdırılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır. **Metin** yalnız bir dil ve anlatımla yazılmalı, makale Türkçe ise Türkçe, makale İngilizce ise İngilizce yazım kurallarına uygun olmalıdır.

Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralanmalıdır. Denklemler numaralanmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir. Yazılarda yalnızca SI birimleri kullanılmalıdır. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalıdır. Teşekkür olabildiğince kısa olmalı, çalışmaya katkısı ve desteği bulunan kişi ve kuruluşlar belirtilmelidir. Çizelgeler, çizimler ve fotoğraflar metin içine yerleştirilmeli, her birine numara ve başlık verilmeli ve başlıklar çizim ve fotoğrafların altına, çizelgelerin üstüne yazılmalıdır.

Kaynaklar metinde köşeli parantez içinde numaralanmalı ve kaynaklar listesinde metin içinde veriliş sırasına uygun biçimde belirtilmelidir. Etik kuralları gereğince, alıntılar tırnak içinde verilmeli ve bir referans numarası ile kaynak belirtilmelidir. Kaynaklarda şu bilgiler verilmelidir: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, makalenin (bildirinin veya kitabın) tam başlığı; **Makale ise:**, derginin adı, cilt, sayı, başlama ve bitiş sayfaları, yıl. **Kitap ise:** cilt numarası, varsa editörü, yayımlandığı yer, yayımlandığı yıl. **Bildiri ise:** konferansın adı, yapıldığı yer, yıl. **Elektronik ortamdaki alınmış ise:** Bildiri sadece CD/DVD'de yayınlanış ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, bildirinin adı, konferansın adı (CD/DVD), yapıldığı yer, yıl. "Konferansın adından hemen sonra parantez içerisinde CD/DVD olduğu belirtilecektir." **Tez ise:** Yazarın soyadı, adının baş harfi, tezin adı, derecesi, sunulduğu kurum, yıl. **Rapor ise:** Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, raporun adı, türü, numarası, kuruluşun adı, yayımlandığı yer, yıl. **Web Sitesi ise:** Yazar(lar) belli ise; yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, yazının başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), gün, ay, yıl olarak alıntı tarihi, varsa yayımlandığı yıl. **Kurum/Kuruluşlara ait ise:** Kurum adı, yazının başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), gün, ay, yıl olarak alıntı tarihi, varsa yayımlandığı yıl. **Elektronik kitap/rapor ise:** Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi veya kitap/raporu yayımlayan kurum veya kuruluşun adı, gün, ay, yıl olarak alıntı tarihi, varsa yayımlandığı yıl.

Dergi İletişim Adresleri

Çukurova Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergi Yayın Kurulu Başkanlığı 01330 ADANA

E-posta: mmfdergi@cu.edu.tr
Tel: (322) 3387050

cu.mmfdergi@gmail.com
Faks: (322) 3386126

