



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK MİMARLIK
FAKÜLTESİ
DERGİSİ

ÇUKUROVA UNIVERSITY
JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING AND ARCHITECTURE

Cilt/Vol: 35

Sayı/Issue: 2

Haziran/June 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valuable, and useful research articles including original and current scientific research and applications, previously unpublished anywhere else, will be regarded.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

Air Quality Assessment by Statistical Learning-Based Regularization	271
<i>İstatistiksel Öğrenmeye Dayalı Düzenlemeyle Hava Kalitesinin Değerlendirilmesi</i>	
Bülent TÜTMEZ	
Çaldıran Fayı'nın Çaldıran İlçesi Dolayında Paleosismolojik ve Neotektonik Özellikleri.....	279
<i>Title Paleoseismological and Neotectonic Characteristics of Çaldıran Fault Around Çaldıran District</i>	
Hakan GÜNEYLİ, Müjdat YAMAN ve Vildan YILDIRIM	
Dalga Yüğü Altında İskele Tipi Yapılarda Kullanılan Çakma Çelik Kazık Sistemlerin Davranışı.....	295
<i>Behavior of Pile Steel Pile Systems used in Pier Structures Under Wave Load</i>	
Münire FINDIK, İ. Devran ÇELİK, S. Nilay KESKİN ve Yusuf ÖZTÜRK	
Hastanelerde Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme Uygulamalarının Enerji ve Ekserji Analizi	311
<i>Energy and Exergy Analysis of HVAC Applications in Hospitals</i>	
Kale Mawlood MINA ve Hüsamettin BULUT	
İnsan Kaynakları Departmanı için Etmen Tabanlı Sistem Tasarımı.....	325
<i>Agent Based System Design for the Human Resources Department</i>	
Melek IŞIK	
Kapalı Döngü Üretim Rotalama Problemi için Bir Karar Destek Sistemi Önerisi.....	333
<i>A Decision Support System Proposal for Closed Loop Production Routing Problem</i>	
Yusuf KUVVETLİ ve Rızvan EROL	
Optimization of the Effect of Processing Parameters on Surface Roughness and Cutting Energy in CNC Milling of Al-7075 Material	343
<i>Al-7075 Malzemenin CNC Frezelenmesinde İşlem Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne ve Kesme Enerjisine Etkisinin Optimizasyonu</i>	
Ali PINARBAŞI, Mustafa Kemal KÜLEKÇİ, Cem BOĞA ve Uğur EŞME	
Paletli Bir Mobil Robotun Modellenmesi ve Bulanık Mantık ile Yörünge Kontrolü	355
<i>Modeling a Tracked Mobile Robot and Trajectory Control by Using Fuzzy Logic</i>	
Osman DOĞMUŞ ve Mahit GÜNEŞ	

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Experimental Investigation of the Flow Characteristics around a NACA0012 Airfoil Subjected to Stall and Post-Stall Conditions 367**
Stol ve Stol Ötesi Durumlara Maruz Kalan Bir NACA0012 Kanat Profili Etrafındaki Akış Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi
Göktürk Memduh ÖZKAN
- Tüketici Sonrası Geri Dönüştürülen Denim Kumaşların Seçilmiş Konfor Özellikleri Üzerine Bir Çalışma 377**
A Study on Selected Comfort Properties of Post-Consumer Recycled Denim Fabrics
Fusun DOBA KADEM ve Şehpal ÖZDEMİR
- İç Isı Değiştiricili Transkritik CO₂ Soğutma Sisteminin Farklı Tasarım Parametreleri için Ekserji Analizi 387**
Exergy Analysis of a Transcritical CO₂ Compression Refrigeration System with Internal Heat Exchanger for Different Design Parameters
İbrahim KARAÇAYLI ve Erdoğan ŞİMŞEK
- An Experimental Evaluation of Control Modes for Pneumatic Artificial Muscles Using Fast on/off Valves 401**
Yapay Pnömatik Kaslar için Denetim Kiplerinin Hızlı Aç/Kapa Valfler Kullanarak Deneysel Bir Değerlendirmesi
Elif Tuğba BAĞLAR ve Cabbar Veysel BAYSAL
- Zamanla Sinüzoidal Olarak Değişen Manyetik Alan Şiddetinin Ters Basamak Geometrisinde Akış Ayrılması ve Isı Transferine Etkisi 413**
The Effect of Sinusoidally Changing Magnetic Field Strength on Flow Separation and Heat Transfer in Backward-Facing Step Geometry
Harun ZONTUL ve Beşir ŞAHİN
- The Effect of Design Phase Meetings on Change Orders in Building Construction Projects 425**
Bina Projelerinde Tasarım Aşaması Toplantılarının Değişiklik Emirlerine Etkisi
Olca GENÇ, Hilmi COŞKUN ve Ercan ERDİŞ
- Yüzey Modifikasyonu Yapılmış Isırgan Otu Lifi Takviyeli Polyester Kompozit Üretimi ve Mekanik Özellikleri 433**
Production and Mechanical Properties of Surface Modified Nettle Fiber Reinforced Polyester Composite
Emel Ceyhun SABİR

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Diyatomit Agregalı Blok Elemanların Yüksek Sıcaklık ve Donma-Çözülme Etkisinde Bazı Fiziko-Mekanik Özelliklerinin Araştırılması..... 445**
Investigation of Some Physico-Mechanical Properties of Diatomite Aggregate Block Elements in High Temperature and Freezing-Thawing Effect
Hakan AKBABA
- Yedek Parça Envanter Politikasının Makina Kullanılabilirliğine Etkisini Değerlendirmeye Yönelik Bir Simülasyon Algoritması..... 455**
A Simulation Algorithm for Appraising the Effect of Spare Parts Inventory Model on Machine Availability
Onur GÖLBAŞI
- Design of a Test System for Compressibility and Resilience Performance Measurement of Floor Coverings 469**
Yer Döşemeliklerinin Sıkıştırılabilirlik ve Rezilyans Performans Ölçümü için Bir Test Sistemi Tasarımı
Maher ALSAYED, Hatice Kübra KAYNAK ve Halil İbrahim ÇELİK
- Evrişimli Sinir Ağları için Maksimum Ortaklama Devre Tasarımları..... 477**
Max-Pooling Circuit Designs for Convolutional Neural Networks
Büşra BÜLBÜL ve Mustafa GÖK
- Gürleşen-Tülü (Doğu Toroslar) Yöresinde Yüzeleyen Paleozoyik ve Mesozoyik Birimlerin Petrografisi ve Stratigrafisi 485**
Petrography and Stratigraphy of the Paleozoic and Mesozoic Units Exposed in the Gürleşen-Tülü (Adana, Eastern Taurus) Area
Nusret NURLU ve Ahmet Can AKINCI
- Fonksiyonel Derecelenmiş Malzemeli Kirişlerin Sönümlü ve Sönümsüz Zorlanmış Titreşim Analizi..... 496**
Damped and Undamped Forced Vibration Analysis of Beams Made of Functionally Graded Materials
Timuçin Alp ASLAN, Ahmad Reshad NOORI ve Beytullah TEMEL

İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Van Gölü Havzası Doğu ve Kuzey Bölgesindeki Killerin Standart ve Modifiye Proktor Özelliklerinin Belirlenmesi 511**
Determination of Standard and Modified Proctor Properties of Clay Soils in Eastern and Northern of Van Lake
Ali ÖZVAN, Onur SARAN ve Murat MUVAFIK
- Openair® Plazma Sisteminin Polyester İçerikli Çözümlü Örme Kumaşlara Etkisinin İncelenmesi 527**
Investigation of the Effects of Openair® Plasma System on Polyester Contained Warp Knitted Fabrics
Sabiha SEZGİN BOZOK, R. Tuğrul OĞULATA ve Serin MEZARCIÖZ
- Farklı Nemde Kurutma Havası Kullanılarak Kurutulan Yerfıstığının Kuruma Kinetiklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi 537**
Experimental Determination of Drying Kinetics of Peanut Dried by using Drying Air at Different Humidity
Kamil Neyfel ÇERÇİ ve Ertaç HÜRDOĞAN
- Küresel İnovasyon Endeksi Verilerinin Kümeleme Analizi ile Değerlendirilmesi..... 551**
Evaluation of Global Innovation Index with Clustering Analysis
Filiz GÜRTUNA ve Ulviye POLAT

Air Quality Assessment by Statistical Learning-Based Regularization

Bülent TÛTMEZ^{*1}

¹İnönü University, Engineering Faculty, Mining Engineering Department, Malatya

Geliş tarihi: 17.04.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Abstract

PM₁₀ can be stated as a particulate matter smaller than 10 micrometer and it can be suspended in the air. The incremental concentration of PM₁₀ affects both human and environment drastically. In this study, an air quality assessment by exhibiting the potential relationships among the secondary indicators and PM₁₀ has been focused. For the analyses, statistical learning-based regularization procedures such as Ridge, the Lasso and Elastic-net algorithms have been practiced. In particular, use of Elastic-net algorithm in predicting PM₁₀ concentration includes a novelty. As a result of the computational studies, it has been recorded that all the models showed high accuracy capacities. However, the elastic-net model outperforms the other models both accuracy and robustness (stability). Considering the error measurements (MSE and MAPE), the best numerical results have been provided by the Elastic-net model. Use of machine learning-based regularization algorithms in environmental problems can provide accurate model structures as well as generality and transparency.

Keywords: Regularization, Regression, Air quality, PM₁₀

İstatistiksel Öğrenmeye Dayalı Düzenlemeyle Hava Kalitesinin Değerlendirilmesi

Öz

PM₁₀, 10 mikrometreden daha küçük boyutta, havada askıda kalma özelliğine sahip parçacık madde olarak tanımlanabilir. PM₁₀'un çok yüksek konsantrasyonları insan ve çevreyi şiddetli biçimde etkiler. Bu çalışmada, hava kalitesinin değerlendirilmesi amacıyla, ikincil parametreler ile PM₁₀ arasındaki ilişkilerin ortaya çıkarılmasına odaklanılmıştır. Analizler için istatistiksel öğrenmeye dayalı düzenleme yöntemleri olan Ridge, Lasso ve Elastic-net yordamlarından yararlanılmıştır. Özellikle Elastic-net yordamının PM₁₀ tahmininde kullanımı yenilik taşımaktadır. Hesaplamaların sonucu olarak, bütün modellerin yüksek kestirim kapasitesine sahip oldukları kaydedilmiştir. Bununla birlikte, gerek kestirim başarısı ve gerekse de model gürbüzlüğü (duraylılığı) bakımından Elastic-net modeli diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha başarılı sonuçlar vermektedir. Model hata ölçümleri (MSE ve MAPE) temel alındığında, en iyi sayısal sonuçlar Elastic-net modeliyle elde edilmiştir. Makine öğrenmesine dayalı düzenleme yordamlarının çevresel problemlerin değerlendirilmesi amacıyla kullanımı başarılı, geliştirilmiş ve şeffaf model yapılarının oluşturulmasını sağlayabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Düzenleme, Bağlanım, Hava kalitesi, PM₁₀

*Sorumlu Yazar (Corresponding author): Bülent TÛTMEZ, bulent.tutmez@inonu.edu.tr

1. INTRODUCTION

Air quality management has gained critical importance due to urban life and crowded cities. As a result of the industrialization and unrestrained population increase, new paradigms as well as scientific-statistical control mechanisms have accompanied these trends. Among the set points of the process, industry and agricultural works can be highlighted [1].

Air quality is referenced by critical measurements such as particle matters (PM_{10} , $PM_{2.5}$), SO_2 , temperature, velocity, humidity, pressure [2]. Like in Turkey, the most countries use these indicators and evaluations are performed both at global (country) and local scales (city, town etc.) periodically. Thus wise, the pollution levels are determined and necessary precautions are taken by public authorities.

In the recent literature, various mathematical-statistical modelling tools have been examined for appraising particle matter concentrations in the air. One of the important indicators, fine particle $PM_{2.5}$ was investigated in different studies. Lai [3] focused on fine particle events and a quality index suggested based on fine particle matter. Nguyen et al. [4] performed a numerical assessment using baseline simulation aerosol effects. Thus, spatio-temporal variations of air quality parameters were appraised. Recently, Yatkin et al. [5] discussed the potential effects of fine particles on small urban domain. For this evaluation, both natural and anthropogenic sources have been utilized.

In parallel to fine particles, relatively coarse particles (PM_{10}) have been handled in various scientific works. One of these works, remote sensing-based estimation was conducted using air station data obtained from Ecuador [6]. In an interesting study, air quality was handled along with chronic stress and potential effects on human health were assessed [7]. Similarly, the influences of particulate matter concentrations (PM_{10}) on tourism have been inspected by a generalized additive model [8]. More recently, a forecasting-based study which uses time series and harmonic

regression has been carried out for analyzing the PM_{10} variations in Ankara [9].

In general, the relationships between indicator variables and a target variable are analysed by multivariate regression methods. Although the traditional regression methodologies like linear least squares (LS) generate low bias, these are also sensitive against high variance. The LS fitting is mostly used to obtain a linear structure [10]. On the other hand, more robust tools are required for many problems due to interpretability. In particular, limited number of variables and more generality should be considered by a regression modelling. Besides this, air quality appraising built upon particulate matters includes many complexities due to natural variability and different sourced independent variables and a reliable data analysis should be performed based on reduced variability and high accuracy.

From a statistical point of view, performing high accuracy (regression) or clear pattern recognition (classification) under multi-collinearity conditions has critical importance. To model the complex systems based on reduced variance is also a required conditions for a high level identification. To overcome these problems, Ridge and Lasso (Least absolute shrinkage and selection operator) regularization paths were formulated to structure observations based on optimal coefficients both for regression and classification purposes [11,12]. Recently as a regularized regression method, Elastic-Net has been suggested for eliminating the drawbacks of Ridge and the Lasso techniques [13]. All the methods use shrinkage and regularization, and the relationships are revealed using penalty functions and adaptive parameters.

In this study, PM_{10} concentrations measured by the quality stations in a city are appraised by regularization paths. By this way, the potential complexity and the relationships are assessed by high level regression algorithms. Based on a numerical comparison, the use of relatively new regularization (Elastic-net) in environmental data analysis was objected. Therefore, the results have been given using both performance indicators and magnitude of the coefficients.

2. METHODOLOGY

2.1. Problem statement

Many observations are recorded at air quality stations such as Particulate Matters, SO₂, Temperature, Velocity, Pressure, and Humidity measurements. In general, air condition of a region is described by particulate matter level and distribution [14]. In this process, multivariate and simultaneous interdependent relationships should be focused and analyzed. Due to potential collinearities, high variance and natural uncertainties, more accurate and reliable modelling-classification tools are required.

2.2. Ridge Regression

In a traditional multivariate analysis, a matrix solution is the best way to provide the regression coefficients (Equation 1):

$$\hat{\beta}=(X^T X)^{-1} X^T Y \tag{1}$$

The ridge estimator is constructed using an additive small constant as follows [15] (Equation 2):

$$\hat{\beta}_R=(X^T X+\lambda I_p)^{-1} X^T Y \tag{2}$$

In Eq (2), λ is a preliminary invariant, employed as a tuning parameter. $\hat{\beta}_R$ is defined to minimize the penalized sum of squares (Equation 3):

$$\sum_{i=1}^n \left(y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p \beta_j^2 = \text{RSS} + \lambda \sum_{j=1}^p \beta_j^2 \tag{3}$$

In eq (3), RSS denotes the residual sum of squares. The term $\lambda \sum_{j=1}^p \beta_j^2$ is defined as shrinkage penalty. When β_1, \dots, β_p are close to zero, this penalty reduces. In eq. (3), the relative impact of the terms is expressed via the constant λ [16].

2.2. The Lasso

The ridge regression employs all the indicators in the resulting structure. This approach results in limited generality. To eliminate the drawbacks of ridge regression and to increase the model interpretability, the Lasso path was suggested [17].

The Lasso model shrinks down the model coefficients. It establishes models that simultaneously employ regularization to conduct feature selection [18]. The estimated Lasso coefficients $\hat{\beta}_L$ can be stated as (Equation 4):

$$\sum_{i=1}^n \left(y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_j| = \text{RSS} + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_j| \tag{4}$$

The Lasso path utilizes an l_1 (norm) penalty in place of an l_2 . In parallel to ridge analysis, the selection of a reliable λ has also determinative importance.

2.2. Elastic-net

Even though the Lasso is an effective variable selection method, it may contain several drawbacks [13]. If the number of variables is bigger than the number of measurements, the Lasso can select at most N variables. In the same condition, when the variables are correlated, ridge regression outperforms the Lasso. As an integration of the Lasso and ridge, elastic net performs best, because it obtains a strong combination of sparsity and regularization [19]. The following structure shows the objective function of the model (Equation 5):

$$L(\lambda_1, \lambda_2, \beta) = |y - X\beta|^2 + \lambda_2 |\beta|^2 + \lambda_1 |\beta|_1 \tag{5}$$

In Eq. (5), λ_1, λ_2 are fixed and non-negative. For $\alpha \in [0, 1)$ the elastic-net penalty can be provided (Equation 6 and 7):

$$\alpha = \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2), \tag{6}$$

$$(1-\alpha)|\beta|_1 + \alpha|\beta|^2 \quad (7)$$

In the regularization system, the l_1 part of the penalty forms a sparse model. However, the quadratic part of the penalty performs the l_1 part more stable. Elastic-net regularization consists of two stages [13]:

- For each fixed λ_2 , the ridge regression coefficients are determined,
- The Lasso-type shrinkage along the Lasso coefficient determination path is performed.

3. IMPLEMENTATION

3.1. Data Set and Structure Identification

The air quality data set includes the observations recorded in Eskisehir city by national authority within an action plan [20]. The data set covers the temporal measurements within the period February 2007 - December 2013. Due to the practical problems encountered in measurement processes [20] and outlier values, some of data were not able to consider. The data set comprising of 75 average values covers particulate matter (PM_{10}), SO_2 and meteorological parameters such as temperature, pressure, humidity and velocity [21]. The parameters considered are the general air quality assessment parameters referred in literature [2].

To reveal the pattern of the relationships in the data set, a series of bivariate median plots have been constructed as in Figure 1. The fences separate the observations. The bags consist of 50% of all observations. By this structure, the outliers can be exhibited. The relationships between each indicator variable and PM_{10} indicate that temperature, velocity and humidity effects are similar and high variability. There are no outliers. On the other hand, both pressure and SO_2 produce lower variance and some outliers. It should be noticed that the outlier provided by SO_2 bivariate plot may be resourced from recording or extra ordinary situation.

3.2. Results and Discussion

The substantial parts of the computations have been performed via the packages in R [22] such as glmnet [23] and Caret [24]. Data scaling in the regularization algorithms have been performed by [15] (Equation 8):

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n}}} \quad (8)$$

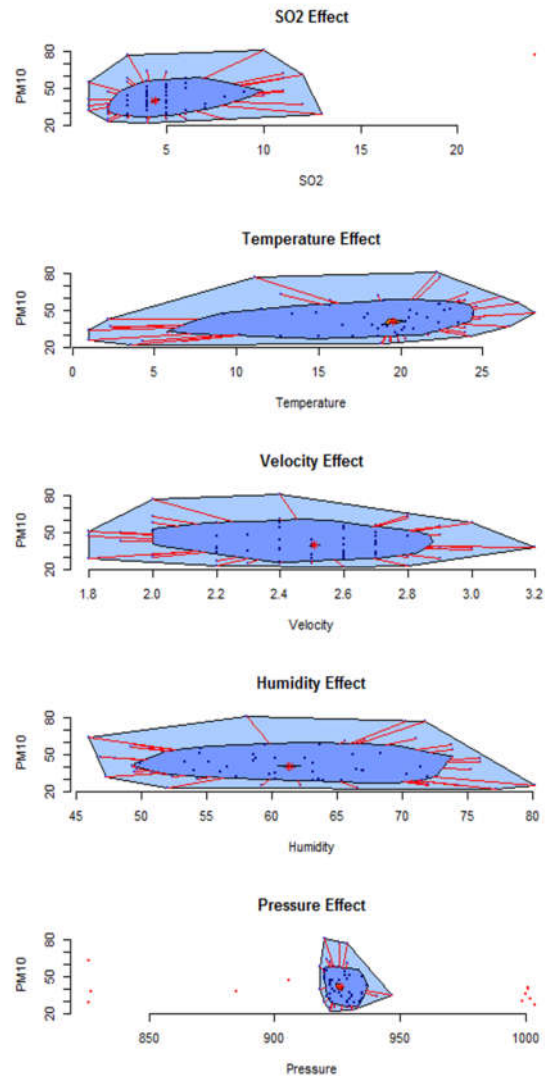


Figure 1. Bivariate plots for relationships

To determine the initial constants like λ , a grid (5 indicator variables plus intercept) and 75 columns (number of observations) was structured. using 6 x 75 matrix, with 6 rows

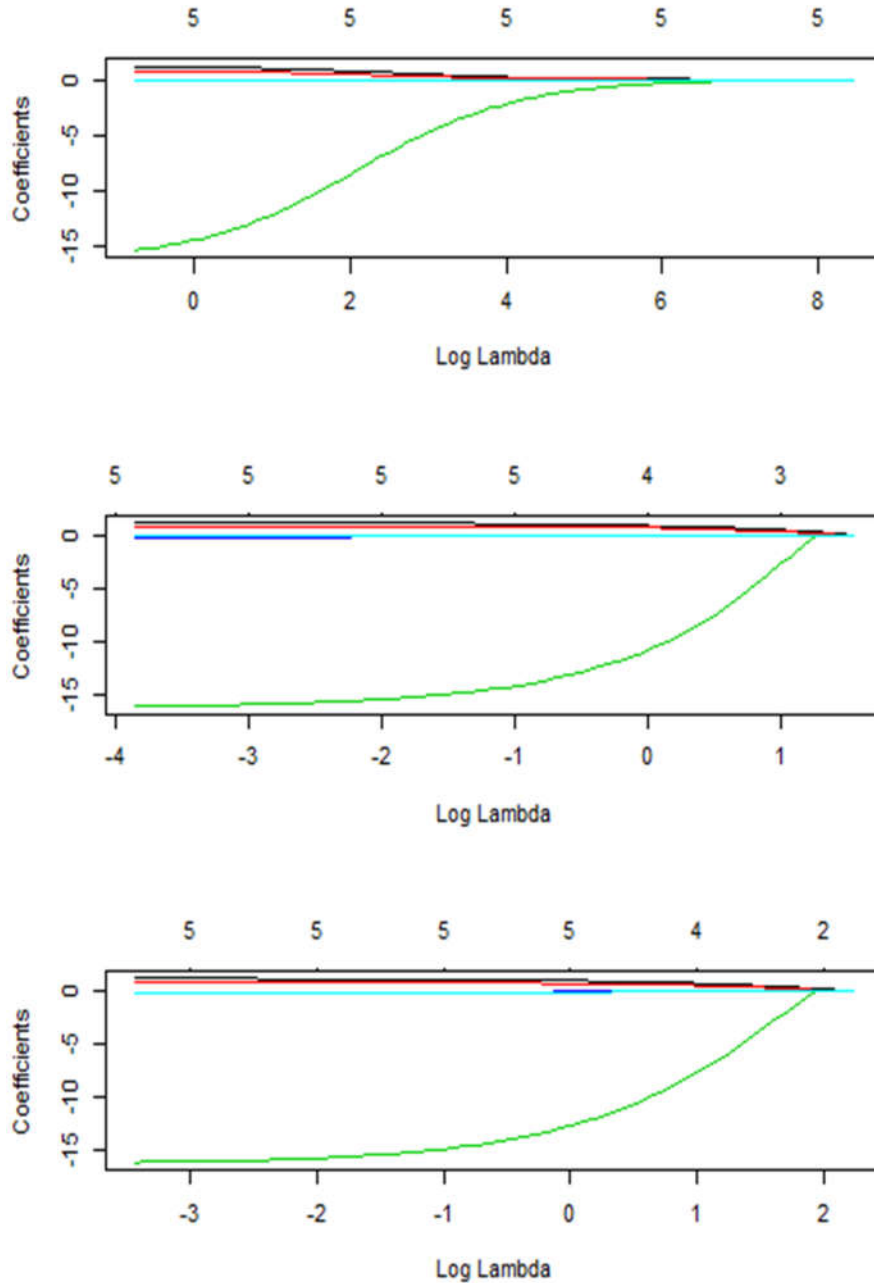


Figure 2. Coefficients provided by training models

To provide the model parameters and performance measures, first data set was splitted into two groups: 75% (Training) and 25% (Testing). Figure 2 indicates the optimized model coefficients

obtained by the λ grid values. The numbers on the plots refer the number of indicator variables using for determining the coefficients. These reference model parameters have been obtained using training observations.

In the second step, the critical parameter λ was optimized by ten-fold cross validation. Figure 3 indicates the cross validation-based parameter optimization structure.

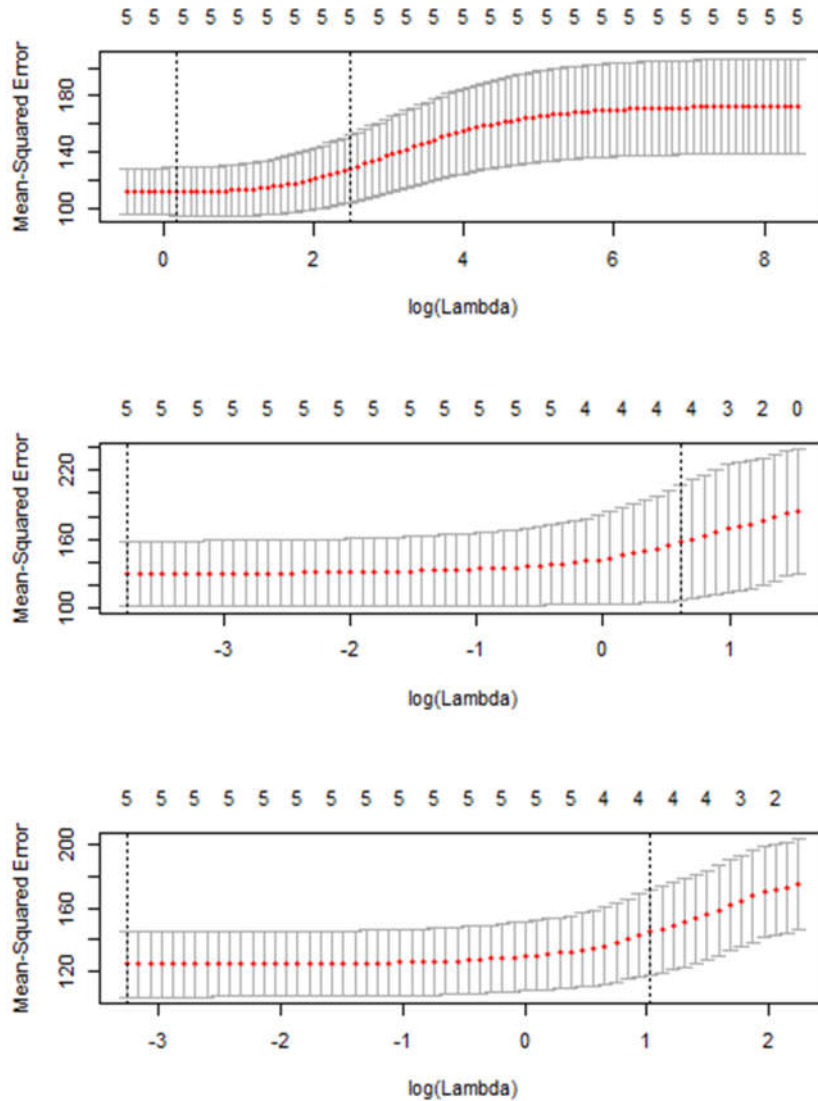


Figure 3. Cross Validation-based MSEs

In consequence of the simulations, the optimum tuning value has been provided by the smallest cross-validation error. In order to obtain the determinative parameter λ against MSEs, ten-fold cross validation has been conducted.

The model optimizations (final coefficients) are given in Table 1. The case studies showed that all the models have notable estimation capacities. The magnitudes of the coefficients include some potential for an explanation. As seen in Table 1,

the Elastic-net model explains the relationships via relatively smaller magnitudes comparing with the other models. This point has importance to analyse the degree of the variability.

Providing an effective bias-variance trade-off permits to minimize the model's total error [25]. From an error-based analysis, the best accuracy has been provided by the elastic-net model. Table 2 summarizes the testing model performances based on Mean Squared Error (MSE) and Mean Absolute Percentage Error (MAPE) measures. The lower MSE and MAPE refer the better accuracy. It should be noticed that even though the Ridge model employs 5 indicator variables, not only the Lasso but also the Elastic-net models use 4 independent variables in identification. This means that both the models have more generality comparing with the ridge model structure.

Table 1. Optimized model coefficients

Model	Equation
Ridge	$PM_{10} = 95.96 + 0.61SO_2 + 0.23Tem - 3.18Vel - 0.14Hum - 0.05Pre$
Lasso	$PM_{10} = 88.33 + 1.18SO_2 + 0.28Tem - 0.20Hum - 0.05Pre$
Elastic-Net	$PM_{10} = 41.68 + 0.78SO_2 + 0.23Tem - 0.02Hum - 0.01Pre$

Table 2. MSE and MAPE performances on testing data

Model	MSE	MAPE
Ridge	146.32	0.253
Lasso	145.44	0.246
Elastic-Net	142.01	0.232

One of the main motivations of this study was specify the effects of air quality model parameters on particulate matter. Table 1 indicates that SO_2 and temperature parameters have additive effects. However, the rest of the parameters such as velocity, humidity and pressure have reducing effects.

Although the elastic-net model seems the best model from Table 2, the estimation capacities of the regularization paths are also very close. It should be noticed that both the Lasso and the elastic-net use limited parameters and these have

more general structures than the Ridge model. Besides these, as a hybrid model structure, elastic-net confirmed more technical superiorities:

- Eliminating limitation on the number of selected variables;
- Stabilizing the l_1 regularization path.

4. CONCLUSIONS

Particulate matter (PM) addresses particles suspended in the air. The incremental concentration of PM_{10} and its detrimental effects on human and environment have gained attention in the world.

This study focused on revealing the potential relationships among the secondary air quality indicators and PM_{10} concentrations. For this purpose, high level regression procedures such as Ridge, the Lasso and Elastic-net regularization algorithms have been utilized. The case studies showed that all the models have huge capacities to specify the relationships. In particular, the elastic-net path can be suggested for the system including high number of variables. Due to generality and transparency, this hybrid model can be suggested for analyzing spatial-environmental processes.

5. REFERENCES

1. Mallik, C., 2019. Anthropogenic Sources of Air Pollution, in Air Pollution: Sources, ed. Impacts and Controls, Saxena, P., Naik, V., CABI. New Delhi.
2. Radzka, E., Rymuza, K., 2019. The Effect of Meteorological Conditions on PM_{10} and $PM_{2.5}$ Pollution of the Air. *Rocznik Ochrona Srodowiska* 21(1), 611-628.
3. Lai, L.W., 2016. Public Health Risks of Prolonged Fine Particle Events Associated with Stagnation and Air Quality Index Based on Fine Particle Matter with Diameter $<2.5 \mu m$ in the Kaoping Region of Taiwan. *Int. J. of Biometeorology*, 60(12), 1907-1917.
4. Nguyen, G.T.H., Shimadera, H., Uranishi, K., Matsuo, T., Kondo, A., Thepanondh, S., 2019. Numerical Assessment of $PM_{2.5}$ and 0-3 Air Quality in Continental Southeast Asia:

- Baseline Simulation and Aerosol Direct Effects Investigation. *Atmospheric Environment*, 219, 117064.
5. Yarkin, S., Gerboles, M., Belis, C.A., Karagulian, F., Lagler, F., Barbiere, M., Borowlak, A., 2020. Representativeness of an Air Quality Monitoring Station for PM_{2.5} and Source Apportionment Over a Small Urban Domain. *Atmospheric Pollution Research*, 11(2), 225-233.
 6. Alvarez-Mendoza, C.I., Teodoro, A.C., Torres, N., Vivanco, V., 2019. Assessment of Remote Sensing Data to Model PM₁₀ Estimation in Cities with a Low Number of Air Quality Stations: A Case of Study in Quito. Ecuador, *Environments*, 6(7), 85.
 7. Petrowski, K., Bastianon, C.D., Buhner, S., Brahler, E., 2019. Air Quality and Chronic Stress a Representative Study of Air Pollution (PM_{2.5}, PM₁₀) in Germany. *J. Occupational and Environmental Medicine*, 61(2), 144-147.
 8. Yoon, H., 2019. Effects of Particulate Matter (PM₁₀) on Tourism Sales Revenue: a Generalized Additive Modelling Approach. *Tourism Management*, 74, 358-369.
 9. Akdi, Y., Okkaoglu, Y., Golveren, E., Yucel, M.E., 2020. Estimation and Forecasting of PM₁₀ Air Pollution in Ankara Via Time Series and Harmonic Regressions. *Int. J. Environmental Science and Technology*, <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02705-0>.
 10. Draper, N.R., Smith, H., 1998. *Applied Regression Analysis*, Wiley, USA.
 11. Saleh, A.K.M.E., Arashi, M., Kibria, B.M.G., 2019. *Theory of Ridge Regression with Applications*, John Wiley & Sons, USA.
 12. Tutmez, B., 2018. Bauxite Quality Classification by Shrinkage Methods, *Journal of Geochemical Exploration*, 191, 22-27.
 13. Zou, H., Hastie, T., 2005. Regularization and Variable Selection Via the Elastic Net. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*:301-320.
 14. Megaritis, A.G., Fountoukis, C., Charalampidis, P.E., Pilinis, C., Pandis, S.N., 2013. Response of Fine Particulate Matter Concentrations to Changes Ofemissions and Temperature in Europe. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 3423-3443.
 15. James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R., 2013. *An Introduction to Statistical Learning*, Springer, New York.
 16. Dorugade, A.V., 2014. New Ridge Parameters for Ridge Regression. *Journal the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 15(1), 94-99.
 17. Hastie, T., Tibshirani, R., Wainwright, M., 2015. *Statistical Learning with Sparsity*, CRC Press, Boca Raton.
 18. Kuhn, M., Johnson, K., 2013. *Applied Predictive Modelling*, Springer, New York.
 19. Khan, M.H.R., Anamika, B., Tamanna, H., 2019. Stability Selection for Lasso, Ridge and Elastic net Implemented with AFT Models, *Statistical Applications in Genetics and Molecular Biology*, 18(5), 10.1515/sagmb-2017-0001.
 20. ÇŞB., 2014. Eskişehir İli Temiz Hava Eylem Planı, THEP (2014-2019), Eskişehir. (in Turkish).
 21. Tutmez, B., 2019. Multivariate Statistical Control of Air Quality. 2. International Mersin Symposium, Mersin, 370-381.
 22. R Development Core Team, 2008. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria (ISBN 3-900051-07-0).
 23. Friedman, J., Hastie, T., Tibshirani, R., 2010. Regularization Paths for Generalized Linear Models Via Coordinate Descent. *J. Statistical Softwares*, 33, 1-22.
 24. Kuhn, M., 2008. Building Predictive Models in R Using the Caret Package. *Journal of Statistical Software* 28(5), 1-26.
 25. Alpaydın, E., 2010. *Introduction to Machine Learning*, the MIT Press, Cambridge.

Çaldıran Fayı'nın Çaldıran İlçesi Dolayında Paleosismolojik ve Neotektonik Özellikleri

Hakan GÜNEYLİ^{*1}, Müjdat YAMAN², Vildan YILDIRIM²

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

²ÇŞB., Yer Bilimsel Etüt Dairesi, Ankara

Geliş tarihi: 05.04.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Sağ yanal atımlı Çaldıran Fayı Türkiye'nin Doğu Anadolu bölgesindeki önemli aktif faylarından. Fayın 24 Kasım 1976 tarihinde ürettiği yıkıcı deprem önemli hasar ve can kaybına neden olmuş ve 50-55 km yüzey kırığı oluşturmuştur. Çaldıran ilçesi dolayında yüzey deformasyonları ve paleosismolojik kazı esasına dayalı olarak gerçekleştirilen bu çalışmada son depremde oluşan yüzey kırıklarının korunduğu kesimlerin olduğu saptanmıştır. Yüzey ve paleosismolojik çalışmalar Holosen'de bölgede yüzey kırığı oluşturan ($M \geq 7$) en az üç depremin olduğunu göstermektedir. Çaldıran dolayında, son depremde 1,5 m sağ yanal ve 30-40 cm düşey ötelenme saptanmıştır. Ayrıca, 1696'da Çaldıran bölgesinde meydana gelen depremi [18] Çaldıran Fayı'nın ürettiği kabul edilerek tekrarlanma aralığının 280 yıl; kısa dönem yatay kayma hızının $5,36 \text{ mm/yıl}^{-1}$ düşey kayma hızının ise $1,43 \text{ mm/yıl}^{-1}$ olduğu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çaldıran fayı, Paleosismoloji, Deprem, Tekrarlanma aralığı, Kayma hızı

Title Paleoseismological and Neotectonic Characteristics of Çaldıran Fault Around Çaldıran District

Abstract

The Çaldıran Fault having a character of strike slip fault with a dextral slip is one of the major active faults in the Eastern Anatolia region of Turkey. The destructive earthquake produced by the fault on November 24, 1976 caused significant damage and loss of life, and created a surface rupture of 50-55 km. In this study carried out on the basis of surface deformation and paleoseismology around the Çaldıran settlement, it was determined that there are fault lines where the surface ruptures occurred in the last earthquake are still protected. The studies of surface investigation and paleoseismological trenching show that there were at least three earthquakes (events) forming surface rupture ($M \geq 7$) in the region during the Holocene. Around Çaldıran, 1.5 m right lateral and 30-40 cm vertical offsets were measured in the last earthquake. On the other hand, it was determined that the recurrence interval for major earthquakes of 280 years, the short-term horizontal slip rate of 5.36 mm/yr^{-1} and vertical slip rate of 1.43 mm/yr^{-1} considering that the historical earthquake that occurred in the area of Çaldıran district in 1696 [18] was produced by the Çaldıran Fault.

Keywords: Çaldıran fault, Paleoseismology, Earthquake, Recurrence interval, Slip-rate

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Hakan GÜNEYLİ, hguneyli@cukurova.edu.tr

1. GİRİŞ

Doğu Anadolu'nun önemli yapısal unsurlarından olan Çaldıran Fayı Van gölünün 100 km KD'sunda; Tendürek dağınsa 23 km güneyinde, BKB-DGD gidişli sağ yönlü doğrultu atımlı bir faydır. Bölgede E.Pliyosen'den itibaren hakim sıkışmalı-açılmalı bir tektonik rejim eşlenik (conjugate) doğrultu atımlı fayların baskın olduğu bir yapı geliştirmiştir [1]. Çaldıran Fayı bu yapı içerisindeki aktif ana faylardandır. Çaldıran Fayı, Tutak Fayı (TF); Erciş Fayı (EF) ve Kuzey Tebriz Fayı (NTF) ile bir sistem oluşturarak Kafkas Blok'unun güney kenarını oluşturur [2,3,4].

Çaldıran Fayı 24.11.1976'de 7,5 büyüklüğündeki Çaldıran Depremi'nde [5], 50-55 km yüzey kırığı ile 2,75 m yanal [5]; 0,5 m'ye kadar düşey [5,6] atım oluşturmuştur. Çaldıran Fayı'nın kayma hızı için yapılan çalışmalarda farklı yöntemler izlenerek 8,7 [7], 8,1 [3], 6,5-7,3 [8] ve 3,27 mm/yıl [4] değerleri bulunmuştur. Tekrarlanma aralığı için Selçuk ve arkadaşları, [4] elastik blok modellemesi ile 320 yıllık bir hesaplama yaparken aynı çalışmada atımlardan yola çıkarak 3,27 mm/yıllık kayma hızı ile 790 yıllık bir aralık bulmuşlardır.

Bu çalışmada Çaldıran Fayı'nın yüzelediği Çaldıran yerleşim birimi dolayında özellikle son depremde oluşmuş yüzey kırıklarının hâlâ izlenebildiği kesimlerde paleosismolojik hendek kazıları yapılmış, Kuvaterner birimlerindeki deformasyonlar belirlenmiş ve oluşan deformasyonların eski sanat yapıları üzerindeki izleri analiz edilmiştir. Böylece Çaldıran Fayı'nın aktif tektonik ve depremsellik açısından bir değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada öncelikle bölgenin jeolojik özellikleri ve tarihsel-aletsel dönem depremselliği ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Devamında çalışmanın esasını oluşturan, aktif tektonik öncelikli saha; aktif fay; paleosismolojik kazı yer seçimi; son depremde oluşmuş ve halen korunmuş yüzey kırıklarının saptanması ve değerlendirilmesi;

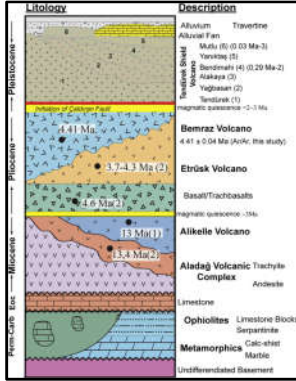
ve jeolojik birimlerde ve sanat yapılarında oluşmuş aktif fay kökenli deformasyon araştırmaları yapılmıştır. İnceleme alanında 1976 depreminde oluşan yüzey kırıkları büyük ölçüde korunmuş olduğundan paleosismolojik hendek kazı yer seçimlerinde saha çalışmaları yeterli olmuş, herhangi bir jeofizik yöntem gerekliliği kalmamıştır.



Şekil 1. İnceleme alanının yerbulduru haritası

İnceleme alanında Çaldıran Fayı birçok paralel ve yarı paralel bireysel fay kolundan oluştuğu (Şekil 1) için her bir fay kolu numaralandırılmış ve yapılan hendek, saha çalışmaları ve yüzey-mühendislik yapılarındaki deformasyon özellikleri bu fay kolu tanımlamalarına göre gerçekleştirilmiştir.

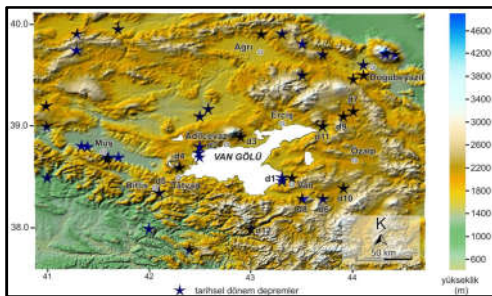
Çaldıran Fayı ile ilgili paleosismolojik bir çalışma henüz yapılmış değildir. Bu çalışma Çaldıran Fayı üzerinde yapılan ilk paleosismolojik çalışmadır. Bölgedeki Pleistosen ve Holosen yaşlı birimlerin yaşlandırılmasında saha gözlemleri, birimlerin deformasyon özellikleri, çimentolanma-tutturulma dereceleri, yaşı bilinen birimlerle olan kesenkesilen ilişkileri göz önünde bulundurulmuştur. Bölgede Pleistosen dönemine kadar olan birimlerin ayrıntılı radyometrik yaş analizleri mevcuttur [9-11]. Tendürek volkanizmasının son 30.000 yıla



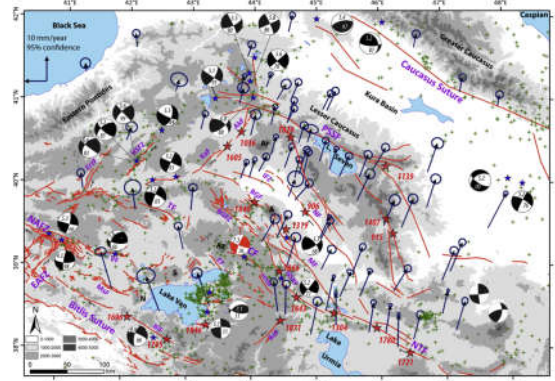
Şekil 3. İnceleme alanının genelleştirilmiş dikme kesiti (Radyometrik yaşlar (1) [9], (2) [10] ve (3) [11]) [4'den]

3.2. İnceleme Alanının Depremselliği

Çaldıran dolayında 1647 (I=IX) ve 1696 (I=IX, M=7,1) [18] (d7 ve d9)'de Çaldıran Fayı ile ilişkili iki deprem kaydı vardır (Çizelge 1 ve Şekil 4). Ayrıca 1866 ve 1871'de Çaldıran Fayı ile bağlantılı iki deprem de kayıtlarda mevcuttur (Şekil 5). Çaldıran Fayı ile birlikte Hasan Timur Gölü Fayı, Balık Gölü Fayı (BGSKF) ve Doğu Beyazıt Fayı (DBF) büyük olasılıkla Kuzey Tebriz Fay Zonu (NTF) ve Salmas Fayı (SF)'nin KB uzanımıdır [2]. Bu bağlamda Kuzey Tebriz Fay Zonu üzerinde 1304, 1721, 1780 ve 1843'de meydana gelen tarihsel depremlerin (Şekil 5) yapısal olarak Çaldıran Fayı'nın GD uzanımında gerçekleştiği düşünülebilir. Tarihsel kayıtlara göre Çaldıran Fayı ve bağlı olduğu aktif ana yapı üzerinde yaklaşık olarak 50-60 yılda bir, kayda değer ($M \geq 5-6$) bir deprem meydana gelmektedir.



Şekil 4. Sayısal yükseklik modeli üzerinde tarihsel depremler (Tarihsel depremler Çizelge 1'de) [16,17,18,19]



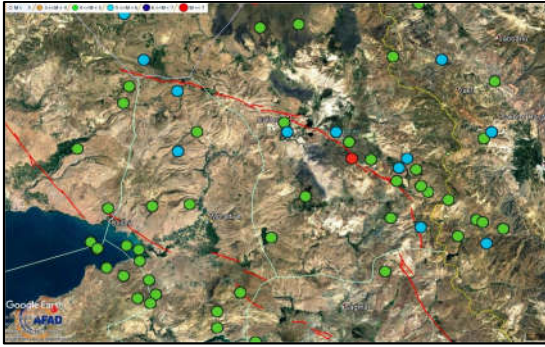
Şekil 5. D.Anadolu ve B. İran gölg. aktif fay-sismik haritası (Mavi yıldız: orta büyüklükteki depremler; kırmızı yıldız: tarihsel depremler [20,21]. Faylar [22,23,24,15]'den. Sismisite USGS'den. Odak mekanizmaları: [25,26,27,28, ve CMT kataloğundan. GPS hız vekt: [29,3,30]: [4]'den]

Çizelge 1. Tarihsel dönem depremleri [16,17,18,19; L: Lokasyon (Lok. Şekil 5'de); M: Büyüklük; I: Şiddet]

L	Tarih	Enlem	Boylam	M	I
d1	1101	38,47	43,3		VI
d1	1111	38,5	43,4	6,6	IX
d2	1208	38,7	42,5	6,5	?
d2	1245	38,74	42,5	5	VII
d2	1275	38,8	42,5	6,8	?
d3	1276	38,9	42,9	5	VIII
d3	1282	38,9	42,9	5	?
d4	1439	38,6	42,3	?	VI
d5	1441	38,35	42,1	5	VIII
d6	1646	38,3	43,7	5	VI
d7	1647	39,15	44	?	IX
d8	1648	38,3	43,5	6,8	VIII
-	1685	?	?	?	VI
-	1692	?	?	?	?
d9	1696	39,1	43,9	7,1	IX
d1	1701	38,5	43,4	5	VIII
d1	1701	38,5	43,4	5	VII
d1	1704	38,5	43,4	5	VII
d10	1715	38,4	43,9	6,7	VIII
d11	1791	39	43,7	?	VI
d12	1871	38	43	6,9	VII
d1	1881	38,5	43,3	7,3	X
d1	1894	38,47	43,3	?	V
d1	1900	38,47	43,3	5,2	VI

Aletsel dönemde fay üzerindeki en büyük deprem 24 Kasım 1976 tarihinde meydana gelen ($M=7,5$)

Çaldıran Depremi'dir. 3840 can [31,32] ve mal kaybına neden olmuş; 50-55 km yüzey kırığı gelişmiştir [5]. Ayrıca Çaldıran Fayı'nın yapısal olarak GD devamı sayılabilecek Salmas fayı üzerinde 1930 yılında $M=7,4$ yıkıcı bir deprem meydana gelmiştir [2]. Aletsel kayıtlara göre Çaldıran Fayı üzerinde, özellikle Çaldıran yerleşim biriminin GD uzanımında $M=5-6$ arasında belirgin sismik yoğunluk söz konusudur (Şekil 6).



Şekil 6. Aletsel dönemde Çaldıran ilçesi ve çevresinde meydana gelen depremler [33]

3.3. Yüzeysel Deformasyonları

İnceleme alanının batısındaki 1 No'lu fay, K77B genel gidişinde; 1,7 km uzunluğunda devamlı bir çizgisellik sunar (Şekil 7) ve sahanın en KB'sındaki fay denetimli bir uzamış sırtı, uzun eksenli boyunca öteleyerek yaklaşık 230 m'lik bir sağ yanallı atım oluşturur (Şekil 8). Fay, bu uzamış sırtın orta kesimlerinde, güney yamaçtaki heyelanların gelişimini denetlemektedir (Şekil 9).



Şekil 7. İnceleme alanında Çaldıran Fayı'nı oluşturan fay kolları üzerinde yapılan paleosimolojik kazı yerleri



Şekil 8. Çaldıran Fayı'nın 1 No'lu kolu üzerinde oluşan sağ yanallı ötelenme (Çaldıran batısı)



Şekil 9. 1 No'lu fay denetiminde gelişmiş heyelan

1 Nolu fay kolunun devamı niteliğindeki 2, 3, 4, 5 ve 6 No'lu fay kolları (Şekil 7) Çaldıran ilçesinin kuzeyini sınırlandıran yaklaşık D-B gidişinde şekillenmiş yükseltinin kuzey yamacını 30-40 m sağa sıçramalar yaparak denetlemektedir. Bu yükselti Pleistosen yaşlı bazaltik bir kütlede oluşmakta olup 2-6 No'lu fay kolları bazaltlar ile kuzeydeki vadi (ova) tabanını oluşturan alüvyal düzlüklerin sınırını oluşturmaktadır; sağ yönlü yanallı harekete kuzey bloğu düşüren normal bileşen eşlik etmektedir. Bunlar 320-550 m arasında uzunluklardadır. Saf doğrultu atımlı fay özelliği gösteren 4-6 Nolu fay kollarında 1976 depreminde oluşan yüzey kırıkları korunmuştur (Şekil 10-12), ayrıca 6 Nolu fay kolu üzerinde küçük ölçekli fay gölleri (sag-pond) oluşmuştur. Bu fay kolları D-B ile K58B arasında doğrultularda yüzeylemektedir.

1 No'lu fay kolundan GB'ya doğru ayrılan ikinci ana kolun başlangıcını oluşturan 7 No'lu fay kolu yaklaşık 900 m uzunluğunda ve K54B genel doğrultusundadır. Bu fay kolu geniş bir "S" yaparak Yerleşim birimi içerisinde geçmektedir. Bu fay büyük ölçüde Pleistosen yaşlı volkanikler

içerisindedir, ancak yapılaşma ve yoğun tarımsal faaliyet, fayın izini büyük ölçüde silmiştir. Buna karşın 1976 depreminde oluşan yüzey deformasyonları eski yapılarda izlenebilmektedir.

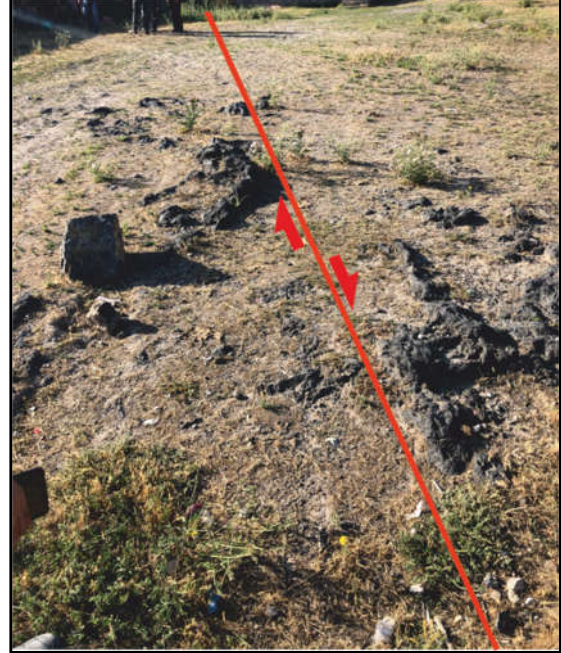


Şekil 10. 4 No'lu fay kolu üzerinde 1976 depreminde oluşmuş yüzey kırığının güncel görünümü (bakış B ve D'ya)



Şekil 11. 6 No'lu fay kolunda 1976 depreminden kalma yüzey kırığı ve Hendek-5'deki uzanımı (bakış D ve GB'ya)

7 No'lu fay kolunun Pleistosen bazaltlarında korunabilmiş yüzey kırıklarından biri yerleşim birimi içerisindeki eski bir yapının bahçesinde açıkça yüzeylenmektedir (Şekil 12). Bu fay üzerindeki eski bir yapı temeli ve duvarında yaklaşık 1,5 m sağ yanal ötelenme ölçülmüştür (Şekil 13). Bu noktadan yaklaşık 125 m KB'da eski duvarlarda 40 cm ve 1,4 m'lik iki farklı sağ yanal ötelenme hâlâ korunmuş durumdadır (Şekil 14,15). 7 No'lu fay kolu üzerindeki bu yüzey deformasyonları, 50-70 yaşlarında bölge sakinleri ile yapılan görüşmelerde değerlendirilmiş ve zamanla inşaat ve tarımsal faaliyetler nedeniyle ortadan kalktığı bilgisine ulaşılmıştır.

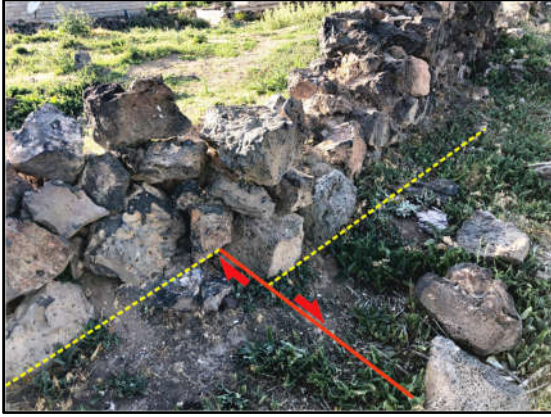


Şekil 12. Çaldıran Yerleşim birimi içerisinde 7 No'lu fay kolu üzerindeki sağ yanal ötelenme (bakış B'ya)



Şekil 13. Çaldıran Yerleşim biriminde 7 No'lu fay kolu üzerinde bir yapı temeli ve bir duvarda 1,5 m sağ yanal atım (bakış B'ya)

8 No'lu fay kolu, 7 No'lu fay kolunun GD devamı niteliğinde olup yaklaşık 460 m boyunca K52B genel doğrultusunda devam eder. Bu fay kolu askeri mîntıkada kaldığından ayrıntılı yüzey araştırması ve hendek kazısı yapılamamıştır.



Şekil 14. 7 No'lu fay kolu üzerinde eski bir duvardaki sağ yanıl ötelenme (bakış K'e)



Şekil 15. 7 No'lu fay kolu üzerinde eski bir duvardaki sağ yanıl ötelenme (bakış G'e)

7 No'lu fay kolu ile 8 No'lu fay kolu arasında herhangi yapısal/geometrik bir farklılaşma yoktur; bunlar birbirinin devamı olup tek bir fay kolu olarak değerlendirilebilir.

9 No'lu fay kolu 8 No'lu fay kolunun GD ucundan yaklaşık 180 m sol yönde sıçrama yaparak başlamaktadır. Yaklaşık 1,2 km uzunlukta ve K79B genel doğrultusundadır. Çaldıran İlçesi içerisinde geçen ana karayoluna paralel ve hemen kuzey kesiminde yüzeyler. Fay, karayoluna teğet olarak yüzeylediği mesafeler boyunca, yeraltı su seviyesinin yüzeyde olduğu bataklık çökelleri içerisinde geçer. 10 No'lu fay kolu da yaklaşık 125 m sol sıçrama yaparak başlar. Yaklaşık 650 m

uzunluğunda ve K58B genel doğrultusundadır. Büyük ölçüde Çaldıran Ovası'nı oluşturan bataklık çökelleri ve yatay yüzey oluşturan Pleistosen bazaltlarından geçer. Bu fay kolu üzerinde son depremin yüzey kırıkları korunmuş durumdadır. 1976 depremini yaşayan yöre sakinleri ile yapılan saha araştırmalarında yüzey kırıklarının geçtiği kesimler net olarak belirlenmiş ve kuzey bloğun yükseldiği uzun çizgisel hatların belirgin şekilde yüzeylediği saptanmıştır (Şekil 16).



Şekil 16. 10 No'lu fay kolu üzerindeki yüzey kırığı ve oluşan fay sarplığı (bakış KB'ya)

11 No'lu fay kolu yaklaşık 110 m sağa sıçrama yapan bir fay kolu olarak başlar ve 490 m dolayında devam eder. K63B genel doğrultusunda; düz bir çizgisel hat halinde yüzeyler. Pleistosen bazaltları içerisine belirgin fay düzlemi ve sarplıkları oluşturmuş durumdadır. Bu fay kolunun devamında benzer doğrultuda ve yapıdaki başka bir fay kolu küçük bir sağa sıçrama ile mostra vermektedir (Şekil 7).

3.4. Hendek (Paleosismolojik Kazı) Çalışmaları

Paleosismolojik kazı çalışmalarında, Kuvaterner deformasyonunun keskin olduğu fay sarplıkları ve 24 Kasım 1976 (M=7,5) depreminin halen korunmuş yüzey kırıklarına odaklanılmıştır. Bu çalışmada proje alanı ve dolayındaki aktif fay ve paleosismolojik kazı çalışmaları ile MTA tarafından [15] çizilen bazı diri fay kollarının konumları ve geometrileri değiştirilmiş, detaylandırılmış veya yeniden çizilmiştir (Şekil 7). Aşağıda bu araştırma kapsamında yapılan paleosismolojik hendek kazısı çalışmalarının ayrıntısı, numaralandırılmış fay

kolları altında verilmiştir. Bu çalışma kapsamında toplam 15 hendek kazısı gerçekleştirilmiş, bunlardan verimli olan altı tanesi değerlendirmeye alınmıştır.

3.4.1. Hendek-1

Hendek-1 kazısı, 2 No'lu fay kolunun orta kesimlerinde oldukça keskin ve yanal devamlılığı olan bir fay sarplığı üzerinde açılmıştır (Şekil 17).



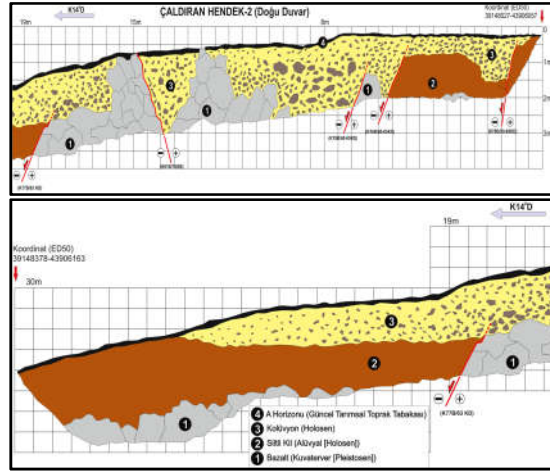
Şekil 17. Hendek 1'in görünümü (bakış G'e)

Hendekte 2 No'lu fay kolunun oluşturduğu fay sarplığını denetleyen beş fay ortaya çıkmıştır. Hendeğin güney ucunda, 1 ve 5. m'lerdeki ilk iki fay alüvyal bir kil (2 No'lu Birim) birimini kesmiş ve kolüvyal bir (3 No'lu) birimin çökmesini sağlamıştır. Devamında 6.5. m'de temeli oluşturan bir bazalt kütlesi faylanarak kolüvyal (3 No'lu) birimle dokanaklı hale gelmiştir. Devamında 15. m'de hemen hemen aynı doğrultuda ancak ters yönde (GB'ya doğru) eğimli bir başka fay 3 No'lu birimle bazalt kütlesini tektonik dokanaklı olarak karşı karşıya getirmiştir. 18. m'de ise başka bir fay bazalt kütlesi ile 2 No'lu birimi faylı olarak dokanak hale getirmiş durumdadır (Şekil 18).

Hendeğin güney kesimindeki ilk 15 m'ye kadar olan dört fay Holosen yaşlı 3 No'lu kolüvyal birimi kesmiş veya oluşumunu denetlemiştir. Buna karşın 19. m'deki fay daha yaşlı bir birim olan 2 No'lu alüvyal birimi kesmiş; 3 No'lu birimi kesmemiştir (Şekil 18 ve 19). Bu durum 2 No'lu fayın bu kesimde yüzey kırığı meydana getirmiş en az iki deprem oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 18. Hendek-1'in görünümü (bakış D'ya)



Şekil 19. Hendek-1'in logu

3.4.2. Hendek-2

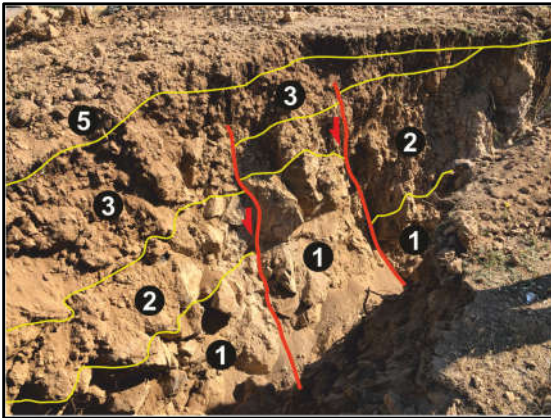
Hendek-2 kazısı 3 No'lu fay kolunun başlangıç kesimlerinde oldukça keskin ve yanal devamlı bir fay sarplığı üzerinde açılmıştır (Şekil 20). Hendeğe tamamen Kuvaterner yaşlı birimler yer almakta olup Pleistosen yaşlı masif bazaltlar temeli oluşturmakta, bunun üzerine fay denetimli iki farklı kolüvyal birim ve bunların üzerine alüvyal bir çökel gelmektedir.

Hendekte 3 No'lu fay kolunun sarplığını denetleyen iki fay ortaya çıkmıştır. Hendeğin güneyinde 6 ve 7. m'lerdeki iki fay Kuvaterner yaşlı bazaltlar ile iki farklı kolüvyal (2 ve 3 No'lu) birimi kesmiştir.



Şekil 20. Hendek-2'nin görünümü (bakış G'e)

7. m'deki fay öncelikle bazalt üzerinde bir kırık oluşturmuş; ardından bir kolüvyal birim (2 No'lu birim) gelişmiş devamında meydana gelen başka bir yüzey kırığı ile 2 No'lu birim de atıma uğramış ve üstte başka bir kolüvyal (3 No'lu) birim oluşmuştur. Ardından son bir yüzey kırığı daha oluşmuş ve her iki fay da birlikte hareket ederek en genç kolüvyal birim (3 No'lu Birim) de dâhil olmak üzere tüm birimleri kesmiştir (Şekil 21 ve 22). Hendekte saptanan iki aktif fayın oluşturduğu son hareket değerlendirildiğinde yaklaşık 25-30 cm'lik bir düşey atımın meydana geldiği söylenebilir.

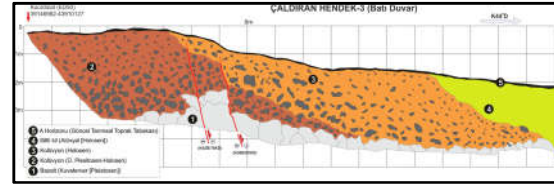


Şekil 21. Hendek-2'de fay sarplığına karşılık gelen kesimin görünümü (bakış D'ya)

Hendekte ortaya çıkan, fay sarplığını oluşturan iki fay; bu faylar denetiminde oluşan iki kolüvyal birim ve son oluşan kolüvyal birimin de faylar

tarafından kesilmesi, 3 No'lu Fay kolunun burada en az üç (3) adet yüzey kırığı meydana getirmiş ($M \geq 7$) deprem oluşturduğunu göstermektedir.

Hendeğin kuzey devamında, topografyanın düzleştiği kesimde akarsu çökeli niteliğinde alüvyal bir birim gelişmiş durumdadır (Şekil 22).



Şekil 22. Hendek-2'nin logu

3.4.3. Hendek-3

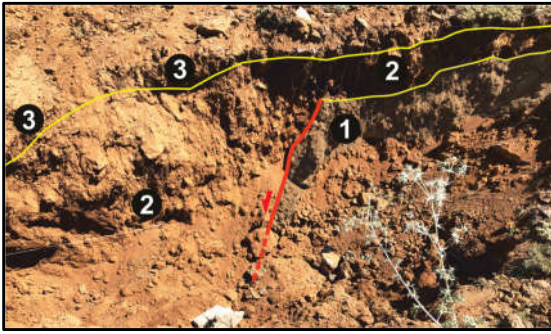
Hendek-3 kazısı 5 No'lu fay kolunun GD uç kesimlerinde oldukça keskin bir fay sarplığı üzerinde açılmıştır (Şekil 23).



Şekil 23. Hendek 3'ün açıldığı fay sarplığı ve hendeğin görünümü (bakış G'ye)

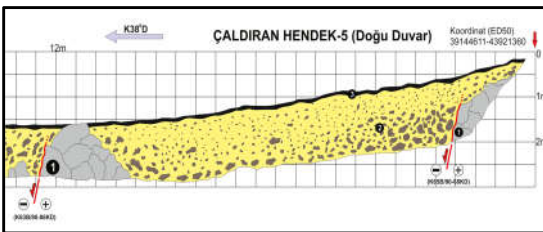
Hendekte 5 No'lu fay kolunun oluşturduğu fay sarplığını denetleyen bir ana fay ortaya çıkmıştır. Sarplık, bu kesimde tek bir fay kolu ile şekillendirilmiştir. Bu fay Kuvaterner bazaltlarından türeme tutturulmamış, çimentosuz ve keskin köşeli çok değişik boyutlarda çakıl ve bloklar içeren bir kolüvyon oluşturmuştur. Hendeğin 12. m'sinde başka bir bazalt kütesinin

kuzey kenarında ikinci bir fay yer almaktadır. Bu bazalt kütleli yüzeye kadar ulaşmaktadır (Şekil 24 ve 25). Bu fay, büyük olasılıkla kolüvyal birimi kesmiştir. Hendeğin güney ucundaki fay buradaki sarplığı oluşturduktan sonra, Holosen yaşlı kolüvyal çökeli hendeğin orta kesimindeki ikinci fay ile birlikte yeniden kesmiş olmalıdır.



Şekil 24. Hendeğin-3'te, güneydeki ana fay (doğu duvar)

Keskin bir fay sarplığı üzerinde kazılan Hendeğin-3'de, sarplığı oluşturan fay Pleistosen birimlerinde belirgin bir fay düzlemi oluşturmuş ve sarplığa bağlı olarak Holosen yaşlı bir kolüvyon oluşmuştur. Devamında hendeğin orta kesiminde başka bir fay bu kolüvyal birimle Kuvaterner yaşlı bazaltlar arasında tektonik bir dokanak oluşturmuştur. Bu veriler Hendeğin-3'de ortaya çıkan 5 No'lu Fay kolu üzerinde, bu kesimde en az iki (2) yüzey kırığı meydana getirmiş ($M \geq 7$) deprem oluştuğunu göstermektedir.

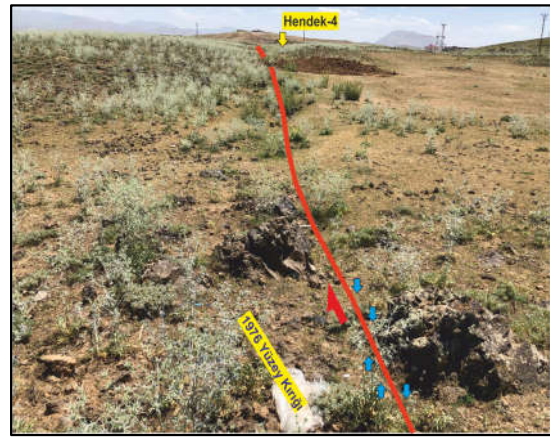


Şekil 25. Hendeğin-3'ün logu

3.4.4. Hendeğin-4

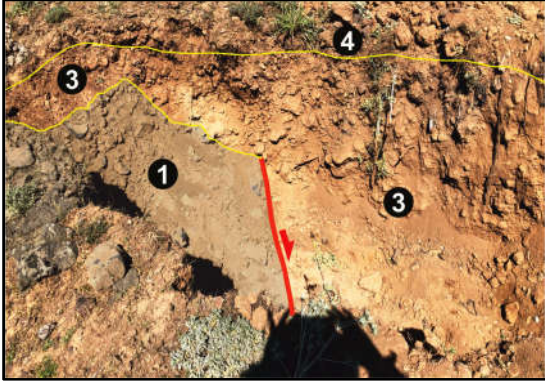
Hendeğin-4, 4 No'lu fay kolu üzerindeki 1976 yüzey kırığı üzerinde, kazılmıştır (Şekil 7 ve 26). Yüzey kırığının KB'ya doğru devamında oldukça belirgin bir fay sarplığı oluşmuş ve bu sarplığın güneyinde

küçük ölçekli bir fay gölü (sag pond) oluşmuştur. Yöre sakinleri ile yapılan görüşmelerde 1976 kırığının, bu sarplıktan çizgisel olarak geçtiği öğrenilmiş, yapılan saha çalışmalarında yüzey kırığının büyük ölçüde korunmuş olduğu saptanmıştır (Şekil 7 ve 26). Ayrıca Hendeğin-4'ün 50 m KB'sında, 1976 yüzey kırığı üzerinde 60-70 cm sağ yanal ötelenme ölçülmüştür.

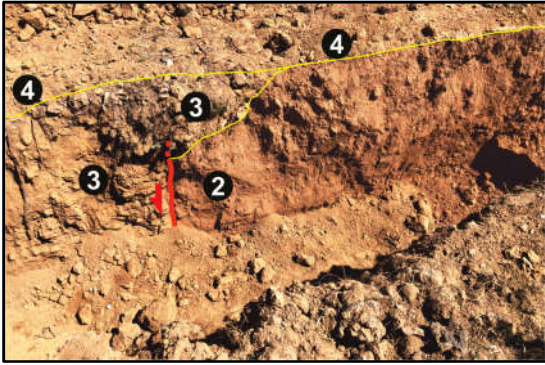


Şekil 26. 4 No'lu fayın yüzeydeki kırık izi, Hendeğin-4 (bakış D'ya) [Mavi oklar: yüzey kırığı üzerinde 60-70 cm sağ yanal ötelenme]

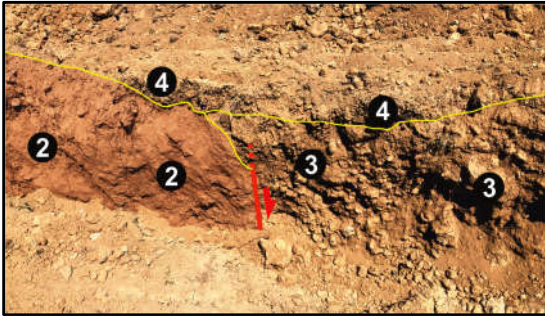
Hendeğin-4'de, 4 No'lu fay kolunun oluşturduğu fay sarplığını meydana getiren ve 1976 yılı yüzey kırığına karşılık gelen fay, hendeğin kuzey ucunda ortaya çıkmıştır (Şekil 27). Bu fay Pleistosen yaşlı bazaltlarda keskin ve düzgün bir düzlem oluşturmuş olup yaklaşık 70° GB'ya eğilimlidir. Sarplığın güneyinde, bu fay kontrolünde gelişmiş ve bu fay tarafından denetlenen tipik bir kolüvyal birim oluşmuştur. Hendeğin güney kesiminde 8-13. m'ler arasında alüvyal bir çakıllı-siltli kil birimi bulunmaktadır. Bu birim Pleistosen yaşlı bazaltlardan genç; Holosen yaşlı kolüvyal birimden daha yaşlı bir birim olup büyük olasılıkla Ü. Pleistosen-Holosen yaş aralığındadır. Birim, her iki sınırında faylı olarak kolüvyal birimle dokanak halindedir (Şekil 28-30). Bu alüvyal birimin her iki sınırını denetleyen faylar Holosen dönemi ürünü olsalar da yüzeyde bir sarplık izi bulunmaması hendeğin kuzey ucundaki sarplığı oluşturan fayın son hareketinden görece eski olduğunu ifade etmektedir (Şekil 30).



Şekil 27. Hendek-4'ün kuzey ucunda, 1976 yüzey kırığına karşılık gelen fay (Doğu duvar)



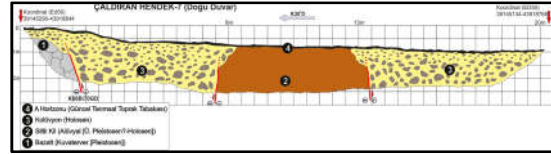
Şekil 28. Hendek-4'ün orta kesiminde yer alan 2. fay (Doğu duvar)



Şekil 29. Hendek-4'ün orta kesiminde yer alan 3. fay (Doğu duvar)

4 No'lu fay denetiminde belirgin bir fay sarplığı üzerinde kazılan Hendek-4'de, 1976 depreminde yüzey kırığı oluşturmuş olan fay, hendeğin kuzey kesiminde yüzeylenmektedir. Pleistosen bazaltlarını keserek Holosen yaşlı bir kolüvyal birim

oluşturması bu fayın yüzey deformasyonunu açıkça ortaya koyar. Orta kesimlerde, Holosen yaşlı kolüvyondan görece yaşlı (Ü. Pleisosen?-Holosen) bir alüvyal birimin Holosen yaşlı kolüvyal birimle iki sınırında da faylı dokanak ilişkisi göstermesi ve bu fayların yüzeyde bir sarplık oluşturmaması (Şekil 30), bu faylanmanın son hareketten önceki bir dönemde meydana gelen başka bir olay olduğunu göstermektedir. Bu veriler 4 No'lu fay kolu üzerinde, bu kesimde en az iki (2) yüzey kırığı meydana getirmiş ($M \geq 7$) deprem olduğunu göstermektedir.



Şekil 30. Hendek-4'ün logu

3.4.5. Hendek-5

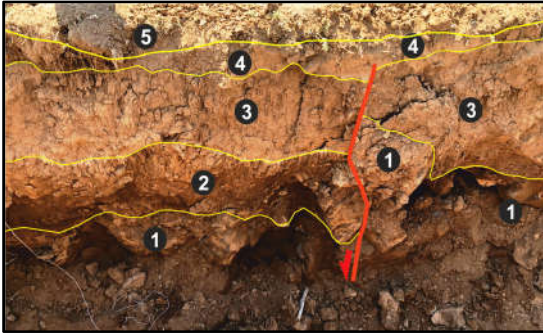
Hendek-5 kazısı 6 No'lu fay kolunun GD uç kesimlerinde, 1976 depremi yüzey kırıklarından biri üzerinde yapılmıştır. Yapılan araştırmalarda, oluşan yüzey kırığının oldukça derin 1-2 m genişliğinde, yanal devamlılığı olan bir yüzey deformasyonu ile yıllarca korunduğu; yüzeydeki çatlakların derin çukurlar halinde açık kaldığı öğrenilmiştir. Saha çalışmalarında da bu yüzey kırıklarının güncel topografyada hâlâ belirgin oldukları ve 6 No'lu fay kolunun oluşturduğu çizgisellik üzerinde buldukları saptanmıştır (Şekil 10, 31 ve 32).

Hendekte aşağıdan yukarıya, doğru temeli oluşturan Pleistosen masif bazaltları, fay denetimli kolüvyal bir birim, alüvyal ince çakıllı-konsolide bir kil ve üstte buradaki fay gölünde gelişmiş bataklık çökelleri, faylara bağlı olarak gelişen geniş çatlaklarda kil dolgu ve yüzeyde tarımsal toprak tabakası (A-Horizonu) bulunmaktadır.

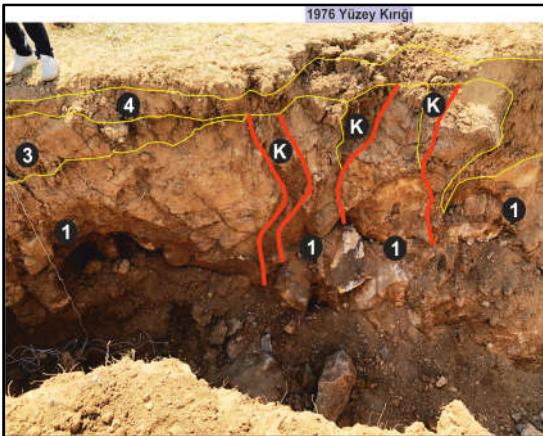
Hendeğin GD ucunda; 12. m'de büyük bir fay Pleistosen yaşlı bazalt kütlelerinde, güney bloku düşüren bir atım oluşturmuştur (Şekil 33 ve 36). Bu faylanmaya bağlı olarak, tutturulmuş ve hafifçe çimentolanmış bir alüvyal kama (2 No'lu birim) oluşmuştur. Devamında ince, yuvarlaklaşmış

seyrek çakıllar içeren alüvyal bir siltli kil birimi (3 No'lu birim) çökelmiştir. Bu alüvyal birimin çökeliğinden sonra bu fay yeniden hareket etmiş ve o döneme kadar oluşmuş olan tüm birimleri kesmiştir. Sonra bunların üzerine bir bataklık çökeli (4 No'lu birim) gelmiş ve tüm bu birimleri örtmüştür. Son olarak bu fay yeniden bir atım oluşturmuş ve bataklık çökelleri de dâhil tüm birimleri kesmiştir. Hendeğin bu kesimindeki bu fay üzerinde yüzey kırığı oluşturmuş en az üç (3) deprem verisi bulunmaktadır.

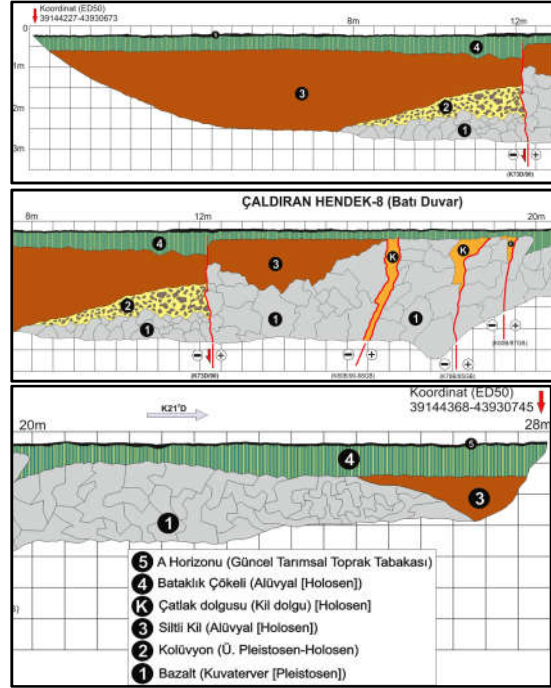
Hendeğin KD'ya doğru 16 ve 20. m'leri arasında Pleistosen bazalt kütleleri arasında gelişmiş yaklaşık düşey duruşlu üç fay yer alır. Bu faylar bazalt kütlelerinde 10-15 cm'ye ulaşan genişlikte çatlaklar oluşmasını sağlamış ve bu çatlaklar kil ile doldurulmuştur (Şekil 32 ve 33).



Şekil 31. Hendek-5'in GD kesiminde yer alan fay ve oluşturduğu yapı



Şekil 32. Hendek-5'in orta kesiminde 1976 kırığına karşılık gelen yer alan faylar



Şekil 33. Hendek-5'nin logu

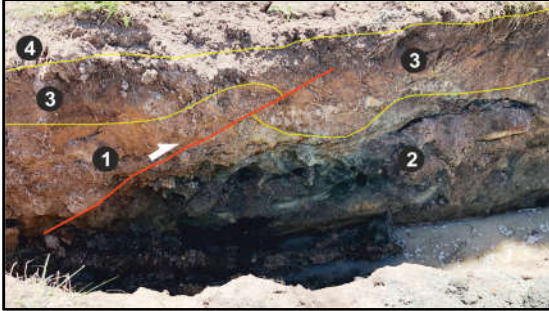
3.4.6. Hendek-6

Hendek-6, 10 No'lu fay kolu üzerindedir. Ana fayın son depremde oluşturulduğu sarplığın belirgin olduğu bir noktada (Şekil 16) yapılan kazıda 1,5-2 m'den sonra su çıkışı başlamıştır. Ancak çok şiddetli olmayan su gelişi hendek çalışması yapmaya belirli ölçüde izin vermiştir.

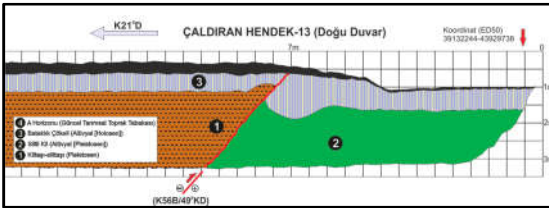
Hendekte tamamen Çaldıran ovasını oluşturan birimler yer almaktadır. Kahverengi kilttaş-silttaşından oluşan gösel bir birim, yeşilimsi renkli alüvyal bir siltli kil, bataklık çökeli ve güncel nebatî toprak tabakası birimleri bulunmaktadır.

Hendeğin GB ucunda, 7. m'de KD'ya eğimli ters bileşenli bir fay mevcuttur. Bu fay tam olarak 10 No'lu fay koluna karşılık gelmektedir (Şekil 16, 34 ve 35). Ortaya çıkan ters bileşenli fay gösel ince kilttaş-silttaş tabaklarından oluşan (1 No'lu) birimin alüvyal yeşilimsi siltli-kilttaş üzerine bindirmesini sağlamıştır. Fay bu birimler üzerinde halen oluşan güncel bataklık çökeli (3 No'lu birim)'ni de kesmiş ve topografyada belirgin ve yanal yönde devamlı bir fay sarplığı oluşturmuştur.

Hendekte ortaya çıkan fay 10 No'lu fay kolu olup 1976 depreminin yüzey kırığının yüzeye kadar ulaştığının açık bir verisidir. Bu fay 30-40 cm dolayında düşey atım oluşturmuştur. Hendekteki mevcut yapı yüzey kırığı oluşturan en az 1 (bir) sismik olayı işaret etmektedir.



Şekil 34. Hendek-6'da, ana fay (doğu duvar)



Şekil 35. Hendek-6'nın logu

3.5. Kayma Hızı ve Tekrarlanma Aralığı

Daha önce yapılan çalışmalarda Çaldıran Fayı'nın yanal kayma hızı için 8,7 [7], 8,1 [3], 6,5-7,3 [8] ve 3,27 mm/yıl [4] değerleri bulunmuştur. Tekrarlanma aralığı içinse Selçuk ve arkadaşları [4] tarafından aynı çalışma içerisinde 320 ve 790 yıllık oldukça farklı değerler bulunmuştur.

Çaldıran Fayı üzerinde tarihsel dönemde yüzey kırığı oluşturmuş son deprem ($M=7,1$) 1696'da [18]; aletsel dönemde ise 1976 yılında ($M=7,5$)'dır. Bu iki deprem arasında geçen süre 280 yıldır. Bu çalışmada, son depremde oluşmuş en büyük sağ yanal ötelenme Çaldıran yerleşim birimi içerisinde 1,5 m ölçülmüştür. Buradan yola çıkarak Çaldıran Fayı için, Çaldıran yerleşim birimi dolayında yanal kayma hızının ortalama 5,36 mm/yıl olduğu söylenebilir. Son depremde oluşan en büyük düşey atım ise yaklaşık 40 cm olarak ölçülmüştür. Buradan yola çıkılarak düşey

kayma hızı yaklaşık 1,43 mm/yıl olarak hesaplanmıştır.

Çaldıran Fayı üzerinde kayıt altına alınmış yüzey kırığı oluşturmuş son iki deprem ($M=7,1$) 1696 [18,20] ve ($M=7,5$) 1976 yılındadır. 14 Nisan 1696'da oluşan $M=7,1$ depremde Çaldıran bölgesindeki köyler tamamen yıkılmış, Maku (İran) ve Van arasında önemli hasar ve uzun süre artçı şoklar olmuştur. Mayıs 1696'da bir artçı deprem de önemli hasar oluşturmuştur [18]. Bu net bilgiler fayın ortalama 280 yıllık bir tekrarlanma aralığı sunduğunu göstermektedir.

Çaldıran Fayı'nın bir parçası olduğu, Kuzey Tebriz Fay Zonu [2] üzerinde 1304, 1721, 1780 ve 1843'deki tarihsel depremler bu yapı için sismisitenin devamlı oluşunu gösterir. Çaldıran Fayı ve yapısal ilişkide olduğu aktif faylar üzerinde yaklaşık 50-60 yılda bir, kayda değer ($M=5-6$) deprem meydana gelmektedir.

4. SONUÇLAR

Çaldıran yerleşim birimi dolayında yapılan saha ve paleosismolojik kazı çalışmalarında Holosen ve Pleistosen birimlerinde Çaldıran Fayı'nın belirgin deformasyon oluşturduğu saptanmıştır. Paleosismolojik kazılarda 1976 ($M=7,5$) ve yüzey kırığı meydana getirmiş ($M \geq 7$) daha eski depremlerin verilerine ulaşılmıştır. Bu bağlamda Çaldıran Fayı'nın Holosen döneminde en az üç (3) kez yüzey kırığı oluşturmuş "büyük" ($M \geq 7$) deprem ürettiği belirlenmiştir.

Çaldıran Fayı üzerinde 1976 yılında meydana gelen ($M=7,5$) deprem ve paleosismolojik veriler bu fayın büyük deprem üretme potansiyeli taşıdığını açıkça göstermektedir.

Hendeklerde, son depremde 30-40 cm'ye ulaşan düşey atım olduğu saptanmış; yüzeyde son deprem ürünü 0,4-1,5 m aralığında sağ yanal deformasyonunlar ölçülmüştür.

Tarihsel ve aletsel deprem verilerine göre, Çaldıran Fayı'nın $M \geq 7$ depremler için ortalama 280 yıllık bir tekrarlanma aralığına sahiptir. Çaldıran Fayı, yapısal ilişkili olduğu faylar ile

birlikte değerlendirildiğinde bölgede 50-60 yılda bir $M=5-6$ depremin olduğu ortaya çıkmaktadır.

Son depremde oluşan en büyük 1,5 m'lik sağ yanal ötelenme baz alındığında Çaldıran Fayı için, çalışma alanında yanal kayma hızı ortalama 5,36 mm/yıl olarak ortaya çıkmaktadır. Son deprem için ölçülen en büyük düşey yer değiştirme ise yaklaşık 40 cm olarak baz alındığında ortaya çıkan düşey kayma hızı yaklaşık 1,43 mm/yıl'dır.

5. KAYNAKLAR

1. Tapponnier, P., 1977. Evolution Tectonique du Systeme Alpin en Medit. Poinçonnet et Ecrasement Rigide-plastique, B. Soc. Geol. Fr. 19, 437-460.
2. Koçyiğit, A., Yılmaz, A., Adamia, S., Kuloshvili, S., 2001. Neotect. of E. Anatolian Plateau (Turkey) and Lesser Caucasus: impl. for Transition from Thrusting to Strike-slip Faulting, Geod. Acta, 14(1-3), 177-195.
3. Djamour, Y., Vernant, P., Nankali, H.R., Tavakoli, F., 2011. NW Iran-E. Turkey Present-day Kinematics: Results from the Iranian Permanent GPS Network. Earth Planet. Sci. Lett. 307, 27-34.
4. Selçuk, A.S., Erturaç, M.K., Nomade, S., 2016. Geology of the Çaldıran Fault, Eastern Turkey: Age, Slip Rate and Implications on the Characteristic Slip Behaviour. Tectonophysics. 680, 155-173.
5. Arpat, E., Şaroğlu, F., İz, H.B., 1977. Çaldıran Depremi. Yeryuvarı ve İnsan 2, 29-41.
6. Toksöz, M.N., Arpat, E., Şaroğlu, F., 1977. East Anatolian Earthquake of 24 November 1976. Nature 270, 423-425.
7. Karimzadeh, S., Çakır, Z., Osmanoglu, B., Schmalzle, G., Miyajima, M., Amiraslanzadeh, R., Djamour, Y., 2013. Interseismic Strain Accumulation Across the North Tabriz Fault (NW Iran) Deduced from InSAR Time Series. J. Geodyn. 66, 53-58.
8. Rizza, M., Vernant, P., Ritz, J.F., Peyret, M., Nankali, H., Nazari, H., Djamour, Y., Salamati, R., Tavakoli, F., Chery, J., Mahan, S.A., Masson, F., 2013. Morphotectonic and Geodetic Evidence for a Constant Slip-rate Over the Last 45 kyr Along the Tabriz Fault (Iran). Geophys. J. Int. 193, 1083-1094.
9. Innocenti, F., Mazzuoli, R., Pasquare, G., Radicati di Brozolo, F., Villari, L., 1976. Evolution of Volcanism in the Area of Interaction Between the Arabian, Anatolian and Iranian Plates (Lake Van, Eastern Turkey). J. Volcanol. Geotherm. Res. 1, 103-112.
10. Lebedev, V., Sharkov, E., Keskin, M., Oyan, V., 2010. Geochr. of L. Cenozoic Volcanism in the Area of Van L., Turkey: An Example of Dev. Dynamics for Magmatic Processes, Doklady Earth Sciences, 1031-1037.
11. Ercan, T., Fujitani, T., Matsuda, J.-I., Notsu, K., Tokel, S., Ui, T., 1990. D. ve GD Anadolu Neojen-Kuvaterner Volkanitlerine İlişkin Yeni Jeokimyasal, Radyometrik ve İzotopik Verilerin Yorumu. MTA Derg. 110, 143-164.
12. Pearce, J.A., Bender, J.F., De Long, S.E., Kidd, W.S.F., Low, P.J., Güner, Y., Şaroğlu, F., Yılmaz, Y., Moorbath, S., Mitchell, J.G., 1990. Genesis of Collision Volcanism in E. Anatolia, Turkey. J. Volc. Geotherm. Res. 44, 189-229.
13. Kuzucuoğlu, C., Christol, A., Mouralis, D., Doğu, A.F., Akköprü, E., Fort, M., Brunstein, D., Zorer, H., Fontugne, M., Karabiyikoğlu, M., Scaillet, S., Reyss, J.L., Guillou, H., 2010. Form. of the Upper Pleistocene Terraces of Lake Van (Turkey). J. Quat. Sci. 25, 1124-1137.
14. MTA Gen. Müd., 2002. 1:100.000 Ölçekli, Başkale K51 ve Doğubayazıt J52-52 Paftası Jeoloji Haritası, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara)
15. Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., Şaroğlu, F., 2013. Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası. Ölçek 1:1.250.000, MTA Gen. Müd., Özel Yay. Serisi-30, Ankara.
16. Ergin, K., Güçlü, U., Uz, Z., 1967. Türkiye ve Civarının Deprem Kataloğu (MS. 11-1964). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Arz Fiziği Enstitüsü Yayınları, No 28.
17. Soysal, H., Sipahioğlu, S., Kolçak, D., Altınok, Y., 1981. Türkiye ve Çevresinin Tarihsel Deprem Kataloğu (2100 B.C.-1900 A.D.). TÜBİTAK, TBAG-341.

18. Ambraseys, N.N., Finkel, C.F., 1995. The Seismicity of Turkey and Adjacent Areas: A Historical Review, 1500–1800. İstanbul.
19. Tan, O., Tapırdamaz, M.C., Yörük, A., 2008. The Earthquake Catalogues for Turkey. *Turk. J. Earth Sci.* 17, 405–418.
20. Ambraseys, N.N., 2009. Earthquakes in the Medit. and M. East. Camb. Uni. Press, N. York.
21. Berberian, M., 2014. Earthquakes and Coseismic Surface Faulting on the Iranian Plateau; A Historical, Soc. and Physical Approach. 1. ed. Elsevier, Dev. in Earth Surface Processes 17 978-0-444-63292-0, 638.
22. Philip, H., Avagyan, A., Karakhanian, A., Ritz, J.F., Rebai, S., 2001. Estimating Slip Rates and Recurrence Intervals for Strong Earthquakes Along an Intracontinental Fault: Example of the Pambak–Sevan–Sunik Fault (Armenia). *Tectonophysics* 343, 205–232.
23. Karakhanian, A.S., Trifonov, V.G., Philip, H., Avagyan, A., Hessami, K., Jamali, F., Bayraktutan, M.S., Bagdassarian, H., Arakelian, S., Davtian, V., Adilkhanyan, A., 2004. Active Faulting and Natural Hazards in Armenia, Eastern Turkey and Northwestern Iran. *Tectonophysics* 380, 189–219.
24. Hessami, K., Pantosti, D., Tabassi, H., Shabaniyan, E., Abbassi, M.R., Feghhi, K., Solaymani, S., 2003. Paleoearthquakes and Slip Rates of the North Tabriz Fault, NW Iran: Preliminary Results. *Ann. Geop.* 46, 903–916.
25. McKenzie, D., 1972. Active Tectonics of the Mediterranean Region. *Geophys. J. Roy. Astr. S.* 30, 109–185.
26. Toksöz, M.N., Nábělek, J., Arpat, E., 1978. Source Properties of the 1976 Earthquake in E. Turkey: A Comp. of Field Data and Teleseismic Results. *Tectonophysics* 49, 199-205.
27. Tan, O., Taymaz, T., 2006. Active Tectonics of the Caucasus: Earthquake Source Mechanisms and Rupture Histories Obtained from Inversion of Teleseismic Body Waveforms. *Geol. Soc. Spec. Pap.* 409, 531–578.
28. Tan, O., Tapırdamaz, M.C., Yörük, A., 2008. The Earthquake Catalogues for Turkey. *Turk. J. Earth Sci.* 17, 405–418.
29. Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., 2006. GPS Constraints on Continental Deformation in the Africa–Arabia–Eurasia Continental Collision Zone and Implications for the Dynamics of Plate Interactions. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 1978–2012, 111.
30. Karakhanyan, A., Vernant, P., Doerflinger, E., Avagyan, A., Philip, H., Arslanyan, R., Champollion, C., Arakelyan, S., Collard, P., Baghdasaryan, H., Peyret, M., Davtyan, V., Calais, E., Masson, F., 2013. GPS Constraints on Cont. Def. in the Armenian Region and Lesser Caucasus. *Tectonophysics* 592, 39–45.
31. Gülkan, P., Gürpınar, A., Çelebi, M., Arpat, E., Gençoğlu, S., 1978. Engineering Report on the Muradiye–Çaldıran, Turkey, Earthquake of 24 November 1976. National Academies.
32. Tuncel, M., Erer, S., Sergün, Ü., Göçmen, K., 1978. Report of Çaldıran-Muradiye Earthquake 2468. University of İstanbul.
33. www.deprem.gov.tr, 2020.

Dalga Yüğü Altında İskele Tipi Yapılarda Kullanılan Çakma Çelik Kazık Sistemlerin Davranışı

Münire FINDIK^{*1}, İ. Devran ÇELİK¹, S. Nilay KESKİN¹, Yusuf ÖZTÜRK^{1,2}

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Senirkent Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, Isparta

Geliş tarihi: 14.10.2019

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Jeopolitik değer açısından üç tarafı denizlerle çevrili olan ülkemizde liman, iskele ve rıhtım yapıları ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Ülkemiz jeolojik ve jeofizik açıdan aktif fayların bulunduğu deprem kuşağında yer almaktadır. Özellikle sismik bölgelerdeki kıyı ve liman yapılarında depreme dayanıklı tasarım ve dizayn aşamalarında Demiryolları, Limanlar ve Hava Meydanları (DLH) Genel Müdürlüğü 2008 yılında, “Kıyı ve Liman Yapıları, Demiryolları ve Hava Meydanı İnşaatlarına İlişkin Deprem Teknik Yönetmeliği” kapsamında verilen teoriler ve formüller kullanılmaktadır. Bu çalışmada, kum zemine oturan kazıklı iskele yapısı üzerine çalışılmıştır. Farklı kazık çaplarında ve DLH 2008’de tavsiye edilen 4D-8D aralıklarla yerleştirilerek çeşitli modeller oluşturulmuştur. Modellemeler, Sap2000 bilgisayar programı ile yapılmıştır. Kazıklı iskele yapısı için tüm kazık ve üst yapı elemanları ile ilgili detaylı bilgilere yer verilmiştir. Çalışılan modeller için, Zemin durumuna ve değişen dalga periyotlarına göre ideal kazık çapı ve aralığına dair sonuçlar grafiklerle sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: İskele yapıları, Kazıklı temeller, Dinamik analiz

Behavior of Pile Steel Pile Systems used in Pier Structures Under Wave Load

Abstract

In our country that is surrounded by seas on three sides, harbor, pier and dock structures has gained importance in terms of geopolitical value. Our country is located in the earth quake zone where geologically and geophysically active tectonic faults reside. Especially in seismic zones, earthquake-resistant design and application are important for coast and land port structures. The theories and formulas given within the scope of DLH 2008 seismic technical regulations of Coastal and Harbor Structures, Railways and Airport Constructions, are used in the design and design stages. In this study, piled pier structure on sand ground has been studied. Various models with different pile diameter sizes have been created. Different layouts are formed with 4D-8D intervals as recommended in DLH 2008. Sap2000 v.20 computer program is used for modeling. Detailed information regarding the piled scaffolding structure is given. The results of the ideal pile diameter and spacing according to soil conditions and changing wave periods are presented in the graphs.

Keywords: Pier structures, Pile foundations, Dynamic analysis

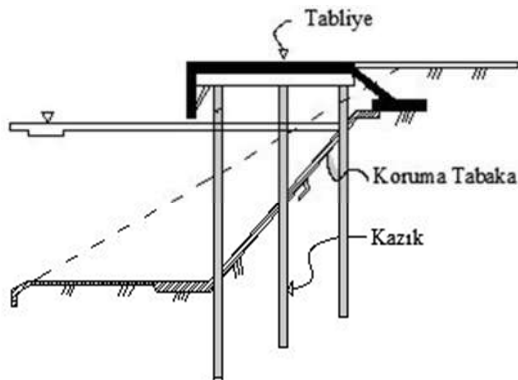
*Sorumlu yazar (Corresponding author) : Münire FINDIK, mnr.dikmen@gmail.com

1. GİRİŞ

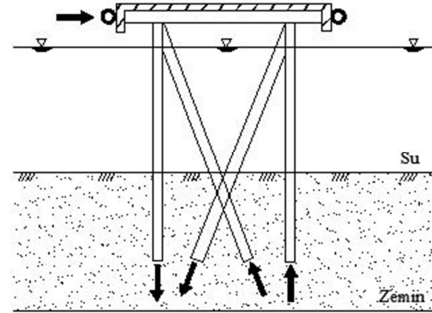
Teknolojinin son 50 yılında yaşanan gelişmeler neticesinde, ülkeler arasındaki ithalat ve ihracat oranları önemli ölçüde artmıştır. İthalat ve ihracat faaliyetlerinin artışı, farklı taşımacılık sistemlerinin gelişmesine sebep olmuştur. Ekonomik olarak uygun olması ve taşıma kapasitesinin fazla olmasından dolayı deniz taşımacılığı, dünya ticaretinde en çok tercih edilen ve ülkelerin ekonomik gelişmelerinde etkin rol oynayan lojistik sistemdir. Bir yarımada ülkesi olarak bu gelişmeler bizimde modern liman ve tersane tesislerine olan ihtiyacımızı artırmıştır.

Limanlar; gemilere dalga, akıntı, fırtına ve buz gibi çevresel etkenlere karşı koruma sağlayan, kıyı yanaşma yapılarına gemilerin ve diğer deniz taşıma araçlarının yanaşıp bağlanabileceği veya demirleyebileceği olanakları sunan, tekne ile kıyı arasında gerekli yük, insan nakli ve muhafazası için tesisler barındıran, sınırlandırılmış kara ve deniz alanları olarak tanımlanırlar [1].

Kıyı yanaşma yapılarının başlıcaları: iskele, rıhtım ve dolfenlerdir. İskeleler, kıyı çizgisine dik veya belirli bir açı ile bulunan, bir ucu kıyı ile bağlantılı yapılardır. Rıhtımlar, iskelelerin aksine kıyıya paralel olarak yapılan ve istinat yapısı görevi de gören kıyıya bitişik yapılardır. Dolfenler ise, gemi yanaşması veya bağlanması için yapılan tekil yapılardır. Şekil 1'de kıyı yanaşma yapılarının zemin ile olan etkileşimleri ifade edilmeye çalışılmıştır.



a) Açık tip rıhtım yanaşma yapısı



b) Açık tip iskele yanaşma yapısı

Şekil 1. Kıyı yanaşma yapıları [2]

Kıyı yanaşma yapılarına etkiyen rüzgâr, dalga ve deprem kuvvetleri tasarımlarda dinamik olarak değerlendirilir iken, gemi ve bağlama yükleri statik olarak dikkate alınabilmektedir. Bu kapsamda; kıyı yanaşma yapıları, üstyapıda meydana gelen düşey yükleri, dalga hareketinden dolayı ortaya çıkan dalga kuvvetlerini ve deniz araçlarının yanaşması sırasında ortaya çıkan yanaşma yüklerini güvenle zemine aktarabilecek şekilde kazıklı temeller üzerine oturtulurlar.

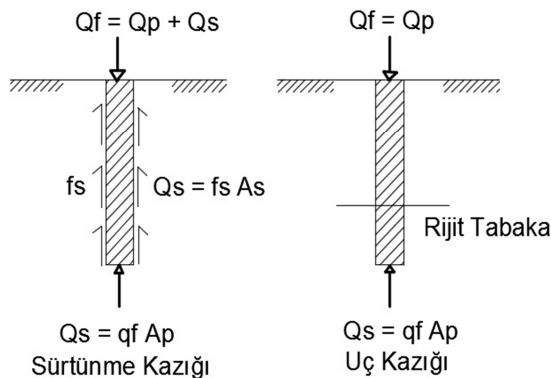
Zeminlerin taşıma gücü ve oturma yeterliliğinin artırılması açısından derin temeller önemli yapı elemanlardır [3]. Derin temeller, statik ve dinamik koşullar altında yanal yüklenmeye maruz kalabilmektedirler. Özellikle liman ve kazıklı kıyı yanaşma yapılarında gemi çarpması, dayanma yapılarının temelleri, kule temelleri, rüzgâr ve dalga yükleri kazıkların yanal yüklenmesine birer örnektir. Ayrıca deprem gibi titreşim hareketlerinden ortaya çıkabilecek hasarların azaltılması ve önlenmesi açısından kazıklı temeller yapıya önemli katkılar sağlamaktadır [3].

Yanal yüklerin etkisindeki kazıklarda yatay deplasmanlar meydana gelmektedir. Bu deplasmanlar sonucunda zeminde gerilmeler oluşmaktadır. Etki-tepki prensibine göre oluşan deplasman gerilme dağılımının belirlenmesinde p-y (kuvvet-deplasman) eğrileri kullanılır. Bu eğriler oluşturulurken zeminin elastik sınırlar içerisinde kaldığı kabul edilir ve p-y eğrileriyle zemin, elastik yaylara dönüştürülür [4]. Bu tür kazıklarda tasarım ölçütü, nihai taşıma gücüne ilave olarak kazıkların maksimum deplasmanıdır.

Nihai taşıma gücü ve yer değiştirmelerin yanı sıra kazıkta eğilme ile göçme meydana gelme olasılığına karşı güvenlik gözetilmelidir. Bu şartlar altında kazıklardan beklenen ise, izin verilen yer değiştirme sınırları içinde kalarak yapının ömrü boyunca herhangi bir hasar veya göçme riski oluşturmamasıdır.

Kazıklar; yükleri iletme şekillerine göre sürtünme ve uç kazığı, imal edildikleri malzemeye göre; ahşap, betonarme, çelik, imalat şekline göre; çakma kazıklar, yerinde dökülen kazıklar olarak sınıflandırılırlar [5]. Kazık temeller, bir deprem sırasında temel hareketlerini azaltmanın en etkin yöntemlerinden biridir. Düşey servis yüklerinin tamamını ya da önemli bir kısmının kazığın etrafındaki çevre sürtünmesi ile taşınması durumunda sürtünme kazıkları, kazık uç direnci yolu ile taşınması durumunda uç kazıklar olarak çeşitlendirilmişlerdir.

Kazıklar genellikle grup şeklinde imal edilirler ve tek kazığın davranışından daha farklı bir yük deformasyon davranışı gösterirler. Grup kazık davranışına zemin ve kazık özelliklerinin yanında grubu oluşturan kazık sayısı, kazıkların yerleştirme biçimleri, kazıklar arası uzaklıklar ve kazık başlığının rijitliği ve zemin yüzeyi ile olan ilişkisi etkili olmaktadır. Şekil 2’de kazık çalışma prensibi gösterilerek, kazık çevresinde oluşan sürtünmeye bağlı kuvvetler ile uç kuvvetin birlikteliği formüle edilmiştir. Çalışmalarda kullanılan kazık tipine bağlı olarak dayanım katsayıları değişkenlik göstermektedir.



Şekil 2. Kazık çalışma prensibi [6]

Q_f : Tek kazığın nihai taşıma gücü,
 Q_p : Kazığın uç taşıma kapasitesi,
 Q_s : Kazığın sürtünme direnci,
 q_f : Kazık ucundaki zeminin birim nihai taşıma kapasitesi,
 f_s : Birim sürtünme direnci,
 A_p : Kazık ucundaki enkesit alanı,
 A_s : Kazık sürtünme alanı olarak ele alınır.

Son yıllarda gerçekleşen deprem ve tsunami felaketleri, dünya çapında kıyı ve liman yapılarının tasarımı konusunun önem kazanmasına sebep olmuştur. Ülkemizde ise, 2008 yılında yürürlüğe giren Kıyı ve Liman Yapıları, Demiryolları, Hava Meydanları İnşaatlarına ilişkin Deprem Teknik Yönetmeliği (DLH 2008) kıyı ve liman yapılarının tasarım aşaması için önemli bir kılavuz olmuştur [7]. Yüksel ve Çevik [1] yayınladıkları kitaplarında liman yapılarının tasarımı ile ilgili geniş çaplı bilgiler sunmuşlardır. Yüksel ve Orhan [8], liman yapılarının sismik yüklemeler sonucunda oluşabilecek hasarlar konusunda bilgi vermişlerdir. Ülkemizde ilki 2013 ikincisi 2015 yılında düzenlenmiş olan Ulusal Liman Kongrelerinde liman ve yavaşma yapılarının çalışma kapasiteleri, verimlilikleri, yapılarda çeşitli sebeplerden oluşan hasarlar ve onarımları hakkında çalışmalar yürütülmüştür [9-10].

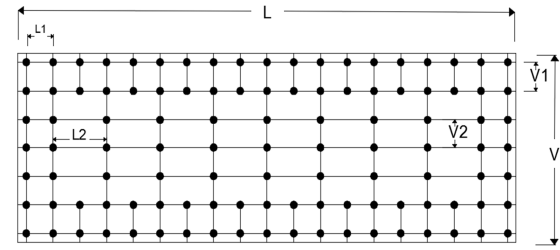
Kadıoğlu [11], İzmit körfezinde bulunan kazıklı rıhtım yapısını modellemiş ve doğrusal olmayan itme analizi gerçekleştirmiştir. Eğik çelik kazıkların eğim açıları değiştirilerek modelin genel davranışına olan etkisini araştırmıştır. Düz ve eğimli kazıklı yapı arasında yer değiştirme talepleri yaklaşık 14 kat fark olmasına rağmen, eksenel kuvvette 1,5 ve eğilme momentinde 1,8 kat fark bulmuştur. Eğik ve düz kazıkların 3 boyutlu modelleri oluşturularak zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizlerle zemin tipinin kazıkların davranışına etkisinin araştırılmasını önermiştir.

Topsoy [12], düşey kazıklı rıhtım yapısının taban kesme kuvvetlerinin de R katsayısı ile orantılı olarak değişiklik gösterdiğini gözlemlemiştir. Deprem yükleri kadar zemin yükleri, rüzgâr yüklerinin de kazık uç kuvvetlerine etkisinin olduğunu belirtmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Daire kesitli çelik kazık üzerine oturan iskele yapılarının olası dalga yükleri altındaki davranışının incelendiği bu çalışmada 6 adet sayısal model oluşturulmuştur. Sayısal modellerin belirlenmesi aşamasında kazık çapları ve bu çaplara bağlı olarak değişen kazık aralıkları parametre olarak kabul edilmiştir. DLH2008'de kazık aralıkları kazık çapına göre tanımlanmış olup, 3D-8D aralığında alınabileceği ifade edilmiştir [7]. Kazık çaplarına göre değer kazanan kazık aralıkları çalışma kapsamında 4D ve 8D olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan kazıkların çapları ve et kalınlıkları; D600x12 mm, D800x12 mm ve D1000x12 mm olarak belirlenmiştir. Kazık çapları üç değişken olarak belirlenirken cidar kalınlıkları 12 mm olarak kabul edilmiştir. Boru profillerin çelik malzeme sınıfı S275 seçilmiştir.

Şekil 3'de kazıkların plan yerleşimlerini belirleyen parametreler gösterilmiştir. Burada, L platform uzunluğunu, V platform genişliğini, L1 ve L2 x doğrultusunda iki kazık arası mesafeyi, V1 ve V2 ise y doğrultusunda iki kazık arası mesafeyi ifade etmektedir. Kazık aralıkları, iskele temelinin plan yerleşimini belirlemektedir. Çizelge 2'de bu tanımlaya göre oluşturulan sayısal modellerin isimlendirmeleri ve boyutsal parametreleri ayrıntılı olarak sunulmuştur.



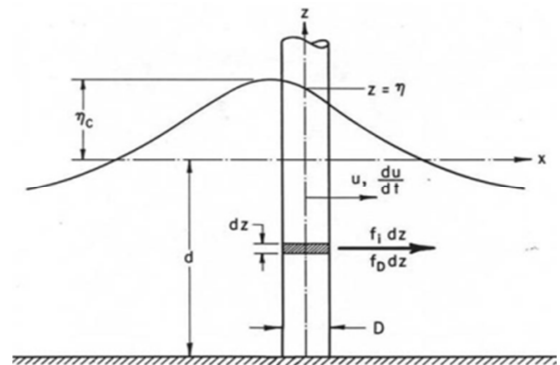
Şekil 3. Sayısal modellerde kullanılan kazıkların yerleşim planı

Çizelge 2. Sayısal modellerin boyutsal parametreleri

Model No	Kazık Çapı (D) (cm)	Kazık Aralığı	L (m)	L1 (m)	L2 (m)	V (m)	V1 (m)	V2 (m)
M1	60	4D	59,60	2,40	4,80	21,20	2,40	4,80
M2	60	8D	59,60	4,80	9,60	21,20	2,40	4,80
M3	80	4D	59,60	3,20	6,40	21,20	3,20	3,20
M4	80	8D	59,60	6,40	12,80	21,20	3,20	6,40
M5	100	4D	58,00	4,00	8,00	22,00	4,00	4,00
M6	100	8D	58,00	4,00	16,00	22,00	4,00	4,00

Çizelge 2'de tanımlanan boyutsal parametreler kapsamında modellerdeki kazık sayıları değişkenlik göstermektedir. Bu kapsamda M1, M2, M3, M4, M5 ve M6 modelleri için sırasıyla 128, 68, 99, 48,78 ve 44 adet kazık kullanılmıştır. Kazıkları dört taraftan çevreleyen ve aralıklarda kazık başlıkları boşta kalmayacak şekilde 80 cm yüksekliğinde başlık kirişi ve 40 cm döşeme tanımlanarak üst yapı tamamlanmıştır. Modellerde kazık boyları sabit kabul edilmiş ancak deniz tabanındaki eğime göre zemine gömülü uzunlukları değişken olarak tanımlanmıştır. Daire kesitli boru profiller kullanılarak dizayn edilen kazıklı temel sistemine sahip modellere 8 metre dalga yüksekliği için 4 sn, 6 sn ve 12 sn dalga periyotları dikkate alınarak dalga kuvvetleri

tanımlanmıştır. Boru profillere etkiyen dalga kuvveti Şekil 4'de gösterilmiştir [13].



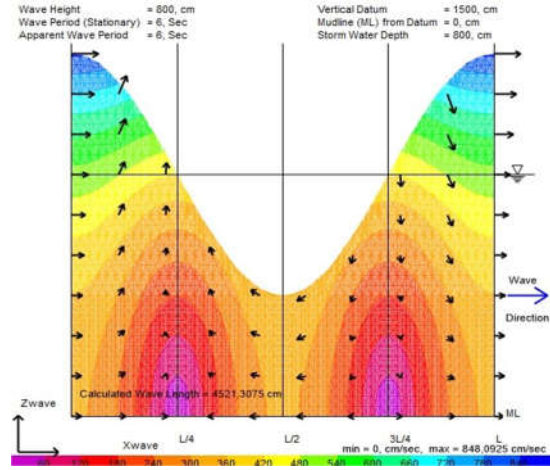
Şekil 4. Dairesel kesite etkiyen dalga kuvveti

Dalga kuvvetlerinin hesaplanmasında, Sap2000 sonlu elemanlar programı Eşitlik 1’de tanımlanan Morrison metoduna bağlı algoritma kullanılmaktadır [14].

$$F = F_D + F_I = C_D \frac{\gamma_{su}}{2} AU|U| + C_m \frac{\gamma_{su}}{2} V \frac{dU}{dt} \quad (1)$$

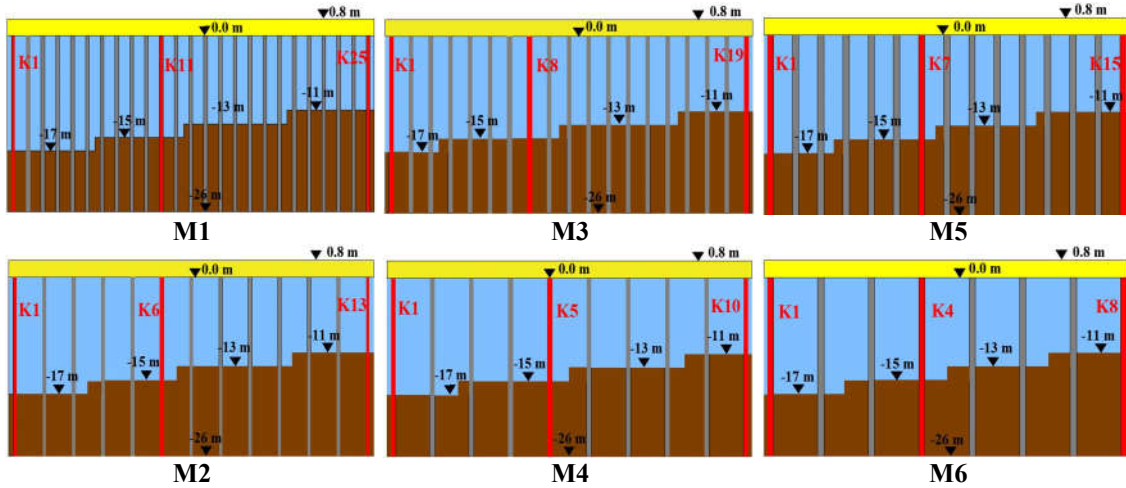
Burada F eleman boyuna eksenine birim uzunlukta etki eden hidrodinamik kuvveti, F_D birim uzunlukta sürüklenme kuvvetini, F_I birim uzunlukta atalet kuvvetini, γ_{su} deniz suyunun birim hacim ağırlığını, A birim uzunlukta alanı, V birim uzunlukta hacmi, U elemanın eksenine normal etki eden su parçacık hızı bileşenini, |U| U değerinin mutlak değerini, dU/dt elemanın eksenine normal etki eden su parçacık ivmesi bileşenini, C_D sürüklenme katsayısını, C_m atalet katsayısını ifade etmektedir [14,15].

Sürüklenme ve atalet katsayıları kazık geometrilerine göre değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan dairesel kesitli kazıklar için sürüklenme katsayısı (C_D) ve atalet katsayısı (C_m) değerleri sırasıyla 0,7 ve 2,0 olarak alınmıştır [15]. Deniz suyunun birim hacim ağırlığı ise $10,25 \text{ kN/m}^3$ olarak programa tanımlanmıştır. Şekil 5’de dalga karakteristikleri gösterilmiştir.



Şekil 5. Dalga karakteristikleri

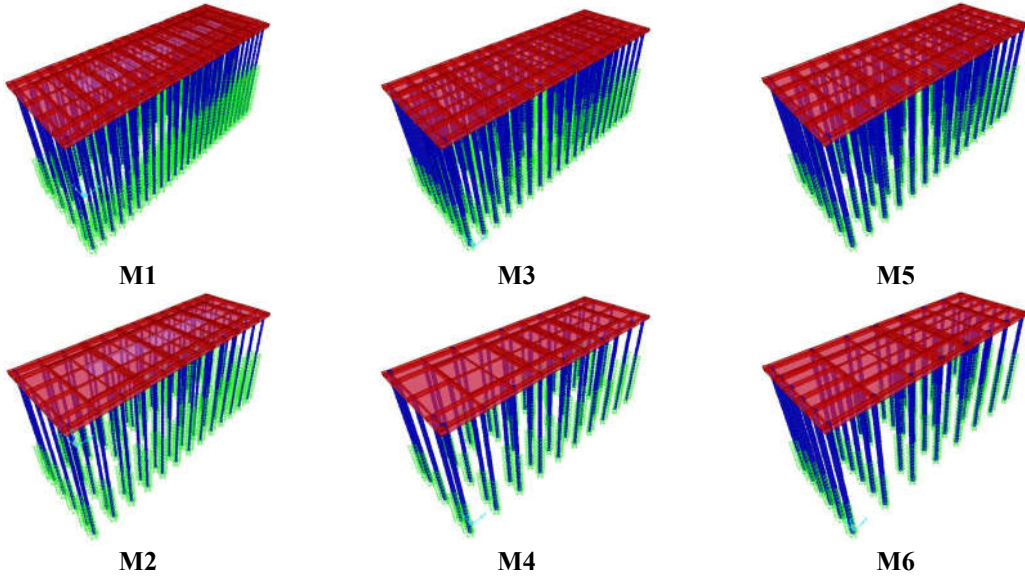
Şekil 6’da çalışmada kullanılan sayısal modellerin kesit görünüşleri verilmiştir. Kesitlerde deniz kotu, zemin eğimi ve bu eğime bağlı olarak farklı gömülü derinliğe sahip kazık sistemi gösterilmiştir. Ayrıca, analiz sonuçlarının değerlendirilmesi için veri okuması yapılan kazıklar kırmızı renk ile gösterilmiştir. Şekil 6’da gösterilen kazıkların seçiminde zemine gömülü uzunlukları ve yapı içindeki konumları dikkate alınmıştır.



Şekil 6. Sayısal modellerin kesit görünüşleri ve analiz sonuçları için veri okuması yapılacak kazıkların belirlenmesi

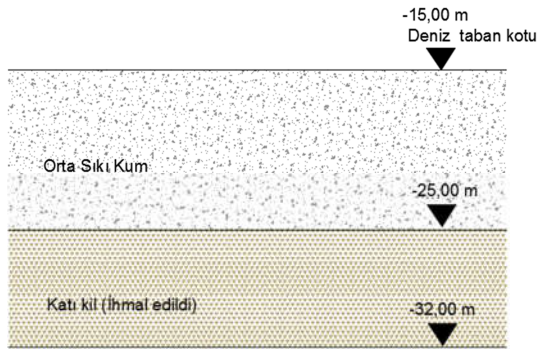
Kesit ve plan yerleşim durumları ayrıntılı olarak tanımlanan iskele yapılarının 4D ve 8D yerleşim

şekli için oluşturulmuş sayısal modellerinin 3 boyutlu görünüşleri Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Kazık çapı ve aralığına göre yerleşim şekli değişen sayısal modellerin genel görünüşleri

Kazık sisteminin oturduğu zemin tabakları katı kil üzerinde orta sıklıkta kum olarak kabul edilmiştir. Tanımlanan zemin katmanı için 26 m yükseklikte olan tüm kazıklar orta sıkı kum içerisinde yer almaktadır. Şekil 8’de deniz tabanı zemin katmanları gösterilmiştir.



Şekil 8. Deniz tabanı için tanımlanan zemin durumu genel görünümü

Sayısal modellerde kazık zemin ilişkisi yay sabiti kullanılarak programa tanımlanmıştır. Yay sabitinin hesaplanmasında orta sıkı kum için kabul edilen kohezyonsuz zemine ait parametreler ile hesaplanan yatak katsayısı için kullanılan parametreler Çizelge 3 ve 4’de gösterilmiştir.

Çizelge 3. Kohezyonsuz zemin için tasarımda kullanılan parametreler [6]

Zemin	E_s (kN/m^2)	Φ	Y_d (kN/m^3)	ν
Orta Sıkı Kum	30000	35°	19	0,3

E_s : Elastisite modülü

Φ : Efektif kayma direnci açısı

Y_d : Zemin doygun birim hacim ağırlığı

ν : Poisson oranını ifade etmektedir.

Kumlarda yanıl yatak katsayısı derinlikle doğrusal bir artış gösterir. Bu zeminlerde K_h (yatak katsayısı, kN/m^3) değeri Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmaktadır [6].

$$K_h = nh^*(z/B) \quad (2)$$

Eşitlik 2’de ifade edilen nh , zemin sıklığına bağlı katsayı, z derinlik (m), B kazık çapıdır (m).

Çizelge4. Kohezyonsuz zeminlerde nh değerleri [7]

Zemin Sıklığı	YASS üzerinde nh (kN/m^3)	YASS altında nh (kN/m^3)
Gevşek	2200	1300
Orta sıkı	6600	4400
Sıkı	18000	11000

Sayısal modellerde kazıkların gömülü derinlikleri 9-15 m aralığında değişmektedir. Sap2000 programında zemin yatak katsayısını temsil eden yay sabitleri birer metre için tanımlanmıştır [14]. Çizelge 5’de modellerde kazıkların her bir metre derinlik için tanımlanan yay sabiti değerleri derinlikçe gösterilmiştir. Sayısal modellerde, zemin içerisinde farklı derinliklerde çalıştığı ön görülen kazık sistemleri, Çizelge 5’de yatak katsayısı olarak tanımlanan yay sabitleri kullanılarak X ve Y yönü olan yatay doğrultularda sınır koşulları tanımlanmıştır.

Çizelge 5. Yatak katsayısı değerleri

Derinlik (m)	Yatak Katsayısı (kN/m ³)		
	D60	D80	D100
1	7333	5500	4400
2	14666	11000	8800
3	22000	16500	13200
4	29333	22000	17600
5	36666	27500	22000
6	44000	33000	26400
7	51333	38500	30800
8	58666	44000	35200
9	66000	49500	39600
10	73333	55000	44000
11	80666	60500	48400
12	88000	66000	52800
13	95333	71500	57200
14	102666	77000	61600
15	110000	82500	66000

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada; altı adet sayısal modelin 4 sn, 6 sn ve 12 sn dalga periyodu etkisi altındaki davranışı analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarında, kazıkların tabandan iskele platformuna kadar olan yüksekliği boyunca yatay yer değiştirmeler hesaplanmıştır.

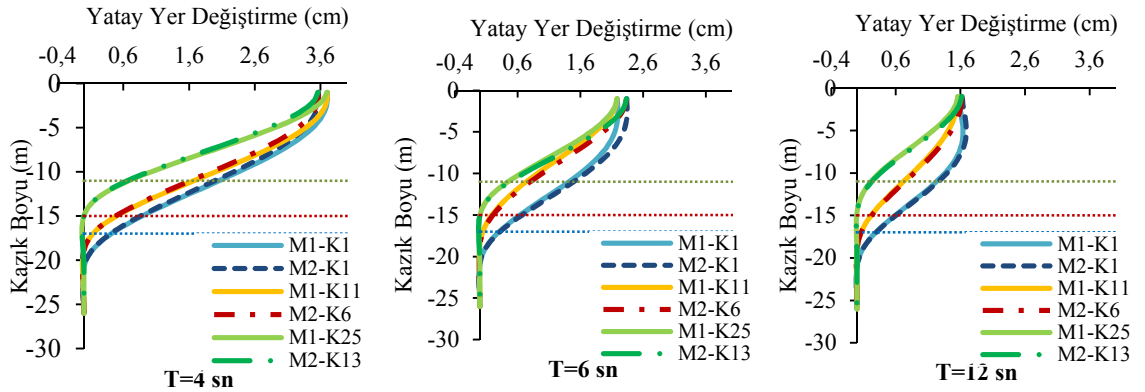
Elde edilen değerler 60 cm, 80 cm ve 100 cm kazık çapı için 4D ve 8D yerleşim düzeninde karşılaştırılarak grafik halinde sunulmuştur.

Şekil6 üzerinde kırmızı renkle işaretlenmiş kazıklar için sistem içinde birbiri ile olan yatay yer değiştirme değerleri ve aynı kazıkların farklı dalga periyotları altındaki davranışları karşılaştırmalı olarak bu bölümde sunulmuştur. Bu kapsamda ilk olarak 60 cm kazık çapı 4D ve 8D yerleşim şekline ait M1 ve M2 nolu modeller kazık sistemleri yatay yer değiştirme değerleri Şekil 9’da verilmiştir. M1 ve M2 nolu modele ait sonuçlar incelendiğinde; kazıkların sistem içindeki davranışı tüm analizlerde, kazık üst kotlarının birlikte hareket ettiği yani iskele üst yapısının diyafram özelliği sergilediği görülmektedir. Bu durum tüm kazıkların sistem içinde bir bütün çalıştığını göstermektedir. Kazıkların sistem içindeki durumlarını ifade eden Şekil 9.a’da, kazık aralığının azalması ve buna bağlı kazık sayısındaki artış, yatay yer değiştirme talebine etkin bir şekilde yansımış, T=4 sn, 6 sn ve 12 sn periyot değerlerine ait tüm yüklemelerde yatay yer değiştirmeler azalmıştır. Periyot değerlerinin kendi içindeki durumları değerlendirildiğinde, en kritik yatay yer değiştirme taleplerinin 4 sn’lik periyodu takiben 6 sn ve 12 sn periyotlarında olduğu görülmektedir (Şekil 9.b). Bu noktada dinamik bir yük olan dalga yükünün yüksek frekans düşük periyot değerinde yani tekrarlı yükleme altında daha yüksek yatay yer değiştirme talebinin olduğu görülmektedir.

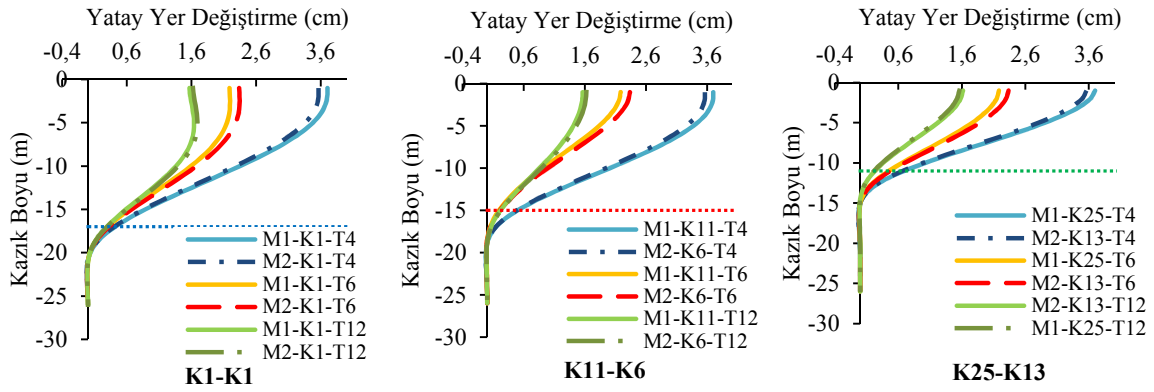
Grafiklerde kesikli çizgiler ile tanımlanan sınırlar her kazığın deniz tabanına ulaştığı derinliği, yani gömülü kısmın başladığı kotu temsil etmektedir. Çalışmada kullanılan kazık boyları 26 m olarak tasarlanmıştır. Bu kapsamda yeşil renk ile ifade edilen kıyıya en yakın ve en çok gömülü derinliğe sahip olan kazık olup 15 m gömülü derinliğe sahiptir. Kırmızı renkle tanımlanan ve sistem kesitinde yapı ortasında yer alan kazık olup gömülü derinliği 11 m’dir. Grafiklerde mavi renkle tanımlanan ve deniz tarafında en uçta yer alan buna bağlı olarak en az gömülü derinliğe sahip olan kazık elemandır. Yapı ucundaki bu elemanın

gömülü derinliği 9 m'dir. Bu kapsamda yapı içindeki konumları ve gömülü derinlikleri değişen kazıkların yatay yer değiştirmelerinin sistem içindeki durumları incelendiğinde; en rijit

davranışın beklendiği üzere kıyıya en yakın ve gömülü derinliği en çok olan kazıktan en az doğru değiştiğidir.



a) Sabit dalga periyodu altında farklı kazıklarda gerçekleşen yatay yer değiştirmeler



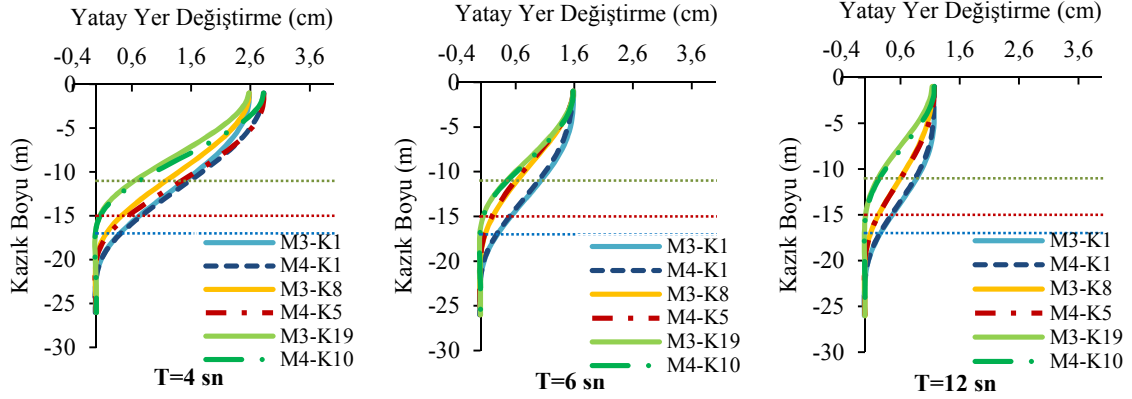
b) Değişken dalga periyotları altında kazıklarda gerçekleşen yatay yer değiştirmeler

Şekil 9. M1 ve M2 (D60 4D-8D) modellerinin dalga periyotlarına göre yatay yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılması

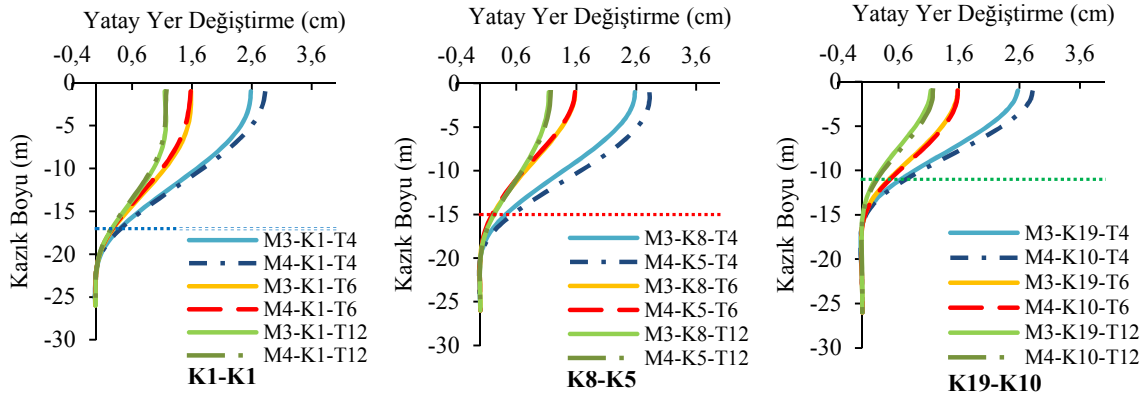
Şekil 9.b'de yer alan grafiklerde seçilen her bir kazığa farklı periyotlarda etkiyen dalga yüklerinin 4D ve 8D yerleşim düzeni için kazıkların kendi içindeki kıyaslamalarını içermektedir. Bu durum değerlendirildiğinde; en çarpıcı tespitin gömülü derinliğin deniz tabanını temsil eden sınır çizgisi dikkate alındığında tüm kazıklarda ortalama 3-5 m aralığında değişen derinlikte zeminin yatay yer değiştirmeyi tutamadığı, başka bir ifade ile kazık elemanın mesnet etkisinin sınır çizginin en az 5 m altında başladığıdır. Orta aksta ve kıyıya yakın

uçtaki konumda yer alan kazıklarda bu sınırlar altında zeminden kazanılan rijitlik etkiyen yük cevap verebilecek rijitlikte kalırken, denize yakın uçtaki kazık sistemi için yeterli rijitlik sağlayamamaktadır.

Şekil 10'da M3 ve M4 nolu modellerin yani 80 cm çapındaki kazık sisteminin 4D ve 8D yerleşim düzenindeki sayısal modellere ait analiz sonuçlarından elde edilen yatay yer değiştirme karşılaştırmaları yer almaktadır.



a) Sabit dalga periyodu altında farklı kazıklarda gerçekleşen yatay yer değiştirmeler



b) Değişken dalga periyotları altında kazıklarda gerçekleşen yatay yer değiştirmeler

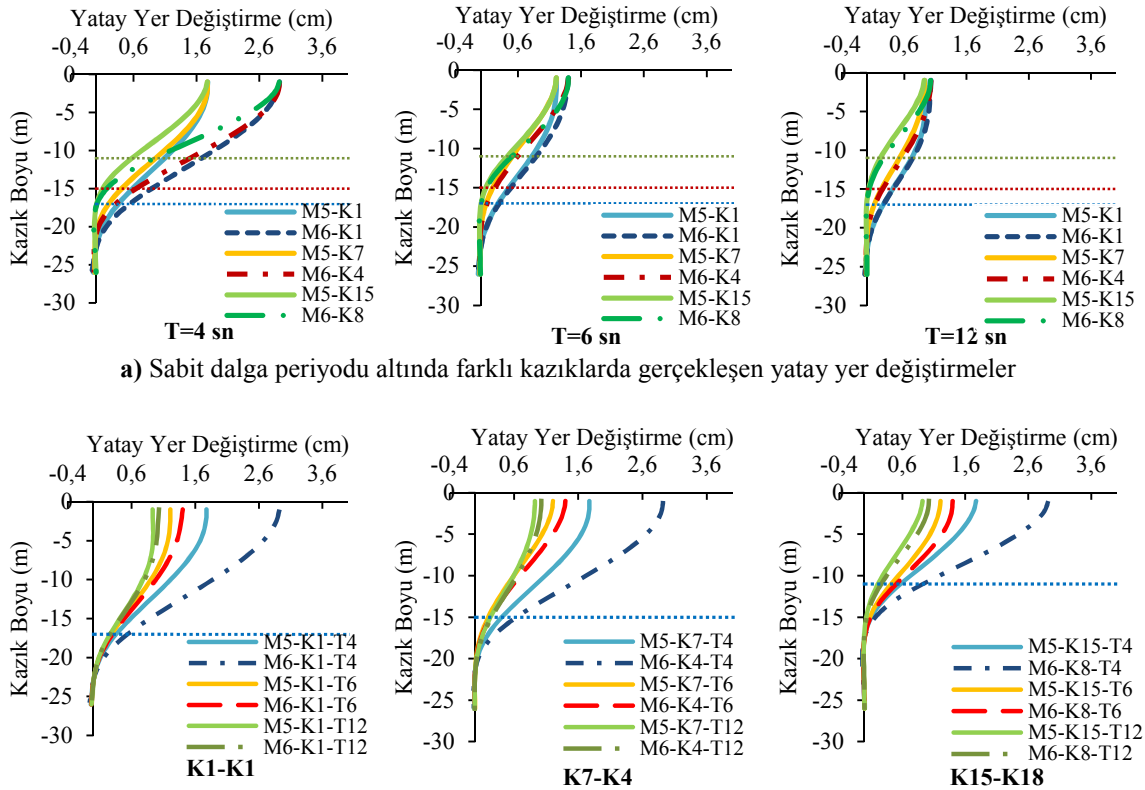
Şekil 10. M3 ve M4 (D80 4D-8D) modellerinin dalga periyotlarına göre yatay yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılması

80 cm çaplı kazıkların sistem içindeki durumlarını temsil eden grafikler incelendiğinde, elde edilen yatay yer değiştirme eğrilerin 60 cm çapındaki sayısal modellere göre daha rijit bir davranış sergilediği görülmektedir. Bu sayısal modellerde de, 4D yerleşimin sistem yatay yer değiştirme talebini azaltmış olduğu görülmektedir. Bu kazık çapı için yerleşimden kazanılan rijitlik artışı 60 cm'lik sisteme göre daha belirgin bir hal almış, 4D sonucundaki yatay yer değiştirme değerleri 8D aralığında yatay yer değiştirme değerlerinin %60 oranında azalmasına sebep olmuştur. Yerleşim düzeninin kazık çapına göre şekil aldığı sayısal modellerde, kazık çapına bağlı olarak aralık ve kazık sayısı değişkenlik göstermektedir. Bu kapsamda kazık aralığı artması ve kazık sayısının

M1 ve M2 nolu modellere göre azalmasına rağmen kazık çapındaki artış, daha etkin sonuç vermiştir.

Şekil 10'da seçilen kazık elemanlarının kendi içlerindeki durumlarını ifade eden grafikler incelendiğinde; her kazık için zemin sınır çizgisi davranış karşılaştırmasının 60 cm'lik modellere göre daha rijit kaldığı burada da görülmektedir. Bu modellerde sınır çizgisi altındaki zeminin etkin mesnet tepkilerinin oluşamadığı, başka ifade ile gelen yüklere karşılık veremediği mesafe 3 m'ye düşmüştür. Ayrıca 80 cm'lik modellerde denize en yakın uçta yer alan kazık dâhil olmak üzere tüm kazıklar etkin çalışma derinliğinin altında yeterli rijitliğe ulaşmıştır.

Çalışma kapsamında son modeller olan 100 cm kazık çapının 4D ve 8D yerleşim planındaki M5 ve M6 nolu modeller için elde edilen sayısal analiz sonuçları Şekil 11'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 11. M5 ve M6 (D100 4D-8D) modellerinin dalga periyotlarına göre yatay yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılması

100 cm'lik kazıkların sistem içindeki kıyaslamalarına baktığımızda, bu yerleşim düzeninde kazık platformu tepe yer değiştirmesi açısından 4D yerleşim düzeni için 8D'ye göre elde edilen kazanım, diğer modellere göre daha belirgin durumdadır.

M5 ve M6 nolu modeller kazık sisteminin kendi içinde karşılaştırması dikkate alındığında ise diğer modellerden farklı olarak; Bu sistemde deniz kenarına yakın kısımdaki uçkazıkta, kazık ucunda da deplasman tespit edilmiştir. Başka bir ifade ile bu modellerde, en uçtaki kazık sahip olduğu gömülü derinlik, kazığa etkileyen yükleri sönmeyecek düzeye ulaşamamıştır. Ancak kazık sisteminin üst tablada diyafram olarak çalışıyor

olması sayesinde, bu kazıktaki yetersizlik diğer sistem elemanlarınca karşılanmıştır. Diyafram etkisi ile elde edilen bu kazanım dinamik bir yük olan dalga yükünün, iskele yapısı için tekrar aralığı dikkate alındığı hizmet ömrü açısından değerlendirilmelidir.

Değişken dalga periyodu (4 sn, 6 sn ve 12 sn) sabit dalga yüksekliği (8 m) için sayısal modellerin yatay yer değiştirme taleplerinin taşıma kapasitesi açısından değerlendirilebilmesi için; en etkin dalga kuvveti altında tüm modellerde dikkate alınan kazık elemanların kesme kuvveti ve moment dağılım grafikleri elde edilmiştir. Kapasite grafiklerinin sistem güvenliği açısından değerlendirilebilmesi için Çizelge 6'da kullanılan

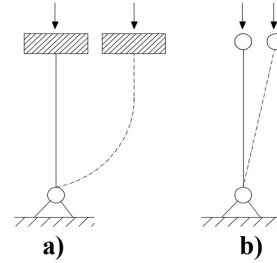
kazık çaplarının sistem içindeki yük durumları da dikkate alınarak kesme kuvveti ve moment taşıma kapasiteleri lineer sınır için belirlenmiş ve Çizelge 6 üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 6. Kazıkların çaplarına bağlı kesme kuvveti ve moment kapasite değerleri

Kazık Çapı (D) (cm)	Kesme Kuvveti (kN)	Moment (kN/m)
60	196	1650
80	275	1890
100	425	2350

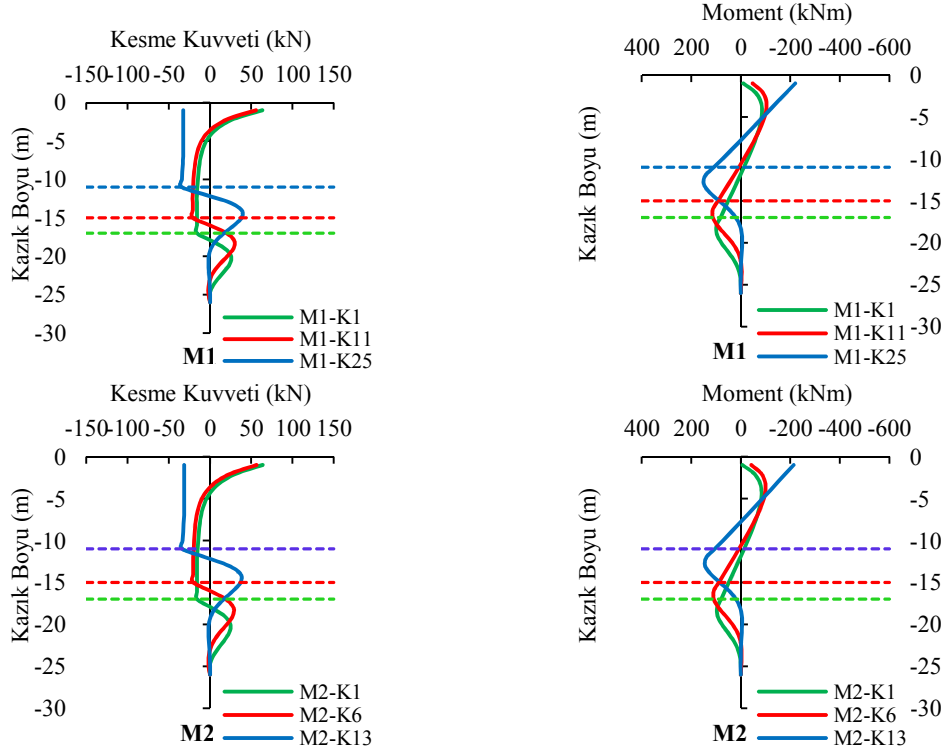
Yapılan çalışmada, kazık sistemi üst yapıyla birlikte analiz edilmiştir. Bu durum kazık başının üst yapı kütle eylemsizliğinden etkilenecek rijitlik kazanmasına sebep olmuştur. Üst yapı kazık etkileşiminden kazanılan bu rijitlik kazık elastik eğrisini de belirlemiştir. Çalışmada kullanılan tüm kazıklar orta sıkı kum içerisinde değerlendirildiği için tamamı sürtünme kazığı olup kazık ucunda soketlenme ihmal edilmiştir. Bu durumun

matematik modellenmesi ve buna bağlı elastik şekil değiştirmesi Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Kazık davranışının gösterimi. a) Kazık üstünde platform olması durumu, b) Kazık başının boş olması durumu

Çalışma kapsamında dikkate alınan modellere ait olan kazık kesme kuvveti ve moment değerleri ölü yük, hareketli yük ve dalga periyotları içinde etkili durum olan 4 sn periyot için kombinasyon oluşturularak okumalar yapılmış ve elde edilen grafikler Şekil 13, 14 ve 15’de gösterilmiştir.



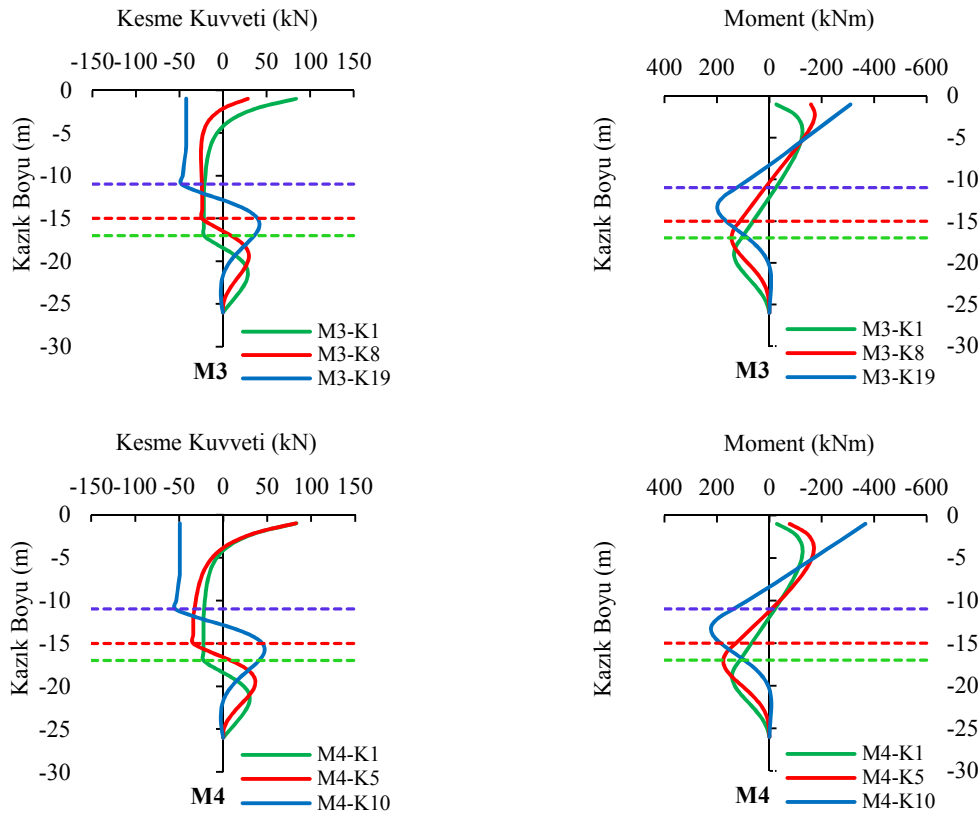
Şekil 13. M1 ve M2 nolu modellerin 4 sn dalga periyodu için kesme kuvveti ve moment dağılımlarının karşılaştırılması

Kazık çapının 60 cm olduğu modellere ait grafikler incelendiğinde, bu dalga periyodu için elde edilen tüm değerlerin kazık kapasite değerini aşmadığı tüm kazıkların lineer sınırlar dâhilinde kaldığı görülmektedir. Kesme kuvveti ve Moment değerlerinin kazık boyunca dağılımının verildiği grafikler incelendiğinde; elde edilen verilerin yatay yer değiştirme davranışı ile örtüştüğü görülmektedir. Bu grafiklerde kesme kuvveti için sönüm sınır çizgisi ile başlasa da, etkinin tamamı ile sönümü için gömülü derinliğin tamamı kullanılmaktadır.

M2 (D60-8D) modelinde, kesme kuvvetleri dağılımları K1-K6 kazıkları için pozitif bölgede başlamış, devam eden durumda K13'de olduğu gibi negatif bölgeye geçiş ve dağılımca kendi içlerinde paralellik göstermiştir. K1-K6 kazıklarının etkiyen dalga kuvveti için dalga pik

noktalarına karşılaşması sebebi ile K13'ten başlangıç itibarı ile ayrılmıştır. Moment değerlerinin kazık boyunca dağılımları incelendiğinde, en belirgin durumun, çalışmada kullanılan matematik modelin bir sonucu olarak, kazık başlarının moment almasıdır. Bu durumda kazık başı moment değerleri incelendiğinde, zemin gömülü derinliği en yüksek olan ve kuvvet doğrultusu dikkate alındığında üst yapı ile etkileşimi en yüksek olan K6, K13 kazıkları için hesaplanan uç momentleridir. Bu noktada sahip olduğu rijitliğin üst yapıdan elde edilen eylemsizliğe bağlı momentin ilişkili olduğu söylenebilir.

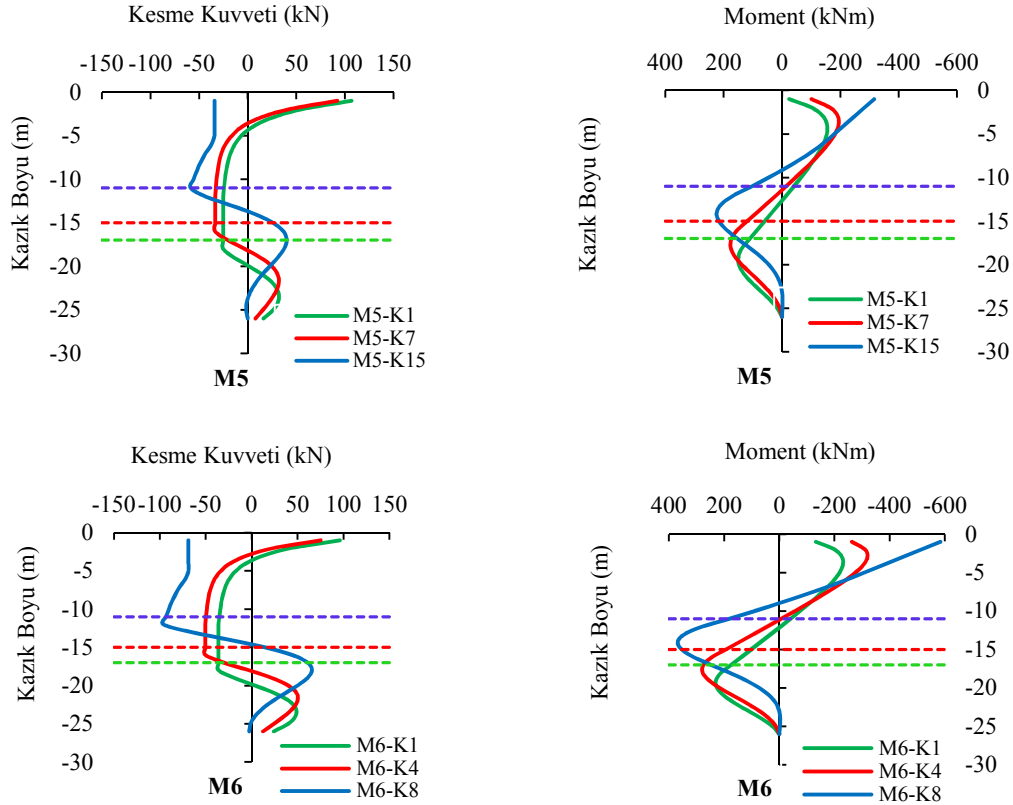
Kazık çapının 80 cm olduğu modellere ait grafikler incelendiğinde, dalga pik noktalarına bağlı oluşan kesme kuvveti değerleri bu modelde de açıkça görülmektedir (Şekil 14).



Şekil 14. M3 ve M4 nolu modellerin 4sn dalga periyodu için kesme kuvveti ve moment dağılımlarının karşılaştırılması

80 cm kazık çapı için elde edilen tüm kesme kuvveti diyagramlarında, kesme kuvveti değerlerinin tümüyle zemin tarafından karşılandığı görülmektedir. Moment dağılımını ifade eden grafikler incelendiğinde 4D ve 8D plan yerleşim düzeni için elde edilen kazık çapının büyümesine

bağlı rijitlik kazanımı kazık uç momentinin artmasına sebep olmuştur. Bu durum bir önceki kazık çapındaki kazık rijitliği ile üst yapı etkileşimindeki pozitif yaklaşımının bir teyidi niteliğindedir. Bu kapsamda elde edilen uç momentler, 60 cm kazık çapının büyük olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 15. M5 ve M6 nolu modellerin 4 sn dalga periyodu için kesme kuvveti ve moment dağılımlarının karşılaştırılması

Kazık çapının 100 cm olduğu modellere ait sonuçlar incelendiğinde; bu modellerde kazık çapının en büyük boyutta olmasına karşın, kazık çapı ile doğru orantılı olarak büyüyen kazık aralığı kazık zemin etkileşiminden kazanılan rijitliği etkilemiştir. Bu kapsamda hem kesme kuvvetlerinin hem de moment kuvvetlerinin sönümlenmesi diğer modellere göre kıyasla daha geniş aralıkta gerçekleşmiştir. Ayrıca kesme kuvveti değerleri 8D yerleşim planındaki modelde tamamı ile sönümlenememiş, sistem taban kotunda artık kuvvet kalmıştır.

Bu kuvvet nedeniyle Şekil 11’de kazığın taban kotunda yatay yer değiştirme yapması olarak sonuç vermiştir. 100 cm kazık çapı için elde edilen moment diyagramları incelendiğinde kazık uç momentlerinin diğer kazık çaplarına göre daha da arttığı açıkça görülmektedir. Bu durum kazık rijitliğinin üst yapı etkileşimindeki pozitif kazanıma destek vermektedir. 100 cm kazıklarda diğer modellerden 4D-8D karşılaştırması noktasında kazık uç moment değerleri ayrılmıştır. Bu durum kazık grup etkisinin kazık sayısının

enaz olduğu bu modelde, kazık bireysel rijitliklerinin ön plana çıkmasıdır.

4. SONUÇLAR

Dalga periyotlarındaki değişimin iskele yapısı kazık sistemi üzerine etkisinin incelendiği bu çalışmada; 4 sn, 6 sn ve 12 sn dalga periyodu, 8 m dalga yüksekliği için analiz edilmiştir. Analizlerde hesaplanan dalga yükleri kazık çapına göre kazık yerleşiminin değiştiği altı adet sayısal model üzerinde değerlendirilmiştir.

Analizlerde kazık çapı 60 cm, 80 cm ve 100 cm olarak alınmıştır. Bu kazık çapları için kazık aralıkları 4D ve 8D yerleşim düzeninde sayısal model sayısı artırılmıştır. Tüm modellerde zemin parametreleri ve kazık uzunlukları sabit alınmıştır. Sap2000 sonlu elemanlar programı kullanılarak kazıkların yatay yer değiştirmeleri ve bu yer değiştirmeyi tetikleyen kesme kuvveti ve moment diyagramları elde edilmiştir. Elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Dalga yüksekliği sabit tutularak değişen dalga periyodu için yapılan analizlerde dalga periyodundaki azalma (frekanstaki artış), kazıkların yatay yer değiştirmelerinde artış olarak sonuç vermiştir. Yapılan incelemede; bu durum dalganın pik noktalarının kazık kesiti teması ile ilgili olmayıp, dalga periyodunun yapı periyoduna yaklaşması ile ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Yatay yer değiştirme grafiklerinde kazık aralıklarının etkileyen dalga kuvveti içindeki durumları dikkate alındığında, kazık çapı ve bu çap için kullanılan aralıklı yerleşim düzeninin, 4D ve 8D kıyaslamalarında, kazık aralığındaki düşüşe bağlı rijitlik kazanımı en etkin 80 cm kazık çapı için elde edilmiştir.

Çalışmada tanımlanan iskele modellerinde kullanılan kazık yapısı dikkate alındığında; kazık performansı, kazık çapı ve kazığın içindeki zemin ile olan etkileşiminin bir sonucu olarak davranış sergilemektedir. Çalışmada bu durumu ifade etmek için kazıkların kendi içlerindeki davranışları deplasman grafiklerine yansıtılmıştır. Grafiklerden

elde edilen sonuca 100 cm kazık çapı 8D'lik yer değiştirmelerine ait grafiklerde gömülü derinliği 9 m olan kazık elemanın kazık taban kotunda yatay yer değiştirmenin sınırlanamadığı, kazığın bütüncül olarak hareket ettiği tespit edilmiştir. Aynı modelin 11 m ve 15 m gömülü kazık boyuna sahip sonuçlarında ise gömülü sınır çizgisinin ancak 4-5 m altında sönümlenme gerçekleşmiştir. 60 cm ve 80 cm çaplı tüm modellerde yatay yer değiştirmenin zemin içinde gömülü sınır çizgisinin ortalama 3-5 m altında tamamı ile sönümlendiği görülmüştür.

Kazıkların etkileyen dalga yükü atındaki karşılaştığı maksimum kesme kuvveti ve moment değerleri, kazık ortalama taşıma kapasiteleri ile lineer sınır dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler, hem kesme kuvveti hem moment için çalışmada tanımlanan periyot değerleri için lineer sınırı aşmamıştır. Davranışça durum değerlendirildiğinde; 60 cm ve 80 cm kazıklarda zemin yeterli sönüm rijitliği sağlamış, kazık moment sönümlemesi, kazık gömülü sınırın üzerinde başlamıştır. Kesme kuvveti değerleri ise bu modellerde gömülü sınır çizgisi altında 2-3 m aralıkta sönümlenmeye başlamış ve kazık taban kotunda tamamı ile sönümlenmiştir. 100 cm kazıkta ise kesme kuvveti değerleri taban kotunda sönümlenmemiş, artık kuvvet kalmıştır. Bu durum yatay yer değiştirme grafiği ile birlikte değerlendirildiğinde, yük değeri olarak lineer sınırın çok altında çalışmasına rağmen tekrarlı yüke maruz bu kazık için tehlike arz etmektedir. Ayrıca, kesme kuvveti diyagramlarında, dalga pik noktaları ile etkileşim içinde olan kazık elemanlarda pozitif kesme kuvveti ile başlamış, zemin etkisi devreye girdikçe, davranış ve dağılımca tüm kesme kuvvetleri aynı paralellikte sonuçlar vermiştir.

Çalışmada kazık eksen moment dağılımı grafiklerinden elde edilen diğer önemli sonuç kazık başlarının moment almasıdır. Buradaki temel sebep, bu çalışmada kazık sistemi ve üst yapı birlikte analiz edildiği için üst yapıdaki kütleyle bağlı eylemsizlik kazık başında rijitlik sağlamaktadır. Eylemsizliğe bağlı elde edilen bu rijitlikte kazık başının moment almasına sebep vermektedir. Bu durum kazıklı temel sistemlerinin

üst yapı ile birlikte analiz edilmediği durumlarda kazık başının moment almadığı momentin kazık boyunca artarak gittiği şeklindedir. Ancak bu çalışmada elde edilen sonuç dikkate alındığında kazık başında hesaplanan kütle eylemsizliğine bağlı rijitlik tasarımcının gözardı edemeyeceği kadar büyük bir değer olduğudur. Kazık başındaki moment değerleri dikkate alındığında, kazık başı moment değerinin kazığın zemin ve kendi kesit özelliklerine bağlı rijitlik kazanımı ile direkt alakalı olduğudur. Bu noktada, en büyük moment değerleri, 80 cm ve 100 cm kazıklarda elde edilmiştir. Kazık rijitlik kazanımındaki artış üst yapı eylemsizlik kazanımına pozitif olarak yansımaktadır. Bu durumun kazığın üst yapı içerisindeki konumu ile de ilişkili olduğu grafiklerde ayrıca tespit edilmiştir. Bu kapsamda en yüksek kazanım orta aks ve kıyı aksındaki kazıklarda elde edilmiştir. Orta aksındaki kazanım üst yapı kaynaklı, kıyı aksındaki kazanım zemin etkisine bağlı kazık rijitliğindeki artış kaynaklı olduğudur.

Sonuç olarak; bu tipteki yapılarda dalga periyodundaki düşüş (frekanstaki artış), yatay yer değiştirme talebini de beraberinde getirmektedir. Bu tipteki sistemlerde kullanılacak kazık elemanlarında kazık çapına göre şekil alan kazık aralığında, özellikle 8D'lik yerleşim planlamasında, kazık yatay yer değiştirmeleri zemin koşulları için sorgulanmalıdır. Bu kapsamda, bu zemin koşulu için yapılan analiz sonuçları kazık gömülü derinliği kazık boyunun en az %40-45 olmalıdır.

5. KAYNAKLAR

1. Yüksel, Y., Çevik, E., 2006. Liman Mühendisliği, Beta Yayınevi (1. Baskı), 558, İstanbul.
2. Thoresen, C.A., 2004. Port Designer's Handbook: Recommendations and Guidelines. Thomas Telford, 549, London.
3. Kayadelen, C., Bağrıaçık, B., Altay, G., 2019. Kazıkların Deprem Etkisi Altında İncelenmesi Çukurova Üniversitesi Müh Mim Fak. Dergisi, 34, 51-56.
4. Şahin, D., 2016. Kazıklı Kıyı Yanaşma Yapılarının Analiz ve Tasarım Aşamalarının İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 179, İstanbul.
5. Coduto, D.P., 2011. Temel Tasarımı: İlkeler ve Uygulamalar (2. Baskı), Gazi Kitabevi, 816, Ankara.
6. Polat, Ş.Ş., 2008. Deformation Based Seismic Design of Pile Supported Marine Facilities, Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırmaları Enstitüsü, Doktora Tezi, 195, İstanbul.
7. DLH, 2008. T.C. Ulaştırma Bakanlığı, Kıyı ve Liman Yapıları, Demiryolları, Hava Meydanları İnşaatlarına İlişkin Deprem Teknik Yönetmeliği.
8. Yüksel, Y., Orhan, K., 2013. Sismik Risk ve Limanlarda Hasar Tipleri, 1. Ulusal Liman Kongresi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
9. 1. Ulusal Liman Kongresi, 2013. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
10. 2. Ulusal Liman Kongresi, 2015. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
11. Kadioğlu, Z., 2015. Kazıklı Kıyı Yapılarının Doğrusal Olmayan Davranışı ve Şekil Değiştirmeye Göre Tasarım, Gebze Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 83, Gebze.
12. Topsoy, E., 2016. Kıyı Yanaşma Yapılarının Tasarımı, Onarım ve Güçlendirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 179, İstanbul.
13. CERC, 2003, Coastal Engineering Manual.
14. CSI, SAP2000 V.20. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual, Computers and Structures Inc., Berkeley, CA, USA.
15. KYPTTE, 2016. Kıyı Yapıları Planlama ve Tasarım Teknik Esasları, Ankara.

Hastanelerde Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme Uygulamalarının Enerji ve Ekserji Analizi

Kale Mawlood MINA¹, Hüsametdin BULUT^{*2}

¹Shahidan Qaladze Teaching Hospital, General Directorate of Health-Raparin, Iraq

²Harran University, Department of Mechanical Engineering, Şanlıurfa

Geliş tarihi: 12.03.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Bu çalışmada, Irak, Süleymaniye'deki Qaladze hastanesinde kullanılan HVAC sistemlerinin enerji ve ekserji analizleri termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına göre yapılmıştır. Yapılan analizlere göre kazan ve klima santralleri için ortalama ısı enerjisi ve ekserji verimleri sırasıyla %89, %19,5 ve %81,5, %24; chiller grubunun soğutma performans katsayısı ortalama 4,82 olarak hesaplanmıştır. HVAC sistemlerinin genel olarak ısı konforu hastanede sağladıkları tespit edilmiştir. Ancak hastanedeki iç hava kalitesini ve ısı koşullarını iyileştirmek için HVAC sistemlerinin tüm bileşenlerinin sürekli kontrol edilmesi gerektiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hastane, Enerji, Ekserji, İklimlendirme

Energy and Exergy Analysis of HVAC Applications in Hospitals

Abstract

In this study, energy and exergy analysis of HVAC systems used in Qaladze hospital in Sulaymaniyah, Iraq were done by using the first and second laws of thermodynamics. The average values of thermal energy and exergy efficiencies for the boiler and air handling units were found as 89%, 19.5% and 81.5%, 24%, respectively. The cooling coefficient of performance of the chiller group was calculated as 4.82 on average. It was determined that HVAC systems generally provide thermal comfort in the hospital. But it was concluded that all components of HVAC systems should be constantly checked to improve the thermal conditions and indoor air quality in the hospital.

Keywords: Hospital, Energy, Exergy, HVAC

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Hüsametdin BULUT, hbulut@harran.edu.tr

1. INTRODUCTION

Hospitals are a vital part of any modern health and service system along with growing the world population and industrialization in the countries. Increasing energy needs and energy costs turn eyes on the HVAC system in the hospitals. Analysis of energy and exergy in HVAC systems according to thermodynamic laws are used to evaluate suitable devices for air conditioning and ventilating of the hospital. Energy is needed to maintain the operation with indeed to available work of the HVAC system. Exergy is another name to obtainable energy in the thermodynamic terms during the work of the HVAC system. The minimum work needs to supply the system undergoes process between the specific initial and final states in terms of thermodynamics, when analyzed energy and exergy of the HVAC systems [1]. HVAC systems in the hospital are very demanding energy and play a determinant role in indoor environmental quality (IEQ). Energy efficiency in the HVAC system is also required to affect the supply of air system and indoor air quality (IAQ) with increasing the effectiveness of ventilation to improving thermal comfort in hospitals. The energy and exergy analysis were evaluated of the actual energy consumption for thermal systems in the central heating systems of the hospital [2]. The exergy analysis is used to evaluate the performance of HVAC systems. The series of exergy analysis applications showed effectiveness in the HVAC system [3].

2. MATERIAL AND METHOD

Energy and exergy analysis of HVAC system application with all technologies are carried out for the Qaladze Hospital of Sulaymaniyah, Iraq. Since analysis of energy and exergy of the HVAC system in hospitals have a very desirable role in indoor environmental quality (IEQ). The quality of HVAC equipment should be provided with a suitable environment for the patients, hospital staff, employees according to the function of the hospital. The parameters related to the thermodynamic equations should be taken into account for energy and exergy analysis in the

HVAC system. The applications of parameters are indicated for the heating and cooling process of air conditioning in the hospital.

2.1. Energy and Exergy Analysis (Thermodynamic Analysis)

The thermodynamic analysis is expressed to the availability of energy and exergy. The first law of thermodynamics is used to calculation of energy balance capacity of the HVAC system. The second law of thermodynamic is also used to calculate of exergy when energy destroyed in the HVAC system. The first and second laws of thermodynamics are also used to calculate energy and exergy efficiency and information about to work of the HVAC systems [4].

The amount of energy inlet and outlet should be equal according to the first law thermodynamic as known energy analysis [5]. It also are called energy conservation that are expressed as follows (Equation 1):

$$\Sigma E_i = \Sigma E_o \quad (1)$$

The left side and right side of the equation express total energy input and output. The difference between them gives the total amount of energy losses.

The efficiency of systems or devices is equal to the energy ratio of the outlet and inlet of system and devices. The efficiency of the first law can be determined by the following equation (Equation 2):

$$\eta_I = \frac{E_o}{E_i} \quad (2)$$

The exergy analysis is also expressed a percentage of exergy losses and second law efficiency of the thermodynamic analysis. Exergy analysis is an important device for evaluating and analyzing processes by identifying flaws due to thermodynamic irreversibility [6,7].

When the materials are under heating temperature T, pressure P, special enthalpy h, and entropy S

reduced to T_o environmental temperature. The equation special of exergy can be calculated from the following equation [5] (Equation 3).

$$E_x = (h - h_0) - T_0(S - S_0) \quad (3)$$

The exergy difference between inlet and outlet of points for every device can be expressed irreversibility (I) as seen below (Equation 4):

$$I = \sum Ex_{inlet} - \sum Ex_{outlet} \quad (4)$$

The thermal efficiency is not an adequate criterion alone to evaluate energetic efficiency, irreversibility (second law efficiency) is required [8] (Equation 5).

$$\eta_{II} = \frac{\text{useful work output}}{\text{maximum possible (reversible) work output}} \quad (5)$$

The exergy ratio is expressed as follows [9] (Equation 6)

$$\eta_{II} = \frac{Ex_0}{Ex_i} \quad (6)$$

2.1.1. Energy and Exergy Analysis of the Boiler

Energy and exergy analysis are done for the heating system in the hospital building. The heating system of the hospital building is used for the heating process of air-conditioning in the winter season. The hot water in the boiler are distributed to the boiler line, air handling unit (AHU), and diffusers, as shown in Figure 1. The range of temperatures between 50 °C and 65 °C is produced from that of the boiler.

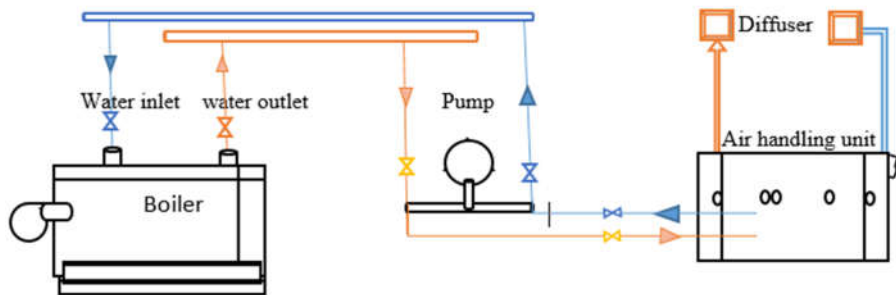


Figure 1. Schematic of a typical heating system with the boiler, AHU, and diffusers

Boiler inlet energy is the amount of fuel combustion ($E_{b_i} = \dot{E}_{b_{fuel}}$), and it can be calculated as follows (Equation 7):

$$\dot{E}_{b_{fuel}} = \dot{m}_{fuel} \times H_{net} \quad (7)$$

Where, $\dot{E}_{b_{fuel}}$ is boiler fuel energy, \dot{m}_{fuel} is mass flow fuel, and H_{net} is the net calorific value of (diesel fuel). The boiler output energy is the amount of energy when to the separating of water in boiler ($\dot{E}_{B_o} = \dot{E}_{b_w}$) and it can be calculated as follows (Equation 8):

$$\dot{E}_{b_w} = \dot{m}_{b_w} [h_o - h_i] \quad (8)$$

Where, \dot{E}_{b_w} is energy boiler water, \dot{m}_{b_w} is the mass flow rate of water. Energy loss in the boiler can be acquired that from as follows (Equation 9):

$$\dot{E}_{b_L} = \dot{E}_{b_{fuel}} - \dot{E}_{b_w} \quad (9)$$

Exergy analysis is used for the calculation of the second law efficiency of the boiler [10]. Inlet and outlet of total exergy in the boiler as seen in Figure 1.

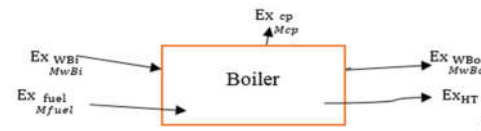


Figure 2. Exergy analysis for inlet and outlet of the boiler

As shown as in Figure 2, inlet exergy is the energy composes of fuel combustion ($Ex_{b\text{fuel}}$) and inlet exergy of fluid to the boiler (Ex_{bwi}). On the other hand outlet, exergy is the energy of combustion products (Ex_{bcp}), outlet exergy of fluid to the boiler (Ex_{bwo}) and heat transfer of boiler surface to the environment (Ex_{bHT}) [11]. The following equation is given as a total of exergy losses, acquired by reformulating Equation 10, (5):

$$Ex_{b\text{total}} = Ex_{b\text{fuel}} + Ex_{bwi} - (Ex_{bwo} + Ex_{bHT} + Ex_{bcp}) \quad (10)$$

The exergy of burned fuel is indicated to work of the boiler, as diesel fuel when connected with oxygen and nitrogen during comprising of combustion natural gas fuel equation as seen the follows below [12] (Equation 11).

$$Ex_{b\text{fuel}} = \dot{m}_{\text{fuel}} \cdot H_{\text{net}} \cdot \varphi \quad (11)$$

Where $Ex_{b\text{fuel}}$ is exergy boiler fuel, φ is chemical energy factor taken as (1.04) ([11,13] and H_{net} is the net calorific value of (diesel fuel) [14].

The exergy of boiler inlet and outlet of water calculated from the following Equations 12 and 13:

$$Ex_{bwi} = \dot{m}_{bw} [(h_{wi} - h_0) - T_0(S_{wi} - S_0)] \quad (12)$$

$$Ex_{bwo} = \dot{m}_{bw} [(h_{wo} - h_0) - T_0(S_{wo} - S_0)] \quad (13)$$

Where, Ex_{wi} is input exergy boiler water, Ex_{wo} is output exergy boiler water, \dot{m}_{wB} is mass flow rate water of boiler, T_0 is the dead state or environmental temperature.

The exergy of heat transfer from boiler surface to the environment, this transition called as exergy losses on the surface of the boiler, and calculated as follows (Equations 14 and 15):

$$\sum Ex_{HT} = \dot{Q}_L \left(1 - \frac{T_0}{T_{BST}}\right) \quad (14)$$

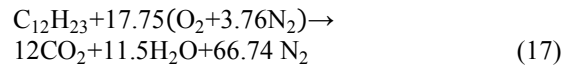
$$\dot{Q}_L = \dot{m}_{\text{fuel}} \times H_{\text{net}} - \left(\dot{Ex}_B + (\dot{m}_{N_2} \cdot \Delta h_{N_2} + \dot{m}_{CO_2} \cdot \Delta h_{CO_2} + \dot{m}_{H_2O} \cdot \Delta h_{H_2O})\right) \quad (15)$$

Where Ex_{HT} is the heat transfer exergy boiler kW, T_{BST} is the boiler surface temperature, So , QL acquired by subtraction of exergy by fuel combustion of value for exergy in the boiler, and Equation 16 calculated by [12].

The exergy of combustion products in the boiler calculated in the following Equation 16:

$$\sum Ex_{bcp} = \sum \dot{M}_i \times Ex_i \quad (16)$$

Where $\sum Ex_{bcp}$ is the total exergy of combustion product kW, $\sum \dot{M}_i$ is the total mass flow of combustion products kg/s, and Ex_i is the exergy of combustion products kJ/kg. The combustion equation of diesel fuel is given the following Equation 17, [14].



The percentage of total mass for each combustion product can be calculated as follow (Equation 18):

$$y_i = \frac{\dot{M}_i}{\dot{M}_{\text{tot}}} \quad (18)$$

$$\dot{M}_{\text{tot}} = (12 \cdot \dot{M}_{CO_2}) + (11.5 \cdot \dot{M}_{H_2O}) + (66.74 \cdot \dot{M}_{N_2}) \quad (19)$$

Where, y_i is the mass fraction, \dot{M}_{tot} is the total molecular mass of combustion products kg/kmol. The average yield is 1% for natural gas combustion, the mass of combustion products is taken 0 loss during the combustion process [15].

$$\dot{M}_{cp} = (\dot{M}_{\text{fuel}} + \dot{M}_{\text{air}}) \times 1 \quad (20)$$

For calculation mass flow rate combustion of products and percentage values as follows:

$$\dot{M}_i = \dot{M}_{cp} \cdot y_i \quad (21)$$

The exergy of combustion products equals the addition of thermodynamic and chemical exergy. Total exergy value of flue gases are acquired from following Equation 22:

$$\sum Ex_{bcp} = \dot{M}_{N_2} \times Ex_{\text{tot}N_2} + \dot{M}_{CO_2} \times Ex_{\text{tot}CO_2} + \dot{M}_{H_2O} \times Ex_{\text{tot}H_2O} \quad (22)$$

Table 1. Mass flow rate and percentages of combustion products

CP	M_i , (g)	M_{tot} , (g)	$y_i = \frac{M_i}{M_{tot}}$, (%)	\dot{M}_{CP} , (kg/s)	$\dot{M}_i = \dot{M}_{cp} \cdot y_i$, (kg/s)
N ₂	1868.72	2603.72	71.7712	0.0085	0.006101
H ₂ O	207	2603.72	7.95016	0.0085	0.000676
CO ₂	528	2603.72	20.2787	0.0085	0.001724

2.1.2. Energy and Exergy Analysis of the Chiller

Chiller plants should be sized possible with current cooling loads when used for air-conditioning of the hospitals. The cooling system is used for the cooling process in the summer season in hospital

building. The chiller has three cycles to produce cooling water. The cold water of the chiller is pathed to the main cooling collectors and transfer to the chiller line and air-handling unit (AHU) as shown in Figure 3.

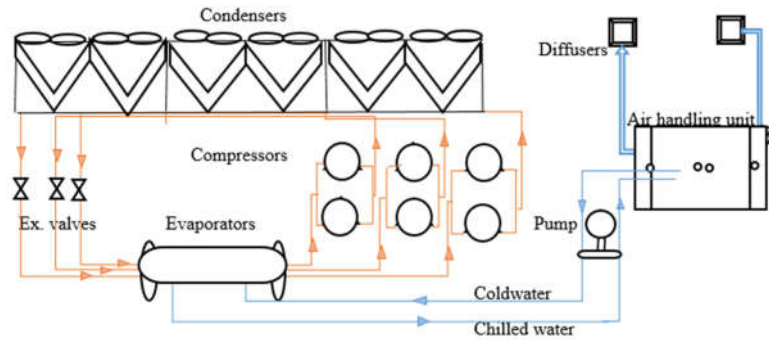


Figure 3. Schematic of a typical cooling system with the chiller, AHU, and diffusers

The cooling system is an air-cooled water chiller as shown in Figure 3. The energy and exergy analysis were done for components of the chiller: compressor, condenser, throttling device, and evaporator. The overall performance of the air-cooled water chiller is also calculated. The potential enhancement of performance of each

component with the energy efficiency is investigating that analysis of the energy and exergy in the air-cooled water chiller [16]. In the chiller, energy and exergy analysis were done according to measured parameters for the components. All equations for the components are given in the Table 2, [17].

Table 2. Equations of energy and exergy analysis for chiller components

Components	Mass Balance	Energy analysis	Entropy	Exergy analysis
Compressor	$\dot{m}_2 = \dot{m}_1$	$W_n = \dot{m}_1 (h_2 - h_1)$	$\phi_1 - \phi_2 = (h_2 - h_1) - T_o (s_2 - s_1)$	$\dot{E}x_{cp} = W_n - [\dot{m}_1 (\phi_1 - \phi_2)]$
Condenser	$\dot{m}_3 = \dot{m}_2 = \dot{m}_1$, $\dot{m}_{ai} = \dot{m}_{ao} = \dot{m}_a$	$Q_{cd} = \dot{m}_3 (h_3 - h_2)$ $= \dot{m}_a c_{pa} (h_{ao} - h_{ai})$	$\phi_2 - \phi_3 = (h_2 - h_3) - T_o (s_2 - s_3)$ $\phi_{ai} - \phi_{ao} = (h_{ai} - h_{ao}) - T_o (s_{ai} - s_{ao})$	$\dot{E}x_{cd} = \dot{m}_3 (\phi_2 - \phi_3) + \dot{m}_a (\phi_{ai} - \phi_{ao})$
Throttling valve	$\dot{m}_4 = \dot{m}_3$	$(h_3 = h_4)$	$\phi_3 - \phi_4 = (h_3 - h_4) - T_o (s_3 - s_4)$	$\dot{E}x_{ex.v} = \dot{m}_3 (\phi_3 - \phi_4)$
Evaporator	$\dot{m}_4 = \dot{m}_3$ $\dot{m}_{wi} = \dot{m}_{wo} = \dot{m}_w$	$Q_{ev} = \dot{m}_4 (h_1 - h_4)$ $= \dot{m}_a c_{pw} (T_{w0} - T_{wi})$	$\phi_1 - \phi_4 = (h_1 - h_4) - T_o (s_1 - s_4)$ $\phi_{wi} - \phi_{wo} = (h_{wi} - h_{wo}) - T_o (s_{wi} - s_{wo})$	$\dot{E}x_{ev} = \dot{m}_4 (\phi_1 - \phi_4) + \dot{m}_w (\phi_{wi} - \phi_{wo})$

Where, \dot{m} is the mass flow rate in chiller kg/s, W_{cp} is the energy of compressor kW, W_n is the power consumption of compressor kW, ϕ is a flow of

exergy kW/kg, h : is the enthalpy kJ/kg, T_o : is the environmental temperature °C, S is the entropy kJ/kg.K. Q_{cd} is the energy of the condenser

kW, Q_{ev} is the energy of the evaporator kW, $c_{p\omega}$ is the specific heat capacity of water kJ/kg.K, c_{pa} is the specific heat capacity of air kJ/kg.K, Ex_{des} is the exergy destruction kW.

The coefficient of performance (COP) used to evaluate overall performance in the air-cooled chiller. COP is calculated as seen from the equation below [18,19] (Equation 23).

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_{c1} + \dot{W}_{c2}} \quad (23)$$

Where, COP is coefficient of performance, \dot{Q}_e is the capacity of the evaporator, and \dot{W}_{c1} , \dot{W}_{c2} are the work of compressors.

2.1.3. Energy and Exergy Analysis of the Air Handling Unit (AHU)

The primary energy demand for heating and cooling of air-conditioning that can be transmitted fluid/air to elements of AHU contains two main supply and exhausts energetic analysis. In addition, AHU is used for heating and cooling processes of air-conditioning in the hospital. The energy equation for AHU can be indicated from follows below [20] (Equations 24, 25 and 26).

$$\dot{E}_{AHU\ water} = [\dot{m}_{AHU\ w} \times (h_{wo} - h_{wi})] \quad (24)$$

$$\dot{E}_{AHU\ air} = [\dot{m}_{AHU\ a} \times (h_{ao} - h_{ai})] \quad (25)$$

$$\eta_{AHU} = \frac{\dot{E}_{AHU\ o}}{\dot{E}_{AHU\ i}} \quad (26)$$

Exergy analysis in the AHU has excellent insulation, heat losses to the environment may be neglected that from elements as shown in Figure 4.

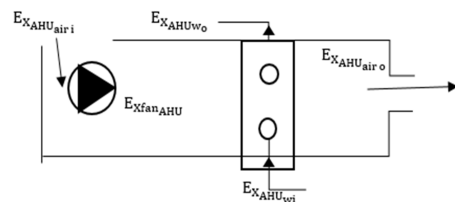


Figure 4. Exergy analysis for inlet and outlet of the AHU

Exergy value for inlet and outlet water in the AHUs can be calculated from the following equations (Equations 27 and 28);

$$Ex_{AHU\ w_i} = \dot{m}_{AHU\ w} [(h_{wi} - h_0) - T_0(S_{wi} - S_0)] \quad (27)$$

$$Ex_{AHU\ w_o} = \dot{m}_{AHU\ w} [(h_{wo} - h_0) - T_0(S_{wo} - S_0)] \quad (28)$$

When calculating the air part in AHU, exergy is assumed to be 0, because the air is drawn from the atmosphere [20]. Exergy for the outlet of AHU as shown in equations below (Equation 29):

$$Ex_{AHU\ air} = \dot{m}_{AHU\ a} [(h_{ao} - h_0) - T_0(S_{ao} - S_0)] \quad (29)$$

The power fan of AHU is equal to (3, 5.5, 11) kW from the catalog values can be using in the calculations, it could be varying according to the size of AHU. The Following of statements, the total exergy equation and exergy efficiency for AHUs have calculated from that the following Equations 30 and 31 [10].

$$Ex_{AHU\ t} = Ex_{AHU\ air_i} + Ex_{AHU\ water_i} + Ex_{AHU\ fan_i} - (Ex_{AHU\ air_o} + Ex_{AHU\ water_o}) \quad (30)$$

$$\eta_{AHU} = \frac{Ex_{AHU\ o}}{Ex_{AHU\ i}} \quad (31)$$

3. RESULT AND DISCUSSION

This study deals with the energy and exergy analysis of HVAC systems in the hospital of Qaladze in Sulaymaniyah from Iraq. The general information and some applications are discussed where that relates to the subject. Analysis of energy and exergy for HVAC systems based on parameters. The parameters are measured during the operating of the HVAC system in the hospital.

3.1. Energy and Exergy Analysis of HVAC System

Energy and exergy analysis of the components of the HVAC system are based on the first and second laws of thermodynamics. Some data are acquired from the working conditions of the component at full load. Inlet and outlet temperature for each device are measured and

recorded. Enthalpy and entropy values are taken from the thermodynamic tables. Water flow rate and energy consumption are read on the label of devices.

3.1.1. Energy and Exergy Analysis of the Boiler

The boiler has a capacity values ranges between 250 kW to 600 kW. Analysis energy and exergy

have consisted of temperature, mass flow (water/fuel), enthalpy, and entropy are measured for some days of month in the hospital. The total amount of analysis energy and exergy of the boiler are given in the Tables 3 and 4. The amount of energy and exergy of the boiler vary according to daily usage of the HVAC system as seen in Figure 3.

Table 3. Energy analysis of the boiler and values of parameters for some days of months

Some days of months	T _{in} °C	T _{out} °C	m _{water} kg/s	m _{fuel} kg/s	Enthalpy h _i kJ/kg	Enthalpy h _o kJ/kg	Energy Ė _{fuel} kW	Energy Ė _{water} kW	Energy boiler losses kW
05-Jan	55	65	7.78	0.0085	230.26	272.12	363.8	325.6	38.22
15-Jan	54	64	7.78	0.0085	230.16	272.08	363.8	326	37.76
28-Jan	52	62	7.5	0.0083	209.54	251.38	353.7	313.8	39.89
06-Feb	53	65	7.78	0.0085	230.06	272.12	363.8	327.1	36.67
18-Feb	52	60	7.5	0.0083	209.54	251.18	353.7	312.3	41.39
27-Feb	54	64	7.78	0.0085	230.16	272.08	363.8	326	37.76
04-Mar	51	60	7.5	0.0083	209.44	251.18	353.7	313.1	40.64
15-Mar	52	62	7.5	0.0083	209.54	251.38	353.7	313.8	39.89
25-Mar	51	60	7.5	0.0083	209.44	251.18	353.7	313.1	40.64
03-Apr	50	60	7.5	0.0083	209.34	251.18	353.7	313.8	39.89

Table 4. Exergy analysis of the boiler and values of parameters for some days of months

Some days of months	T _{in} °C	T _{out} °C	m _{water} kg/s	m _{fuel} kg/s	Enthalpy h _i kJ/kg	Enthalpy h _o kJ/kg	Entropy S _i kJ/kg.K	Entropy S _o kJ/kg.K	Exergy boiler, kW
05-Jan	55	65	7.78	0.0085	230.26	272.12	0.768	0.8937	321.15
15-Jan	54	64	7.78	0.0085	230.16	272.08	0.7585	0.8834	317.37
28-Jan	52	62	7.5	0.0083	209.54	251.38	0.7286	0.8496	322.75
06-Feb	53	65	7.78	0.0085	230.06	272.12	0.7524	0.8937	324.98
18-Feb	52	60	7.5	0.0083	209.54	251.18	0.7286	0.8313	333.7
27-Feb	54	64	7.78	0.0085	230.16	272.08	0.7585	0.8834	320.25
04-Mar	51	60	7.5	0.0083	209.44	251.18	0.7146	0.8313	333.74
15-Mar	52	62	7.5	0.0083	209.54	251.38	0.7286	0.8496	335.52
25-Mar	51	60	7.5	0.0083	209.44	251.18	0.7146	0.8313	333.74
03-Apr	50	60	7.5	0.0083	209.34	251.18	0.7038	0.8313	325.97

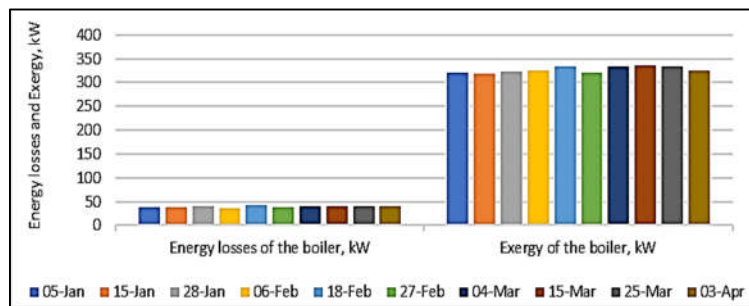


Figure 5. Energy and exergy analysis of the boiler

The terms of energy and exergy losses, of the HVAC systems have different values based on the temperature and mass flow. Figure 5 have more understandable to the amount of energy and exergy losses of the boiler. The boiler has the lowest energy loss and the highest exergy. The amount of energy and exergy from the boiler vary according to working days in the months. The value of energy and exergy of the boiler were 38.22 kW and 321.15 kW, on 05 January, as compared to another day were 39.89 kW and 335.52 kW on 15 March, respectively. The losses of energy and exergy in the boiler can be indicated the great difference among the values of energy and exergy.

3.1.1.1. Thermal Efficiency and Exergy Efficiency of the Boiler

The thermal efficiency and exergy efficiency are dependent on the values of the fluid inlet and the outlet boiler. The thermal efficiency and exergy efficiency of the boiler should be calculated in order to understand how boiler works better. In the literature, thermal efficiency range between 80% and 90% and exergy efficiency range between 15% and 25%. The values of thermal efficiency and exergy efficiency for the boiler are 90% and 23% on 5 January, while they are 89% and 18% on 15 March, respectively. According to the results, the boiler has the optimum working for the heating process of the hospital as seen in Table 5.

Table 5. Thermal efficiency and exergy efficiency of the boiler

Some days of months	Thermal efficiency boiler, η_b (%)	Exergy efficiency boiler, ξ_b (%)
05-Jan	90	23
15-Jan	90	23
28-Jan	89	20
06-Feb	90	22
18-Feb	88	17
27-Feb	90	22
04-Mar	89	17
15-Mar	89	18
25-Mar	89	17
03-Apr	89	16

The difference between thermal efficiency and exergy efficiency can be investigated that the work's boiler. The recommendation values of the boiler thermal efficiency above were 89%, and exergy efficiency under was 23%, which can be provided to a comfort air-conditioning in the hospital during the winter season.

3.1.2. Energy and Exergy Analysis of the Chiller

The chiller has a capacity value (180 tons of refrigeration and 633 kW) that was used for air-cooling in the hospital. The air-cooled water chiller at the actual operation was investigated to determine the power consumption of the compressors, the heat capacity of the evaporators and condensers, and the COP of the chiller. The determination data used to verify the accuracy of the simulation results given at working the devices

of the HVAC system. The amount calculation of energy and exergy are given in the Tables 6 and 7 for air-cooled chiller. Consequently, the amount of energy and exergy can be varied according to the temperature given on the daily working of devices, as seen from the tables and figures below.

The energy analysis are given in the Table 6. The amount of energy of the air-cooled water chiller. varies with days for each month. The amount of energy of the chiller components such as the condenser, evaporator, and compressors were 751.43 kW, 631.63 kW and 119.799 kW on 20 June, while compared to another day were 766.51 kW, 630.68 kW and 135.828 kW on 30 July, respectively. According to the results, there are a great difference among the amounts energy of the chiller components of the days on monthly as seen from Figure 6.

Table 6. Energy analysis of the chiller and values of parameters for some days of months

Some days of months	Te °C	Tc °C	m kg/s	h ₁ kJ/kg	h ₂ kJ/kg	h _{3,4} kJ/kg	Q _{Cd} kW	Q _{ev} kW	W _{Cpt} kW
20-Jun	2	43	4.59	398.44	424.54	260.83	751.43	631.63	119.799
25-Jun	2	48	4.72	398.44	426.85	268.36	748.07	613.98	134.095
30-Jun	2	45	4.64	398.44	425.48	263.57	751.26	625.8	125.466
05-Jul	5	47	4.71	400.15	426.16	266.65	751.29	628.79	122.507
10-Jul	5	45	4.62	400.49	425.48	263.57	748.02	632.57	115.454
20-Jul	5	48	4.78	400.49	426.85	268.36	757.58	631.58	126.001
30-Jul	5	50	4.9	400.15	427.87	271.44	766.51	630.68	135.828
08-Aug	2	49	4.9	398.44	427.53	269.73	773.22	630.68	142.541
14-Aug	2	51	5	398.78	428.9	272.8	780.5	629.9	150.6
25-Aug	2	48	4.72	398.44	426.85	268.36	748.07	613.98	134.095

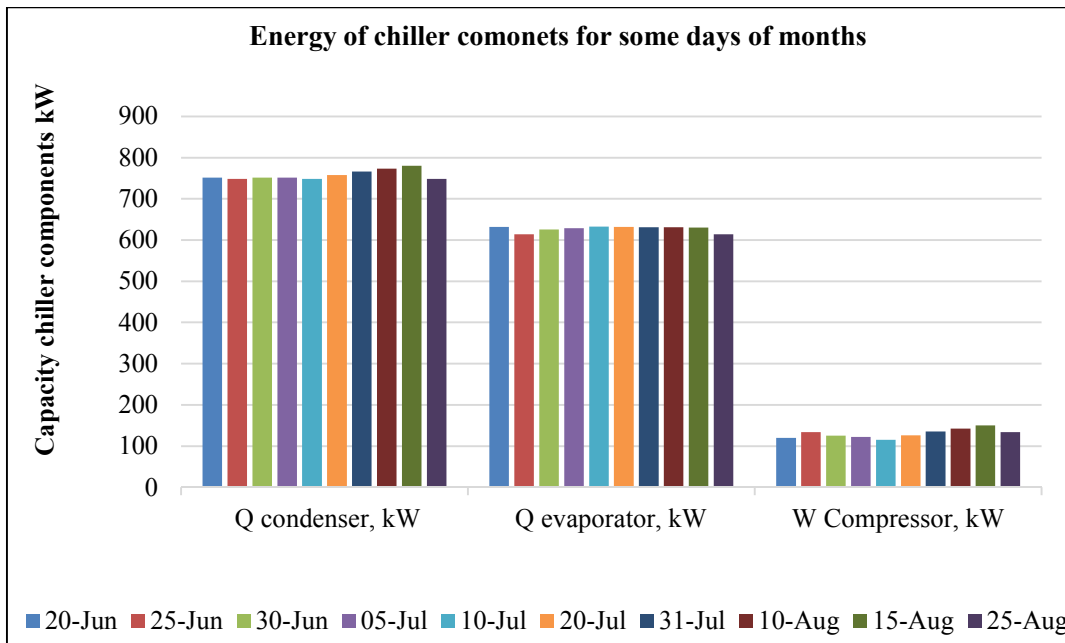


Figure 6. Energy analysis for chiller components

Figure 6 shows that increase or decrease the energy value for the chiller components among days on monthly. The parameters can be raising and lowering of the chiller components depended on the temperature value and mass flow on the daily working chiller. The figure above is indicated the energy value among the components since the compressor is lower than both of them.

The Table 7 presents exergy analysis of the chiller. The amount of exergy components in the air-

cooled water chiller are different for each day of month. The values of exergy for the components of chiller such as compressors, condenser, expansion valve, and evaporator were 88 kW, 48.9 kW, 23.9 kW, and 16.2 kW; on 20 June, while compared to another day were 93.9 kW, 53.1 kW, 27.5 kW, and 20.7 kW on 8 August, respectively. According to the results, raising and lowering of the parameter values are dependent on the temperature and mass flow, as seen from Figure 7.

Table 7. Exergy analysis of the chiller and values of parameters for some days of months

Some days of months	T_e °C	T_c °C	m kg/s	h_1 kJ/kg	h_2 kJ/kg	$h_{3,4}$ kJ/kg	$s_{1,2}$ kJ/kg.K	s_3 kJ/kg.K	s_4 kJ/kg.K	$\dot{E}x_{cp}$ kW	$\dot{E}x_{cd}$ kW	$\dot{E}x_{ex.v}$ kW	$\dot{E}x_{ev}$ kW
20-Jun	2	43	4.6	398.4	424.5	260.8	1.72	1.204	1.22	88	48.9	23.9	16.2
25-Jun	2	48	4.7	398.4	426.9	268.4	1.72	1.227	1.25	83.6	47.8	32.3	14.9
30-Jun	2	45	4.6	398.4	425.5	263.6	1.72	1.213	1.23	80.6	49.2	25.7	16
05-Jul	5	47	4.7	400.2	426.2	266.7	1.72	1.222	1.24	90.2	48.9	26.3	16.4
10-Jul	5	45	4.6	400.5	425.5	263.6	1.72	1.213	1.25	88.1	48.9	22.8	16.1
20-Jul	5	48	4.8	400.5	426.9	268.4	1.72	1.227	1.25	83.4	48.4	28.2	16.4
30-Jul	5	50	4.9	400.2	427.9	271.4	1.72	1.237	1.26	93.9	52.2	30.7	16.8
08-Aug	2	49	4.9	398.4	427.5	269.7	1.72	1.232	1.25	83.2	53.1	27.5	20.7
14-Aug	2	51	5	398.8	428.9	272.8	1.72	1.241	1.27	90.7	49.5	37.7	16.5
25-Aug	2	48	4.7	398.4	426.9	268.4	1.72	1.227	1.25	92.7	47.8	32.3	14.9

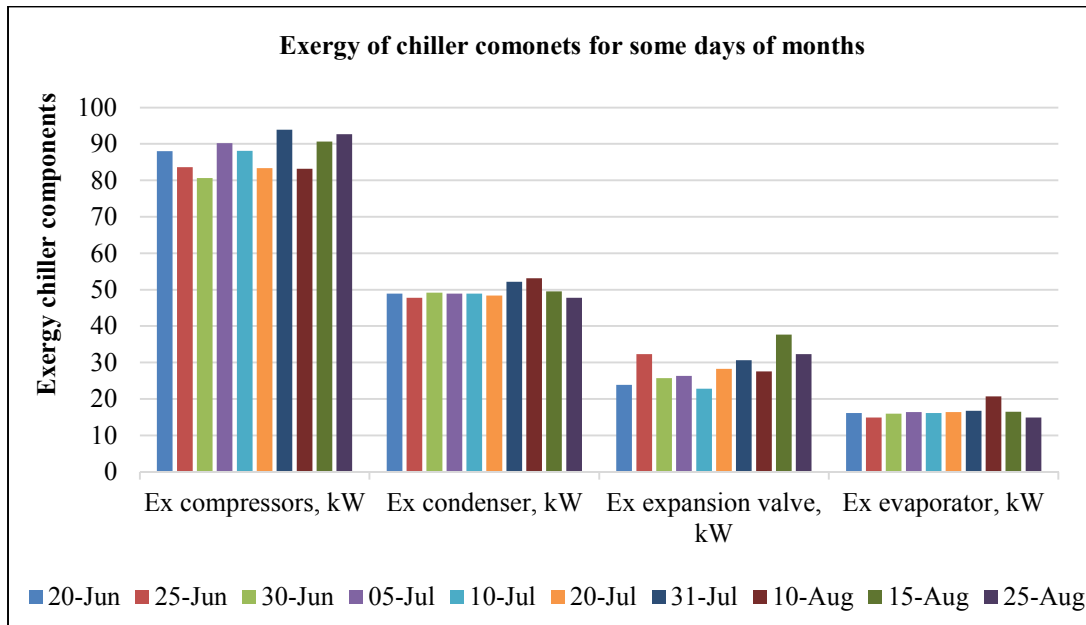


Figure 7. Exergy Analysis of the chiller components

Figure 7 shows that raising and lowering the amount of exergy of the chiller components for some days of monthly. In the figure above the amount of exergy in the evaporator is lower than all components, but exergy compressors are higher than all components of the air-cooled water chillers.

3.1.2.1. Coefficient of Performance (COP) of the Chiller

Table 8 gives that the amount coefficient of performance COP, and COP Carnot, for the air-

cooled chiller. The values of COP actual and COP Carnot are 5.3 and 6.71 on 20 Jun, as compared to another day are 4.6 and 6.18 on 30 Jul, respectively. According to Figure 8, the amount of COP Carnot greater than COP actual. The overhead results are showed that changing the values among the chiller components.

Table 8. Coefficient of performance value of the chiller

Some days of months	$T_e, ^\circ\text{C}$	$T_c, ^\circ\text{C}$	$\text{COP}_{\text{Actual}}$	$\text{COP}_{\text{Carnot}}$
20-Jun	2	43	5.3	6.71
25-Jun	2	48	4.6	5.98
30-Jun	2	45	4.9	6.39
05-Jul	5	47	5.1	6.62
10-Jul	5	45	5.5	6.95
20-Jul	5	48	5.0	6.47
30-Jul	5	50	4.6	6.18
08-Aug	2	49	4.4	5.85
14-Aug	2	51	4.2	5.6
25-Aug	2	48	4.6	5.98

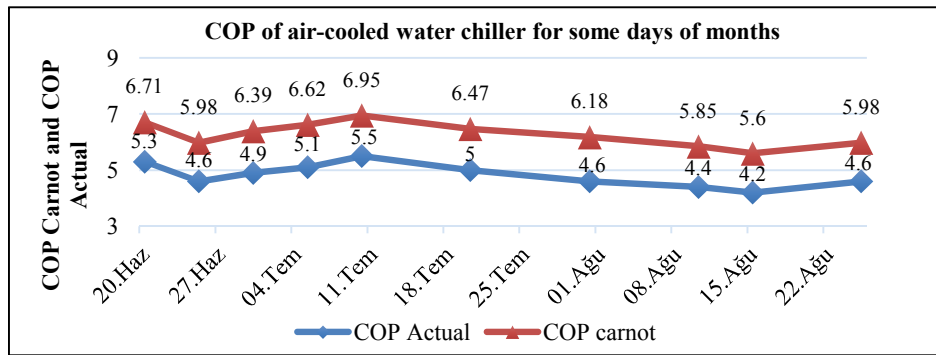


Figure 8. $\text{COP}_{\text{Actual}}$ and $\text{COP}_{\text{Carnot}}$ of the air-cooled water chiller

3.1.3. Energy and Exergy Analysis of the AHU

The energy and exergy values for fluid/air inlet and outlet of AHU are given that considered from the Tables 9 and 10. The values of energy and exergy are indicated from the results, and the most exergy interaction occurs at inlet and outlet in the AHUs. Energy and exergy losses of the AHUs have different values on the days of months in the

hospital. The AHU has the highest energy loss and the lowest exergy losses. The amount of energy and exergy losses of the AHU were 25.1 kW and 11.24 kW, on 05 January month, as compared to another day were 26.1 kW and 10.94 kW on 25 March month respectively. The AHU has a grate differentiable between the amount of energy and exergy as seen in Figure 8.

Table 9. Energy analysis of the AHU and values of parameters for some days of months

Some days of months	T_{in} °C	T_{out} °C	\dot{m}_{wAHU} kg/s	$\dot{m}_{\text{air AHU}}$ kg/s	Enthalpy h_i kJ/kg	Enthalpy h_o kJ/kg	Energy $\dot{E}_{\text{AHU water}}$ kW	Energy $\dot{E}_{\text{AHU Air}}$ kW	Energy E_{AHUL} kW
05-Jan	60	50	0.6	0.999	251.18	209.34	150.71	125.6	25.1
15-Jan	60	49	0.5	0.999	251.18	198.89	125.59	99.45	26.1
28-Jan	59	48	0.5	0.999	240.72	198.89	120.36	99.45	20.9
06-Feb	58	48	0.6	0.999	240.72	198.89	144.43	119.3	25.1
18-Feb	55	45	0.5	0.999	230.26	188.44	115.13	94.22	20.9
27-Feb	57	49	0.6	0.999	240.72	198.89	144.43	119.3	25.1
04-Mar	55	45	0.5	0.999	230.26	188.44	115.13	94.22	20.9
15-Mar	59	47	0.6	0.999	240.72	198.89	144.43	119.3	25.1
25-Mar	58	45	0.5	0.999	240.72	188.44	120.36	94.22	26.1
03-Apr	60	48	0.5	0.999	251.18	198.89	125.59	99.45	26.1

Table 10. Exergy analysis of the AHU and values of parameters for some days of months

Some days of months	T _{in} °C	T _{out} °C	m _{wAHU} kg/s	m _{air AHU} kg/s	Enthalpy h _i kJ/kg	Enthalpy h _o kJ/kg	Entropy S _i kJ/kg.K	Entropy S _o kJ/kg.K	Exergy fan kW	Exergy Ex _{AHUt} kW
05-Jan	60	50	0.6	0.999	251.18	209.34	0.8313	0.7038	5.5	11.24
15-Jan	60	49	0.5	0.999	251.18	198.89	0.8313	0.6712	5.5	11.41
28-Jan	59	48	0.5	0.999	240.72	198.89	0.7997	0.6712	5.5	10.03
06-Feb	58	48	0.6	0.999	240.72	198.89	0.7997	0.6712	5.5	10.54
18-Feb	55	45	0.5	0.999	230.26	188.44	0.768	0.6386	5.5	9.707
27-Feb	57	49	0.6	0.999	240.72	198.89	0.7997	0.6712	5.5	10.03
04-Mar	55	45	0.5	0.999	230.26	188.44	0.768	0.6386	5.5	9.61
15-Mar	59	47	0.6	0.999	240.72	198.89	0.7997	0.6712	5.5	10.03
25-Mar	58	45	0.5	0.999	240.72	188.44	0.7997	0.6386	5.5	10.94
03-Apr	60	48	0.5	0.999	251.18	198.89	0.8313	0.6712	5.5	11.29

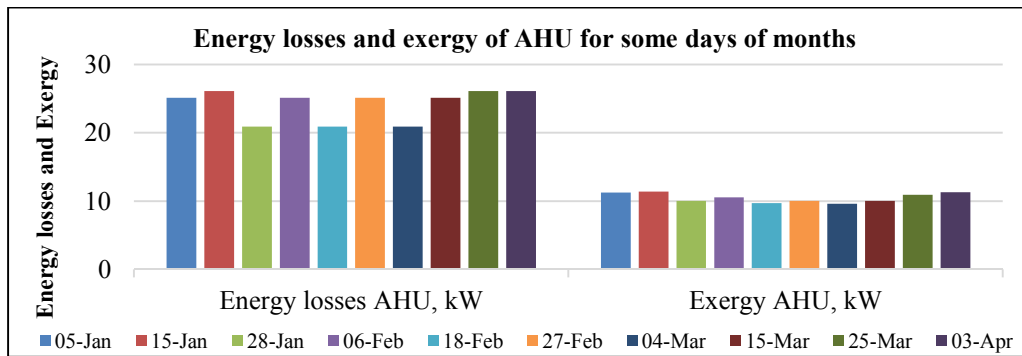


Figure 9. Energy and exergy analysis of the AHU

3.1.3.1. Energy and Exergy Efficiency of the AHU

The energy efficiency and exergy efficiency value of the AHUs are given in Table 11. To understand better that the amount of energy efficiency and exergy efficiency are used to specify the work of the AHU according to first and second laws of

thermodynamics. Besides, the first and second laws are used to calculating energy efficiency and exergy efficiency as shown in Table 11. The values of energy and exergy efficiencies for the AHU were 83% and 33% on 5 January, while compared to another day were 83% and 23% on 15 March, respectively.

Table 11. Energy efficiency and exergy efficiency values of the AHU

Some days of months	Energy efficiency AHU, η _{AHUI} (%)	Exergy efficiency AHU, η _{AHUII} (%)
05-Jan	83	33
15-Jan	79	23
28-Jan	83	26
06-Feb	83	28
18-Feb	82	22
27-Feb	83	23
04-Mar	82	21
15-Mar	83	23
25-Mar	78	19
03-Apr	79	22

4. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The evaluation of HVAC systems used in the hospital Qaladeze in Sulaymaniyah, Iraq was done by using energy and exergy analysis in this study. The first and second laws of thermodynamics are used in energy and exergy analysis of HVAC systems. Energy and exergy analysis were done in the boiler, chiller, and AHU as components of the HVAC system in the hospital. The maximum value of energy efficiency and exergy efficiency of the boiler are 90% and 23%, respectively. The maximum COP of the chiller is calculated as 5.5. The maximum energy efficiency and exergy efficiency of AHU are 83% and 33%, respectively. The results showed the working conditions of each component of the HVAC system have a significant effect on the analysis of energy and exergy.

There are general recommendations for energy and exergy of HVAC system applications in the hospital:

- HVAC systems should be ensure attended that to specify room conditions for example through heating, cooling, air filtration, air distribution, airflow rates, and air exchange rates in the room of hospitals.
- Air-handling units (AHUs) should be provided to sufficiently designed drains to remove any condensate that may be formed in them.
- Where possible, ducting, piping, fittings, sensors and other components should be marked or labeled for ease of documentation, indicating location, and direction of flow must be suitable.
- Return and exhaust filters, and grilles are selected and installed that should be a suitable design for cleaning and maintenance in the rooms.
- The air in the rooms was polluted that with organic solvents or highly hazardous materials should normally not be recirculated.
- HEPA filters may be installed (in the supply air stream or return air stream) to remove pollutants and thus prevent cross pollution. The filter selection should be suitable for their

intended use and classified according to the modern international classification system.

- Air should not flow through the dust extraction ducting or return air ducting from the room with higher pressure to the room with lower pressure.
- Operation and maintenance manuals of the HVAC system should be available to procedures and kept up to date with details of any system made revisions.
- Each equipment of AHU (i.e. fan, coil, filter, and humidifier) should be checked at working periodically.
- Consequently, all ducts and pipes should be checked that of surface coating damage caused by insulation, corrosion, and scratching.
- Sometimes ducts have air leakage due to more problems such as properly all openings in an air-handling cabinet, joints in the duct system, joints where ducts meet register flares, and openings are penetrated the room.

5. REFERENCES

1. Alhazmy, M.M., 2006. The Minimum Work Required for the Air Conditioning Process, *Energy*, 31, 2739-2749.
2. Özgener, L. Hepbaşlı, A., 2003. HVAC Sistemlerinde Ekserji Analizinin Gerekliliği ve Uygulamaları. VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, İzmir, Turkey, 16(1), 3-12. [in Turkish].
3. Kanoğlu, M., Çarpınlioğlu, M.O., Yildirim, M., 2004. Energy and Exergy Analyses of an Experimental Open-cycle Desiccant Cooling System, *Applied Thermal Engineering*, 24, 919-932.
4. Aydin, M., Reis, A.H., Miguel, A.F., 2007. Effect of Flow with Suspended Particles on Convective Heat Transfer and Exergy Balance, *International Journal of Energy Research*, 33(2), 180-185.
5. Şahin, H.M., Acir, A., Baysal, E., Koçyiğit, E., 2007. Evaluation of Energy Efficiency in Kayseri Sugar Plant by Method of Energy and Exergy Analyses, *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, 2(1), 111-119.

6. Demircioğlu, A., 2010. Theoretical Investigation of Performances of R22, R407c, and R410a, Which are Substitutes for R22 in a Heat Pump. Gazi University Graduate School of Natural and Applied Sciences, 109, 4-10.
7. Menlik, T., Demircioğlu, A., Özkaya, M.G., 2013. Energy and Exergy Analyses of R22 and its Alternatives R407c and R410a in a Vapor Compression Refrigeration System, Int. J. Exergy, 12(1), 11-30.
8. Çengel, Y.A., Boles, M.A., 2008. Thermodynamics an Engineering Approach. 5th Edition Güven Yayınevi, İzmir, 1, 402-621.
9. Çomaklı, K. Karslı, S. Yılmaz, M. Çomaklı, Ö., 2007. Termal Sistemlerde Ekserji Verimi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2, 25-34 [in Turkish].
10. Ergün, A., 2010. Energy and Exergy Analyses of a Shopping Center Which Needs 80.000 m² Heating and Cooling, Gazi University Graduate School of Natural and Applied Sciences, 30(6), 506-515.
11. Çomaklı, K., Yüksek, B., 2002. Kazanlarda Ekserji Analizi, Tesisat Mühendisliği, 33-37 [in Turkish].
12. Çalışkan, H., Tat, E.M., Hepbaşlı, A., 2009. Performance Assessment of Internal Combustion Engine at Varying Dead (reference) State Temperatures, Applied Thermal Engineering, 29, 3431-3436.
13. Kotaş, T.J., 1985. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Butter-Worths, London.
14. United Nations Economic Commission For Europe, 1978. Energy Consumption in the Forest Industries of the ECE Region. Paper presented at the seminar on Energy Aspects of the Forest Industries in Udine, Italy.
15. Ergün, A., Menelik, T., Özkaya, M.G., 2015. Energy and Exergy Analyses of the Heating System in a Multipurpose Building. 2, 77-84.
16. Wu, W.C., Lee, T.S., Chuah, Y.K., Wang, S.K., 2010. Improvement of Airflow and Heat Transfer Performance of Multi-coil Condensers by Different Coil Configurations, Int. J. Refrig, 14, 517-532.
17. Brown, M.W., Bansal, P.K., 2001. An Elemental NTU- ϵ Model for Vapour-compression Liquid Chillers, Int. J. Refrig, 24, 612-627.
18. Lee, T.S., 2010. Second-law Analysis to Improve the Energy Efficiency of Screw Liquid Chillers, Entropy, 12, 375-389.
19. Wu, W.C., Lee, T.S., Chang, C.H., 2012. Energy and Exergy Analysis for Improving the Energy Performance of Air-cooled Liquid Chillers by Different Condensing-coil Configurations, National Taipei University of Technology, Taipei 10608P. Taiwan.
20. Altundağ, A., Gedik, E., Ergün, A., Arslan, K., Ekiciler, R., 2015. Exergy Analysis of Heating Line of Surgery Air Handling Unit in a Hospital. Karabük Üniversitesi, Electronic Journal of Machine Technologies, 12(4), 103-114.

İnsan Kaynakları Departmanı için Etmen Tabanlı Sistem Tasarımı

Melek IŞIK*¹

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

Geliş tarihi: 10.04.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

İşletmelerin verimli bir şekilde faaliyetlerini devam ettirebilmeleri iyi bir insan kaynakları yönetimi sayesinde gerçekleşmektedir. İnsan kaynaklarının akıllı sistemler üzerinden yönetilmesi ile işlemler daha hızlı ve bütüncül yürütülmektedir. İnsan kaynakları gibi karmaşık bir sistemin tasarım ve uygulamasında özerk akıllı etmen sistemlerinin kullanımı yaşanan problemleri çözmek açısından önemlidir. Bu bakış açısıyla, bu çalışmada, etmen tabanlı yaklaşımlardan biri olan Prometheus metodolojisi uygulanarak işletmelerdeki insan kaynakları departmanında yapılan işler için bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Prometheus metodolojisinin ve geliştirme ortamının sistem içerisinde uyumluluğu detaylandırılmış ve elde edilen tasarım gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Etmen tabanlı sistemler, İnsan kaynakları, Prometheus

Agent Based System Design for the Human Resources Department

Abstract

By virtue of a good human resources management that businesses can continue their activities efficiently. Operations are carried out faster and more integrative by managing human resources through intelligent systems. The use of autonomous intelligent agent systems in the design and implementation of a complex system such as human resources is important in solving the problems experienced. From this point of view, in this study, a design is realized for the jobs applied in the human resources department of the enterprises by applying Prometheus methodology, which is one of the agent-based approaches. The compatibility of Prometheus methodology and development environment within the system is detailed and the obtained design is demonstrated.

Keywords: Agent based systems, Human resources, Prometheus

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Melek IŞIK, demirtasm@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Toplumsal, ekonomik ve sosyal hayatta teknolojiye yaşanan gelişmeler ile birlikte birçok değişim meydana gelmektedir. İnsan kaynakları yönetimi de bu değişimlere uğrayan alanlar arasında yer almaktadır. Son dönemlerde, işletmelerdeki insan kaynakları yönetim birimleri, faaliyetlerini yürütürken iki şeyden yararlanmaktadır. Bunlardan birisi bilgisayarlardan diğeri ise elektronik ortamdan oluşmaktadır [1].

İşletmelerdeki insan kaynakları işlevleri için elektronik olarak kolaylık sağlayan yapay zeka yaklaşımı ile daha hızlı çözümler sağlanabilmektedir. Bu yaklaşımlardan bir tanesi de etmen tabanlı sistem tasarımıdır. Etmen; “Özerk aktiviteler yapabilen ve bir yazılım ortamına aktarılabilen ayrıca hedef ve isteklerine ulaşabilme gibi yeteneklere sahip bir bilgisayar sistemidir.” [2]. Bir amacı veya görevi olan etmenler yapılması gereken planlarını gerçekleştirmek için sistem içerisinde beklerler [3]. Diğer yazılımlar veya bilgisayarlarla iletişime geçen etmenler hedeflerine ulaşırlar ve görev için hazırda beklerler ayrıca kendi amaçları doğrultusunda girişimde bulunurlar [4]. Etmenleri diğer yazılım parçalarından ayıran en önemli özellikleri; özerk olmak, konumlanmak, tepkisellik ve esnekliktir [5].

Literatürde, bu çalışmada olduğu gibi insan kaynakları yönetimi ve etmen tabanlı sistemleri birleştiren çalışmalar çok sınırlıdır. Parker ve Caine [6] basit bir insan kaynakları problemini çözmek için iki alternatif metodolojiyi karşılaştırmıştır. Çalışmada, Markov analizini kullanan geleneksel yaklaşımın karmaşık olduğu ve karar vericiye çok az şey aktardığı gösterilmiştir. Etmen sistem yaklaşımı olan holonik sistem dinamiği yaklaşımının oluşturulması daha kolay ve esneklik sağlayarak karar vericiye kapsamlı bir bakış açısı sağlamıştır. Padgham ve arkadaşları [7] konferans yönetim sistemi ile ilgili Prometheus etmen uygulamasını kullanarak hizmet sektöründe tasarım yapmışlardır. Farklı bir bakış açısıyla bakıldığında, Rahman ve Mahmood [8] bir binada tahliye planlaması yapabilmek için Prometheus

metodolojisi kullanmışlardır. Talib ve arkadaşları [9] temel amacı gizlilik ve doğruluk olan bulut veri depolamasının kullanılabilirliği ve bütünlüğünü kolaylaştırmak için Prometheus ile etmen tabanlı sistem tasarlamışlardır. Kaymak ve arkadaşları [10] ise etmen tabanlı sistem tasarım araçlarından olan Prometheus yazılım geliştirme metodolojisini uygulayarak Kanı-İstek-Hedef modeline dayalı çok etmenli sistemin tasarım ve uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, örnek kütüphane yönetim sisteminin tasarımı için metodolojideki aşamalar gösterilmiştir. Larioui ve Byed [11] ise birden fazla noktası olan bir ağda karar verme ve rota planlamanın iyi bir şekilde yapılması için Prometheus ile akıllı bir çözüm yolu geliştirmişlerdir.

Literatür incelendiğinde etmen tabanlı sistemlerin Prometheus yöntemi ile işletmelerdeki departmanlar için yapılan çalışmalar yok denecek kadar kısıtlıdır. Bu çalışmada ise, Doğan'ın [1] çalışmasındaki elektronik insan kaynakları yönetimi unsurları için etmen tabanlı sistem tasarım aracı olan Prometheus yazılımı ile problem ele alınmıştır. Bu tasarım ile amaç, etmen sistem aracılığı ile işletmelerdeki insan kaynakları yönetimi işleyişinde daha hızlı ve doğru yöntemler kullanabilmektir.

2. YÖNTEM

Klasik modelleme ve tasarlama sistemlerinden farklılık gösteren sistemlerden birisi de etmen tabanlı sistemlerdir. Etmen tabanlı sistemler için özel tasarım şablonları kullanılmaktadır. Özel şablonlardan biri olan Prometheus, sistemlerin tasarımının yapılmasında ve uygulanmasında önemli rol oynamaktadır. Prometheus metodolojisini tasarlamak için yine aynı isimle bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yöntemde; sistem spesifikasyonları, mimari tasarım ve ayrıntılı tasarım olmak üzere üç temel aşama mevcuttur [12].

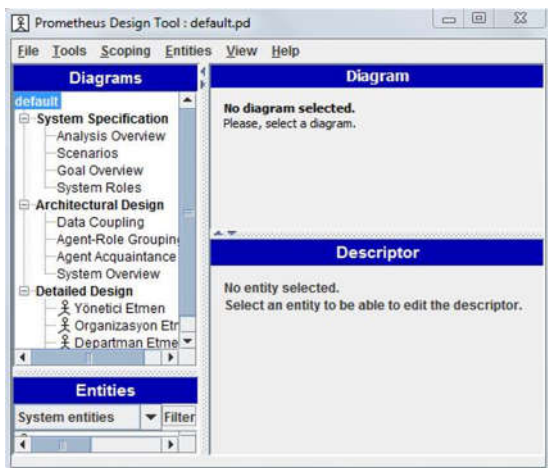
Prometheus yönteminin sistem spesifikasyonlarını belirleme aşaması, sistemin hedefleri ve temel fonksiyonları üzerine odaklanmaktadır. Bu aşamada aynı zamanda etmen tabanlı sistemin

çevre birimlerle olan iletişim ara yüzleri hazırlanmaktadır. “System specifications” paneli üzerinden sistem spesifikasyonları ana menüsü kullanılarak sistem başlangıç bilgileri girilmektedir.

Mimari tasarım aşamasında, sistemde bulunan etmen tipleri belirlenmektedir. Etmenlerin kendi arasında nasıl iletişimde olacağı sistem spesifikasyonları bölümünden gelen bilgiler ile belirlenmektedir.

Ayrıntılı tasarım aşamasında, etmenlerin detay tasarımı ve sistem içerisindeki işleri nasıl organize edeceği belirlenmektedir. Bu aşamada etmen tiplerinin karşılaştıkları durumlar karşısında hangi planlarını çalıştıracakları ayrıntılı bir şekilde tasarlanmaktadır. Etmenlerin gerçekleştireceği planlar, başka etmenlerden gelecek mesajlar ile tetiklenerek uygulanmaktadır. Mesajlar, etmenlerin kendi içerisinde veya başka etmenler ile müzakeresi sonucunda iletilmektedir.

Etmen tabanlı sistemlerin tasarımında en yaygın kullanılan Prometheus yöntemini içeren yazılımın adı Prometheus Tasarım Aracıdır (Prometheus Design Tool-PDT). Şekil 1’de yazılımın genel görünümü gösterilmiştir.



Şekil 1. Prometheus sistem paneli

Bu çalışmada, Prometheus etmen tabanlı tasarım yazılımı kullanılarak insan kaynakları departmanındaki işleyişi ele alan kavramsal model

geliştirilmiştir. Bu model ile yapılan işler için elektronik olarak yönetim sağlanacaktır.

3. KAVRAMSAL MODELİN PROMETHEUS YAZILIMI İLE TASARLANMASI

3.1. Sistem Spesifikasyonları Aşaması

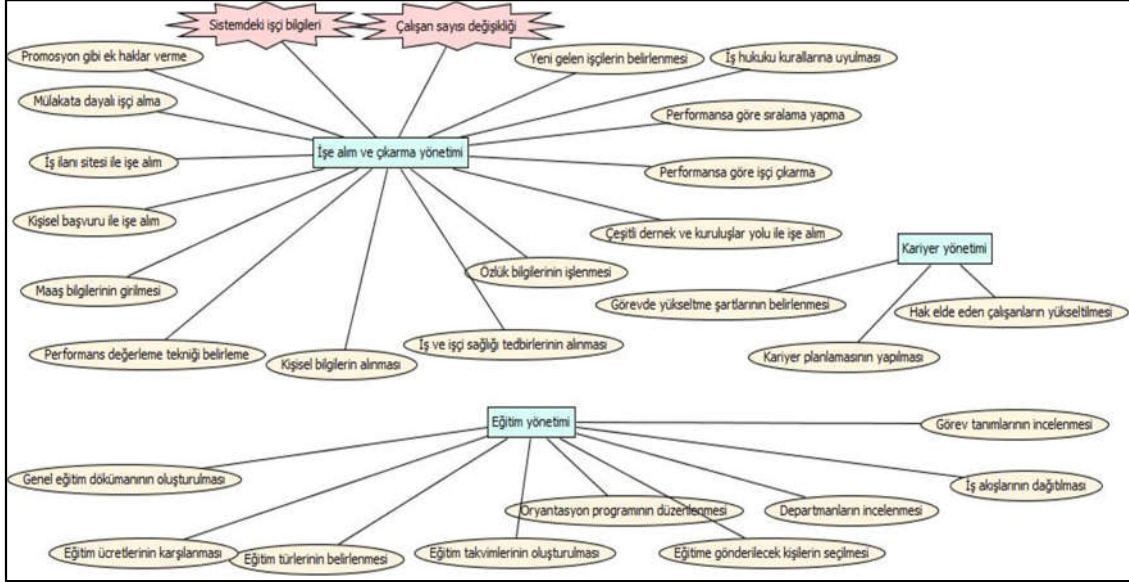
Prometheus yönteminin ilk aşaması olan sistem spesifikasyonları aşamasında, senaryolar, hedefler ve alt hedefler ayrıca bu hedefleri gerçekleştirecek roller belirlenmektedir. Öncelikle, senaryolar oluşturularak modele başlanır. Bu senaryoları gerçekleştirecek hedefler ortaya konur ve bir yol haritası çizilmiş olunur.

İnsan kaynakları departmanlarında yapılan işlemlerin hangi işler olduğu konusunda Doğan’ın [1] çalışması bizi yönlendirmiştir. Tespit edilen hususlara göre sistemde yapılması hedeflenen senaryolar oluşturulmuştur. Oluşturulan senaryolar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

- Mülakata dayalı işçi alma,
- Performansa göre işçi çıkarma,
- Özlük bilgilerinin işlenmesi,
- Eğitim takvimlerinin oluşturulması,
- Oryantasyon programının düzenlenmesi,
- Kariyer planlamasının yapılması.

Sistem senaryolarının gerçekleşmesi durumunda hangi rollerin aktif olacağı bu panel üzerinde belirlenmektedir. Senaryolara göre hazırlanan sistemdeki hedefler ve rol tanımlamaları Şekil 2’deki gibi tanımlanmıştır.

İnsan kaynakları için olması gereken roller üç başlık altında toplanmıştır. Sistemdeki insan kaynakları rol tanımları; “işe alım ve işten çıkarma yönetimi”, “eğitim yönetimi” ve “kariyer yönetimi” gibi tanımlanmaktadır. Her bir rolün altında gerçekleştirilmesi gereken hedefler mevcuttur. Böylece, insan kaynakları için gerçekleştirilmesi gereken hedefler bir role atanarak işlemler gruplandırılmış ve hangi işlemlerin yapılacağı belirlenmiştir.



Şekil 2. Sistem rol tanımlamaları

İşe alım ve çıkarma yönetimi rolündeki hedefler aşağıda sıralanmıştır:

- Mülakata dayalı işçi alımı,
- Yeni gelen işçilerin belirlenmesi,
- İş ilanı sitesi ile işe alım,
- Kişisel başvuru ile işe alım,
- Çeşitli dernek ve kuruluşlar yolu ile işe alım,
- Performansa göre işçi çıkarma,
- Performans değerlendirme tekniği belirleme,
- Performansa göre sıralama yapma,
- Promosyon gibi ek haklar verme,
- Özlük bilgilerinin işlenmesi,
- Kişisel bilgilerin alınması,
- Maaş bilgilerinin girilmesi,
- İş hukuku kurallarına uyulması,
- İş ve işçi sağlığı tedbirlerinin alınması,

Eğitim yönetimi rolündeki hedefler ise şunlardır:

- Eğitim takvimlerinin oluşturulması,
- Eğitime gönderilecek kişilerin seçilmesi,
- Eğitim türlerinin belirlenmesi,
- Eğitim ücretlerinin karşılanması,
- Oryantasyon programının düzenlenmesi,
- Genel eğitim dokümanının oluşturulması,
- Departmanların incelenmesi,
- Görev tanımlarının incelenmesi,

- İş akışlarının dağıtılması,

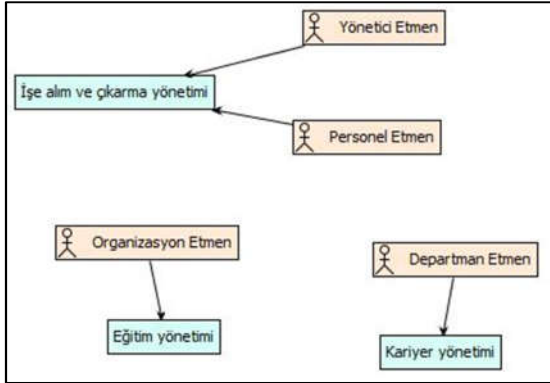
Kariyer yönetimi rolündeki hedefler de aşağıda belirlendiği gibidir:

- Kariyer planlamasının yapılması,
- Görevde yükselme şartlarının belirlenmesi,
- Hak elde eden çalışanların yükseltilmesi.

Sistemdeki işçi bilgileri ve çalışan sayısı değişikliği gibi sistem başlangıç bilgileri bu aşamada yazılım üzerinde tasarlanmaktadır. Bu hedefler gerçekleştirildiğinde insan kaynakları departmanı açısından işletmelere daha hızlı bilgi akışının sağlanması ve elektronik olarak bir bütün şeklinde sistemin yönetilmesi amaçlanmaktadır. İşgücü tasarrufu sağlanarak daha yetkin elemanlar yetiştirilecektir. Böylece insan kaynakları departmanı daha verimli bir iş planı ile yönetilmiş olacaktır.

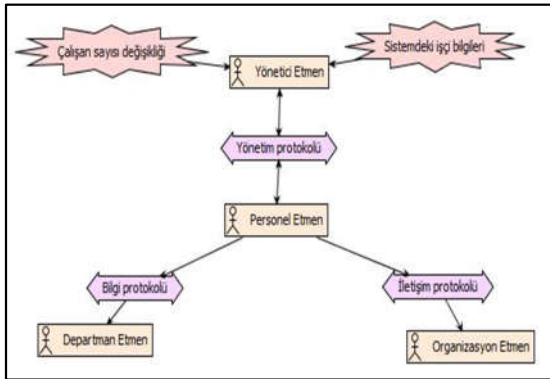
3.2. Mimari Tasarım Aşaması

Bu aşama, sistem spesifikasyonları aşamasında belirlenen rolleri ve etmenleri belirleyerek gruplandırmaktadır. Etmenler belirlendikten sonra etmenler arasında protokoller yazılarak müzakere sistemi oluşturulmaktadır. Şekil 3'te etmen ve rol tanımlamaları görülmektedir.



Şekil 3. Rol etmen bağlantıları

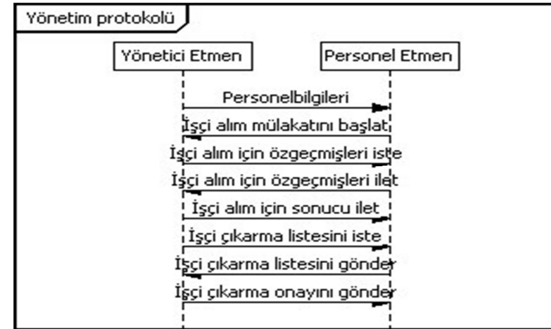
Şekil 3'te işe alım ve işten çıkarma yönetimi Yönetici Etmen ve Personel Etmen tarafından yürütülmektedir. Ayrıca Organizasyon Etmen eğitim yönetimi rolünü ve Departman Etmen de kariyer yönetimi rolünü üstlenmiştir. Şekil 4'de ise etmenler ve aralarındaki protokoller gösterilmektedir. Yönetici Etmen ve Personel Etmen arasında yönetim protokolü, Personel Etmen ve Departman Etmen arasında bilgi protokolü, Personel Etmen ve Organizasyon Etmen arasında iletişim protokolü mevcuttur. Bu protokollerde mesajlaşma yöntemi ile birbirleri arasında etkileşim söz konusu olmaktadır. Çalışan sayısı değişikliği ve sistemdeki işçi bilgileri de Yönetici Etmen tarafından işleme alınmaktadır.



Şekil 4. Etmenler ve protokollerin gösterimi

Etmen tipleri kendilerine gelen çevresel olayları çözerken diğer etmen tipleri ile etkileşime geçmektedirler. Şekil 5'de Yönetici Etmen tipi ile Personel Etmeni arasındaki müzakere protokolü

görülmektedir. Etmenler arasındaki iletişim de kurulduktan sonra sistemimizin mimari tasarım aşaması tamamlanmış olmaktadır. Bu şekilde insan kaynakları için iletişim halinde olacak etmenler belirlenmiş ve işlemler daha eşzamanlı yürütülmeye başlanmış olmaktadır.



Şekil 5. Yönetici-personel etmen tiplerinin müzakere protokolü

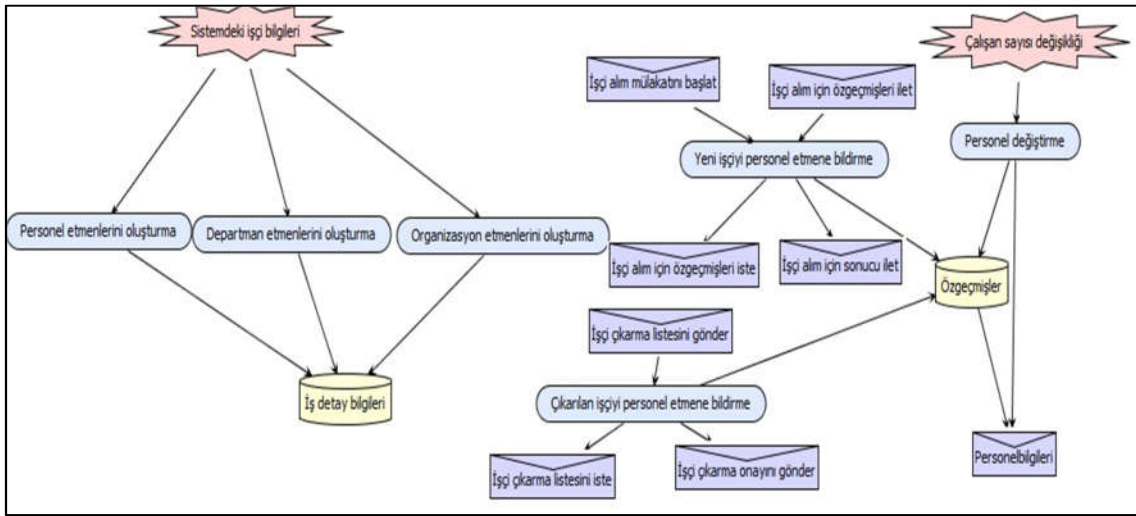
3.3. Ayrıntılı Tasarım Aşaması

Bu aşamada, etmenlerin mesaj tetiklemesiyle hangi planlarını çalıştıracakları ve hangi veri tabanı üzerinde işlem yapacakları tanımlanmaktadır. Mesajlar, etmenlerin kendi içerisinde olabildiği gibi diğer etmenlerden de gelebilmektedir. İnsan Kaynakları Departmanı için mimari tasarım aşamasında oluşturulan etmenlerin detayları bu aşamada verilmiştir.

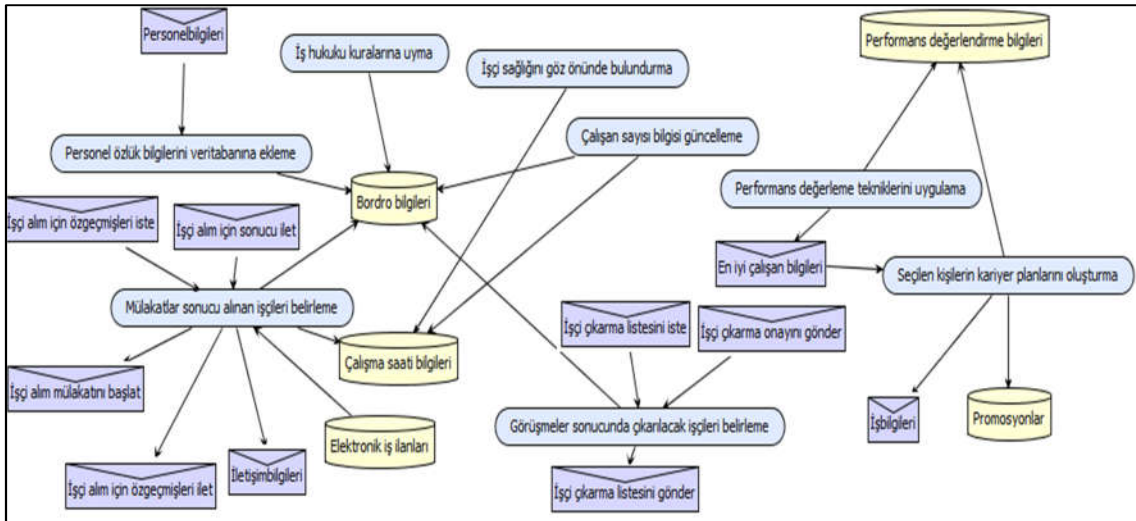
Şekil 6'da Yönetici Etmen tipinin ayrıntılı tasarımı gösterilmektedir. Yönetici Etmen sistemi tetikleyerek Personel, Departman ve Organizasyon Etmenleri oluşturma planları gerçekleşir. Yeni işçiyi bildirme, personel değiştirme ve çıkarılan işçiyi Personel Etmene bildirme planlarını da gerçekleştirerek özgeçmiş veri tabanı güncellenir. Yönetici Etmenden personel bilgileri, işçi alım için özgeçmişleri iste, işçi alım için sonucu ilet, işçi çıkarma listesini iste ve işçi çıkarma onayını gönder mesajları Personel Etmene gönderilir. Bu mesajlara cevap olarak Personel Etmenden işçi alım mülakatını başlat, işçi alım için özgeçmişleri ilet ve işçi çıkarma listesini gönder mesajları Yönetici Etmene gönderilir. Bu şekilde, insan kaynakları için önemli olan Yönetici Etmen ile Personel Etmen arasında elektronik olarak bir köprü kurulmuş olur.

Şekil 7’de ise Personel Etmenin ayrıntılı tasarımı gösterilmektedir. Personel özlık bilgilerini veri tabanına ekleme planıyla gelen personel bilgileri bordro bilgileri veri tabanına eklenir. Mülakatlar sonucu alınan işçileri belirleme planı ile gelen özgeçmişlerin ve iletişim bilgilerinin Yönetici Etmene gönderilmesi ve Yönetici Etmenin onayı sonrasında işe başlaması karar verilen kişilerin bilgileri sisteme dahil edilmesi söz konusudur. Görüşmeler sonucunda çıkarılacak işçileri

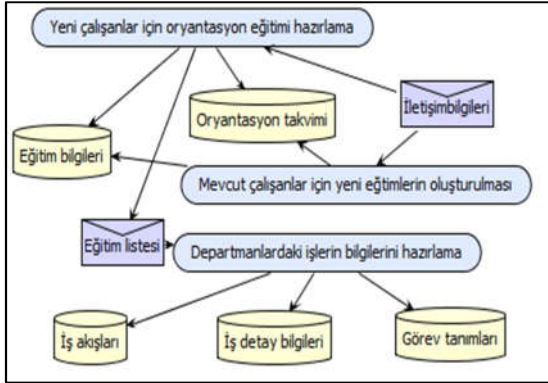
belirleme planıyla Yönetici Etmenin onayıyla kişi bilgileri güncellenir. Performans değerlendirme tekniklerini uygulama planıyla performansı iyi olan çalışanlara kariyer planları oluşturularak promosyonlar veri tabanına eklenir. İş hukuku ve işçi sağlığı planları çalıştırılır. Personel Etmen burada kilit rolü üstlenmiştir. Etmenler arasında müzakere yaparak insan kaynakları işleyişini dengede tutmaktadır.



Şekil 6. Yönetici etmen-ayrıntılı tasarım

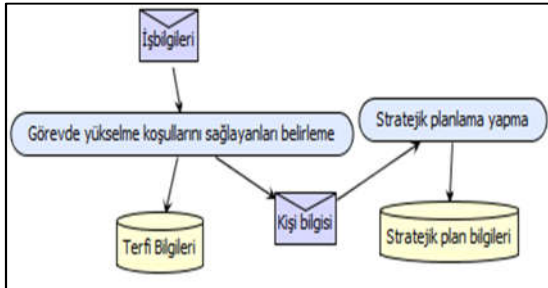


Şekil 7. Personel etmen-ayrıntılı tasarım



Şekil 8. Organizasyon etmen-ayrıntılı tasarım

Şekil 8’de organizasyon etmeni ayrıntılı tasarımı gösterilmiştir. Yeni çalışanlar için oryantasyon eğitimi hazırlama planıyla oryantasyon ve eğitim bilgileri kaydedilir. Mevcut çalışanlar için yeni eğitimlerin oluşturulması planıyla çalışanların güncel eğitimleri görmesi sağlanır. Ayrıca departmanlardaki işlerin bilgileri hazırlanarak işçilere iş bilgileri rehber olarak gösterilmektedir. Böylece, insan kaynakları departmanında yeni işe başlayan veya mevcut çalışanların düzenli eğitim takvimleriyle kişisel gelişimleri Organizasyon Etmen aracılığıyla sağlanmış olur.



Şekil 9. Departman etmen-ayrıntılı tasarım

Şekil 9’da Departman Etmenin ayrıntılı tasarımı gösterilmektedir. Görevde yükselme koşullarını sağlayanları belirleme planıyla sistemin stratejik planı yapılarak terfiler işçilere verilmektedir. Departman Etmen aracılığı ile başarılı kişilere hakları teslim edilerek motive edilmesi sağlanmaktadır. Bu şekilde, insan kaynakları için önemli unsurlarından birisi olan kazanılmış haklar çalışanlara teslim edilmiş olunur.

Etmen tabanlı sistem geliştirilmesinde son aşama bir yazılım aracılığı ile uygulama yapılmasıdır. Fakat, farklı platform kullanımı gerektirdiği için Prometheus yöntemi içerisine dahil edilmemiştir. Bu tasarım ile insan kaynakları işleyişinin elektronik olarak birbiriyle konuştuğu bir sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu sistem ile verimli bir yönetim sistemi gerçekleştirilerek veri kayıplarının önüne geçilmesi sağlanmaktadır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, etmen tabanlı sistemlerin tasarımında kullanılan yazılım ile işletmelerdeki insan kaynakları departmanlarının yaptığı işlemler için tasarım yapılmıştır. Model, geleneksel modelleme ve tasarlama yöntemlerinden farklılık göstermektedir. Prometheus tasarım yönteminin sahip olduğu üç aşama incelenmiş ve insan kaynakları işlemleri için gerekli işlerin tasarımı sağlanmıştır. Bu yazılım ile takım çalışması desteklenmiş ve elektronik olarak sistemin yönetilmesi bir bütün halinde sağlanmıştır. Bu çalışma ile hedeflenen, insan kaynakları işleyişinin kağıt ve dokümantasyon gibi maliyetlerden azaltarak daha verimli bir yönetim bakışı kazandırmaktır. Çalışanlar için çizelgeleme faaliyetlerini düzenleyerek sistemi daha hızlı hale getirmek amaçlanmıştır. Gelecek çalışmalarda, yazılımın kodlama yapılan platformlarda gerçekleştirilerek sistemin daha verimli hale getirilmesi düşünülmektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Doğan, A., 2011. Elektronik İnsan Kaynakları Yönetimi ve Fonksiyonları, 51-80.
2. Wooldridge, M., Jennings N.R., 1995. Intelligent Agents: Theory and Practice, The Knowledge Engineering Review, 10(2), 115-152.
3. Hahn, C., Madrigal-Mora C., Fischer K., 2009. A Platform-independent Metamodel for Multi-agent Systems, Autonomous Agents and Multi-agent Systems, 18(2), 239-266.
4. Bellifemine, F.L., Caire, G., Greenwood, D., 2007. Developing Multi-agent Systems with JADE, John Wiley & Sons, (7), 303.

5. Wooldridge, M., 2009. An Introduction to Multiagent Systems, England: John Wiley & Sons, Ltd, (2), 368.
6. Parker, B., Caine D., 1996. Holonic Modelling: Human Resource Planning and the Two Faces of Janus, International Journal of Manpower, 17(8), 30-45.
7. Padgham, L., Thangarajah J., Winikoff M., 2007. The Prometheus Design tool—a Conference Management System Case Study, In International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering, Springer, 197-211.
8. Rahman, A., Mahmood A. K., 2008. Agent-based Simulation using Prometheus Methodology in Evacuation Planning, In 2008 International Symposium on Information Technology, IEEE, 1-8.
9. Talib, A.M., Atan, R., Abdullah, R., Murad, M.A., 2011. Multi Agent System Architecture Oriented Prometheus Methodology Design to Facilitate Security of Cloud Data Storage, Journal of Software Engineering, 5(3), 78-90.
10. Kaymak, Y., Teket K.D., Demirci, S., Getir, S., Erdur, R.C., Kardaş, G., 2012. JACK Kanı-İstek-hedef Modeline dayalı Çok-etmenli bir Kütüphane Yönetim Sisteminin Prometheus Metodolojisi ile Geliştirilmesi, 6. Ulusal Yazılım Mühendisliği Sempozyumu, 121-128.
11. Larioui, J., Byed A.E., 2020. Multi-Agent System Architecture Oriented Prometheus Methodology Design for Multi-modal Transportation, International Journal, 8(5), 2118-2125.
12. Padgham, L., Winikoff M., 2005. Developing Intelligent Agent Systems: A Practical Guide, John Wiley & Sons, (13), 241.

Kapalı Döngü Üretim Rotalama Problemi için Bir Karar Destek Sistemi Önerisi

Yusuf KUVVETLİ^{*1}, Rızvan EROL¹

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

Geliş tarihi: 29.04.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Üretim rotalama problemi; üretim, envanter, dağıtım ve rotalama kararlarının bir arada verildiği bir tedarik zinciri problemidir. Bu problemin temel amacı, kararların entegre bir şekilde verilmesiyle birlikte maliyet açısından daha etkin kararlar almaktır. Bu çalışmada, bu problemin kapalı döngü versiyonunu ele alan bir karar destek sistemi önerilmiştir. Önerilen karar destek sisteminde kapalı döngü tedarik zincirlerindeki üretim rotalama problemi için DH algoritması uygulanmıştır. DH algoritması problemi parçalayarak alt problemleri etkileşimli bir şekilde hızla çözmeyi amaçlar. Sistemin gerçek hayat uygulamalarını gösterebilmek adına sıvı yağ üretimi yapan bir firma için bir aylık planlama dönemi için incelenen problem uygulanmış ve maliyetlerin mevcut duruma göre daha düşük olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: DH algoritması, Kapalı döngü tedarik zincirleri, Karar destek sistemi, Üretim rotalama problemi

A Decision Support System Proposal for Closed Loop Production Routing Problem

Abstract

Production routing problem; is a supply chain problem where production, inventory, distribution and routing decisions are made together. The main aim of this problem is to make more cost-effective decisions, with decisions being made in an integrated manner. In this study, a decision support system that deals with the closed loop version of this problem is proposed. In the proposed decision support system, the DH algorithm has been applied for the production routing problem in closed loop supply chains. The DH algorithm decomposes the problem and aims to solve sub-problems interactively in a small time. In order to demonstrate the real-life applications of the system, the problem examined for a one-month planning period is applied for a company producing fats oil and it is found that the costs are lower than the current application.

Keywords: DH algorithm, Closed loop supply chains, Decision support system, Production routing problem

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Yusuf KUVVETLİ, ykuvvetli@cu.edu.tr

Bu tasarım adımları doğrultusunda, bu çalışmada kapalı döngü tedarik zincirlerinde yer alan planlama problemlerinden birisi olan kapalı döngü tedarik zinciri üretim rotalama problemi için bir karar destek sistemi geliştirilmesi önerilmiştir. İncelenen problem, periyotlar boyunca üretim, envanter, dağıtım ve rotalama kararlarının yeni ürünler için yapıldığı ve dönen ürünler için ise toplama ve geri dönüşüm işlemlerinin ele alındığı bir yapıyı ifade eder. Bu çalışmada ele alınan kapalı döngü kapalı döngü tedarik zinciri ağı Şekil 1’de sunulmuştur.

Bu çalışmadaki ağ yapısına göre, ürünler bir tesiste üretilmektedir. Üretim süreci, müşteri talepleri doğrultusunda periyodik olarak oluşacak hazırlık maliyetlerine göre gerçekleştirilmektedir. Üretilen ürünler dağıtım araçları ile müşterilere dağıtılmaktadır. Müşterilere dağıtım yapılırken, aynı zamanda dönen ürün olarak nitelendirilen ve kullanım ömrünü tamamlamış/deforme olmuş/iade edilmiş ürünler toplanmaktadır. Son olarak toplanan ürünler firmanın üretim tesislerinde uygun görülmesi halinde geri dönüşüm işlemine uğramaktadır. Tüm bu sürecin kesintisiz işleyebilmesi için üretici firma ve müşterilerin stok tutmalarına izin verilebilir. Bu kapalı döngü ağının temel amacı minimum maliyetle tüm ağ için en etkin planlama faaliyetlerini incelenen planlama dönemi boyunca elde etmektir. İncelenen kararların kompleks yapıda olması nedeniyle karar vermede kullanıcılara yardımcı olacak sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, bu problemin çözümü için bir karar destek sistemi oluşturmaktır. Böylelikle problemi çözümü için mevcut durumda oluşturulmuş olan etkin algoritmaların kullanıcı tarafında kullanılabilir olması sağlanacaktır. Buna ek olarak bir sıvı yağ ürünü için önerilen yaklaşım irdelenmiş ve sonuçları sunulmuştur.

Bu çalışmanın 2. bölümünde konu ile ilgili yapılmış önceki çalışmalar ele alınmıştır. 3. bölümde çalışmada yer alan uygulama çalışması için elde edilen veriler tanıtılmış ve 4. bölümde karar destek sisteminin tasarımından

bahsedilmiştir. 5. bölümde ise elde edilen bulgular sunulmuştur. Son olarak 6. bölümde çalışmadan elde edilen sonuçlar ve gelecek çalışmalara öneriler yer almaktadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Tedarik zincirlerinde en önemli kavramlardan birisi esneklik ve işbirliği için uygun zincir üyeleri oluşturmaktır [5]. Bu durum entegre kararların verilmesini zorunlu kılmaktadır. Klasik tedarik zincirlerinde üretim ve dağıtım kararları pratikte birbirini etkileyecek niteliğe sahiptir. Bu nedenle, tedarik zincirlerinde entegrasyon konusu ve kararların bir arada verilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. İlk çalışmalardan olan Chandra ve Fisher [6] çalışmasında, üretim ve dağıtım kararlarının bir arada verildiği durum için bir matematiksel model önermiştir. Sonuçlar entegrasyon kararlarının bağımsız kararlara göre iyileştirme sağladığını göstermiştir.

Problemin klasik tedarik zincirleri için önerilen farklı türde varyantları yer almaktadır. Karakteristikler incelendiğinde tek ürünlü [7], çok ürünlü [8], rotalama kararlarını da içeren [9-12] ve çok periyotlu [13] çalışmaların geleneksel tedarik zincirleri için yapıldığı görülmüştür. Bununla birlikte bozulabilir [14] ve gıda ürünlerinde [15] de problemin uygulamaları da önceki çalışmalarda yer almaktadır. Üretim rotalama problemi için farklı varyantlar, literatür taraması olarak sunulmuştur [16].

Kapalı döngü tedarik zincirlerinde ise yapılan çalışma sayısı sınırlıdır. Genellikle rotalama ve dağıtım kararlarını göz önüne alınmamıştır [17,18]. Üretim kararlarının göz önüne alınmadığı modellerle envanter, toplama ve rotalama kararlarının da entegre olarak alındığı çalışmalar bulunmaktadır [19]. Üretim, dağıtım, rotalama, envanter ve toplama kararlarının alındığı kapalı döngü çalışmasında matematiksel bir model önerilmiştir [20]. Tüm durumların göz önüne alındığı; üretim, dağıtım, envanter, toplama ve geri dönüşüm kararlarını entegre olarak göz önüne alan bir çalışmada matematiksel model ve sezgisel

Decomposition Heuristic (Ayrıştırma Sezgiseli-DH) yöntemi önerilmiştir [21]. Ayrıca ilgili çalışmada, margarin ürünü için örnek bir uygulama yer almaktadır.

Karar destek sistemleri birçok farklı uygulama alanına sahiptir. Bunlara örnek olarak; sağlık sistemlerinde hasta bakımı görevleri ve bugün aktif olarak ve her yerde kaliteli hizmet sunumunu desteklemek [22], tarımda karmaşık sorunları ele almak ve bitkisel üretimde karlılığı korumak [23] verilebilir.

Sürdürülebilirliğin üç boyutunu (ekonomik, sosyal ve çevresel) dikkate alan, ürün ve üretim yaşam döngüsünün aşamalarında (ürün ve üretim tasarımı, üretim planlaması, üretim ve süreçlerin ve ürünlerin yeniden üretimi) kullanılan karar destek sistemleri derlenmiştir [24]. Giret ve arkadaşları [25] çalışmasında, sürdürülebilir üretim sistemlerinin çizelgelenmesi için karar destek sistemi önerilmiştir.

Önceki çalışmalar incelendiğinde, karar destek sistemlerinin uzun yıllardır çalışılan bir konu olduğu ve üretim planlama ve çizelgeleme faaliyetlerinde de kullanıldıkları görülmektedir. Bu durum bu çalışmada ele alınan kapalı döngü entegre tedarik zinciri yönetimi sistemi için bir karar destek sisteminin kullanılabilir olacağını göstermektedir. İncelenen problemin margarin ürünü için örnek bir vaka üzerinde çözümlendiği görülmüş olup, bu çalışmada, sıvı yağ ürünü için bir örnek uygulama değerlendirilerek incelenen problemin farklı uygulamalardaki performansı da değerlendirilmiştir.

3. MATERYAL

Yemeklik yağ ürünleri ambalaj yapıları gereği deformasyona uğrama ve taşıma koşulları nedeniyle satılamaz duruma gelme sorunları yaşamaktadır. Yemeklik yağ ürünlerinin kapalı döngü uygulamaları aşağıdaki karakteristiklere sahiptir:

- Dönen ürün niteliğine sahip yağ ürünleri geri dönüşüm ya da yok etme/uzaklaştırma

işlemlerine sahiptir [4]. Özellikle kullanılan yağlar için bu durum, kullanım sonrası biyodizel üretimi gibi ürünlerde değerlendirilebilir.

- Sıvı yağ ürünleri son kullanma tarihi, ambalaj ve taşıma sorunları ve kalite problemleri gibi nedenlerle müşteriden toplanabilir. Yeni ve dönen ürünler aynı araçlarla taşınabilir.
- Firmalar, kullanılabilir nitelikte olan bu ürünleri yeni ürün üretiminde kullanılabilir, problemlerini gidererek yeniden pazara sunabilir.
- Geri dönüşüm işleminden sonra, geri dönen katı ve sıvı yağlar, ham yağ spesifikasyonuna ulaşmak için saflaştırılır [4]. Bu işlemin uygulandığı yağlar, hammadde olarak yağ üretiminde kullanılabilir.

Bu çalışmanın materyalini yemeklik yağ üreten bir firmanın sıvı yağ ürünü için bir aylık zaman periyodundaki planlama problemi oluşturmaktadır. Firma Türkiye'nin farklı noktalarına yemeklik yağ ürününü göndermekte ve dönen ürünleri toplamaktadır. İncelenen dönem içerisinde gerçekleştirilecek dağıtım ve toplama işlemleri Şekil 2'de özetlenmiştir.

Buna göre dağıtım/toplama ağında; 22 şehir için yeni ürün gönderimi (mavi ile işaretli şehirler), 2 şehirden dönen ürün toplanma isteği (kırmızı ile işaretli şehirler), 4 şehir için ise hem yeni ürün dağıtımı hem dönen ürün toplanması (sarı ile işaretli şehirler) beklenmektedir. Buna ek olarak üretim ve geri dönüşüm merkezinin yer aldığı şehir (yeşil ile işaretli şehir) bulunmaktadır.

Çizelge 1'de modelde yer alan parametre değerleri operasyonel verilerden elde edilerek sunulmuştur. Buna göre 29 noktada yapılan planlama problemi için 31 günlük bir model kurulmuş olup, günlük ortalama talep miktarı yaklaşık 0,5 ton olarak gerçekleşmiştir. Firmanın farklı ürünleri de ürettiği göz önünde bulundurularak kapasitenin etkin kullanımı için modelin her gün üretim yapma kararı yerine büyük partilerde üretimi tercih edebilmesi olasıdır.



Şekil 2. Dağıtım ağı

Çizelge 1. İlgili ürün için model parametreleri

Parametre Adı	Birim	Değeri
Düğüm sayısı	-	29
Planlama dönemi	Gün	31
Ortalama günlük talep	Ton	0,43
En yüksek günlük talep	Ton	25,65
En düşük günlük talep	Ton	0
Ortalama günlük dönen ürün	Ton	0,05
En yüksek günlük dönen ürün	Ton	10
En düşük günlük dönen ürün	Ton	0
Günlük üretim kapasitesi	Ton	15
Günlük geri dönüşüm kapasitesi	Ton	10
Düğüm arası en uzun uzaklık	Km	1819
Düğüm arası ortalama uzaklık	Km	727
Tur uzunluğu	Km	2500
Eldeki tır sayısı	-	6

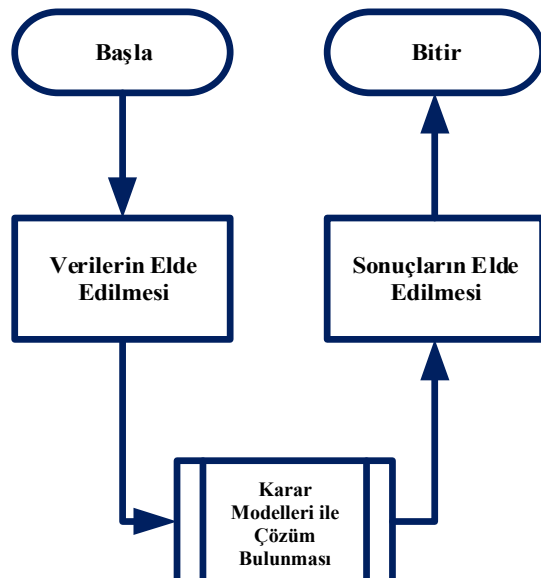
Çizelge 2. İlgili ürün için maliyet parametreleri

Parametre Adı	Birim	Değeri
Ortalama satın alma fiyatı	TL/kg	8,06
Ortalama dönen ürün iade fiyatı	TL/kg	8
Üretim maliyeti/depolama maliyeti		30.000
Geri kazanım hazırlık maliyeti/birim elde bulundurma maliyeti		25.000

Çizelge 2’de modelde yer alan maliyet parametreleri sunulmuştur. Bu parametreler, modelin üretim, stok ve dağıtım kararlarını oluşturmasında etkili olduğundan bazıları için görece olarak sunulmuştur. Birim taşıma maliyeti ise 2,5 TL/km olarak gerçekleştirilmiştir.

4. ÖNERİLEN KARAR DESTEK SİSTEMİ

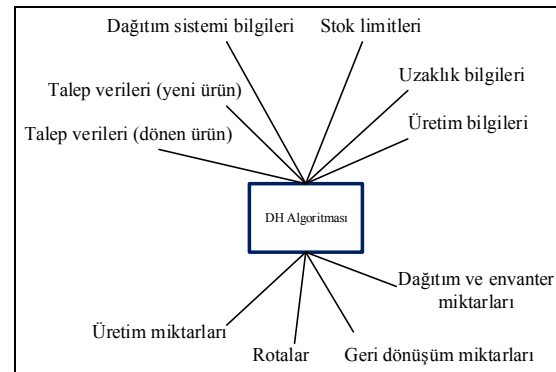
Kapalı döngü üretim rotalama problemi için önerilen karar destek sisteminin genel akışı Şekil 3’de görülmektedir. Buna göre üç temel adımdan söz edilebilir: ilki verilerin elde edilmesini, ikincisi verilerin çözümlenmesini ve sonuncusu ise sonuçların elde edilmesi ve sunumu ifade eder.



Şekil 3. Önerilen karar destek sistemi yapısı

Verilerin elde edilmesi için veri tabanı bağlantısı ve Excel gibi programlardan verilerin alınması mümkündür. Verilerin işlenerek kararların oluşturulması için DH algoritması kullanılır [21].

DH algoritması problemde yer alan yeni ve dönen ürünler için üretim/geri dönüşüm, dağıtım/toplama, envanter ve rotalama kararlarını vermektedir. Algoritma genel olarak tur planlarının tavlama benzetimi algoritmasında oluşturulduğu, bu planlara göre tasarruf algoritması ile rotaların oluşturulduğu ve üretim, envanter gibi kararların matematiksel modelleme yaklaşımı ile iterasyonlar boyunca elde edildiği bir algoritmadır [21]. Bu algoritmanın, problemin çözümünde etkin sonuçlar verdiği gösterilmiştir [21]. Bu algoritmanın girdi ve çıktıları Şekil 4’te özetlenmiştir.



Şekil 4. DH algoritmasının genel gösterimi

DH algoritması belirlenen planlama periyodu boyunca ($t \in T$), talep noktalarına ($i, j \in N$) ve eldeki araçlar için ($k \in V$) bir dağıtım gerçekleştirilmektedir. Yeni ürün ve dönen ürün talepleri (d_{it} ve d_{it}^r), noktalar arası uzaklık bilgileri (l_{ij}), maksimum rota uzunluğu (L), kapasite ve maliyet bilgileri girdiler olarak sisteme beslenmektedir.

Bu girdiler doğrultusunda, DH algoritması günlük ziyaret planlarını çözüm olarak oluşturur. Sonrasında bu planlardan araç rotaları belirlenir. Oluşturulacak rotalar her bir gün için birden fazla olabilir. Eğer bir nokta çifti bir araçla bir günde ziyaret ediliyorsa, x_{ijtk} değerini alır. Tur kısıtları Eşitlik 1 ile kontrol edilebilir.

$$\sum_i \sum_j l_{ij} * x_{ijtk} \leq L \quad i,j \in N \quad (1)$$

Bu rotalar baz alınarak üretilecek miktarlar, stok miktarları ve geri kazanım miktarları için ise diğer kısıtlamaları da dikkate alan optimizasyon modeli her adımda çözülerek uygunluk fonksiyonu hesaplanır. İterasyonlar boyunca hesaplamalar yapılarak optimuma yakın kararların verilmesi amaçlanır.

Elde edilen çıktıların, karar vericilere sunumunda ise tablo ve grafiklerin kullanıldığı görsel bir ara yüz önerilmiştir. Bu ara yüzler doğrultusunda, üst yöneticiler için etkin ve görsel bir sonuç sunumu mümkün olabilmektedir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

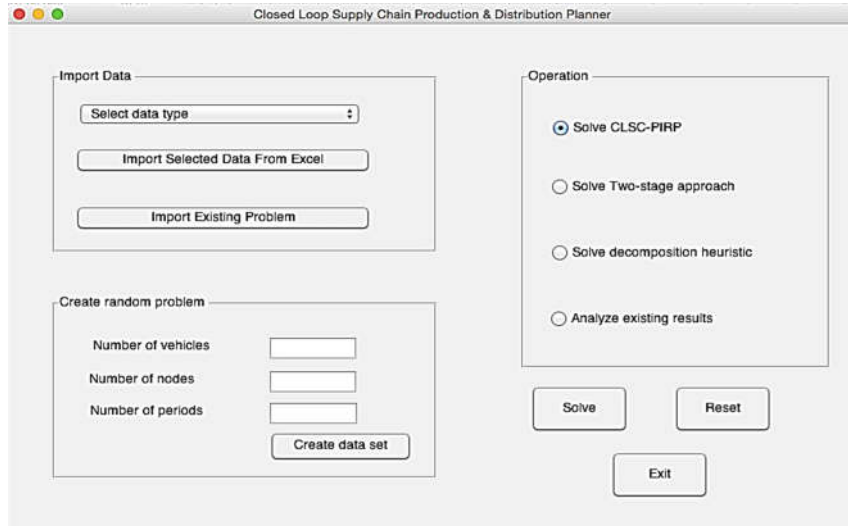
5.1. Karar Destek Sistemi

Karar destek sisteminin son kullanıcı tarafından kullanımının sağlanabilmesi için grafik tabanlı bir ara yüz tercih edilmiştir. Kapalı döngü tedarik zinciri üretim ve dağıtım planlayıcısı olarak adlandırılan karar destek sistemine ait ekran

görüntüleri Şekil 5 ile 8 arasındaki şekillerde sunulmuştur. İlk olarak Şekil 5'te ana menü görünmektedir. Ana menü üç temel bölümde değerlendirilebilir. Bunlardan ilki veri girişlerinin yapıldığı veri tabanı bağlantılı ekranların açıldığı veri giriş ekranıdır. Kullanıcı verileri bir Excel dosyasından alabileceği gibi veri tabanı üzerinde kayıtlı bir problemi de seçebilir.

İkinci bölümde kullanıcı rastgele bir problem örneği oluşturarak kullanılabilir yaklaşımları deneyebilir.

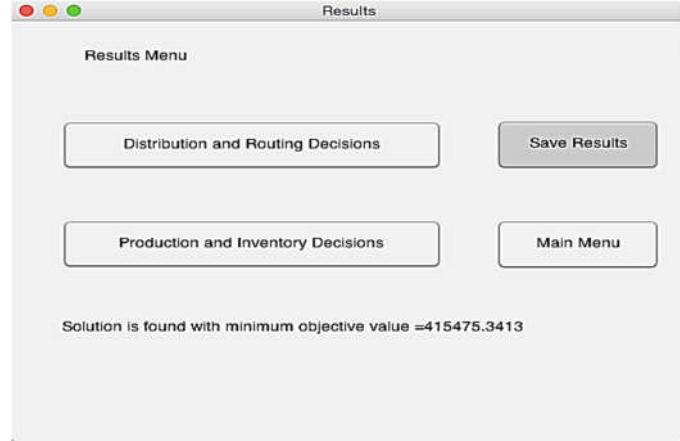
Üçüncü bölümde ise hangi yaklaşımla problem çözümünün elde edileceği yer almaktadır. Problemin çözümü için üç yaklaşım yer almaktadır. Bunlar; entegre kararların verildiği optimizasyon problemi (CLSC-PIRP), ikincisi kararların ileri ve geri yönlü olarak ayrı ayrı verildiği optimizasyon problemi (two-stage approach) ve son olarak üçüncü yaklaşım DH sezgisel yaklaşımıdır. Burada geçmişte çözülmüş bir problemin sonuçlarının da gösterilmesi mümkündür.



Şekil 5. Ana menü [4]

Problemin çözülmesiyle birlikte çözüm ekranı görülür olmaktadır (Şekil 6). Bu ekranda kullanıcı sonuçları kaydedebilir veya inceleyebilir. Sonuçlar kapsamlı olacağı için üretim ve envanter bilgileri

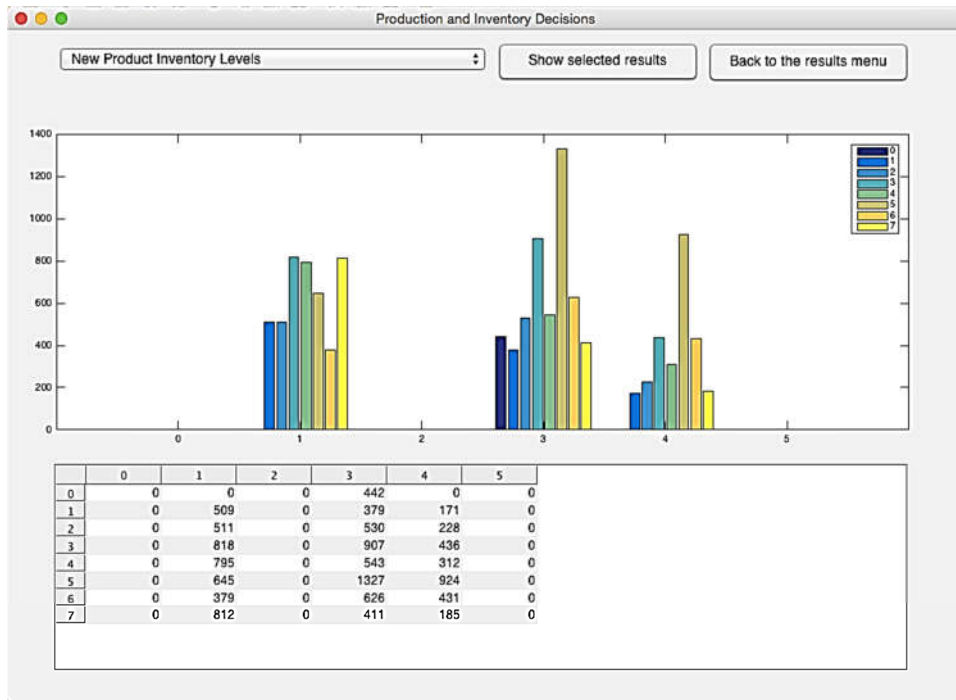
ile dağıtım ve rotalama kararları farklı ekranlardan görünür olmaktadır. Bu aynı zamanda sonuçların farklı personellere aktarımının sağlanabilmesini de sağlamaktadır.



Şekil 6. Çözüm ekranı [4]

Üretim ve envanter bilgi ekranında planlama dönemi boyunca oluşan tüm üretim, geri dönüşüm, yeni ve dönen ürün envanterleri bilgileri hem tablo

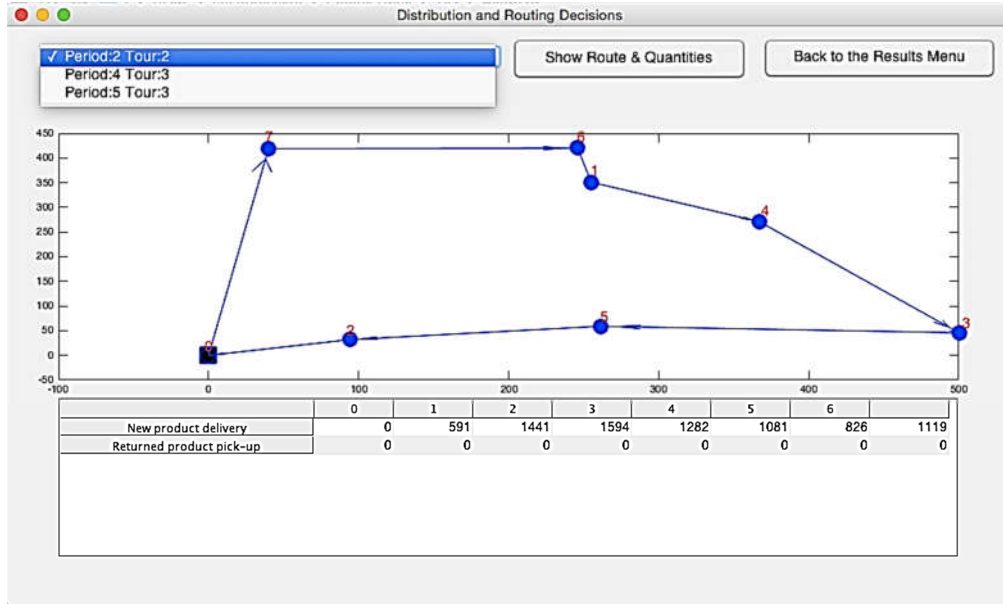
hem de grafiksel olarak görülmektedir. Görülmek istenen stok bilgileri ekranın üst bölümünden seçilerek görülebilir (Şekil 7).



Şekil 7. Üretim ve envanter bilgi ekranı [4]

Önerilen karar destek sisteminde bahsedilmesi gereken son ekran ise rotalama ve dağıtım bilgilerini içeren ekrandır (Şekil 8). Bu ekranda planlama periyodu boyunca her bir gün oluşacak

tüm rotalar seçilerek seyahat planları, sıraları ve gerçekleştirilecek dağıtım/toplama miktarları oluşturulmaktadır. Bu bilgilerin yazdırılmasıyla birlikte sevkiyat listeleri de oluşturulmuş olacaktır.



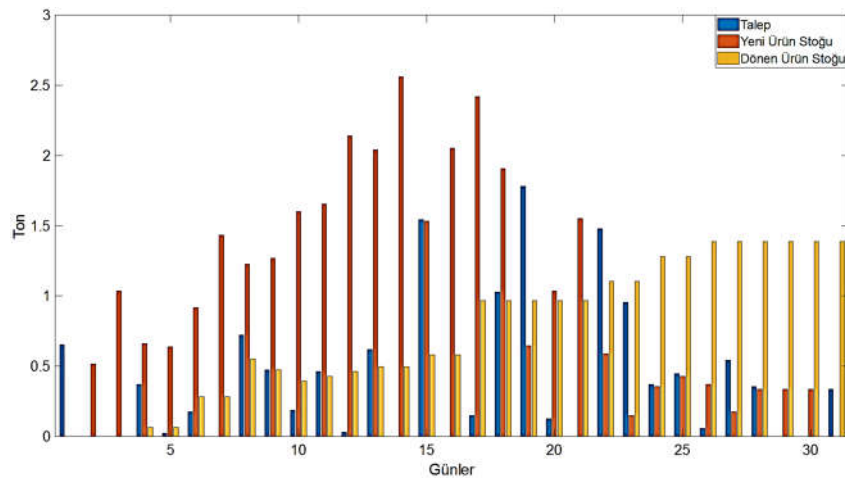
Şekil 8. Rotalama ve dağıtım bilgileri ekranı [4]

5.2. Vaka Sonuçları

İncelenen vaka için bir aylık planlama probleminin çözümü sonucunda toplam maliyet 623833,705 TL olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar mevcut işletme maliyetleriyle kıyaslandığında yaklaşık %10'luk bir iyileşme olduğu görülmüştür.

Genel olarak çözümde 24 gün üretim yapıldığı ve üretim kapasitelerinin 1 gün haricinde tamamen

kullanıldığı görülmüştür. Bu durum, sabit maliyetlerin elde bulundurma maliyetlerine göre görece yüksek olmasından kaynaklı olabilir. Üretimlerde geri dönüşümlü malzeme kullanımı sağlanması amacıyla 3 gün geri dönüşüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Geri dönüşüm kapasitelerinin kullanımında, üretim kapasitesine göre konulabilecek en yüksek geri dönüşümlü yağ olacak şekilde bir planlama yapılmıştır.



Şekil 9. Model sonuçları

Envanter miktarları ve bu miktarların taleple ilişkisi incelendiğinde talepte oluşan sapmalar nedeniyle envanterlerin arttığı gözlenmektedir (Şekil 9). Ürün taleplerinin azalmasıyla aynı zamanda dönen ürün stoklarının arttığı görülmektedir. Bu durum, modelin talepte oluşan sapmalar sonucunda envanter tutarak dalgalanmaları yönetmeye çalıştığını göstermektedir. Buna ek olarak tüketim noktalarına göre oluşan talep ve stok bilgileri Çizelge 3'te sunulmuştur. Buna göre, stok ve talep bilgilerinin yeni ürünler için benzer eğilime sahip olduğu ve dönen ürün için ise belirli bir yüzde ile kullanılması sebebiyle görece olarak daha az gerçekleştikleri görülmektedir.

Çizelge 3. Tüketim noktalarına göre envanter sonuçları

Parametre	Talep	Yeni Ürün Stoku	Dönen Ürün Stoku
Minimum	0	0	0
Ortalama	0,43	0,76	0,13
Maksimum	4,15	5,81	1,90
Standart Sapma	0,78	1,12	0,38

Dağıtım ve rotalama kararları incelendiğinde, vaka için toplam 47 rota düzenlenmiş ve günlük ortalama 1,51 rota oluştuğu gözlenmiştir. Rota sayısının fazla olmasının nedenleri incelendiğinde, bu durumun müşteri noktadaki stok limitlerinden ve rotalama maliyetleri ile elde bulundurma maliyetleri arasındaki ödünleşimden dolayı oluşmuş olabileceği düşünülmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kapalı döngü tedarik zincirlerinde, üretim, dağıtım, rotalama, toplama ve geri dönüşüm kararlarını eşzamanlı veren üretim rotalama problemi için bir karar destek sistemi önerilmiş ve problem bir sıvı yağ ürünü üreten işletme için uygulanmıştır.

Önerilen karar destek sistemi ile birlikte kapalı döngü tedarik zincirinde üretim rotalama probleminde yer alan kısa dönem planlarının

görsel bir ara yüz ile birlikte sunulması sağlanmış ve problemin uygulanabilirliği artırılmıştır.

Entegre kararların tedarik zincirlerinde oldukça etkili sonuçlar oluşturduğu literatürde yer alan çalışmalarda da vurgulanmıştır. İncelenen sonuçlara göre, örnek vaka için bir aylık planlama problemi çözülerek üretim ve geri dönüşüm, stok ve üretim kararlarının dengelendiği ve tüm bu kararların rotalama problemi ile dengelendiği görülmüştür. Problem bu kararlardaki ödünleşimleri maliyetlere göre göz önüne almış ve etkili sonuçlar üretmiştir. Mevcut işletme maliyetleri ile kıyaslandığında, daha çevik bir karar alma sistemi ortaya konulmuştur.

Vaka analizi sonuçlarına göre, firma ayın 24 gününde üretim gerçekleştirmeli, 3 gününde geri dönüşüm gerçekleştirmeli ve günde ortalama 1,51 sevkiyat gerçekleştirmelidir. Firma mevcut uygulamalara göre yaklaşık %10'luk bir tasarruf sağlamıştır.

Çalışma önerilen ağ yapısı üzerinde yalnızca geri dönüşüm opsiyonuna sahip tedarik zincirleri için yapılmıştır. Farklı tersine lojistik opsiyonları değerlendirilebilir. Tek ürünlü ve tek üretim/geri dönüşüm merkezine odaklanılmıştır. Gelecek çalışmalarda problemin farklı varyantları olan, çok ürünlü versiyonları, farklı dağıtım ve rotalama stratejileri gibi konuların göz önüne alınması mümkün olabilir. Karar destek sistemi için ise yazılımın kurumsal kaynak planlaması sistemlerine adaptasyonu sağlanabilir.

7. TEŞEKKÜR

Y Kuvvetli, doktora çalışmalarına verdiği destekler nedeniyle TÜBİTAK-BİDEB 2211 Yurt içi Doktora Burs programına teşekkür eder.

8. KAYNAKLAR

1. Rogers, D.S., Tibben-Lembke R.S., 1999. Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices. Reverse Logistics Executive Council Pittsburgh, PA.
2. Cats-Baril, W.L., Huber, G.P., 1987. Decision Support Systems for Ill-structured Problems:

- An Empirical Study. *Decision Sciences*, 18(3), 350-372.
3. Sauter, V.L., 2014. *Decision Support Systems for Business Intelligence*. John Wiley & Sons, New Jersey, U.S.A.
 4. Kuvvetli, Y., 2016. Coordinated Production-inventory–distribution-routing Problem on Closed Loop Supply Chain with Recycling Option. *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 147, Adana.
 5. Salami, E., Oral, E., Aydınli, S., 2016. Yüklenici Firmaların Tedarik Zinciri Yönetimi Uygulamalarında Kritik Başarı Faktörleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(1), 17-24. DOI: 10.21605/cukurovaummfd.242785.
 6. Chandra, P., Fisher, M.L., 1994. Coordination of Production and Distribution Planning, *European Journal of Operational Research*, 72, 503-517.
 7. Kuhn, H., Liske, T., 2011. Simultaneous Supply and Production Planning, *International Journal of Production Research*, 49, 3795-3813.
 8. Fumero, F., Vercellis, C., 1999. Synchronized Development of Production, Inventory, and Distribution Schedules, *Transportation Science*, 33, 330-340.
 9. Bard, J.F., Nananukul, N., 2010. A Branch-and-price Algorithm for an Integrated Production and Inventory Routing Problem, *Computers & Operations Research*, 37, 2202-2217.
 10. Boudia, M., Louly, M.A.O., Prins, C., 2007. A Reactive GRASP and Path Relinking for a Combined Production-distribution Problem, *Computers & Operations Research*, 34, 3402-3419.
 11. Bard, J.F., Nananukul, N., 2009. The Integrated Production-inventory-distribution-routing Problem, *Journal of Scheduling*, 12, 257-280.
 12. Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F., Jans, R., 2012. Optimization-based Adaptive Large Neighborhood Search for the Production Routing Problem, *Transportation Science*, 48, 20-45.
 13. Toptal, A., Koc, U., Sabuncuoglu, I., 2013. A Joint Production and Transportation Planning Problem with Heterogeneous Vehicles, *Journal of the Operational Research Society*, 65, 180-196.
 14. Manouchehri, F., Nookabadi, A.S., Kadivar, M., 2020. Production Routing in Perishable and Quality Degradable Supply Chains. *Heliyon*, 6(2), e03376.
 15. Li, Y., Chu, F., Côté, J.F., Coelho, L.C., Chu, C., 2020. The Multi-plant Perishable Food Production Routing with Packaging Consideration. *International Journal of Production Economics*, 221, 107472.
 16. Adulyasak, Y., Cordeau, J.F., Jans, R., 2015. The Production Routing Problem: A Review of Formulations and Solution Algorithms. *Computers & Operations Research*, 55, 141-152.
 17. Kannan, G., Sasikumar, P., Devika, K., 2010. A Genetic Algorithm Approach for Solving a Closed Loop Supply Chain Model: A Case of Battery Recycling, *Applied Mathematical Modelling*, 34, 655-670.
 18. Kim, T., Goyal, S.K., Kim, C.-H., 2013. Lot-Streaming Policy for Forward-reverse Logistics with Recovery Capacity Investment, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, 509-522.
 19. Iassinovskaia, G., Limbourg, S., Riane, F., 2017. The Inventory-routing Problem of Returnable Transport Items with Time Windows and Simultaneous Pickup and Delivery in Closed-loop Supply Chains, *International Journal of Production Economics*, 183, 570-582.
 20. Fang, X.J., Du, Y.A., Qiu, Y.Z., 2017. Reducing Carbon Emissions in a Closed-loop Production Routing Problem with Simultaneous Pickups and Deliveries under Carbon Cap-and-Trade, *Sustainability*, 9, 15.
 21. Kuvvetli, Y., Erol, R., 2020. Coordination of Production Planning and Distribution in Closed-loop Supply Chains, *Neural Comput & Applic* (2020), <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04770-5>.
 22. Sutton, R.T., Pincock, D., Baumgart, D.C., Sadowski, D.C., Fedorak, R.N., Kroeker, K.I., 2020. An Overview of Clinical Decision Support Systems: Benefits, Risks, and

- Strategies for Success. NPJ Digital Medicine, 3(1), 1-10.
23. Ali, M.F., Aziz, A.A., Sulong, S.H., 2020. The Role of Decision Support Systems in Smallholder Rubber Production: Applications, Limitations and Future Directions. Computers and Electronics in Agriculture, 173, 105442.
 24. Zarte, M., Pechmann, A., Nunes, I.L., 2019. Decision Support Systems for Sustainable Manufacturing Surrounding the Product and Production Life Cycle—a Literature Review. Journal of Cleaner Production, 219, 336-349.
 25. Giret, A., Trentesaux, D., Prabhu, V. , 2015. Sustainability in Manufacturing Operations Scheduling: A State of the art Review. Journal of Manufacturing Systems, 37, 126–140. doi:10.1016/j.jmsy.2015.08.002.

Optimization of the Effect of Processing Parameters on Surface Roughness and Cutting Energy in CNC Milling of Al-7075 Material

Ali PINARBAŞI¹, Mustafa Kemal KÜLEKÇİ¹, Cem BOĞA^{*2}, Uğur EŞME¹

¹ Tarsus University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering, Mersin

² Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Engineering
Mechanical Engineering, Adana

Geliş tarihi: 17.03.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Abstract

In this study, it is intended to determine the most suitable process parameters for surface roughness and cutting energy of the 7075 series aluminum material in dry environment conditions by using Taguchi method in CNC milling. The process parameters were determined as, cutting speed, feed rate and cutting depth and the effects of these parameters on surface roughness, current flow through the grid and the energy consumed were examined. As a result, optimum process parameters were determined and the results were analyzed by graphs. It was observed that the most effective parameter on the surface roughness was the feed rate, while the most effective parameter on the current drawn from the network was the cutting depth. As a result of the experiments, the best surface roughness value was found to be 0.39 μm and the lowest current value was 0.9 A. In addition, considering the determined current amount and processing time, the lowest energy amount consumed was calculated as 7089.28 J.

Keywords: Milling process, Taguchi method, Cutting parameters, Surface roughness, Energy

Al-7075 Malzemenin CNC Frezelenmesinde İşlem Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne ve Kesme Enerjisine Etkisinin Optimizasyonu

Öz

Bu çalışmada, CNC frezeleme prosesinde 7075 serisi alüminyum malzemenin kuru ortam şartlarında yüzey pürüzlülüğü ve kesme enerjisi için en uygun işlem parametrelerinin Taguchi yöntemi kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. İşlem parametreleri ilerleme hızı, kesme hızı ve kesme derinliği olarak belirlenmiş olup bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne, şebeke üzerinden çekilen akım miktarına ve tüketilen enerji üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçta optimum işlem parametreleri belirlenmiş ve sonuçlar grafiklerle analiz edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden parametre ilerleme hızı iken, şebekeden çekilen akıma en çok etki eden parametrenin kesme derinliği olduğu gözlemlenmiştir. Deneyler sonucunda en iyi yüzey pürüzlülük değeri 0,39 μm , en düşük akım değeri 0,9 A olarak bulunmuştur. Ayrıca, belirlenen akım miktarı ve işlem süresi göz önüne alınarak tüketilen en düşük enerji miktarı 7089,28 J olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Frezeleme işlemi, Taguchi metodu, Kesme parametreleri, Yüzey pürüzlülüğü, Enerji

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Cem BOĞA, cboga@atu.edu.tr

1. INTRODUCTION

Energy is one of the important inputs for the economic and social development of countries. In order to prevent energy from being an obstacle to development and industrialization, efficient use has become important in our country where 70% of the demand is met by import. Studies indicate that efficient use of energy will save 30% on annual final energy consumption. The rapid depletion of fossil fuels that meet a major portion of the world's energy needs is one of the most important problems of our time. Mechanical processing, which is widely applied in the manufacturing industry, is used to give the desired shape to the materials. Therefore, the demand for energy increases. However, energy use has not been considerably optimized. Reduce the energy consumption of machines can significantly improve energy efficiency [1]. The surface quality is of paramount importance in the milling process. Product quality index commonly used in the finishing process is surface roughness [2]. Surface roughness is a key factor that greatly affects the technological quality and production cost of a product [2,3]. Machining conditions, workpiece material and tool geometry are factors that influence surface roughness. For this reason, optimum machining parameters and tool geometry must be selected to achieve a better surface quality in a milled product [4]. A powerful analysis tool such as experimental design is needed to model and analyze the effect of control factors on performance output. The traditional experimental design deals with a large number of experiments and is difficult to use because the number of processing parameters increases. The Taguchi method is a powerful method recently used to improve productivity during research and development [5]. The Taguchi method is a useful and efficient that optimizes experimental design [6,7]. This technique can be used to determine which factor has the most impact. It can also significantly reduce the time spent during experimental research [7-9]. This enables high quality products to be produced quickly and at low cost [5]. Bensouilah et al. [10] using the Taguchi method, coated and uncoated hard turning process surface roughness and shear force analysis

performed. They found that surface roughness was better at coated ceramic tools, while shear force was lower at uncoated ceramic tools. Noordin et al. [11] subjected AISI 1040 steel material to a coated insert turning operation and investigated the effect of cutting parameters on surface roughness. They found that the most important parameter was feed rate. Uçun and Aslantaş [12] examined cutting parameters influence on surface roughness in rough turning. As a result, they observed that carbide cutting tools are not suitable for high cutting values in rough turning. Niranjana et al. [13] optimized the surface roughness using the Taguchi method with machining parameters for turning aluminum alloy 6061 T6 cylindrical bars. The optimum value of surface quality was obtained with cutting speed of 429 (m.min⁻¹), feed rate of 0.05 (mm.min⁻¹) and cutting depth of 1 (mm). They considered these process parameters to be optimal process parameters. Camposeco [14] has optimized the cutting parameters for minimum energy consumption during rough turning of the AISI 6061 T6. Zhou et al. [15] proposed a multi-purpose cutting parameter optimization model aimed at minimizing the processing time per unit of material and energy consumption. Kant and Sangwan [16] used gray relational analysis. They aimed to obtain optimum machining parameters to minimize power consumption and surface roughness. Hanafi et al. [17] used gray relational theory and Taguchi optimization methodology. TiN tools have optimized the process parameters to achieve minimum strength and best surface quality during the processing of PEEK-CF30 under dry conditions. Fratila and Caizar [18] applied the Taguchi methodology to obtain optimum cutting conditions that provide the best surface roughness and minimum power consumption during milling with AlMg₃ material HSS tool. Sarıkaya and Güllü [19] investigated the effect of process parameters in the turning of AISI 1050 steel using Response Surface Methodology (RSM). According to ANOVA results, they observed the highest effect on the surface roughness and the cooling condition. Çetin et al. [20] investigated the effect of plant based cutting fluids and cutting parameters on reducing surface roughness, cutting and feeding forces during turning of AISI 304L austenitic stainless steel

using carbide cutting tool. Lee et al. [21] proposed a simulation-based method to reduce the energy consumption of a three-axis milling machine. Okwudire and Rodgers [22] have proposed a hybrid system to obtain high-performance and

energy efficiency in processing. Abele et al. [23] proposed a machine tool simulation model during a production process and aimed to estimate energy consumption.



Figure 1. Test setup. a) Experiment samples, b) CNC vertical machining center, c) Surface roughness tester d) Clamp meter

Hazir and Koc [24] developed two mathematical models to optimize the surface roughness for the processing condition of Lebanese Cedar pine (*Cedrus libani*). For the optimization process, they have adopted the combined approach of the L27 vertical sequence based simulated angling algorithm. Bhosale et al. [25] conducted experiments using the L9 Taguchi orthogonal array, selecting three different parameters to achieve optimal surface roughness in the turning process. Kumar et al. [26] used the Taguchi L18 mixed type orthogonal array experimental design

to determine the parameters affecting EN 19 stainless steel material's surface roughness and MRR (Material removal rate) in CNC turning. In this study, the experimental design method Taguchi method was used to determine the effect of process parameters on surface roughness and cutting energy and to find optimum values in CNC milling of Al7075 series aluminum part. Unlike the literature, it was investigated what parameter is the most influential on the current drawn from the network. In addition, the results are examined and explained in detail.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.1. Materials and Methods

Traditional experimental design is difficult to use, especially when dealing with a large number of experiments and when the number of processing parameters increases. Taguchi experimental design, developed by Dr. Genichi Taguchi, is an accepted method in the manufacturing sector, considering the variability inherent in the material and manufacturing processes at the design stage. The Taguchi method uses statistically designed orthogonal arrays to achieve the best results with a minimum number of experiments. In this way, the number of experiments is reduced, saving time and cost.

In this study, Al7075 series aluminum material (Figure 1a) DAHLIH MCV-1020BA CNC milling machine (Figure 1b) using the coolant closed milling process was performed. ISCAR H490 E90AX D16-2-C16-09 double-sided rectangular inserts with 4 helical cutting edges was used the cutting tools for heavy applications in experiments. Then, TR100 instrument was used to for the surface roughness (Figure 1c) and the influence on surface roughness of process parameters in the milling was examined and analyzed using Taguchi test design method, which is a quality improvement technique. It is also aimed to achieve optimum surface roughness with minimum energy. Energy calculations were made for this purpose and TENON DT 266 brand clamp meter (Figure 1d) was used to measure the current drawn over the network.

In this study, 9 pieces of 7075 series aluminum material with 50x40x10 (mm) dimensions were used. The 7075 series aluminum are commonly used in the aerospace, arms and defense industries due to light weight, high strength properties and good machinability [27-29]. Table 1 shows the mechanical properties of aluminum material, Table 2 shows the chemical properties.

Table 1. Mechanical properties of Al 7075 series

Maximum tensile strength (MPa)	Maximum yield strength (MPa)	Elongation (%)
280	140	9-10

Table 2. Chemical composition of 7075 series Aluminum material

Element	Contribution percentage (%)
Al	89.79
Zn	5.66
Mg	2.15
Cu	1.32
Si	0.35
Fe	0.45
Mn	0.08
Ti	0.05
Cr	0.10
Others	0.05

In this study, the experimental process parameters are determined as 3 levels are defined for each parameter as shown in Table 3. The experiments were applied under dry conditions. Separate tools were used for each experiment.

Table 3. Process variables, experimental design levels (L) used

Notations	Parameters	L1	L2	L3
A	Feed rate (mm.min ⁻¹)	150	200	250
B	Cutting speed (rev.min ⁻¹)	1000	1500	2000
C	Cutting depth (mm)	0.5	1	1.5

3. RESULTS AND DISCUSSION

Taguchi L₉ orthogonal index was chosen as the most suitable design for the experiment to examine how surface roughness was affected by process parameters. The 'smaller is better' method was used to calculate the S/N ratio, and all values were calculated using the MINITAB 17 program. Table 4 shows the Taguchi L₉ test design.

Table 4. Taguchi L₉ test design

Exp. No.	A	B	C	Surface Roughness R _a (µm)	S/N Ratio (dB)
1	1	1	1	0.42	7.53501
2	1	2	2	0.53	5.51448
3	1	3	3	0.40	7.95880
4	2	1	2	0.91	0.81917
5	2	2	3	1.89	-5.52924
6	2	3	1	0.39	8.17871
7	3	1	3	0.81	1.83030
8	3	2	1	0.53	5.51448
9	3	3	2	0.55	5.19275

In the graph given in Figure 2, the S/N ratios which are formed according to the process parameters for surface roughness are given. According to Taguchi experimental design, the best surface roughness (Ra) was obtained from experiment 6 corresponding to the largest S/N ratio.

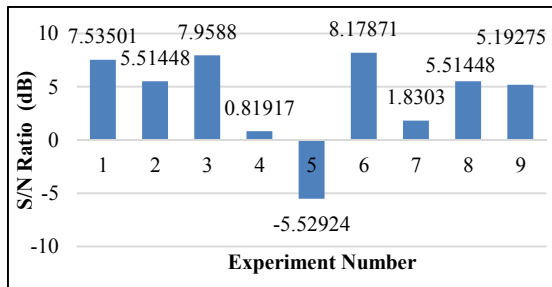


Figure 2. S/N ratio graph belonging to surface roughness

In Figure 3, the lowest surface roughness value (Ra) was obtained from the experimental parameters A₂B₃C₁ with a value of 0.39 (µm). The highest surface roughness value (Ra) was obtained from the test parameters A₂B₂C₃ with test value of 1.89 (µm).

In the light of these graphs, the best surface roughness value is obtained from the optimum process parameters in experiment 6 (Figure 2). Table 5 shows the S/N analysis of each control factor on surface roughness. From this table, the most effective factors are feed rate, cutting depth and cutting speed, respectively.

Table 5. Surface roughness S/N response table

Level	Feed rate (A)	Cutting speed (B)	Cutting depth (C)
1	7.891	3.395	7.076
2	1.156	2.721	4.730
3	4.179	7.110	1.420
Delta	6.735	4.389	5.565
Rank	1	3	2

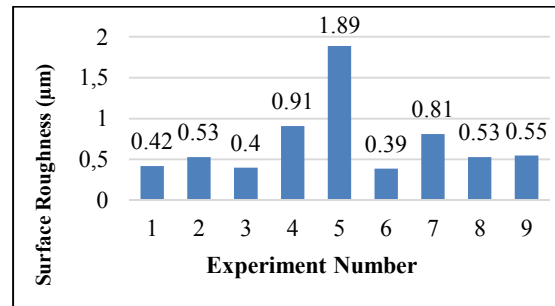


Figure 3. Surface roughness value graph of process parameters

According to the Figure 4, the surface roughness increases to a certain level as the feed rate increases and then starts to decrease. Increasing the depth of cut also caused the surface roughness to increase to a certain level. However, this increase was not as effective as the feed rate parameter.

In Figure 5 the effect of feed rate and cutting speed is shown. According to the given graph, the surface roughness is highest in the middle levels of both parameters. The lowest surface roughness was obtained when the feed rate was level 2 and the cutting speed was level 3.

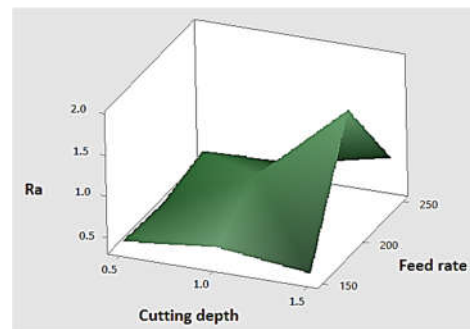


Figure 4. Graph of the effect of feed rate and cutting depth on surface roughness

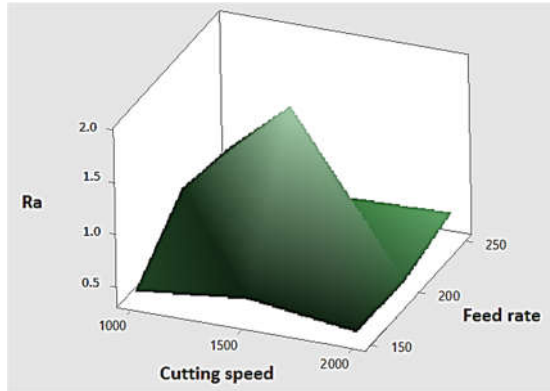


Figure 5. The effect of feed rate and cutting speed on surface roughness

According to the Figure 6, when the cutting speed increases, surface roughness increased to a certain level and then decreased. In addition, the surface roughness is the lowest in the 3rd level of cutting speed and 1st level of cutting depth.

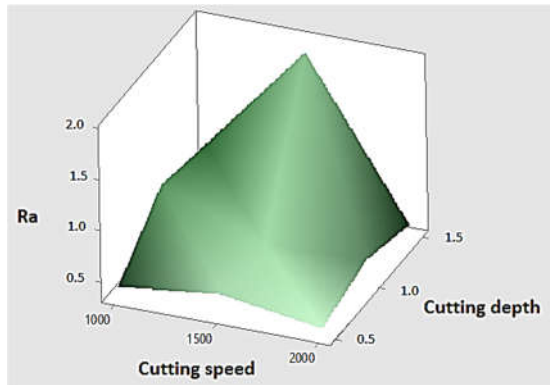


Figure 6. The effect of cutting speed and cutting depth on surface roughness

To obtain the effect of the determined variable parameters on the cutting energy, the amount of current drawn from the network during the processing of 9 test samples on the CNC Mill was measured with the clamp meter and the parameter affecting the current most was determined. Then, energy data were obtained by mathematical calculations. Table 6 shows the measured current values and the calculated S/N ratios in the Minitab 17 program. The minimum current was 0.9 (A) and the highest current was 1.43 (A).

In Figure 7, the S/N ratios generated according to the process parameters for the amount of current drawn are given. According to Taguchi experimental design, the optimum value was obtained from experiment 1 which corresponds to the largest S/N ratio.

In Figure 8, the lowest current value 0.9 (A) is obtained from test parameters $A_1B_1C_1$ in experiment 1. The highest current value 1.43 (A) was obtained from the test parameters $A_3B_3C_2$ in experiment 9.

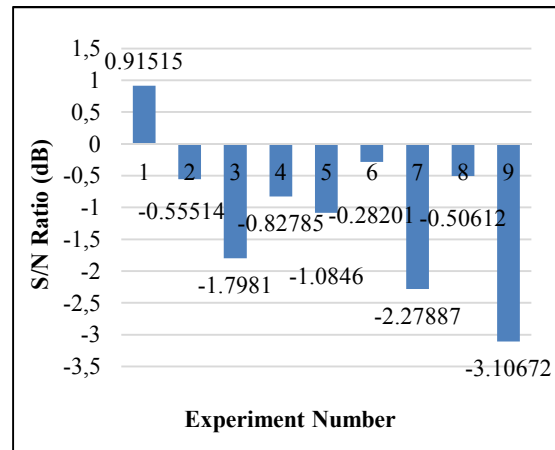


Figure 7. S/N ratio graph of the process parameters for the amount of current drawn

Table 6. Current and values of S/N ratio

Exp. No.	A	B	C	Current I (A)	S/N Ratio (dB)
1	1	1	1	0.9	0.91515
2	1	2	2	1.066	-0.55514
3	1	3	3	1.23	-1.79810
4	2	1	2	1.1	-0.82785
5	2	2	3	1.133	-1.08460
6	2	3	1	1.033	-0.28201
7	3	1	3	1.3	-2.27887
8	3	2	1	1.06	-0.50612
9	3	3	2	1.43	-3.10672

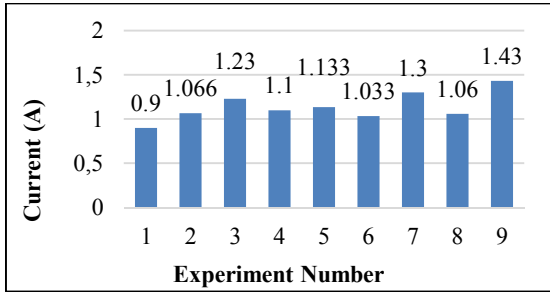


Figure 8. Current value graph of process parameters

Table 7 shows the S/N analysis of each control factor on the current. The most effective factors on the flow from this table are the cutting depth, feed rate and cutting speed, respectively.

Table 7. Current S/N response table

Level	Feed rate (A)	Cutting Speed (B)	Cutting depth (C)
1	-0.47937	-0.73052	0.04234
2	-0.73149	-0.71529	-1.49657
3	-1.96390	-1.72894	-1.72052
Delta	1.48454	1.01366	1.76286
Rank	2	3	1

In Figure 9, feed rate and cutting speed influences on the flow are examined. According to the given graph, the lowest current value was obtained at the 1st level of both parameters. The highest current value is obtained when both parameters are at the 3rd level.

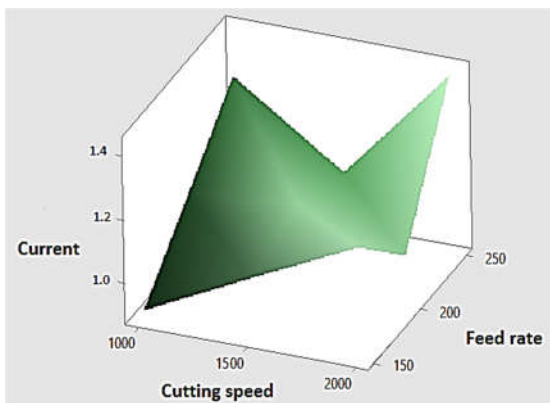


Figure 9. The cutting speed and feed rate influences on the current

In Figure 10, the cutting speed and cutting depth influences on the current are examined. According to the given graph, the lowest current value was obtained at the 1st level of both parameters. The highest current value is obtained when the cutting speed is level 3 and the cutting depth is level 2.

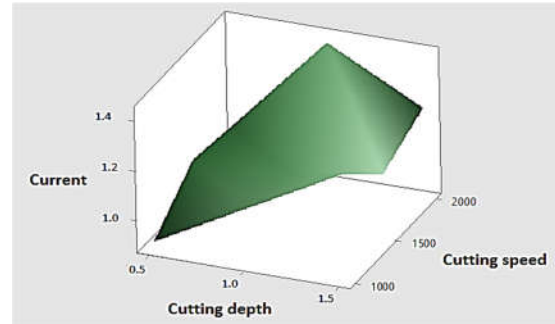


Figure 10. The effect of cutting depth and cutting speed on the current

In Figure 11, the feed rate and cutting depth influences on the current are examined. According to the given graph, the lowest current value was obtained at the 1st level of both parameters.

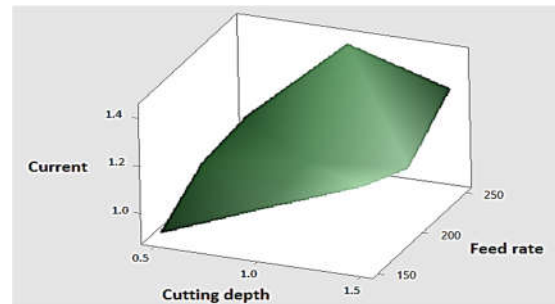


Figure 11. Graph of the effect of cutting depth and feed rate on the current

The amount of energy spent in milling operations is calculated by Equation 1.

$$E = P \times t \tag{1}$$

In Equation 1, E is the energy (Joule), P is the power (Watt) and t is the time (Second).

The amount of current drawn through the mains for each cutting operation was measured with a

clamp meter. Measured values are put in place in Equation 8 and electrical power drawn from the grid is calculated.

$$P=V \times I \times \cos \phi \quad (2)$$

In Equation 2 V is voltage (V), I is current (A) and $\cos \phi$ is power factor. The electrical power is directly proportional to the amount of current measured. Therefore, the amount of current measured in the experiment is high electrical power drawn from the network. The processing time of each workpiece and the amount of energy consumption during the operation of the machine with the help of electrical power values drawn from the network are calculated from Equation 1 and the results are presented in Figure 12.

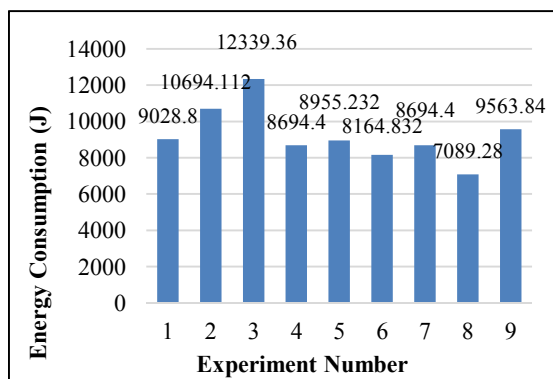


Figure 12. Energy value graph of process parameters

Accordingly, the maximum energy was spent in experiment 3 with 12339.36 (J) and the least energy was spent in experiment 8 with 7089.28 (J).

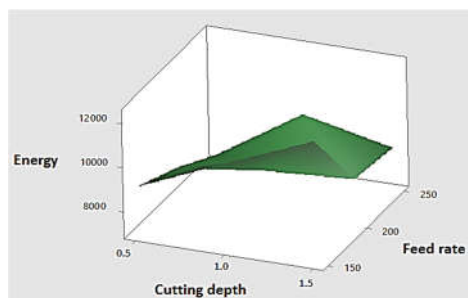


Figure 13. The effect of cutting depth and feed rate on the energy consumption

In Figure 13, it is seen that the energy consumed is maximum when the cutting depth is high and the feed rate is low.

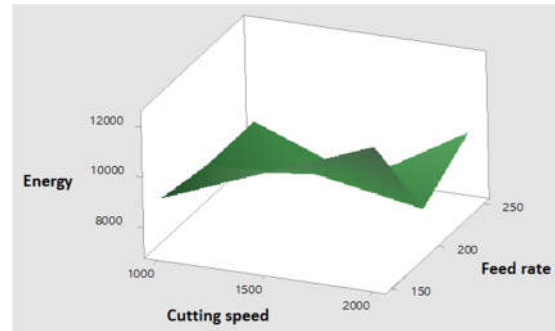


Figure 14. The effect of cutting speed and feed rate on consumed energy

In Figure 14, the energy consumed is maximum when the cutting speed is high and the feed rate is low. In addition, as the feed rate raised, the energy consumed decreased to a certain value and then continued to increase.

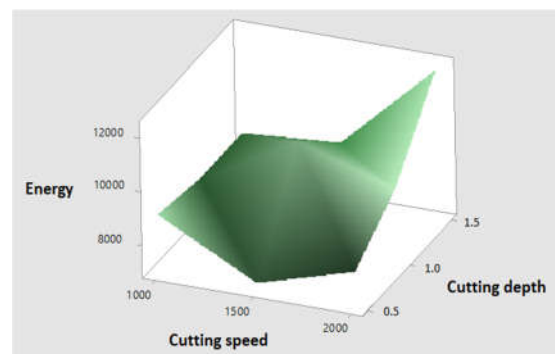


Figure 15. Graph of cutting speed and cutting depth effects on consumed energy

The Figure 15 shows that the consumed energy rises continuously as the cutting speed and cutting depth increases.

4. CONCLUSIONS

In this paper, the effects of machining parameters on surface roughness and cutting energy were examined by using 7075 series aluminum in CNC Milling process. And it was aimed to find the

optimum values. 9 experiments were performed using Taguchi method and the effect values and optimum levels of the process parameters were determined. In this paper, the most suitable process parameters were determined by using fewer experiments with Taguchi method. Thus, a significant advantage was achieved both in terms of cost and time. After the experiments, it was observed that the feed rate was the most effective parameter on surface roughness and the cutting speed was the least effective parameter. As a result of the measurements, it was examined that the cutting depth was the most influential parameter on the amount of current drawn from the network and the cutting speed was the least influential parameter. As a result of the calculations, it is seen that when the cutting depth is high, the cutting speed is high and the feed rate is low, the amount of energy consumed during the process is maximum. In addition, it was found that the most influential parameter on the amount of energy consumed was the feed rate. This is because the amount of energy consumed is high due to the increased processing time when the feed rate is low. According to the results of the experiment, it was observed that keeping the cutting depth low provides low surface roughness and low energy consumption. As a result of the experiments, the best surface roughness value was found to be 0.39 μm and the lowest current value was 0.9 A. In addition, considering the determined current amount and processing time, the lowest energy amount consumed was calculated as 7089.28 J.

5. REFERENCES

1. Bhushan, R.K., 2013. Optimization of Cutting Parameters for Minimizing Power Consumption and Maximizing Tool Life During Machining of Al Alloy SiC Particle Composites, *Journal of Cleaner Production* 32, 242-254. doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.008
2. Zhang, J.Z., Chen, J.C., Kirby, E.D., 2007. Surface Roughness Optimization in an End-milling Operation Using the Taguchi Design Method, *Journal of Materials Processing Technology* 184, 233-239. doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.029
3. Tsai, Y.H., Chen, J.C., Lou, S.J., 1999. In Process Surface Recognition System Based on Neural Networks in End Milling Cutting Operations, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 39, 583-605. doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00053-4
4. Vardhan, M.V., Sankaraiyah, G., Yohan, M., Rao, H.J., 2017. Optimization of Parameters in CNC Milling of P20 Steel Using Response Surface Methodology and Taguchi Method, *Materials Today: Proceedings* 4, 9163-9169. doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.273
5. Nian, C.Y., Yang, W.H., Tarn, Y.S., 1999. Optimization of Turning Operations with Multiple Performance Characteristics, *Journal of Material Processing Technology* 95, 90-96. doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00271-X
6. Gajjal, S.Y., Unkule, A.J., Gajjal, P.S., 2018. Taguchi Technique for Dry Sliding Wear Behavior of Peek Composite Materials, *Materials Today: Proceedings* 5, 950-957. doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.170
7. Ghani, J.A., Choudhury, I.A., Hassan, H.H., 2004. Application of Taguchi Method in the Optimization of End Milling Parameters, *Journal of Materials Processing Technology* 145, 84-92. doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00865-3
8. Park, S.H., 1996. *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*, Chapman&Hall, London, England.
9. Ravi Kumar, M., Reddappa, H.N., Suresh, R., Gangadharappa, M., 2018. Investigation on Hardness of Al 7075/Al₂O₃/SiCp Hybrid Composite Using Taguchi Technique, *Materials Today: Proceedings* 5, 22447-22453. doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.614
10. Bensouilah, H., Aouici, H., Meddour, I., Yaltese, M. A., Mabrouki, T., Girardin, F., 2016. Performance of Coated and Uncoated Mixed Ceramic Tools in Hard Turning Process, *Measurement* 82, 1-18. doi.org/10.1016/j.measurement.2015.11.042
11. Noordin, M.Y., Venkatesh, V.C., Chan, C.L., Abdullah, A., 2001. Performance Evaluation of Cemented Carbide Tools in Turning AISI 1010 Steel, *Journal of Materials Processing Technology* 116, 16-21. doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00838-X

12. Uçun, İ., Aslantaş, K., 2009. Sertleştirilmiş 52100 Takım Çeliğinin Tornalanmasında Karbürlü Kesici Takımın Performansının Araştırılması, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük.
13. Niranjana, D.B., Shivashankar, G.S., Sreenivas Rao, K.V., Praveen, R., 2017. Optimization of Cutting Process Parameters on Al6061 Using ANOVA and Taguchi Method, *Materials Today: Proceedings* 4, 10845-10849. doi.org/10.1016/j.matpr.2017.08.037.
14. Camposeco-Negrete, C., 2013. Optimization of Cutting Parameters for Minimizing Energy Consumption in Turning of AISI 6061 T6 Using Taguchi Methodology and ANOVA, *Journal of Cleaner Production* 53, 195-203. doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.049.
15. Zhou, Z., Zhang, C., Tian, G., Xie, Y., Lin, W., Huang, Z., 2016. Energy Consumption Modeling and Prediction of the Milling Process: A Multistage Perspective, *Journal of Engineering Manufacture* 232, 1973-1985. doi.org/10.1177/0954405416682278.
16. Kant, G., Sangwan, K.S., 2014. Prediction and Optimization of Machining Parameters for Minimizing Power Consumption and Surface Roughness in Machining, *Journal of Cleaner Production* 83, 151-164. doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.073.
17. Hanafi, I., Khamlichi, A., Cabrera, F.M., Almansa, E., Jabbouri, A., 2012. Optimization of Cutting Conditions for Sustainable Machining of PEEK-CF30 Using TiN Tools, *Journal of Cleaner Production* 33, 1-9. doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.005.
18. Fratila, D., Caizar, C., 2011. Application of Taguchi Method to Selection of Optimal Lubrication and Cutting Conditions in Face Milling of AlMg₃, *Journal of Cleaner Production* 19, 640-645. doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.12.007.
19. Sarıkaya, M., Güllü, A., 2014. Taguchi Design and Response Surface Methodology Based Analysis of Machining Parameters in CNC Turning Under MQL, *Journal of Cleaner Production* 65, 604-616. doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.040.
20. Çetin, M.H., Özçelik, B., Kuram, E., Demirbas, E., 2011. Evaluation of Vegetable Based Cutting Fluids with Extreme Pressure and Cutting Parameters in Turning of AISI 304L by Taguchi Method, *Journal of Cleaner Production* 19, 2049-2056. doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.013.
21. Lee, W., Kim, S.H., Park, J., Min, B.K., 2017. Simulation-Based Machining Condition Optimization for Machine Tool Energy Consumption Reduction, *Journal of Cleaner Production* 150, 352-360. doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.178.
22. Okwudire, C., Rodgers, J., 2013. Design and Control of a Novel Hybrid Feed Drive for High Performance and Energy Efficient Machining, *CIRP Annals, Manufacturing Technology*. 62, 391-394. doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.139.
23. Abele, E., Eisele, C., Schrems, S., 2012. Simulation of the Energy Consumption of Machine Tools for a Specific Production Task, Leveraging Technology for a Sustainable World, 233-237. doi.org/10.1007/978-3-642-29069-5_40.
24. Hazir, E., Koc, K.H., 2019. Optimization of Wood Machining Parameters in CNC Routers: Taguchi Orthogonal Array Based Simulated Angling Algorithm, *Maderas. Ciencia y Tecnología* 21, 493-510. doi: 10.4067/S0718-221X2019005000406.
25. Bhosale, K.K., Patil, V.P., Chavan, R.R., Mane, V.V., Sakharkar, A.R., Pawar, C.K., Bhole, A.R., Shinde S.S., 2018. Parameters Optimization of CNC Machining using Taguchi Methodology, *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 6, 4594-4598. http://doi.org/10.22214/ijraset.2018.4753.
26. Kumar, M.V., Kumar, B.J.K., Rudresha, N., 2018. Optimization of Machining Parameters in CNC Turning of Stainless Steel (EN19) by TAGUCHI'S Orthogonal Array Experiments, *Materials Today: Proceedings*, 5, 11395-11407. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.107.
27. Wu, Q., Li, D.P., Zhang, Y.D., 2016. Detecting Milling Deformation in 7075 Aluminum Alloy Aeronautical Monolithic Components Using the Quasi-Symmetric Machining Method, *Metals* 6, 1-14. doi.org/10.3390/met6040080.
28. Starke, E.A., Staley, J.T., 1996. Application of Modern Aluminium Alloys to Aircraft,

- Progress in Aerospace Sciences 32, 131-172.
doi.org/10.1016/0376-0421(95)00004-6.
- 29.** Senthil, K., Iqbal, M.A., Chandel, P.S., Gupta, N.K., 2017. Study of the Constitutive Behavior of 7075-T651 Aluminum Alloy, International Journal of Impact Engineering 108, 171-190.
doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.05.002.

Paletli Bir Mobil Robotun Modellenmesi ve Bulanık Mantık ile Yörünge Kontrolü

Osman DOĞMUŞ^{*1}, Mahit GÜNEŞ¹

¹*Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş*

Geliş tarihi: 23.03.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Bu çalışmada, paletli otonom bir araç tasarlanmış olup tasarlanan otonom aracın yörünge kontrolü bulanık mantık denetleyici (BMD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çok amaçlı tasarlanan otonom araç, otomatik yönlendirme, belirli bir görevi icra etme, çeşitli ortamlara yük taşıyabilme özelliklerine sahiptir. Otonom araçların yörünge kontrolünde farklı kontrol teknikleri kullanılmaktadır. Otonom robotun yörünge kontrol yapısının performansını klasik PI denetleyici ile karşılaştırılmış ve kontrol sistemi Matlab/Simulink modeli kullanılarak benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. BMD'nin sistemin performansını artırdığı ve daha kararlı bir yapı sağladığı gerçekleştirilen benzetim çalışmaları ile ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Paletli mobil araç, Dinamik modelleme, Kinematik modelleme, PI, BMD

Modeling a Tracked Mobile Robot and Trajectory Control by Using Fuzzy Logic

Abstract

In this study, a tracked autonomous vehicle was designed and the trajectory control of the designed autonomous vehicle has been carried out using a fuzzy logic controller (FLC). The multi-purpose autonomous vehicle has the features of automatic steering, performing a specific task, carrying loads to various environments. Different control techniques are used in the trajectory control of autonomous vehicles. The performance of the orbital control structure of the autonomous robot has been compared with the classical PI controller and simulation studies were realized by using the control system Matlab/Simulink model. It has been demonstrated by simulation studies that BMD increases the performance of the system and provides a more stable structure.

Keywords: Tracked mobile robot, Dynamic modeling, Kinematic modeling, PI, FLC

* Sorumlu yazar (Corresponding author): Osman DOĞMUŞ, odogmus@ksu.edu.tr

1. GİRİŞ

Paletli otonom araçlar yüksek manevra kabiliyetlerinin yanı sıra zor arazi şartlarında hareket edebilen, insanlar için tehlikeli olabilecek görevleri yerine getiren ve uzaktan kontrol edilebilen araçlardır. Bu araçlar arama kurtarma, bomba imha benzeri uygulamalar için kullanılmaktadır [1]. Bu çalışmada paletli otonom bir aracın kontrol yöntemlerini geliştirmek amacıyla bilgisayar ortamında modellenmesi yapılmıştır.

Bu çalışmada paletli bir aracın matematiksel modeli çıkarılmış ve benzetim çalışmaları yapmak amacıyla Matlab/Simulink ortamında blok modelleri oluşturulmuştur. Günümüzde, PID kontrolörleri mobil robotların motor kontrolünde ve genel olarak endüstriyel kontrol sistemlerinde hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, PID denetleyicilerin sabit parametrelere sahip olması nedeniyle doğrusal olmayan ve zamanla değişen parametreler içeren sistemlerin denetiminde düşük performans göstermektedir [2,3]. PID denetleyiciler hız, tork ve konum denetiminde motorun karmaşık bir matematiksel modeline ihtiyaç duyarlar. Son zamanlarda geleneksel denetim yaklaşımlarının istenmeyen özelliklerinden kaçınmak için yapay zekâ temelli bulanık mantık, yapay sinir ağları, sinirsel-bulanık mantık yöntemlerini kullanan denetleyici yapıları geliştirilmektedir [4,5]. Bulanık mantık denetleyicinin (BMD) yapısı uyarlanabilir özelliklere ve geniş çalışma koşullarına sahiptir. Ayrıca belirsizliklere, değişken parametrelere ve değişken yük dağılımına sahip sistemlerde kullanıldığında sistemin güçlü cevaplar vermesini sağlar [6]. Yüksek performans gerektiren uygulamalarda geleneksel PID denetleyici yerine BMD yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada paletli mobil robotun denetimi için PI tipi denetleyici ve BMD tasarlanmıştır. Önerilen denetleyicinin başarısını kanıtlamak için aracın, referans olarak verilen sinüzoidal bir yörüngeyi izlemesi ve bozucu girişe karşı tepkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar PI tipi denetleyiciyle karşılaştırılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Sidi ve arkadaşları [7], üç serbestlik derecesine (3DOF) sahip paletli bir mobil robotun modellenmesini sunmuş ve Matlab/Simulink ortamında paletli hızını PID ile kontrol etmiştir. Model, paletli mobil robotun uzunlamasına, yan ve sapma hareketlerindeki yerel koordinat davranışlarının yanı sıra araç hızı, palet kuvveti ve palet kayması gibi kinematik ve kinetik tepkilerini incelemek için geliştirilmiştir.

Huang ve arkadaşları [8], diferansiyel tahrikli paletli robot için ileriye dönük nokta bilgisine dayanan bir PI tipi yörünge izleme denetleyici geliştirmişlerdir. Global Navigasyon Uydu Sistemi antenleri ve bir alıcı modül ile robotun konum ve yön hatalarının gerçek zamanlı tahminlerini elde etmek için navigasyon sensörleri kullanılmıştır.

Asai ve arkadaşları [9], paletli mobil robotun bir yörüngeyi izleyebilmesi için PD benzeri yapay sinir ağı denetleyici yapısı kullanmışlardır. Önerilen çevrimiçi sinir ağı denetleyicisi; kendini eğitebilme ve PD denetim benzeri geribildirim yapısı özelliklerine sahiptir.

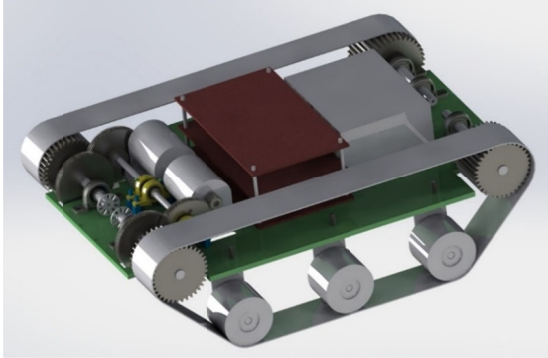
Ji ve arkadaşları [10], iki DA motor tarafından sürülen paletli mobil robotta, yük bozulması ve sol palet ile sağ palet arasındaki mekanik yapı farkı gibi faktörlerin yörünge izleme hatasına neden olduğunu ve izleme hassasiyetini etkilediğini belirtmişlerdir. Bu sorunlara yönelik olarak, kayan bulut-model çapraz kuplaj denetleyici önermişlerdir. Hız döngüsündeki kayan mod denetleyici, rastgele parazitleri engellemek ve tek motorun hız izleme hatasını azaltmak için tasarlanmıştır. Bulut-model çapraz kuplaj denetleyici ise her iki motorun hız izleme hatasını azaltmak için tasarlanmıştır.

3. PALETLİ MOBİL ARAÇ TASARIMI

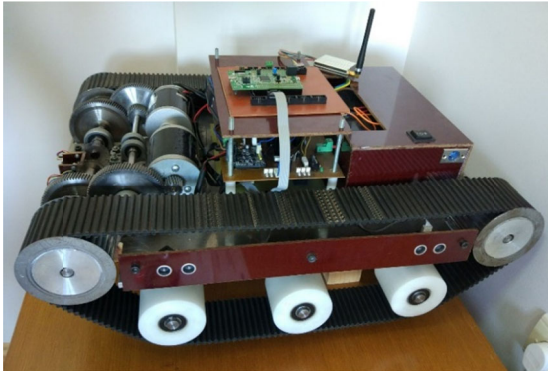
3.1. Fiziksel Özellikler

Tasarlanan aracın mekanik aksamlarının yapımı için; 2 adet 120W DA motor, motor ve teker milleri için rulmanlı yataklar, 45 x 65 cm ebadında

8 mm alüminyum levha, çelik ve alüminyum dişliler ile 2 adet çift yönlü 1440 mm triger kayış kullanılmıştır. Şekil 1’de aracın Solid Works’de çizilmiş üç boyutlu modellemesi görülmektedir. Şekil 2’de ise yapılan paletli aracın resmi verilmiştir.



Şekil 1. Paletli aracın üç boyutlu modeli



Şekil 2. Paletli aracın genel görünüşü

Çizelge 1. Paletli aracın fiziksel değerleri

Parametre Adı	Simge	Birim	Değeri
Kütle	m	kg	36,37
En	d	cm	45
Boy	ℓ	cm	65
Palet çarkı yarıçapı	r	mm	45,8
Dişli aktarma oranı	N_g	-	14,78
Hız	v	m/s	1,15
Kütle Eylemsizlik momenti	J	kgm ²	1,875

Çizelge 1’de paletli aracın fiziksel değerleri verilmiştir. Çizelge 2’de ise paletli araçta

kullanılan DA motor parametreleri verilmiştir. Parametrelerin bir kısmı (L, R, K_b , K_T , b) gerekli motor deneyleri yapılarak belirlenmiştir. Eylemsizlik momenti (J) hesaplanarak bulunmuştur [11].

Çizelge 2. DA motorun parametreleri

Parametre Adı	Simge	Birim	Değeri
Güç	P	W	120
Devir	n	d/d	2750
Tork	T_m	Nm	0,42
Gerilim	V	V	24
Akım	I	A	5
Endüktans	L	mH	1,59
Direnç	R	Ohm	1,137
Ters EMK sabiti	K_b	Nm/A	0,06467
Tork sabiti	K_T	Nm/A	0,06467
Viskoz Sürtünme katsayısı	b	Nm/s	$98,8 \cdot 10^{-6}$
Kütle Eylemsizlik momenti	J	kgm ²	$1,38 \cdot 10^{-6}$

Matlab/Simulink ortamında araç modeli oluşturmak için Eşitlik 1-28’de verilen aracın kinematik ve dinamik formülleri kullanılmıştır. Araç modelinde kullanılan parametreler Çizelge 1 ve 2’de verilmiştir.

3.2. Paletli Aracın Matematiksel Modeli

3.2.1. Kinematik Model

Kinematik model çıkarabilmek için paletli aracın koordinat düzlemindeki görünüşü Şekil 3’de gösterilmiştir. Matematiksel ifadeler ise Eşitlik 1-8’de verilmiştir [7,12].

$$v_R = r\omega_R \quad (1)$$

$$v = (v_R + v_L) / 2 \quad (2)$$

$$\omega_o = (v_R - v_L) / 2d \quad (3)$$

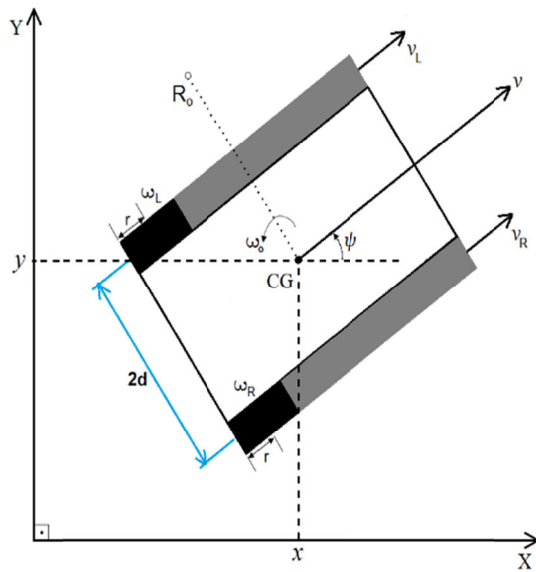
$$\omega_R = (v + d\omega_o) / r \quad (4)$$

$$\omega_L = (v - d\omega_o) / r \quad (5)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = w_o \quad (6)$$

$$\frac{dX}{dt} = v \cdot \cos(\psi) \quad (7)$$

$$\frac{dY}{dt} = v \cdot \sin(\psi) \quad (8)$$



Şekil 3. Kinematik model

Burada; r palet tahrik dişli yarıçapı, w_R, w_L sağ ve sol palet tahrik dişli açısal hızı, w_o paletli aracın açısal hızı, v_R, v_L sağ ve sol palet hızı, v paletli aracın hızı, ψ paletli aracın x eksenine göre açısıdır.

3.2.2. Dinamik Model

Paletli aracın dinamik modeli, Şekil 4'de gösterilen koordinat düzlemindeki görünüşünden faydalanılarak çıkarılmış ve matematiksel ifadeler Eşitlik 9-20'de verilmiştir [13,14].

$$m a = F_T - F_S \quad (9)$$

$$m \frac{dv}{dt} = F_R + F_L - F_S \quad (10)$$

$$J \varepsilon = M_T - M_S \quad (11)$$

$$J \frac{dw_o}{dt} = (F_R - F_L) d - M_S \quad (12)$$

$$F_R = \frac{M_R}{r} \quad (13)$$

$$M_R = N_g M_{mR} \quad (14)$$

$$M_{mR} = K_T I_r \quad (15)$$

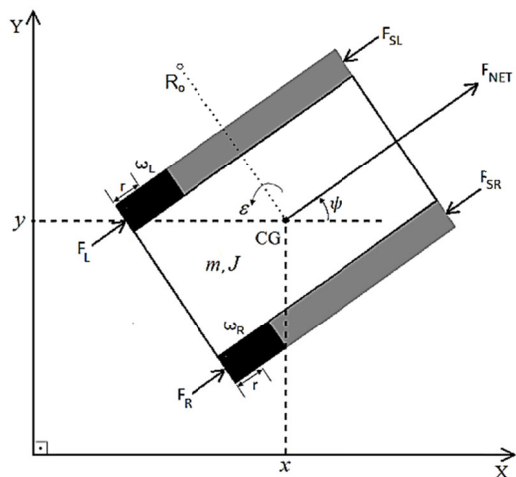
$$F_R = \frac{N_g K_T}{r} I_r \quad (16)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{N_g K_t}{mr} I_l + \frac{N_g K_t}{mr} I_r - \frac{1}{m} F_s \quad (17)$$

$$\frac{dw_o}{dt} = \frac{N_g K_t d}{Jr} I_l + \frac{N_g K_t d}{Jr} I_r - \frac{1}{J} M_s \quad (18)$$

$$\frac{dI_l}{dt} = -\frac{K_b N_g}{L_a r} v + \frac{K_b N_g d}{L_a r} w_o - \frac{R_a}{L_a} I_l + \frac{1}{L_a} U_l \quad (19)$$

$$\frac{dI_r}{dt} = -\frac{K_b N_g}{L_a r} v - \frac{K_b N_g d}{L_a r} w_o - \frac{R_a}{L_a} I_r + \frac{1}{L_a} U_r \quad (20)$$



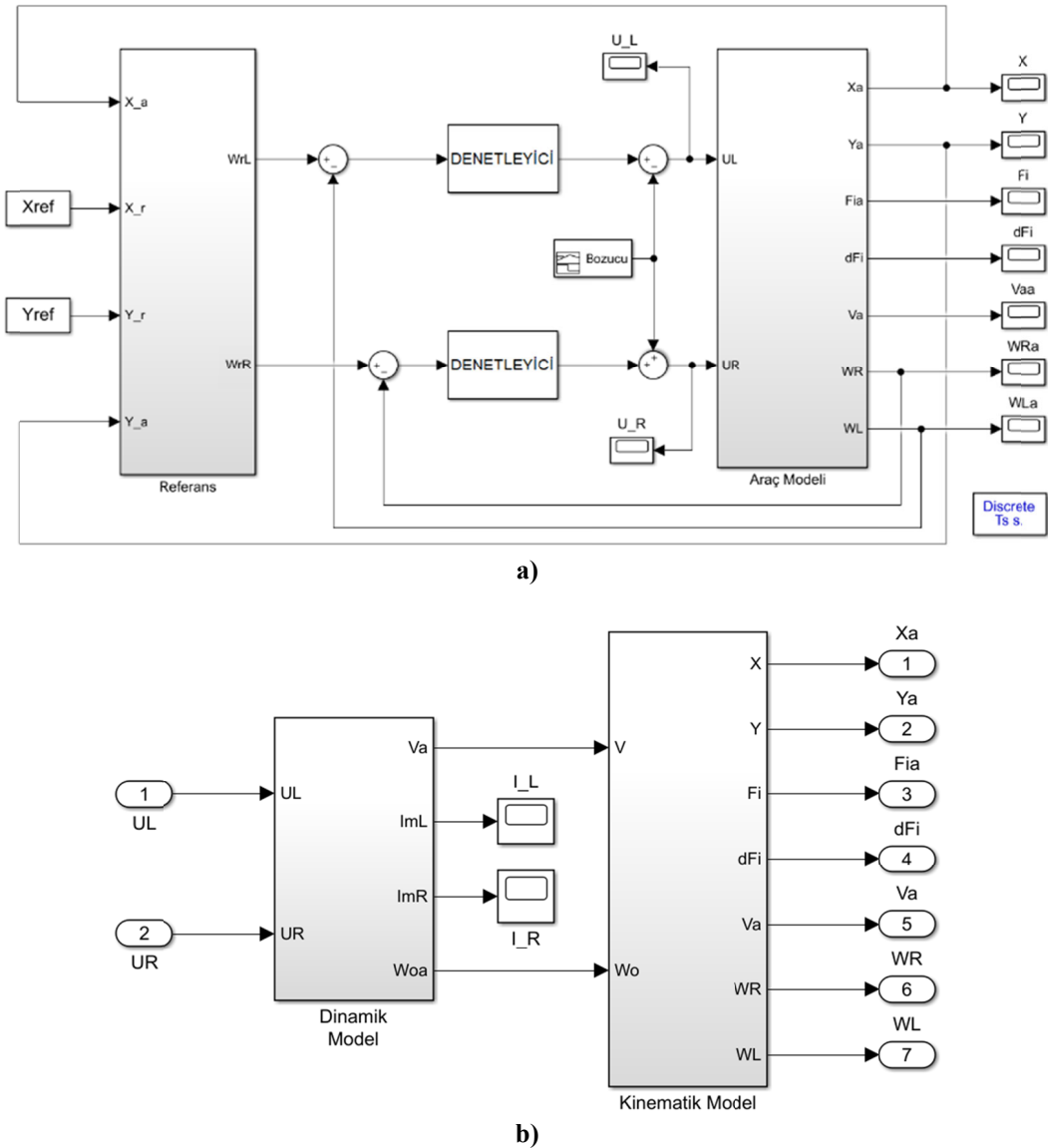
Şekil 4. Dinamik model

Burada; m_a paletli aracın kütlesi ve ivmesi, F_R, F_L, F_T, F_S sağ, sol, toplam ve sürtünme kuvvetleri, J_ε paletli aracın eylemsizlik momenti ve açışal dönme ivmesi, M_T, M_S toplam ve sürtünme momentleri, N_g dişli dönüştürme oranı, d paletler arası mesafe, K_T DA motor tork sabiti, I_r, I_l sağ ve sol motor akımıdır.

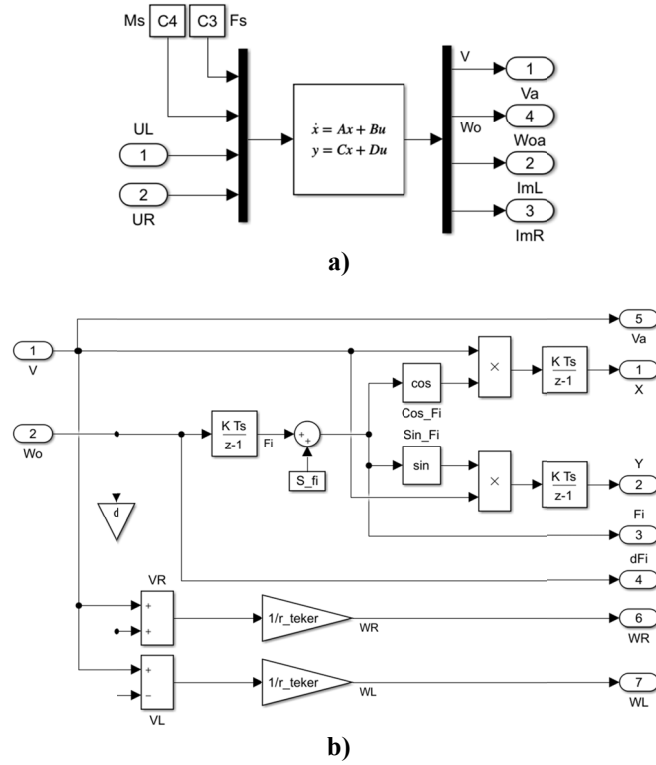
4. YÖNTEM

4.1. Matlab/Simulink Modelinin Oluşturulması

Aracın Matlab/Simulink modeli Şekil 5'de gösterilmiştir. Aracın kinematik modeli Eşitlik 4-8'den faydalanılarak, dinamik modeli ise Eşitlik 17-20'den faydalanılarak Şekil 6'daki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 5. Sistemin matlab/simulink blok diyagramı (a), Araç modeli iç yapısı (b)



Şekil 6. Paletli aracın dinamik modeli (a) ve paletli aracın kinematik modeli (b)

Şekil 6a'daki modelin durum uzay denklemleri Eşitlik 21-28'de verilmiştir.

$$X = [v \quad w_o \quad I_L \quad I_R]^T \quad (21)$$

$$U = [F_S \quad M_S \quad U_L \quad U_R]^T \quad (22)$$

$$\dot{X} = AX + BU \quad (23)$$

$$Y = CX + DU \quad (24)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{N_g K_t}{mr} & \frac{N_g K_t}{mr} \\ 0 & 0 & -\frac{N_g K_t d}{Jr} & \frac{N_g K_t d}{Jr} \\ \frac{K_b N_g}{L_a r} & \frac{K_b N_g d}{L_a r} & -\frac{R_a}{L_a} & 0 \\ \frac{K_b N_g}{L_a r} & \frac{K_b N_g d}{L_a r} & 0 & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

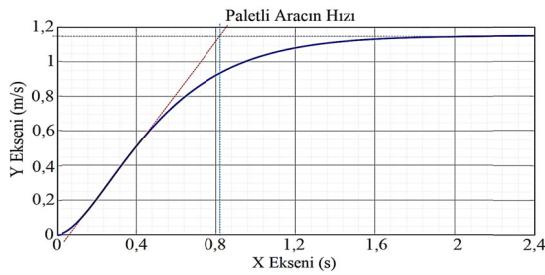
$$D = [0] \quad (28)$$

4.2. Denetleyici Tasarımı

Denetleyicilere giriş olarak sağ ve sol tekerlerin açılma hız hataları verilmiştir. Denetleyici çıkışı Eşitlik 22'deki U matrisinin U_L ve U_R kontrol işaretlerini oluşturmaktadır. Bu işaretler DA motorlarına verilen gerilimlerdir.

4.2.1. PI Tipi Denetleyicinin Tasarımı

Aracın birim basamak tepkisini elde etmek için motorlara sabit 24 V gerilim verilerek, maksimum hız olan 1,15 m/s'ye ulaşması sağlanmıştır. Şekil 7'deki açık-çevrim grafik elde edilmiştir. Paletli aracın açık-çevrim birim basamak tepkisine göre, $D=0,067$ s ve $T=0,753$ s olarak ölçülmüştür.



Şekil 7. Araç hızının açık-çevrim birim basamak tepkisi

Bu değerlere göre Ziegler-Nichols yöntemiyle hesaplanan PID parametreleri Çizelge 3'de verilmiştir [15]. PI denetleyicisinin parametreleri $K_p=10,115$ ve $T_i=0,223$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3. Paletli aracın açık çevrim ziegler-nichols PID parametreleri

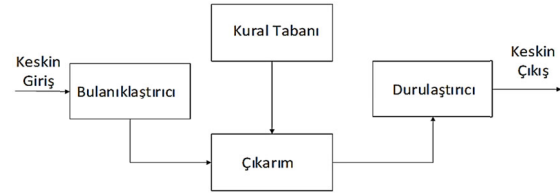
Denetleyici Türü	K_p	T_i	T_d
P	11,239	∞	0
PI	10,115	0,223	0
PID	13,487	0,134	0,034

4.2.2. Bulanık Mantık Denetleyicinin Tasarımı

Bulanıklaştırma, bir sistemden alınan net bir giriş veri kümesinin bulanık dilsel değişkenler, bulanık dilsel terimler ve üyelik fonksiyonları kullanılarak bulanık bir kümeye dönüştürülmesidir. Çıkarım birimi, bulanık giriş setine kural tabanındaki kuralları uygulayarak bir bulanık çıkış seti

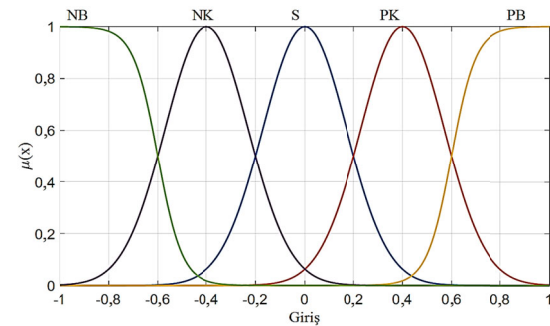
oluşturur. Bulanık çıkarım yöntemlerinde en yaygın olan ve bu çalışmada kullanılan yöntem Mamdani yöntemidir. Bulanıklaştırma, sonuçtaki bulanık çıktı üyelik işlevleri kullanılarak net bir çıktıya dönüştürülür. Sonuç olarak, bu işlem uygulamada kullanılacak gerçek değerleri sağlar [16,17].

Şekil 8'de bir Bulanık Mantık Sistemi (BMS) blok diyagramı verilmiştir. Bu çalışmadaki BMD iki giriş (hata (e) ve hata değişimi (Δe)) ve bir çıkış (motor besleme gerilimi (U))'tan oluşmaktadır.



Şekil 8. Bulanık mantık sistemi blok diyagramı

Sürekli değişkenlerde, herhangi bir aralığı temsil eden bulanık kümelerin sayısı üç ile yedi arasında seçilebilir. Genellikle üç sayısının hassasiyeti az olması ve yedi sayısının da hesaplama yükü getirmesinden dolayı makul olarak beş sayısı seçilmektedir. Gauss tipi üyelik fonksiyonu diğer fonksiyon tiplerine göre daha az parametre gerektirmesi sayesinde birçok çalışmada tercih edilmektedir [18]. Bu çalışmada giriş ve çıkışlar için Şekil 9'daki gibi 5'er Gauss üyelik fonksiyonu NB (Negatif Büyük), NK (Negatif Küçük), S (Sıfır), PK (Pozitif Küçük) ve PB (Pozitif Büyük) olarak seçilmiş ve Çizelge 4'de verilen toplam 25 kural ile tanımlanmıştır. Durulaştırma yöntemi olarak ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır [19].



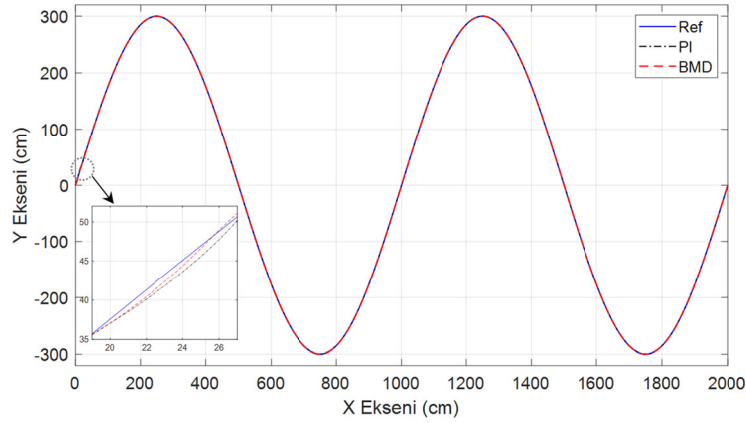
Şekil 9. Bulanık üyelik fonksiyonları

Çizelge 4. Bulanık mantık kural tablosu

U	Δe				
	NB	NK	S	PK	PB
e	NB	NB	NB	NK	S
	NK	NB	NK	S	PK
	S	NB	NK	S	PK
	PK	NK	S	PK	PB
	PB	S	PK	PB	PB

5. BENZETİM ÇALIŞMALARI

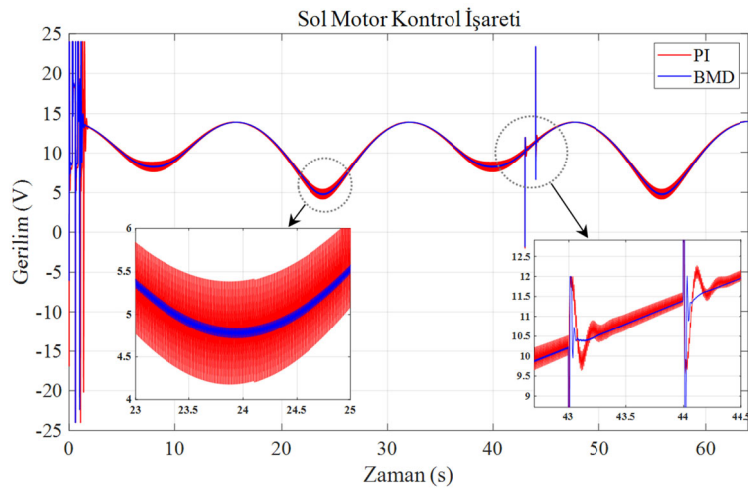
Geliştirilen araç modeli için oluşturulan denetleyicilerin sinüs işaretli bir referans yörüngeyi takip etme başarısı Şekil 10'da gösterilmiştir.



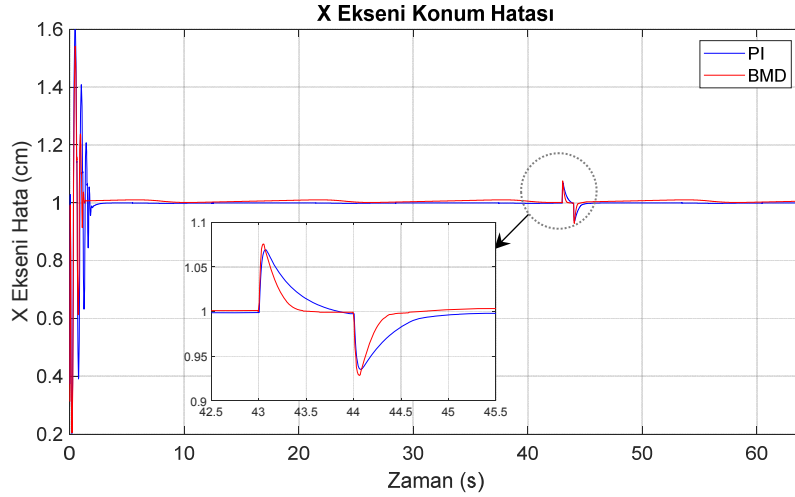
Şekil 10. Referans ve araç yörüngeleri

Her iki denetleyicinin çalışmasında hata çok küçük olduğundan, denetim sonuçlarını daha iyi görüntülemek amacıyla çalışmanın 21-27 cm aralığı büyütülerek şekil üzerinde gösterilmiştir. Denetleyicilerin bozucu girişlere karşı performansını ölçebilmek amacıyla aracın sağ ve

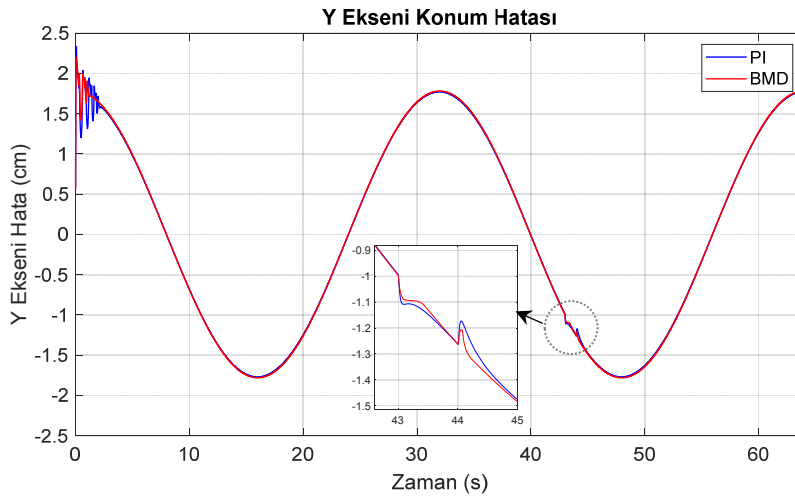
sol motorlarına 43. saniyede 12 V'luk bir bozucu gerilim 1 saniye süre ile uygulanmış ve 44. saniyede kaldırılmıştır. Bu çalışma durumunda elde edilen yörünge, kontrol işaretleri ve hata grafikleri Şekil 10-13'de verilmiştir.



Şekil 11. Sol motor denetleyici çıkış işaretleri



Şekil 12. Araç x-ekseni konum hataları



Şekil 13. Araç y-ekseni konum hataları

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada gerçek bir paletli otonom aracın sistem modeli oluşturularak bulanık mantık denetleyici ile yörünge kontrolü gerçekleştirilmiştir. Kullanılan denetleyicinin performansı klasik PI denetleyici ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 10'daki yörüngeler incelendiğinde, başlangıç anında BMD'nin, PI denetleyiciden daha kısa sürede kararlı hale geçtiği görülmüştür.

Şekil 11'deki sol motora uygulanan kontrol sinyali incelendiğinde PI denetleyici en fazla 1,2 V, BMD ise en fazla 0,1 V'luk bir salınım yaptığı görülmektedir. Sisteme verilen bozucu girişin etkisini PI denetleyici 0,3 s'de düzeltirken, BMD ise 0,2 s'de düzeltmiştir.

Şekil 12'deki x-ekseni konum hata grafiği incelendiğinde her iki denetleyicinin 1 cm hata ile sistemi takip ettiği görülmektedir. Bu hata değeri, referans sinyali ile araç yörüngesi arasındaki hata olmayıp aracın referans sinyali zaman olarak geriden takip etmesinden kaynaklanmaktadır.

Sisteme bozucu giriş uygulandığında meydana gelen yörünge sapmasını PI denetleyici 0,8 s’de düzeltirken, BMD 0,5 s’de düzeltmiştir.

Şekil 13’de ise y-ekseni konum hata grafiği incelendiğinde, her iki denetleyicinin referans sinyali $\pm 1,8$ cm arasında değişen bir hata ile takip ettiği görülmektedir. Bozucu girişin sistemde oluşturduğu etkiyi BMD, PI denetleyiciden daha kısa sürede ortadan kaldırmıştır.

Tüm çalışma durumları incelendiğinde BMD’nin PI denetleyiciye göre daha başarılı olduğu açıkça görülmektedir. Karmaşık bir modele sahip olan paletli araçların yörünge kontrolünde BMD tipi denetleyicinin simülasyon ortamında başarılı olduğu görülmüştür. Bulanık mantık esaslı denetleyicilerin paletli otonom araçların gerçek zamanlı uygulamalarında kullanılabileceği öngörülmektedir.

7. TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmanın yapımında kendilerinden desteklerini esirgemeyen mesai arkadaşlarına teşekkür eder.

8. KAYNAKLAR

1. Dong, H., Luo, Z., 2011. Control Strategies of Human Interactive Robot Under Uncertain Environments. *Mobile Robots: Control Architectures, Bio-Interfacing, Navigation, Multi Robot Motion Planning and Operator Training (2nd Edition)*. Intech, Croatia, p. 390. <https://doi.org/10.5772/2304>.
2. Blasko, V., Kaura, V., 1997. A New Mathematical Model and Control of a Three-phase AC-DC Voltage Source Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 12(1), 116-123.
3. Kececioglu, F.O., Acikgoz, H., Yildiz, C., Gani, A., Sekkeli, M., 2017. Power Quality Improvement Using Hybrid Passive Filter Configuration for Wind Energy Systems. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 12(1), 207–216.
4. Eltamaly, A.M., Alolah, A.I., Badr, B.M., 2010. Fuzzy Controller for Three Phases Induction Motor Drives. *IEEE 2010 International Conference on Autonomous and Intelligent Systems*, 1–6.
5. Kılıç, E., Özçalık, H.R., Şit, S., 2018. Adaptive Controller with RBF Neural Network for Induction Motor Drive. *International Journal of Numerical Modelling. Electronic Networks, Devices and Fields*, 31(3), 1–11.
6. Şit, S., Özçalık, H.R., Kılıç, E., Doğmuş, O., 2016. Asenkron Motorların Online Adaptif Sinirsel-Bulanık Denetim (ANFIS) Sistemine Dayalı Hız Denetim Performansının İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(ÖS 2), 33–41.
7. Sidi, M.H.A., Hudha, K., Kadir, Z.A., Amer, N.H., 2018. Modeling and Path Tracking Control of a Tracked Mobile Robot. *2018 IEEE 14th International Colloquium on Signal Processing and its Application*, 9-10 March, 72–76.
8. Huang, P., Zhang, Z., Luo, X., Zhang, J., Huang, P., 2018. Path Tracking Control of a Differential-Drive Tracked Robot Based on Look-ahead Distance. *IFAC-Papers On Line*, 51(17), 112–117.
9. Asai, M., Chen, G., Takami, I., 2019. Neural Network Trajectory Tracking of Tracked Mobile Robot. *16th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, (4), 225–230.
10. Ji, P., Li, S., Xu, M., Li, J., Guo, J., 2018. Design of Sliding Cloud-Model Cross Coupling Controller for Tracked Mobile Robot. *Proceedings of the 37th Chinese Control Conference*, July 25-27, 5353–5357.
11. Jayakumar, V., Kumar, M., 2012. *Engineering Mechanics*. New Delhi: PHI Learning Private Limited.
12. Malu, S.K., Majumdar, J., 2014. Kinematics, Localization and Control of Differential Drive Mobile Robot. *Global Journal of Researches in Engineering: Robotics & Nano-Tech*, 14(1), 1-9.
13. Gholipour, A., Yazdanpanah, M.J., 2003. Dynamic Tracking Control of Nonholonomic Mobile Robot with Model Reference

- Adaptation for Uncertain Parameters. 2003 European Control Conference, 3118–3122.
14. Wu, X., Xu, M., Wang, L., 2013. Differential Speed Steering Control for Four-wheel Independent Driving Electric Vehicle. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1(4), 355-359.
 15. Ogata, K., 2010. Modern Control Engineering (5th Edition). Prentice Hall, New Jersey, 905.
 16. Kayacan, E., Khanesar, M.A., 2015. Fuzzy Neural Networks For Real Time Control Applications (1st Edition). Butterworth Heinemann, Boston, 264. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02444-6>
 17. Antao, R., 2017. Type-2 Fuzzy Logic Uncertain Systems Modeling and Control. Higher Education Press, Beijing, 136. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4633-9>
 18. Ocampo-duque, W., Osorio, C., Piamba, C., Schuhmacher, M., Domingo, J.L. 2013. Water Quality Analysis in Rivers with Non-parametric Probability Distributions and Fuzzy Inference Systems: Application to the Cauca River , Colombia. Environment International, 52, 17–28.
 19. Aisbett, J., Rickard, J.T., 2014. Centroids of Type-1 and Type-2 Fuzzy Sets When Membership Functions Have Spikes. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 22(3), 685-692.

Experimental Investigation of the Flow Characteristics around a NACA0012 Airfoil Subjected to Stall and Post-Stall Conditions

Göktürk Memduh ÖZKAN*¹

¹Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Adana

Geliş tarihi: 08.05.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Abstract

The flow structure and turbulent characteristics of an airfoil at various Reynolds numbers ($Re_c = 1.5 \times 10^4$, 2.0×10^4 , 2.5×10^4) have been investigated considering two angles of attack ($\alpha = 10^\circ$ and $\alpha = 12^\circ$). PIV measurements have been performed and time-averaged and instantaneous results were presented utilizing vorticity, profiles of streamwise velocity, Reynolds shear stress, and turbulent kinetic energy distributions. The results have shown that both the Re_c and α significantly affect the flow characteristics around the airfoil. Furthermore, the change in flow characteristics between the stall and post-stall angles was elaborated and compared with each other, as being in good agreement with the available literature. The turbulent fluctuations in the airfoil wake, as well as in the suction side, were obtained to be more intense at post-stall angle compared with the stall condition. Besides, due to the earlier flow separation, post-stall condition presented a larger wake and the shedding of vortices formed by the leading and trailing edges of the airfoil.

Keywords: Airfoil, Stall, PIV, Flow structure

Stol ve Stol Ötesi Durumlara Maruz Kalan Bir NACA0012 Kanat Profili Etrafındaki Akış Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi

Öz

Bir kanat profilinin akış yapısı ve türbülans özellikleri, çeşitli Reynolds sayılarındaki ($Re_c = 1,5 \times 10^4$, $2,0 \times 10^4$, $2,5 \times 10^4$) iki atak açısı ($\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=12^\circ$) göz önüne alınarak incelenmiştir. PIV ölçümleri gerçekleştirilmiş ve zaman ortalamalı ve anlık girdap, akış hızı profilleri, Reynolds kayma gerilmesi ve türbülans kinetik enerji dağılımları kullanılarak sonuçlar sunulmuştur. Sonuçlar, hem Reynolds sayısının hem de hücum açısının, kanat profili etrafındaki özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Stol ve stol ötesi açılarda akış karakteristiklerindeki değişiklik, mevcut literatürle iyi bir uyum içinde detaylandırılmış ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Hem kanat profili art izinde hem de emme yüzeyinde oluşan türbülans çalkantılarının, stol ötesi açıda daha şiddetli olduğu elde edilmiştir. Bunun yanında, daha erken akış ayrılması sebebiyle stol ötesi durum, kanat profilinin hücum ve firar kenarlarından doğan girdapların kopması ile birlikte daha geniş bir art izi yapısı göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Kanat profili, Stol, PIV, Akış yapısı

*Corresponding author (Sorumlu yazar): Göktürk Memduh ÖZKAN, gmozkan@cu.edu.tr

1. INTRODUCTION

The stall condition of an airfoil is a subject of interest due to its importance in aerodynamics, and turbomachinery applications (propellers, turbines). When the flow separates from the leading edge at sufficiently large angle of attack, α , oscillations in the velocity and pressure (on the suction side) may occur, resulting in high amplitude vibrations on the airfoil. The consequences of stall may be an airplane crash or reduced efficiency of a turbomachine. The responsible mechanism for stall behavior has been reported by various researchers [1-3], i.e., at large attack angles, α , laminar separation bubble (LSB) formed on the airfoil's suction side starts bursting and cannot reattach to the airfoil's upper surface. However, the dynamics of the flow based on the separation mechanism under stall remain not fully understood and need further investigations to improve engineering designs. Mainly three different stall types have been reported by McCullough and Gault [4]; trailing edge stall, leading-edge stall, and combined trailing-leading edge stall. Through them, the combined stall has the most detrimental effect on the aero-hydro dynamic characteristics of the engineering devices. The combined (or full) stall is realized when angle of attack approaches far beyond the post-stall angle of the airfoil.

On the other side, the low Reynolds number aerodynamics [5] have taken little attention on the research community and still need to be analyzed in detail due to its significance, especially on improving unmanned aerial vehicles [6], as well as the turbomachines. Wang et al. [7] have reported three flow regimes to present individual flow structures on the suction side of a NACA0012 airfoil. Ultra-low ($<10^4$), low (10^4 - 3.0×10^5), moderate (3.0×10^5 - 5.0×10^6) and high ($>5.0 \times 10^6$) Reynolds number flows were revealed in their research where eight distinct flow structures dependent on α , were described. Direct numerical simulations of Rodriguez et al. [3] observed that the structures of separated flow at two different stall angles are slightly different, and corresponding coherent structures also present different modes, in agreement with Huang and Lin [8]. It should be noted that these differences in

flow structures still need to be further investigated in detail, and available numerical works should be supported by experimental studies. In this regard, stall and post-stall conditions of a NACA0012 airfoil at low Reynolds numbers are investigated by Particle Image Velocimetry with this study. Two angles of attack, $\alpha = 10^\circ$ and $\alpha = 12^\circ$ were considered at chord-based Reynolds numbers of $Re_c = 1.5 \times 10^4$, 2×10^4 , 2.5×10^4 . Through them, the results obtained at $Re_c = 2.0 \times 10^4$ were further elaborated since, at this Reynolds number, $\alpha = 10^\circ$ and $\alpha = 12^\circ$ correspond to stall and post-stall angles, respectively for the NACA0012 airfoil according to [7, 9, 10]. It is hoped from this study that the presented results may be beneficial to contribute to the knowledge on low-Reynolds number aero-hydrodynamics prone to stall conditions regarding various engineering applications.

2. EXPERIMENTAL METHOD

The experiments were performed in a closed-loop water channel which has an 8 m-long test section with a spanwise dimension of 1 m and a height of 0.75 m. The turbulence intensity of the free stream velocity at the measurement plane is measured to be less than 2%. For the airfoil, one of the most studied shapes in the literature, NACA0012, was selected and manufactured utilizing 3D printing. High surface quality was obtained by a final polishing of the surface. The airfoil has a chord length of $c=0.1$ m and a span of $b=0.2$ m which corresponds to an aspect ratio of $AR=b/c=2$. Endplates with this AR satisfy the spanwise uniformity of the flow, according to Boutilier and Yarusevych [11]. Hence, the airfoil was fixed with endplates, to eliminate the wall and wing-tip effects on the flow structure. The measurements were performed 5.5 m away from the inlet of the test section, and water height was kept constant as $h_w=0.5$ m. A table was used as the bottom endplate to locate the airfoil at the center of the test section to eliminate the effect of the turbulent boundary layer developed on the side and bottom walls (see Figure 1). The coordinate system was located as started by the leading edge of the airfoil.

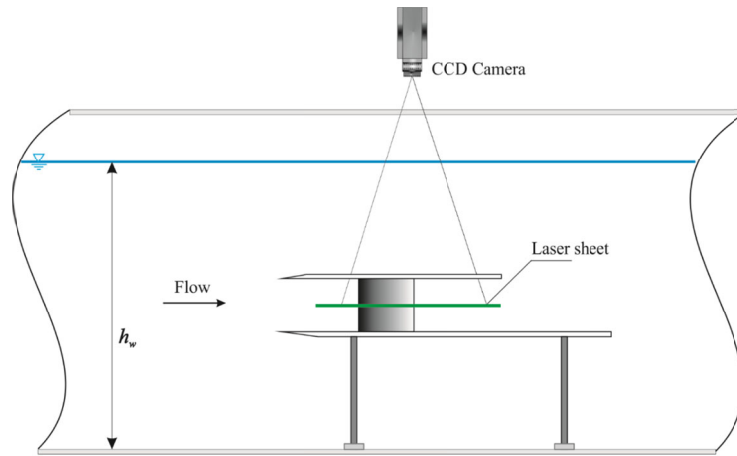


Figure 1. Schematic presentation of the experimental set-up from the side view

Two angles of attack were considered as $\alpha = 10^\circ$ and $\alpha = 12^\circ$ at three different Reynolds numbers based on the chord length, $Re_c = 1.5 \times 10^4$, 2.0×10^4 , 2.5×10^4 ($Re_c = U_\infty c / \nu$ where U_∞ , c , and ν are the free-stream velocity, chord length, and kinematic viscosity, respectively). The angle of attack was adjusted using a Vernier protractor printed on the upper endplate and checked with the camera in the PIV system to ensure that the angle was correctly adjusted. The uncertainty in the angle of attack was $\varepsilon_\alpha = \pm 0.1^\circ$. The temperature of the water was measured and kept constant as $T = 22.8^\circ\text{C}$, corresponding to a kinematic viscosity of $\nu = 0.9427 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [12]. Particle Image Velocimetry (PIV) technique was used to measure the two-dimensional velocity field on the suction side of the airfoil and its near wake. A 35 mm Nikon lens at $f/4.0$ was mounted on the Flow Sense 2ME camera (CCD, 2M, 1600×1200 pix resolution, 8-bit dynamic range, $7.4 \mu\text{m}$ pixel size) to capture the particle images. Silver coated particles having $10 \mu\text{m}$ diameter were used for seeding the flow. A double-pulsed Nd: YAG laser having 532 nm wavelength and 120 mJ/pulse output with a repetition rate of 15 Hz was used for the illumination. The laser sheet thickness and time between images were adjusted to 1 mm and $1000 \mu\text{s}$, respectively. One thousand images were captured for each measurement, and the Dynamic Studio software package was utilized for cross-correlation analysis. For rejecting or substituting spurious vectors (less than 2%), the universal

outlier detection technique [13] was utilized by applying a normalized median validation using a single detection threshold. The uncertainty in measurements [14] was about 2% relative to free-stream velocity in the measurement plane. The vorticity magnitudes were computed by flow circulation using the method of Landreth and Adrian [15]. An interrogation window size of 32×32 pixels was employed with a 50% overlap. The magnification of $M = 0.065$, yielding a resolution of 8.75 px/mm in the object plane, was considered for all experiments, corresponding to the final field of view with $183 \times 137 \text{ mm}^2$.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The structure of the flow around airfoils strongly depends on Re_c and α , resulting in variations on separation, reattachment, and transition mechanisms that determine the wake characteristics of the airfoil. Therefore the effect of Re_c on the flow structure of airfoil at angles of attack of $\alpha = 10^\circ$ and $\alpha = 12^\circ$ is presented in Figure 2 and 3, respectively to elaborate the airfoil wake utilizing time-averaged, $\langle \omega \rangle$ and instantaneous, ω spanwise vorticity contours which were normalized by the chord length, c and the free-stream velocity, U_∞ . It can be seen from Figure 2 that the shear layer separates from the leading edge at $Re_c = 1.5 \times 10^4$, resulting in Kelvin-Helmholtz instability followed by roll-up of the

vortices along the suction side which may be considered as partially attached boundary layer according to Wang et al. [7]. This behavior can also be seen by the time-averaged vorticity contours, $\langle \omega \rangle$, where a distinct structure of the upper shear layer is observed along the leading edge. Due to the increased momentum of the flow by increasing Re_c , the separation is shifted with slight oscillations on the airfoil surface for $Re_c > 1.5 \times 10^4$. While evident perturbations exist in vortical structures at $Re_c = 2.0 \times 10^4$, the flow is more likely to keep attached at $Re_c = 2.5 \times 10^4$. This behavior is due to the particular condition of

$\alpha = 10^\circ$ at $Re_c = 2.0 \times 10^4$, which was defined as the stall angle by previous studies [7,9] for NACA0012. The flow is almost stable and attached at $Re_c = 2.5 \times 10^4$ since the flow separation is postponed due to the increased momentum of the free stream flow. It should also be noted that lower shear evolving from the trailing edge is not strong enough to entrain into the airfoil wake and loses intensity by increasing Re_c . Therefore, even slight oscillations occur in the airfoil wake; vortex shedding could not be observed at the current field of view.

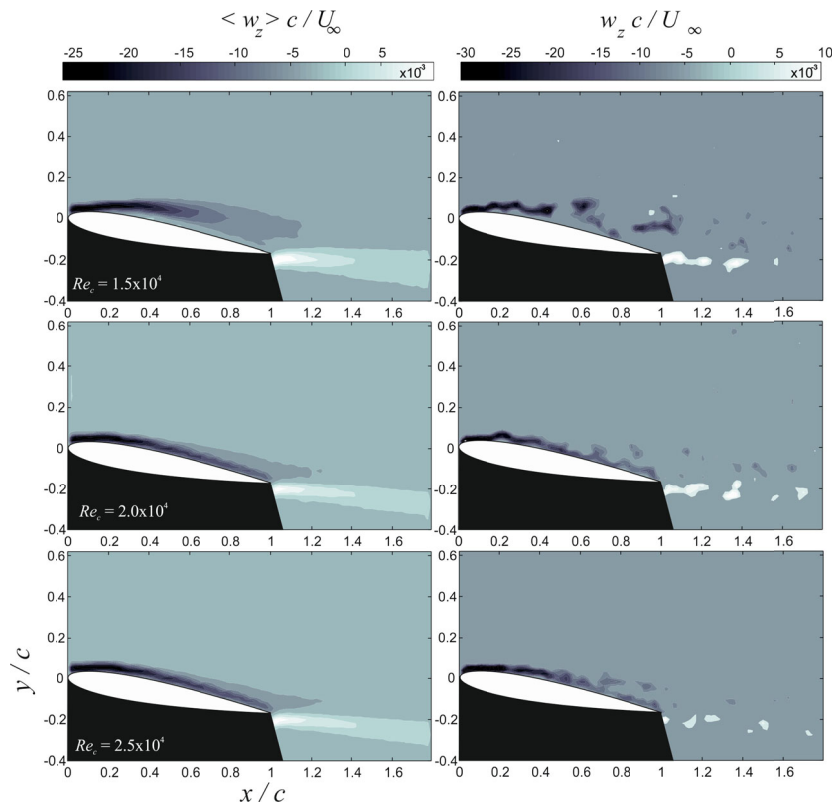


Figure 2. The variation of time-averaged (left) and instantaneous (right) spanwise vorticity contours at $\alpha = 10^\circ$ for the specified Re_c range

Based on the results presented in Figure 2, the flow structures obtained at $\alpha = 10^\circ$ indirectly validate the present experiments. Hence the case at $Re_c = 2.0 \times 10^4$ can be considered as a stall point and will be elaborated in detail latter through the manuscript. To compare the flow structures and

turbulent characteristics at $\alpha = 10^\circ$, the angle of attack of $\alpha = 12^\circ$ can also be considered as the post-stall angle of attack. In this regard, the time-averaged and instantaneous vorticity contours are presented in Figure 3 at $\alpha = 12^\circ$ by varying Re_c . It is evident from the figure that almost all cases, the

flow separation takes place at the leading edge. At $Re_c=1.5 \times 10^4$, a reattachment cannot be seen, and interaction of the vortices generated by the leading and trailing edges exists in the near wake of the airfoil. This is in good agreement with the case of $\alpha=10^\circ$ under the same Re_c where the momentum of the flow is not adequate for the reattachment. An increase in Re_c to $Re_c=2.0 \times 10^4$ results in a delayed separation on the upper surface, which can be understood from both time-averaged and instantaneous vorticity distributions. Compared with the case of $\alpha=10^\circ$, complete separation is obtained as expected from the flow physics, i.e., at post-stall angles, full separation of the flow should take place on the suction side of the airfoil.

However, it can be seen from the instantaneous vortices that the flow intermittently reattaches on the airfoil, which is an indication of strong unsteady oscillations under post-stall conditions. Further increase in Reynolds number to $Re_c=2.5 \times 10^4$ shows a more clear generation of the upper shear layer along the leading edge, which slightly enrolls into the suction side due to the increased momentum of the flow. It should be noted that the roll-up of the lower shear layer from the trailing edge does not take place for $Re_c=2.0 \times 10^4$ and $Re_c=2.5 \times 10^4$, which was the case for $Re_c=1.5 \times 10^4$. This might be due to the rapid breakdown of the vortices when the momentum is more considerable at higher Re_c .

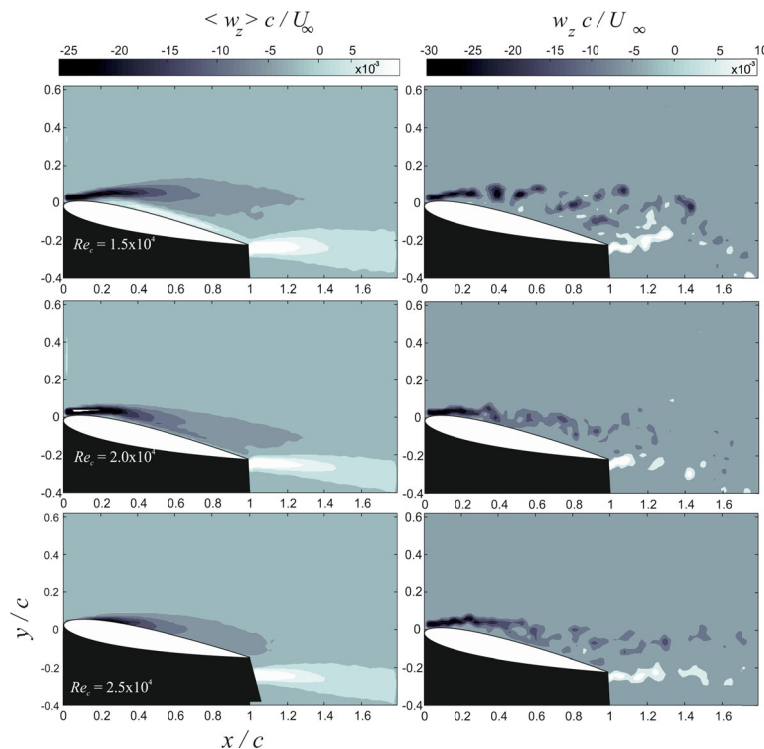


Figure 3. The variation of time-averaged (left) and instantaneous (right) spanwise vorticity contours at $\alpha=12^\circ$ for the specified Re_c range

The change in streamwise velocity distribution in the transverse flow direction is presented in Figure 4, where the velocity magnitudes were normalized by the free-stream velocity, U_∞ . The angles of attack of $\alpha = 10^\circ$ and $\alpha = 12^\circ$ were presented on the top and bottom of Figure 4,

respectively for all Re_c numbers at streamwise locations of $x/c = 0.5$ and $x/c = 1.0$. At both locations, $Re_c = 1.5 \times 10^4$ shows a larger momentum deficit compared with greater Re_c numbers according to the stronger flow separation. This condition is seen at $x/c = 1.0$, which is the edge of

the trailing edge. Profiles of $Re_c x/c = 2.0 \times 10^4$ and $Re_c = 2.5 \times 10^4$ are almost identical at both streamwise locations presenting that the flow is more likely to be attached to the airfoil due to the increased momentum.

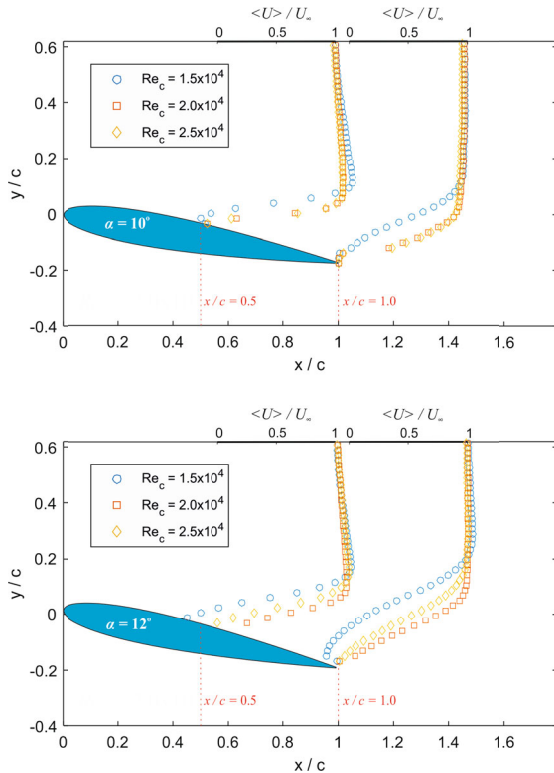


Figure 4. Time-averaged streamwise velocity profiles, $\langle U \rangle / U_\infty$ normalized with free-stream velocity at streamwise locations of $x/c=0.5$ and 1.0 for all Re_c

The angle of attack of $\alpha=12^\circ$ is presented at the bottom of Figure 4. Since the flow separation is earlier and reattachment is not possible at this angle, the negative magnitudes of the streamwise velocity are more distinguishable at $Re_c=1.5 \times 10^4$. Unlikely with $\alpha = 10^\circ$, here there is a distinct difference in the profiles of $Re_c=2.0 \times 10^4$ and $Re_c=2.5 \times 10^4$ even they both present positive magnitudes at specified locations. Interestingly, the momentum of $Re_c=2.0 \times 10^4$ is greater compared with $Re_c=2.5 \times 10^4$, which are considered as post-stall conditions. This might be due to the faster breakdown of vortices separated from the leading

edge at $Re_c=2.5 \times 10^4$, whereas the separated vortical structures found more likely to be attached on the airfoil surface at $Re_c=2.0 \times 10^4$. According to these results presented in Figure 4, the largest deficit in the momentum is obtained at the lowest Re_c . However, the least momentum deficit is obtained at $Re_c=2.0 \times 10^4$, as the post-stall angle for this airfoil type [9]. Therefore, it can be concluded that at post-stall angles, there is no direct relationship between the momentum deficit and Re_c , the lower deficit is obtained exactly at the post-stall angle.

The conclusion by Figure 4 can further be verified by the wake velocity profiles. In this regard, the distribution of wake velocity profiles for all Re_c at $\alpha=10^\circ$ and $\alpha = 12^\circ$ are presented in Figure 5 at $x/c=1.5$. Here, the profiles on the suction side are in accordance with the wake velocity profiles in which the cases for $Re_c > 1.5 \times 10^4$ exhibit identical shape with lower momentum deficit compared with $Re_c=1.5 \times 10^4$. Furthermore, $\alpha=12^\circ$ presents the largest deficit at $Re_c=1.5 \times 10^4$, where the flow separation is almost at the leading edge. Meanwhile, the smallest momentum deficit is observed for $Re_c=2.0 \times 10^4$, as can be considered as a special characteristic of post-stall angles. Henceforward, turbulent characteristics of the flow only at the stall and post-stall angles will be considered to elaborate on their special conditions. From now on, the term stall and post-stall conditions will be used for the conditions $\alpha=10^\circ$ and $\alpha=12^\circ$, respectively, at $Re_c=2.0 \times 10^4$.

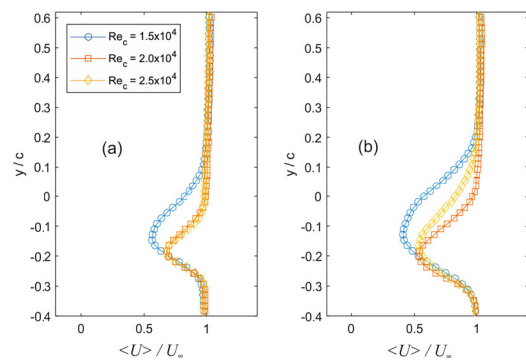


Figure 5. Time-averaged streamwise velocity profiles, $\langle U \rangle / U_\infty$ at streamwise locations of $x/c=1.5$ at (a) $\alpha=10^\circ$ (b) $\alpha=12^\circ$

Turbulent kinetic energy, $\langle k \rangle$, can be approximated by two-dimensional flow assumption by Sheng et al. [16] and is utilized to consider the fluctuations in all directions. The following formula was used to calculate the turbulent kinetic energy where the third fluctuating component is considered to be equal to the half of $(\langle u'u' \rangle + \langle v'v' \rangle)$ (Equation 1).

$$\langle k \rangle = \frac{3}{4}(\langle u'u' \rangle + \langle v'v' \rangle) \quad (1)$$

The spatial distributions of turbulent kinetic energy, $\langle k \rangle$ together with Reynolds shear stress, $\langle u'v' \rangle$ are presented in Figure 6 for stall and post-stall conditions. Their magnitudes were normalized with the square of free-stream velocity, U_∞^2 , where the minimum and incremental values of $\langle k \rangle$ were taken as 0.02 and 0.01, respectively. For $\langle u'v' \rangle$, a color bar is included as an inset to the figure. The contour distributions of $\langle k \rangle$ at stall show the highest concentration along the airfoil's upper surface, which is due to the separation from the leading edge followed by reattachment and consequent oscillations along the surface. The high

fluctuations on the suction side consequently result in kinetic energy production in the airfoil wake. This situation can be seen by the distribution of $\langle u'v' \rangle$ where a negative cluster and a positive cluster are formed along the leading and trailing edges, respectively. Such kind of positive-negative $\langle u'v' \rangle$ distribution is indicative of possible interaction of the vortices and consequent vortex shedding downstream of the airfoil. The structure is changed when the α increased to the post-stall condition shown at the bottom of Figure 6. It should be noted that at post-stall angle, the area occupied by both $\langle k \rangle$ and $\langle u'v' \rangle$ increases, indicating that the wake region gets larger compared with the stall angle. This is also clear with the concentrations on the suction side in which they are weaker for the post-stall condition. Furthermore, the magnitude of the maximum positive shear stress, $\langle u'v' \rangle$ increased by 66.7% compared with the post-stall case (the exact magnitudes are shown in the figure). This sudden increase very well explains the transition of turbulent flow characteristics from stall to post-stall conditions.

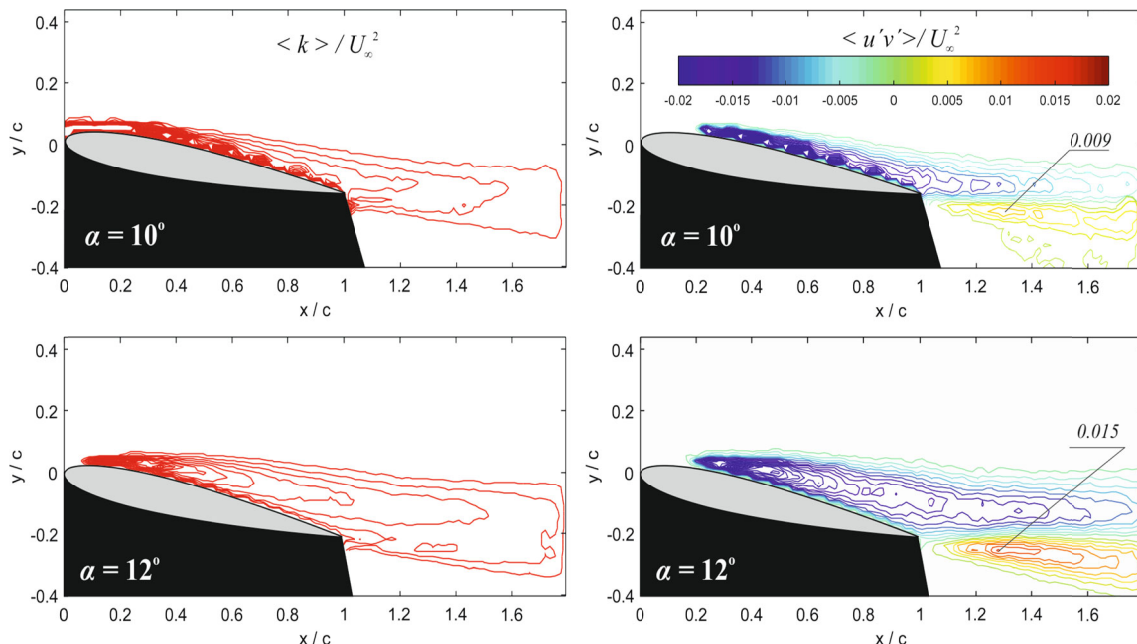


Figure 6. Spatial distribution of the time-averaged turbulent kinetic energy, $\langle k \rangle / U_\infty^2$ and Reynold shear stress, $\langle u'v' \rangle / U_\infty^2$ for stall and post-stall angles

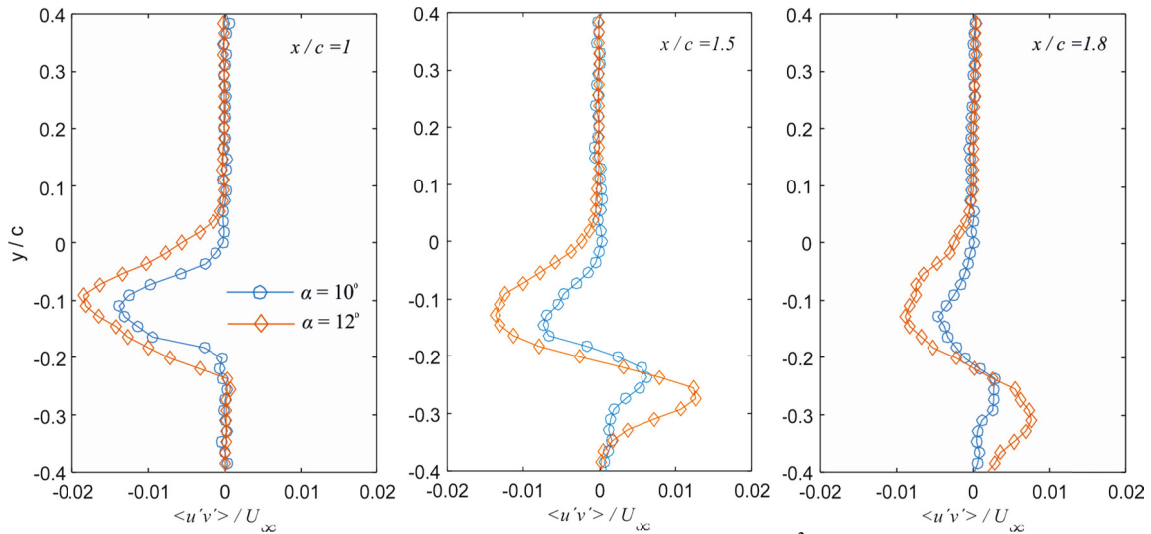


Figure 7. Time-averaged Reynolds shear stress profiles $\langle u'v' \rangle / U_\infty^2$ at streamwise locations of $x/c = 1.0$, 1.5 and 1.8 at stall and post-stall angles

To present the changes in the wake of airfoil more quantitatively, the profiles of normalized $\langle u'v' \rangle$ magnitudes are presented in Figure 7 at three streamwise locations in the airfoil wake, for both angles. One can see that the magnitudes are higher for post-stall conditions at all locations, as expected, i.e., a greater separation causes a larger momentum deficit as depicted before, hence more substantial momentum transfer between the shear layers. The positive and negative $\langle u'v' \rangle$ magnitudes are almost symmetrical for all locations, finally approaching zero magnitudes in the free-stream flow. It should also be noted that the values tend to decrease by increasing streamwise direction where the highest value is observed for $x/c=1.0$ (considering the airfoil wake). The physics behind this reduction can be explained by the dissipation of turbulent kinetic energy in the streamwise direction, which was created by the interaction of vortices generated by the leading and trailing edge shear layers. This is further elaborated in Figure 8, which depicts the trend in $\langle k \rangle$ downstream of the airfoil at a transverse location of $y/c=0.0$. For $x/c > 1.0$, it is observed that $\langle k \rangle$ is higher at post-stall condition; however, the magnitudes of both conditions tend toward to almost zero and get the same value at $x/c=1.4$. Furthermore, Figure 8 also reveals information for the suction side, i.e., the magnitude

of $\langle k \rangle$ is greater for stall condition and decreasing in the downstream direction. The magnitudes for stall and post-stall get the same magnitude at about $x/c=0.6$, and the condition is now reversed, i.e., the magnitude of $\langle k \rangle$ for post-stall is greater. Similar to the comments on $\langle u'v' \rangle$ profiles shown in Figure 7, this is due to the strong separation from both leading and trailing edges followed by the vortex roll-up and consequent vortical interactions downstream of the airfoil wake. The presented results are in good agreement with the vorticity contours presented in Figures 2 and 3, as well as the results of Huang and Lin [8].

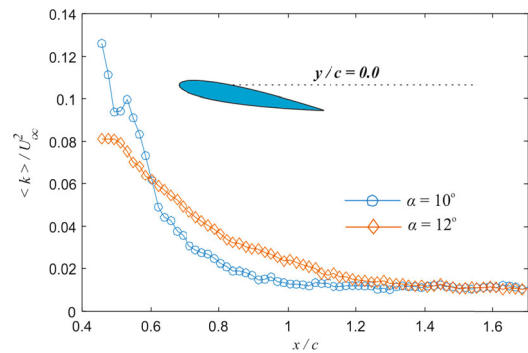


Figure 8. Change in normalized turbulent kinetic energy, $\langle k \rangle / U_\infty^2$ in streamwise direction at transverse location of $y/c=0.0$

4. CONCLUSIONS

In this study, PIV measurements were performed around a NACA0012 airfoil to examine the effect of Reynolds number on the flow characteristics, as well as the change in turbulent fluctuations at stall and post-stall angles. A total of six cases were considered for the study having $\alpha=10^\circ$ and $\alpha=12^\circ$ angle of attack and Reynolds numbers of $Re_c=1.5\times 10^4$, 2×10^4 , 2.5×10^4 . According to the results obtained, it is found that the effect of Re_c on the flow structure is predominantly observed for $\alpha=12^\circ$, i.e., the separated flow region was larger, and the turbulent fluctuations were more significant compared with $\alpha=10^\circ$. At post-stall angles, it was revealed that there is no direct relationship between the momentum deficit and Re_c according to the velocity profiles evaluated on the suction side, as well as the airfoil wake.

Throughout the parameters, the considered angles corresponded to stall and post-stall conditions of the airfoil at $Re_c=2.0\times 10^4$ and results were found to be in consistent with Celaver et al. [9] and Wang et al. [7]. The transition from stall to post-stall was unveiled quantitatively. It was shown that the turbulent fluctuations dramatically change from stall to post-stall angle in which a significant increase in their magnitudes occurs for the post-stall condition. An increase of 66.7% in the maximum Reynolds shear stress was obtained at post-stall angle compared with the stall angle which is due to the earlier and massive separation of the flow. The underlying mechanism of greater turbulent fluctuations at post-stall angle was explained by the formation of the vortices evaluated at the leading and trailing edges, finally interacting with each other. Eventually, vortex shedding was observed at post-stall angles, which can induce the vibrations on the airfoil.

It is hoped that the results of the present work might help to understand the physical mechanism of stall conditions in airfoils. Besides, this study may be extended further to investigate the vortex shedding characteristics, especially at post-stall angles.

5. REFERENCES

1. Almutairi, J., Jones, L., Sandham, N., 2010. Intermittent Bursting of a Laminar Separation Bubble on an Airfoil. *AIAA Journal* 48 (2), 414–426.
2. Bragg, M., Heinrich, D., Balow, F., Zaman, K., 1996. Flow Oscillation Over an Airfoil Near Stall. *AIAA Journal* 34 (1), 199–201.
3. Rodriguez, I., Lehmkuhl, O., Borrell, R., Oliva, A., 2013. Direct Numerical Simulation of a NACA0012 in Full Stall. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 43, 194- 203.
4. McCullough, G.B., Gault, D.E., 1951. Examples of Three Representative Types of Airfoil Section Stall at Low Speeds. NACA TN No: 2502.
5. Lissaman, P.B.S., 1983. Low-Reynolds Number Airfoils. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 15, 223-39.
6. Mueller, T.J., DeLaurier, J.D., 2003. Aerodynamics of Small Vehicles. *Annu. Rev. Fluid. Mech.* 35(1), 89–111.
7. Wang, S., Zhou, Y., Alam, M.M. Yang, H., 2014. Turbulent Intensity and Reynolds Number Effects on an Airfoil at Low Reynolds Numbers, *Physics of Fluids*, 26, 115107.
8. Huang, R.F., Lin, C.H., 1995. Vortex Shedding and Shear-layer Instability of Wing at Low-Reynolds Numbers. *AIAA Journal* 33 (8), 1398-1403.
9. Cleaver, D.J., Wang, Z., Gursul, I., Visbal, M., R., 2011. Lift Enhancement by Means of Small-amplitude Airfoil Oscillations at Low Reynolds Numbers. *AIAA J.* 49(9), 2018–2033.
10. Yasuda, T., Fukui, K., Matsuo, K., Minagawa, H., Kurimoto, R., 2019. Effect of the Reynolds Number on the Performance of a NACA0012 Wing with Leading Edge Protuberance at Low Reynolds Numbers. *Flow, Turbulence and Combustion*. 102, 435-455.
11. Boutilier, M.S.H., Yarusevych, S., 2012. Effects of end Plates and Blockage on Low-Reynolds-number Flows Over Airfoils. *AIAA J.* 50, 1547.

12. Cengel, Y.A., Cimbala, J.M., 2008. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications (1st Edition), McGraw Hill, 49.
13. Westerweel, J., Scarano, F., 2005. Universal Outlier Detection for PIV Data. Experiments in Fluids, 39, 1096–1100.
14. Raffel, M., Willert, C.E., Scarano, F., Kähler, C.J., Wereley, S.T., Kompenhans, J., 2018. PIV Uncertainty and Measurement Accuracy. In: Particle Image Velocimetry. Springer, Cham.
15. Landreth, C.C., Adrian, R.J., 1990a. Impingement of a Low Reynolds Number Turbulent Circular Jet onto a Flat Plate at Normal Incidence. Experiments in Fluids, 9, 74-84.
16. Sheng, J., Meng, H., Fox, R.O., 2000. A large eddy PIV method for turbulence dissipation rate estimation. Chem. Eng. Sci., 55, 4423-4434.

Tüketici Sonrası Geri Dönüştürülen Denim Kumaşların Seçilmiş Konfor Özellikleri Üzerine Bir Çalışma

Füsun DOBA KADEM^{*1}, Şehpal ÖZDEMİR¹

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

Geliş tarihi: 20.02.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Denim, her yaştan ve her kesimden kullanıcıya hitap eden, dünya pazarında üstün rol oynayan bir kumaş çeşididir. Post-consumer re-cycle kavramı yani tüketici sonrası geri dönüşüm; hizmet süresini tamamlamasının ardından atılan tekstil malzemelerinin yeniden kullanılması işlemidir. Tüketici sonrası atıkların geri dönüşüm işlemi bu atıkların toplanmasını ve yeni giysilerde kullanılmak üzere bu atıklardan iplik üretilmesini kapsamaktadır. Bu çalışma ile bir denim işletmesinde, tüketici kullanımı sonrası geri dönüştürülen denim kumaşların hava geçirgenliği, eğilme dayanımı ve yıkamadan sonraki boyut değişimi standartlara göre tespit edilmiş ve elde edilen sonuçlara göre bu geri dönüşüm işleminin denim üretiminde etkin bir şekilde kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tüketici sonrası geri dönüşüm, Denim, Hava geçirgenliği, Eğilme dayanımı

A Study on Selected Comfort Properties of Post-Consumer Recycled Denim Fabrics

Abstract

Denim is a kind of fabric that plays an outstanding role in the world market and appeals to users from all ages and all walks of life. Post-consumer concept as is the process of reusing textile materials after completing the life cycle period. Recycling of post-consumer wastes involves the collection of waste and the production of yarn from these wastes for use in new clothing. In this study, air permeability, stiffness and determination of dimensional change during washing and drying of post-consumer denim fabrics was determined according to the standards. According to the results, this recycling process can be used effectively in denim production.

Keywords: Post-consumer recycle, Denim, Air permeability, Stiffness

* Corresponding author (Sorumlu yazar): Füsun DOBA KADEM, efsun72@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Denim; yaş, cinsiyet, renk, ırk, siyasi ve sosyal statü ayrımı olmaksızın, bireylerin birbirlerini eşit görebileceği tek giysi türü olarak, her yaşta ve her kesimden kullanıcıya hitap eden, Türk ve Dünya denim pazarında üstün rol oynayan bir tekstil ürünüdür. Geçmişte işçi kıyafeti olarak kullanılmaya başlayan, günümüze kadar hızlı bir değişim ve gelişim göstererek moda ve tasarım etkilerini en yoğun görebildiğimiz Denim ürünler, sürdürülebilirlik kapsamında, çevre dostu olma hedefiyle, üzerinde araştırmalar yapılan konuların başında gelmektedir.

Sürdürülebilirlik, çevre değerlerinin ve doğal kaynakların akılcı yöntemlerle kullanılması ilkesiyle ekonomik gelişmenin sağlanmasını amaçlayan çevreci dünya görüşü olarak tanımlanmaktadır. Tekstil ve hazır giyim sektörü özellikle son yıllarda çevresel zararlar, atıkların minimize edilmesi, yeniden kullanım (re-use, up-cycle, down-cycle) ve geri dönüşüm (re-cyle) çalışmaları üzerine oldukça hızlı bir ivmelenme sergilemeye başlamıştır. Tekstil ve hazır giyim sektöründe sürdürülebilirlik kapsamında yapılmakta olan akademik çalışmalar gün geçtikçe artmakta ve sektörde yer alan işletmeler bu alanda geçmişe oranla daha duyarlı hareket etmektedirler.

Pamuk, dünyadaki en yaygın kar getiren gıda dışı mahsuldür. Üretimi dünya çapında 250 milyondan fazla kişiye gelir sağlamakta olup gelişmekte olan ülkelerdeki işçiliğin neredeyse %7'sini kullanmaktadır. Tüm tekstillerin yaklaşık yarısı pamuktan üretilmektedir [1]. Tek bir pamuklu t-shirt için 2700 litre su harcanmaktadır. Dünya Yaban Hayatı Fonu, 1 kilogram pamuk üretmek için 20000 litre su gerektiğini, mevcut üretim yöntemlerinin sürdürülemez olduğunu, atılan giysilerden geri dönüşümle elde edilen pamuk kullanılarak tüketici sonrası geri dönüştürülmüş ürün ile saf pamuk ihtiyacının azaltılıp milyarlarca galon su tasarrufu sağlanabildiğini savunmaktadır [1].

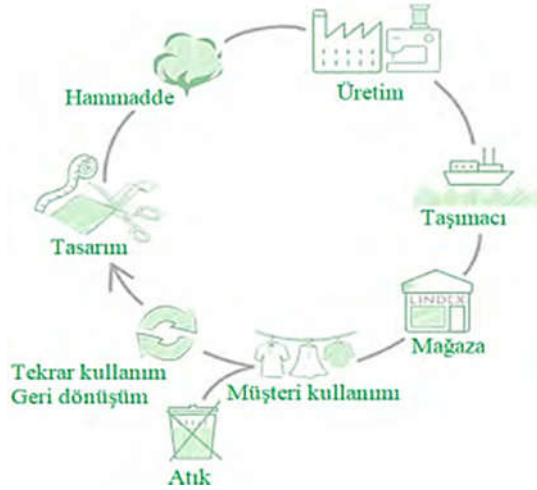
Geri dönüşüm, atık malzemeleri yeni malzeme ve nesnelere dönüştürme işlemidir. Bir malzemenin

geri dönüştürülebilirliği, bakir durumunda sahip olduğu özellikleri yeniden kazanma yeteneğine bağlıdır. Geri dönüşüm, modern atık azaltma sürecinde başlıca bileşenlerden olup, “azalt (reduce)-tekrar kullan (reuse) -geri dönüştür (recyle)” atık hiyerarşisindeki üçüncü bileşen olup günümüzde bu alanda önemli yol kat edilmiş hatta ileri dönüşüm (up-cycling) yapılarak süreç boyunca herhangi bir kalite kaybının yaşanmadığı üretimler de gerçekleştirilmiştir [2].

Tekstil üretim prosesleri büyük miktarda doğal kaynak (su, petrol, toprak) tüketimine sebep olmakta, toksik kimyasallar kullanılmakta ve bu durum karbondioksit açığa çıkarmaktadır. Buna ek olarak da her yıl milyonlarca ton tekstil atılmaktadır. Tekstil sektöründe bu atıkların minimize edilmesi ve geri dönüşümü üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmaya konu olan tüketici kullanımı sonrası geri dönüşüm yönteminin haricinde, tekstilde sürdürülebilirlik için kaynak kullanımını azaltma veya kullanılmayan eşyaların tekrar değerlendirilmesi gibi yollara da başvurulabilmektedir.

Giyim endüstrisinde geri dönüşüm, son yıllarda dikkat çekmeye başlamış, konfeksiyon endüstrisindeki perakendeciler, kullanılmış giysileri toplamak için çeşitli kuruluşlarla ortaklık geliştirerek geri dönüşüm stratejileri oluşturmaya ve tüketici sonrası geri dönüşüm ürünlerini destekler politikalar uygulamaya başlamışlardır. Giyim sektöründe geri dönüşüm, tüketici öncesi ve tüketici sonrası olarak iki şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Tekrar kullanım, geri dönüşüm, kompostlama, yakma vb. işlemler ömrü biten giysileri bekleyen olasılıklardır. Tüketici eski giysiyi ihtiyacı olana verme veya üzerinde ufak değişiklikler yaparak giyme seçeneğinde karar kılırsa, giysi tekrar giyilebilmekte, eğer tekrar giyilebilme mümkün değilse geri dönüşüm şeklinde değerlendirilmektedir. Geri dönüşüm tesisinin bulunup bulunmadığı, giysinin mevcut durumu, giysinin lif içeriği, giysinin tüketici tarafından ne derece kullanılmış olduğu vb. kriterlere bağlı olarak uygulanacak seçenek değişmektedir.

Sürdürülebilir giysi talebinde bulunan müşteriler için giysinin etiketinde geri dönüşüm terimi kullanılarak tüketici dikkatini çekmeye yönelik uygulamalar firmaların önemsedığı bir tercihtir. Şekil 1’de geri dönüşüm için uygulanan giysi üretim döngüsü görülmektedir.

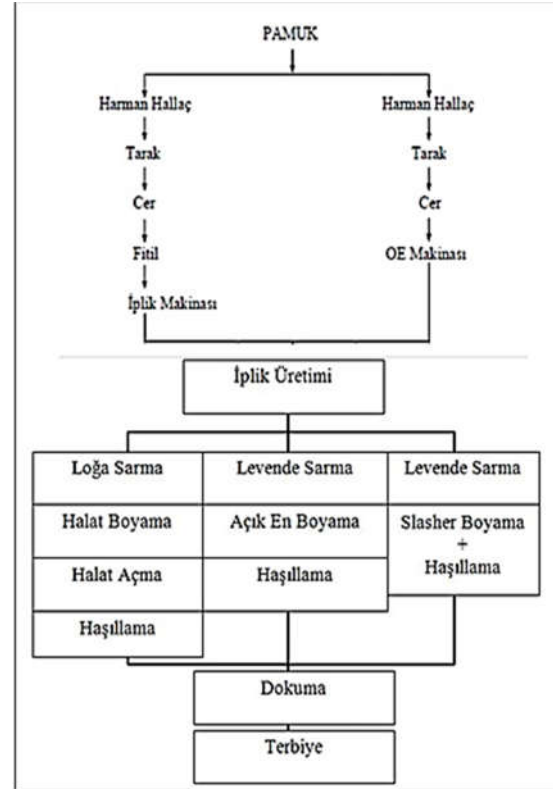


Şekil 1. Giysi üretim döngüsü [3]

Post-consumer re-cycle kavramı yani tüketici sonrası geri dönüşüm, sürdürülebilirlik kapsamında son zamanlarda ortaya çıkan bir kavramdır. Tüketici sonrası (PC) geri dönüşüm; tüketiciye ulaştıktan sonra hizmet süresini tamamlamasının ardından atılan tekstil malzemelerinin özellikle konfeksiyon ürünlerinin bir takım işlemlerden geçerek yeniden kullanılması işlemidir. Tüketici sonrası atıkların geri dönüşüm işlemi bu atıkların toplanmasını ve yeni giysilerde kullanılmak üzere bu atıklardan yeniden elyaf elde edilerek iplik üretim aşamasında belli bir oranda karışımında kullanılarak iplik üretilmesini kapsamaktadır ve böylece yeni kıyafetler üretilmektedir [4].

Tüketici kullanımı sonrası geri dönüştürülmüş elyaf kullanılarak elde edilen denim kumaşın üretimi, standart denim kumaş üretimi gibidir. Farklı olan aşama, kullanılan ipliklerin, konfeksiyon atıklarından geri dönüşümle elde edilen elyafın %15-20 gibi oranda harmana karıştırılarak iplik üretiminde kullanılıyor olmasıdır.

Şekil 2’de genel olarak bir denim kumaş üretiminin elyaftan mamul kumaşa işlem aşamaları verilmiştir [4].



Şekil 2. Denim kumaş üretim aşamaları [4]

Konfeksiyon atıklarından geri dönüşümle elde edilen elyafın üretim yolculuğu söz konusu atıkların, balyalar halinde geri dönüşüm tesisine iletilmesi ile başlar. Geri dönüşüm tesisine gelen konfeksiyon atıkları ilk aşamada balyalarından açılır. Materyal, renk, elyaf kalitesi farklılığı ve tekstil içermeyen materyaller (etiket, rivet, fermuar vb. materyaller) bulunması nedeniyle, heterojen yapıda olan konfeksiyon atıkları tasnif işlemi (ayıklama, ayırma vb.) ile yabancı materyallerinden ayrılır, üzerindeki dikişleri (varsa) sökülür. Daha sonra konfeksiyon atıkları küçük parçalara ayrılarak açıcılarda elyaf haline getirilir. Buradan çıkan materyal ikinci bir açıcıdan geçirilir. Tarak türünde olan bu makinede tek tek lif haline yani elyaf harmanına girebilecek duruma getirilerek balyalanır ve işlem tamamlanır (Şekil 3) [5].



Şekil 3. Tüketici kullanımı sonrası geri dönüştürülmüş elyaf üretimi [5]

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kurtoğlu ve diğerlerinin tüketici sonrası geri dönüşüm üzerine yaptıkları çalışmasında, hazır giyim ürünlerinin kumaş kırıntılarında geri dönüşüm iplikler elde edilerek süprem kumaş üretilmiş ve bu kumaştan giysi dikilmiştir. Elde edilen geri dönüşüm ipliklerin, örme kumaşın ve giysinin kalite kontrol testleri yapılmış ve sonuçları geri dönüşüm olmayan kumaş ile karşılaştırılmıştır. Neticede, kumaş kırıntılarının geri dönüşümü ile elde edilen ipliklerin başarılı bir şekilde hazır giyim sanayinde giysi üretiminde kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır [6].

Doba Kadem [7], denim sektöründe pamuk atıklarının geri dönüşümü üzerine yaptığı deneysel çalışmada atkısı ve çözgüsü re-cyle pamukla harmanda karıştırılarak üretilmiş denim kumaş ile re-cyle olmayan denim kumaşın mukavemet özelliklerini karşılaştırmış ve neticede re-cyle

pamuklu denim kumaşların da diğerleri gibi kullanılabilirliği ortaya konmuştur.

Bairagi'nin tüketici sonrası konfeksiyon atıkları üzerine 20-30 yaş arası genç yaş grubu ile yapmış olduğu kapsamlı bir anket çalışmasında, nüfusun %68'inin her ay giysiler için alışveriş yaptığı, satın alma dürtüsü ve fiili ihtiyacın temel olarak yeni giysilerin satın alma niyetinin arkasındaki nedenler olduğu tespitlerinde bulunmuştur. Ankete katılanların giysilerinin çoğunun, üst giysi ağırlıklı (gömlek gibi) 45'den fazla kıyafetten oluştuğu, bunların da üst giyim giysilerin yaklaşık %88'i olduğu tespit edilmiştir. 20-30 yaş arasındaki ankete katılan kesimin %53'ü giysilerini ihtiyaç olmadığı gerekçesiyle atmaya tercih etmiştir. Birkaç yıl önce, Hint evlerinde geri dönüştürülen kıyafetlerin çoğu, çantalar, battaniyeler, minder örtüleri, perdeler gibi tekrar kullanım (re-use) olarak diğer ürünlere dönüştürülmekteyken son zamanlarda, tüketici kullanımı sonrası konfeksiyon atıklarının geri dönüşümünden elde edilen giysiler üzerine daha fazla yoğunlaşıldığı görülmüştür [8].

Geri dönüştürülmüş pamuktan elde edilen denim kumaşların kuruma davranışının deneysel olarak değerlendirildiği Tölek ve Doba Kadem [9] tarafından yapılan bir başka çalışmada, orijinal denim kumaş ile geri dönüşümlü denim kuruma davranışı deneysel olarak incelenmiş ve her ikisinin kuruma kapasitesinin benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir.

Wangcheng Liub ve diğerleri [10], tüketici sonrası pamuk atığının çevre dostu alkalın/üre çözücü sistemleri kullanılarak kimyasal olarak geri dönüştürüldüğü çalışmalarında rejenere lifler üretmişlerdir. Elde edilen liflerin çapı, morfolojisi, ısı özellikleri ve gerilme özellikleri SEM, TGA, XRD ve gerilme testi ile karakterize edilmiştir. Bu çalışma ile çevre dostu solventler içeren tüketici sonrası pamuk atığının ekonomik bir geri dönüşüm yöntemi olduğu, mevcut ticari normal liflerle karşılaştırılabilir özelliklerine sahip liflerin üretilebileceği görülmüştür.

Doba Kadem ve Özdemir'in 2019 yılında tüketici sonrası geri dönüşüm denim üzerine hazırladıkları çalışmada, bir denim işletmesinde bu şekilde geri

dönüştürülen denim kumaşların kopma mukavemeti ve sürtünme haslığı özellikleri standartlara göre tespit edilmiştir. Yapılan testler sonucu, harmana eklenen geri dönüşüm elyafın kumaş mukavemetinde çözgüde yaklaşık %15 atkıda ise %10 azalmaya sebep olduğu, ancak bunun kabul edilebilir sınırlarda olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca sürtme haslığı test sonuçlarında da her iki kumaşta da beklenildiği gibi haslık değerlerinin düşük çıktığı, geri dönüşüm kumaşların sürtme haslığının standart üretime kıyasla daha kötü olduğu görülmüştür [11].

Bu çalışmada, tüketici kullanımı sonrası geri dönüştürülerek üretilen elyaftan iplik üretilerek elde edilmiş denim kumaş, standart üretimdeki denim kumaşla kıyaslanmış ve kumaşların seçilmiş konfor özellikleri analiz edilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

Tüketici kullanımı sonrası toplanıp geri dönüştürülen elyafın orijinal elyafla harmanda karıştırılarak elde edildiği denim kumaş (PC denim) ile standart denim kumaşın (REF denim) bazı konfor özelliklerinin kıyaslandığı bu çalışmada yapılan testler ve sonuçları değerlendirilmiştir. Her numuneye hava geçirgenliği, yıkama ve kurutmada boyut değişiminin tayini, eğilme dayanımı (Stiffness) ve dokunmuş tekstil mamullerinin eğilme dayanımı tayini testleri uygulanmıştır.

Çalışmada tüketici kullanımı sonrası geri dönüştürülen denim kumaşların üretiminde kullanılan atkı ve çözgü ipliklerine ait özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.

Referans kumaş REF, tüketici kullanımı sonrası geri dönüştürülmüş kumaş PC ile ifade edilmiştir. Kumaşların üretiminde aynı harmandan pamuk iplikleri kullanılmıştır. Kullanıcı sonrası geri dönüşüm prosesinden elde edilen elyaf, çözgü ipliği harmanına %20 oranında karıştırılmıştır olup %79 pamuk elyafı referans denim ile aynı harmandır [12]. İki kumaş ta aynı terbiye işlemlerinden geçirilmiştir. Çizelge 2'de denim kumaşlara ait konstrüksiyon parametreleri ve

kumaşların gördüğü terbiye işlem şartları verilmiştir. Numuneler, SEM-Taramalı Elektron Mikroskobu yardımıyla görüntü analizine tabi tutulmuş ve Çizelge 3'te standartları verilen testler uygulanmıştır.

Çizelge 1. Denim kumaşların iplik özellikleri

İplik Kalite Değerleri	REF Denim		PC Denim	
	Çözü	Atkı	Çözü	Atkı
Rkm (km)	15,16	16,82	16,11	17,21
U %	14,91	8,64	15,72	9,99
CVm	7,43	6,02	6,68	7,05
Eğrilebilirlik İndeksi	3,85	2	4,1	2,41
İnce yer (-50)	1,95	0	8	0
Kalın yer (+35)	47	13,89	321,5	90,5
Neps (200)	16,42	11	201	73,5
Tüylülük	9,06	7,11	8,7	6,87

Çizelge 2. Kumaşların Konstrüksiyon Özellikleri

Numune Özellikleri	REF Denim	PC Denim
Atkı İpliği Numarası(Ne)	10	
Çözü İpliği Numarası(Ne)	7,12	
Atkı Sıklığı (tel/cm)	20	
Çözü Sıklığı(tel/cm)	28	
Örgü türü	3/1 Z dimi	
Kumaş Kompozisyonu (%)	%99 pamuk %1 elastan	%79pamuk %20 post consumer recyle %1 elastan
Kumaş Eni(cm)	135	
Terbiye İşlem Şartları	Tek yüz yakma, Merserizasyon, (NaOH, 18° Bè), 40° C Yıkama, Yumuşatıcı apre, Sanforizasyon	

Hava geçirgenliği, kumaşların ısınma, rüzgâr koruması ve nefes alabilirlik gibi özelliklerini belirleyen parametrelerden biri olduğundan, denim kumaşların bir konfor özelliği olarak bu çalışmada hava geçirgenliği tespit edilmiş ve REF denim ile PC denim birbirleriyle kıyaslanmıştır.

Yıkama ve kurutmada boyut değişmesinin tayini için, numunelere 9 kg kapasiteli ev tipi çamaşır

makinesinde 40 °C'de 45 dakika yıkama işlemi ve ardından düz bir zemine sererek kurutma işlemi uygulanmıştır. Yıkama-kurutma sonrasında kumaşların standartlara uygun şekilde boyutsal değişim oranları, sıklık, gramaj ve kalınlık değerlerinden oluşan fiziksel özellikleri ölçülmüştür.

Çizelge 3. Numunelere uygulanan analizler ve ilgili standartlar

Denim Kumaşlara Uygulanan Analizler	İlgili Standartlar
Hava Geçirgenliği (mm/s)	TS 391 EN ISO 9237, 1999 [13]
Yıkama ve kurutmada boyut değişmesinin tayini (%)	TS EN ISO 5077, 2012 [14]
Eğilme Dayanımı (Stiffness) (kg-f)	ASTM D1388, 2018 [15]
Dokunmuş tekstil mamullerinin eğilme dayanımı tayini (cm) (45° Eğik Düzlem)	TS 1409, 1973 [16]

Kumaşların eğilme dayanımları 2 farklı metot ile analiz edilmiştir. Birinci yöntem olarak ASTM dairesel eğilme test metoduna göre dijital pnömatik yumuşaklık test cihazı ile ölçüm yapılmıştır.

Diğer yöntem olarak eğik düzlem metoduyla eğilme dayanımı, kumaşların sarkma uzunluğu değerlerinin kullanıldığı formüllerle hesaplanmıştır [17]. Atkı numunelerinden elde edilen sarkma uzunluklarının aritmetik ortalaması alınarak ortalama atkı yönü sarkma uzunluğu (X_a) ve benzer şekilde çözgü numunelerinden de ortalama çözgü yönü sarkma uzunluğu (X_c) hesaplanmıştır. Eşitlik 2 ve 3 ile her iki denim kumaş türünün eğilme dayanımları tespit edilmiştir. Burada, a atkı yönü ç çözgü yönünü ifade etmektedir.

$$C = X/2 \quad (1)$$

C= Eğilme uzunluğu, cm
X= Sarkma uzunluğu, cm

$$G = 0,1 * W * C^3 \quad (2)$$

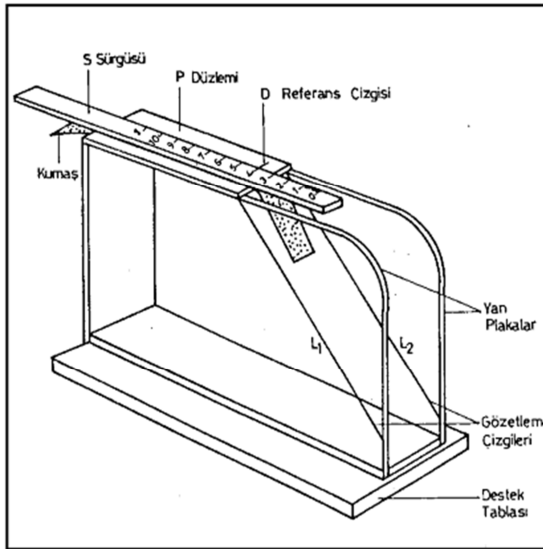
G= Eğilme dayanımı, mg.cm

$W =$ Kumaşın metrekare ağırlığı, g/m^2

Kumaşın genel eğilme dayanımı G_0 , 3 nolu eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$G_0 = (G_a * G_c)^{1/2} \quad (3)$$

Çizelge 8’de test sonuçları yer almaktadır. Şekil 4’te ise eğik düzlem metoduyla yapılan eğilme dayanımı test düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 4. Eğik düzlem metoduyla yapılan eğilme dayanımı test düzeneği [18]

4. BULGULAR

Tüketici kullanımı sonrası geri dönüştürülmüş denim kumaş (PC denim) ve orijinal pamuklu denim kumaş (REF denim) standart atmosfer koşullarında (%65 Bağlı Nem ve 20 °C sıcaklık) kondüsyonlandıktan sonra bazı konfor testlerine tabi tutulmuştur.

Yıkama sonrası atkı ve çözgü yönlerindeki çekme yüzdeleri Çizelge 4’te verilmiştir. Kumaşların yıkama sonrası gramaj, sıklık ve kalınlık özellikleri de Çizelge 5’te karşılaştırılmıştır.

Yıkama sonrası kumaş çektiği için birim alana daha fazla iplik düşmektedir ve bu da kumaşların

kalınlık, sıklık ve birim alanının gramaj değerlerinde artışa sebep olmuştur.

Çizelge 4. Yıkama sonrası boyut değişiminin tayini (%)

Ölçüm No	Yıkama sonrası boyut değişimi (%)			
	REF Denim		PC Denim	
	Çözgü yönü	Atkı yönü	Çözgü yönü	Atkı yönü
1	6	5	6	5
2	5	7	7	7
3	4	5	3	8
4	5	6	5	6
5	4	4	5	4
6	5	8	5	5
7	2	7	5	7
8	5	5	5	5
Ortalama	4,50	5,80	5,10	5,80
Standart Sapma	0,119	0,135	0,112	0,135

Çizelge 5. Numunelerin fiziksel özellikleri

	Yıkama Öncesi		Yıkama Sonrası	
	REF Denim	PC Denim	REF Denim	PC Denim
Gramaj (g/m^2)	399,3	411,48	445,8	436,2
Kalınlık (cm)	0,73	0,728	0,918	0,904
Atkı Sıklığı (tel/cm)	20	17	20	22
Çözgü Sıklığı (tel/cm)	26	27	27	29

Çizelge 6’dan görüldüğü gibi, tüketici sonrası geri dönüşüm denim kumaşın (PC denim) hava geçirgenlik değeri standart denim kumaşa (REF denim) göre yaklaşık %30 oranında daha düşük çıkmıştır. Geri dönüşüm elyafın kullanımında, tüketici sonrası atık olan konfeksiyon ürünlerinin sökülüp küçük parçalara kırılıp sonra geri dönüşüm pamuk işlem adımlarının takip edilerek yeniden hammadde olarak karışımında kullanılması, PC denim için, homojen olmayan bir yapının öngörülemez bir takım olumsuz katkılarının dikkate alınmasını ortaya koymaktadır. Bu sebeple %100 tüketici sonrası geri dönüşüm elyaftan denim üretimi yerine, %10-%30 aralığında karışım olacak şekilde üretimde hammaddeye katkı tercih edilmektedir.

Sonuçlar Çizelge 7 ve Şekil 5’te gösterilmiştir.

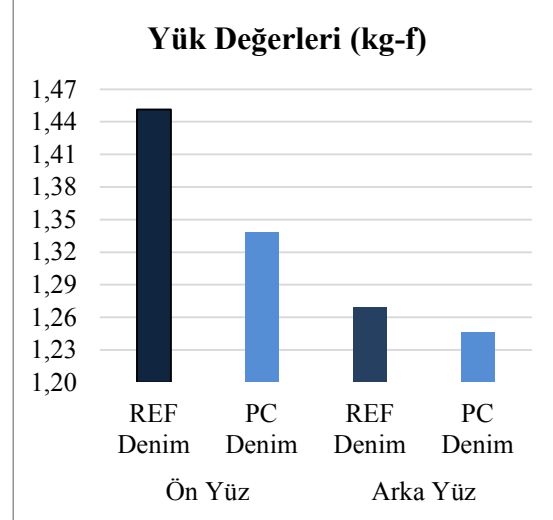
Çizelge 6. Hava geçirgenliği sonuçları (mm/s)

Ölçüm No	REF Denim	PC Denim
1	72,61	50,10
2	72,61	48,17
3	74,78	48,64
4	79,52	53,30
5	73,68	52,19
6	77,08	51,65
7	74,78	53,30
8	74,78	58,26
9	75,00	55,67
10	80,81	57,59
Ort.	75,56	52,89
St.Sap.	2,62	3,30

Tüketici sonrası geri dönüşüm denim kumaşın (PC denim) eğilme dayanımı referans denimden daha düşük tespit edilmiştir. PC denimde, %20 tüketici sonrası geri dönüşüm elyafı olarak çözgü ipliği üretimine katıldığı düşünüldüğünde, bu tür kumaşlar sadece pamuklu giysilerden değil, elastan, polyester gibi sentetik hammaddelerin bulunduğu karışım kumaşlardan da elde edilebileceği için, hammaddenin geri dönüşüm aşamasında gördüğü işlemler sonucunda elyaf kalitesinin %100 orijinal pamuk elyafından elde edilen denim kumaştan (REF denim) daha yumuşak bir tutumun ortaya çıkmasını sağladığı kanaati oluşmuştur.

Çizelge 7. Numunelerin eğilme dayanımları

Ölçüm No	REF Denim		PC Denim	
	Ön Yüz	Arka Yüz	Ön Yüz	Arka Yüz
1	1,316	1,206	1,005	1,078
2	1,605	1,402	1,426	1,207
3	1,46	1,156	1,084	1,395
4	1,418	1,274	1,520	1,366
5	1,457	1,308	1,655	1,188
Ort.	1,451	1,269	1,338	1,247
St.Sap.	0,093	0,085	0,252	0,118



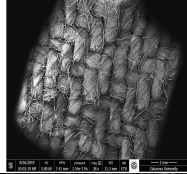
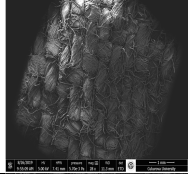

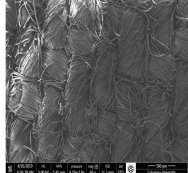
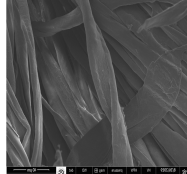
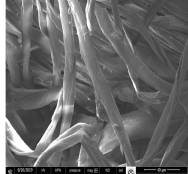
Şekil 5. Eğilme dayanımı test sonuçları grafiği

Çizelge 8. Numunelerin eğilme dayanımları

Ölçülen özellikler	REF Denim		PC Denim	
	Atkı	Çözgü	Atkı	Çözgü
Ortalama Sarkma Uzunluğu	5,750	7,900	5,580	6,880
Eğilme Uzunluğu	2,875	3,950	2,790	3,440
Eğilme Dayanımı (mg.cm)	948,883	2460,881	893,637	1635,036
Genel Eğilme Dayanımı (mg.cm)	1528,1		1223,468	

Numunelerin SEM- Taramalı elektron mikroskobu yardımıyla 28, 60 ve 1000 büyütme oranları kullanarak alınan görüntüleri Çizelge 9'da gösterilmiştir.

Çizelge 9. Numunelerin SEM görüntüleri

		REF Denim	PC Denim
Büyütme Oranı	28x		
	60x		
	1000x		

5. SONUÇLAR

Hazır giyim sektörü gibi kumaş atıklarının geçmişten beri değerlendirildiği sektörde, tüketici kullanımı sonrası giysilerin de geri dönüşüm işlemine tabi tutulması son yıllarda üzerinde çalışılan bir konudur. Tüketici sonrası geri dönüşümle yeniden hayat bulan bu tür hazır giyim ürünleri tüketiciler için de ilgi çekici olmaya başlamış ve çevre dostu olabilmek adına bu konuya duyarlılık gösterilmeye başlanmıştır.

Deneyssel olarak yürütülen bu çalışmada, tüketici kullanımı sonrası geri dönüştürülmüş elyaflar kullanılarak üretilen denim kumaş (PC denim) ile aynı konstrüksiyondaki orijinal denim kumaşın (REF denim) bazı konfor özellikleri tespit edilerek birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Buna göre;

- ✓ PC denim ve REF denim kumaşlar arasında hem atkı yönünde hem çözgü yönünde belirgin bir kumaş çekmesi farkı görülmemiştir. Geri dönüştürülmüş elyaf çözgü ipliği harmanına karıştırılarak kullanıldığı için, PC denim kumaşın çözgü yönü kumaş çekme oranının

daha yüksek olduğu görülmektedir. Yıkama sonrasında kumaşlar çektiği için birim alana daha fazla iplik düşmektedir ve bu da kumaşların kalınlık, sıklık ve metre kare ağırlık (gramaj) değerlerinde artışa sebep olmaktadır.

- ✓ Hava geçirgenliği özelliğinde tekstil yüzeylerinin ham maddesi önemli bir paya sahiptir. Çalışmada kullanılan PC denim kumaş sadece pamuklu kumaşlardan değil, kısmen de olsa elastan, polyester gibi sentetik hammaddeler bulunan kumaşlardan da elde edilebileceği için, PC denim kumaşın hava geçirgenlik değeri standart denim kumaşa göre daha düşük çıkmıştır. Ayrıca iplikteki kalın yer (+50) oranı PC denimde daha yüksek olduğu (iplikler daha kalın olduğundan) için birim uzunluğa giren örgü kaynaklı gözeneklilik daha azdır. Bu da hava geçirgenliğini olumsuz etkilemiştir.

- ✓ Kumaşların eğilme dayanımları 2 farklı metot ile analiz edilmiştir. ASTM dairesel eğilme test metoduna göre dijital pnömatik yumuşaklık test cihazı ile yapılan ölçümlerde REF ve PC denim kumaşların eğilme dayanımları birbirine çok yakın değerler bulunmuştur. Eğik düzlem metodu ile uygulanan deneyde, her iki kumaş türünde de çözgü numunelerinin eğilme dayanımının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. 3/1 dimi örgü yapısı nedeniyle PC ve REF denim kumaşların arka yüzü atkı yoğunluklu, ön yüzü çözgü yoğunluklidir. Geri dönüştürülmüş elyaflar çözgüde kullanıldığı için bu elyafların kullanımını kumaşın daha yumuşak tutuma sahip olmasına katkı sağladığı düşünülmektedir.

Tek bir pamuklu t-shirt için 2700 litre su harcandığı, 1 kilogram pamuk üretmek için 20000 litre su gerektiği gerçeği, bir çok bilinçli tüketiciyi kendine gelmesi için zorlamakta, tüketici, seçtiği bu tür ürünlerle de sürdürülebilir bir dünya için kayda değer bir prestij kazanmaktadır. Amaç, üst düzey geri dönüşüm sağlayarak ürüne değer katmak ise, sıfırdan pamuk üretilip kıyafet yapmak yerine atık kumaşlardan elde edilen pamuk ile hem doğal kaynaklar duyarısızca kullanılmamış olur hem de enerji ve su tasarrufu sağlanarak doğaya

verilen zarar önemli ölçüde azaltılır. Farklı ham maddelerden %100 PC ürünler mevcut olmakla birlikte, son yıllarda özellikle denim sektöründe %20 tüketici sonrası geri dönüşüm denim ürünler rağbet görmekte ve AR-GE ye önem veren firmalar, %100 tüketici sonrası geri dönüşüm pamuklu denim çalışmalarına ivme kazandırmaya çalışmaktadır.

Daha az küresel ısınma, daha az kirlilik, dünya ile daha barışık tüketici için SIFIR ATIK, her bireyin misyonu olmalıdır.

6. TEŞEKKÜR

Yazarlar olarak bu çalışmada, kumaşların temini için verdiği destekten dolayı BOSSA DENİM'e (ADANA), testlerin yürütülmesinde verdiği laboratuvar desteği için Çukurova Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümüne teşekkür ederiz.

7. KAYNAKLAR

1. <https://www.wordwild.org/industries/cotton> erişim tarihi: 06/04/2020
2. <https://wikipedia.org>, erişim tarihi: 06/04/2020
3. Yücel, S., Tiber, B., 2018. Hazır Giyim Endüstrisinde Sürdürülebilir Moda, *Tekstil ve Mühendis*, 25(112), 370-380.
4. Roshan P., 2015. Denim, Manufacture, Finishing and Applications, the Textile Institute, Woodhead Publishing Series in Textiles, UK.
5. <https://www.denimalliance.org>, erişim tarihi: 06/04/2020.
6. Kurtoğlu Necef, Ö., Seventekin, N., Pamuk, M., 2013, Hazır Giyim Sektöründeki Kumaş Kırpıntılarının Geri Dönüşümü Üzerine Bir Çalışma, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 23(3), 286.
7. Doba Kadem, F., 2016. Sürdürülebilir Bir Yaklaşım: Denim Sektöründe Pamuk Atıklarının Geri Dönüşümü Üzerine Bir Çalışma, 12. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi (UKMK 2016), 23-26 Ağustos 2016, İzmir.
8. Bairagi, N., 2017. Recycling of Post-consumer Apparel Waste in India: Channels for Textile Reuse, *Journal of Textile Science & Engineering*, 8(1), 1-3. DOI:10.4172/2165-8064.1000331.
9. Tölek, Ş., Doba Kadem, F., 2017. An Experimental Evaluation About Drying Behavior of Sustainable Denim, 16. Uluslararası Tekstil Teknolojisi ve Kimyasındaki Son Gelişmeler Sempozyumu, 4-6 Mayıs 2017, 105, Bursa.
10. Wangcheng L., Shuyan L., Liu, T., Liu, T., Zhang, J., Liu, H., 2019. Eco-friendly Post-consumer Cotton Waste Recycling for Regenerated Cellulose Fibers, *Carbohydrate Polymers*, 206(2019), 141-148.
11. Doba Kadem, F., Özdemir, Ş., 2019 Denim Geri Dönüşüm Uygulamaları-Tüketici Sonrası Geri Dönüşüm (Post-Consumer Re-Cycle), Ulusal Çukurova Tekstil Kongresi-UÇTEK'2019 26-27 Eylül 2019, 501-508, Adana.
12. Bossa Denim ve Spor Giyim İşletmeleri Kataloğu, 2019.
13. TS 391 EN ISO 9237, 1999. Tekstil-Kumaşlarda Hava Geçirgenliğinin Tayini.
14. TS EN ISO 5077, 2012. Tekstil - Yıkama ve Kurutmada Boyut Değişmesinin Tayini.
15. ASTM D1388, 2018. Eğilme Dayanımı (Dijital Pnömatik Yumuşaklık Test Cihazı ile).
16. TS 1409, 1973 Dokunmuş Tekstil Mamullerinin Eğilme Dayanımı Tayini.
17. Gülşen Bakıcı, G., Doba Kadem, F., 2015. An Experimental Study About Sewability and Bending Strength Properties of Cotton Fabrics, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(2), 177-182.
18. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Tekstil Mühendisliği Laboratuvar Föyleri 2020.

İç Isı Değiştiricili Transkritik CO₂ Soğutma Sisteminin Farklı Tasarım Parametreleri için Ekserji Analizi

İbrahim KARAÇAYLI^{*1}, Erdoğan ŞİMŞEK²

¹Ege Üniversitesi, Ege Meslek Yüksekokulu, İklimlendirme ve Soğutma Teknolojisi Programı, İzmir

²Çukurova Üniversitesi, Adana Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 04.06.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Bu çalışmada iç ısı değiştiricili karbon dioksit soğutucu akışkanla (R744) çalışan kritik nokta üstü (transkritik) soğutma çevriminin tasarım parametrelerinin enerji ve ekserji verimine olan etkileri incelenmiştir. Tasarım parametreleri olarak genişleme elemanı çıkışında soğutucu akışkanın kuruluk derecesi ile iç ısı değiştiricisiyle sağlanan kızgınlık derecesi dikkate alınmıştır. Bu amaçla, iç ısı değiştiricili CO₂ soğutma çevriminin tüm bileşenlerindeki enerji transferini, ekserji yıkımını, entropi üretimini ve ekserji verimini hesaplamak amacıyla buharlaşma sıcaklığı 0 °C ve yoğuşma basıncı 10 MPa alındı. Buna ek olarak, etkinlik katsayısı ile tüm sistemin ekserji verimi hesaplandı. 5 °C ve 30 °C kızgınlık değerlerinde en uygun kuruluk derecesi sırasıyla 0,42–0,47 ve 0,31–0,36 aralığında olduğu belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Transkritik soğutma çevrimi, İç ısı değiştirici, Karbon dioksit, Ekserji yıkımı

Exergy Analysis of a Transcritical CO₂ Compression Refrigeration System with Internal Heat Exchanger for Different Design Parameters

Abstract

In this study, effect of the design parameters of a transcritical refrigeration cycle using carbon dioxide refrigerant (R744) with internal heat exchanger on energy and exergy efficiencies were investigated. Quality of the refrigerant at the exit of the expansion valve and amount of superheating supplied by the internal heat exchanger were considered as design parameters. For this aim, in order to determine the energy transfer, the exergy destruction, entropy generation and exergy efficiency within the all components, the calculations were carried out at evaporation temperature of 0 °C and condensation pressure of 10 MPa. In addition to this, performance coefficient and the exergy efficiency of the whole system were calculated. The most suitable refrigerant qualities at superheating values of 5 °C and 30 °C were determined as between 0,42–0,47 and 0,31–0,36, respectively.

Keywords: Transcritical refrigeration cycle, Internal heat exchanger, Carbon dioxide, Exergy destruction

*Corresponding author (Sorumlu yazar): İbrahim KARAÇAYLI, ibrahim.karacayli@ege.edu.tr

1. GİRİŞ

Enerji kaynaklarına olan taleplerin artmasına karşın fosil esaslı enerji kaynaklarının kısıtlı olması ve küresel ısınma etkilerinin iklim değişiklikleriyle kendini göstermesi alternatif enerji kaynaklarına olan ilgiyi arttırmaktadır [1]. Küresel ısınma potansiyeli (GWP) çok düşük ve ozon tabakasını delme potansiyeli (ODP) sıfır olan alternatif soğutucu akışkanlar soğutma çevrimlerinde tercih edilmesi iyi bir çözümdür [2-4]. Bu nedenle soğutma çevrimlerinde çevreye zararlı olan kloroflorokarbon (CFC) ve hidrokloroflorokarbon (HCFC) içeren soğutucu akışkanlar yerini hidroflorokarbonlara (HFC) ve karbon dioksit gibi doğal soğutucu akışkanlara bırakacaktır [5]. Ucuz ve kolay bulunabilen CO₂'nin kritik basınç ve sıcaklığı sırasıyla 31,6 °C ve 73,8 kPa'dır [4].

Soğutucu akışkan olarak CO₂'nin (R744) kullanıldığı soğutma çevrimi basit buhar sıkıştırma soğutma çevrimi prensibiyle çalışır [6]. Soğutucu akışkan olarak CO₂'nin özgül ısısının ve termal iletkenliğinin yüksek olması, viskozitesinin düşük olması gibi avantajlarının yanı sıra ODP değerinin sıfır, GWP değerinin ise birden küçük olması nedeniyle literatürde çok fazla araştırmalara konu olmuştur [7]. Kritik sıcaklık ve basıncının düşük olması nedeniyle bu soğutma çevrimi kritik nokta üzerinde gerçekleşmektedir. Aksu ve Kurt [8], buharlaştırıcı çıkışında soğutucu akışkanın doymuş buhar olarak kabul edildiği CO₂ ile çalışan kritik basınç üstü bir ısı pompasının hem ısıtma hem soğutma karakteristikleri incelemiştir. Buna göre -15°C ile 0 °C buharlaşma ve 30°C ile 45°C gaz soğutucu çıkış sıcaklık değerleri aralığında ısıtma ve soğutma etkinlik katsayılarını hesaplamış ve optimum gaz soğutucu basınçları belirlemiştir. Özgür ve arkadaşları [9] kritik nokta üstü CO₂ soğutma çevrimleri için optimum gaz soğutucu basıncını sistemdeki buharlaşma sıcaklığının ve gaz soğutucudan çıkış sıcaklığının bir fonksiyonu olarak elde etmiştir. Gullo ve arkadaşları [10], aşırı kızgınlık ve aşırı soğuma değerlerini 5 K kabul edip iki kompresörlü paralel sıkıştırma CO₂ soğutma çevrimini ekserjetik yönüyle geleneksel CO₂ çevrimiyle kıyaslamıştır. Tao ve arkadaşları [11], iç ısı değiştiricili transkritik CO₂ soğutma

çevrimi ile çalışan konut iklimi kurmuş ve deneysel verileri kullanarak ikinci yasa analizi yapmıştır. Soğutma tarafındaki ve gaz soğutucu tarafındaki hava giriş sıcaklıkları, hızları ve buharlaşma sıcaklığı gibi çalışma şartlarının sistem performansı ve toplam ekserji verimi üzerine etkilerini incelemiştir.

Literatürde CO₂ soğutma çevriminde bir takım iyileştirmelerin yapılarak sistemin verim artışlarının incelendiği çok fazla çalışma bulunmaktadır. Özay ve Güngör [3], iç ısı değiştiricili CO₂ soğutma çevriminin enerji analizini yaparak çevrimin maksimum performans değerini sağlayan optimum gaz soğutucu basıncını hesaplamıştır. Buharlaştırıcı çıkışında aşırı kızgınlık değeri 5 K kabul etmiş. Fartaj ve arkadaşları [12], iç ısı değiştiricili CO₂ soğutma çevriminin performansını etkileyen ana faktörleri tanımlamak üzere enerji, ekserji ve entropi yöntemleriyle termodinamik analizi yaparak sistemin soğutma performans katsayılarını hesaplamıştır. Sarkar ve arkadaşları [13], hem ısıtma hem soğutma uygulamaları için iç ısı iç ısı değiştiricili CO₂ soğutma çevriminin gaz soğutucusundaki su sıcaklığı, çevre hava sıcaklığı, kompresör hızı ve ısı transfer alanı oranı gibi değişik çalışma parametrelerinin bileşenlerin tersinmezliklere ve sistemin ekserji verimine olan etkilerini incelemiştir. İç ısı değiştiricisinin kullanıldığı kullanılmadığı çevrimlerde soğutucu akışkanın buharlaştırıcıyı doymuş buhar veya kızgın buhar olarak terk ettiği kabul edilebilir. Shariatzadeh ve arkadaşları [14], çalışma akışkanı CO₂ olan iç ısı değiştiricili kullanılan ve kullanılmayan, basınç düşümü için kısımla vanası veya genişleticili kullanılan toplam dört farklı tipte kritik basınç üstü soğutma çevriminde buharlaşma ve gaz soğutucu çıkış sıcaklığının soğutma performans katsayısı ve ekserji verimine olan etkisini incelemiştir. Wang ve arkadaşları [15], iç ısı değiştiricili, basınç kontrol elemanlı ve çift genişleme elemanlı kritik nokta üstü CO₂ soğutma çevrimlerinin performanslarını geleneksel soğutma çevrimle kıyaslamıştır. Ayrıca gaz soğutucu çıkışındaki soğutucu akışkan ve buharlaşma sıcaklıklarının bir fonksiyonu olarak en uygun gaz soğutucu basıncı nümerik yöntemlerle elde etmiştir. Bellos ve Tzivanidis [16] gaz soğutucu

çıkışında R134a ve LiBr-H₂O çalışma çifti ile çalışan buhar sıkıştırma çevrimiyle aşırı soğutmalı kritik nokta üstü CO₂ soğutma sisteminin enerji ve ekserji analizini yapmışlar ve basit CO₂ soğutma çevrimiyle kıyaslamışlardır.

Kılıç [17], farklı buharlaşma ve gaz soğutucu çıkışındaki soğutucu akışkan sıcaklıkları için tek kademeli ve iki kademeli CO₂ soğutma çevrimin performans katsayılarını karşılatmıştır. Bai ve arkadaşları [18], ejektör genişlemeli transkritik CO₂ soğutma çevriminde buharlaştırıcı çıkışındaki soğutucu akışkanı doymuş buhar kabul etmiş ve kompresörün basma basıncı ile kompresörün izantropik veriminin sistemin ekserji verimi üzerine etkilerini incelemiştir. Bellos ve Tzivanidis [19], sadece temel elemanlardan oluşan transkritik CO₂ soğutma çevrimini referans alarak, iç ısı değiştiricili, paralel sıkıştırma, iki kademeli sıkıştırma ve gaz soğutucudan sonra mekanik soğutmalı olmak üzere farklı konfigürasyonlardaki çevrimlerin farklı buharlaşma ve gaz soğutucu çıkış sıcaklıklarındaki performanslarını karşılatmıştır.

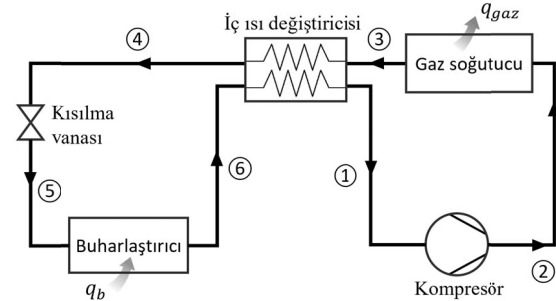
Literatürde farklı iyileştirmelerin uygulandığı transkritik CO₂ soğutma çevrimleri için en uygun gaz soğutucu basıncı ve gaz soğutucu çıkış sıcaklıklarının belirlenmesi için çok fazla çalışma bulunmaktadır ancak buharlaştırıcıya giren soğutucu akışkanın kuruluk derecesinin sistem performansına etkisinin incelendiği çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, buharlaştırıcı çıkışındaki soğutucu akışkanın kızdırılması için iç ısı değiştiricisi kullanılan kritik nokta üstü CO₂ soğutma çevrimi incelenmiştir. Tasarım parametreleri olarak iç ısı değiştiricisinde soğutucu akışkanın aşırı kızgınlık değeri ile buharlaştırıcıya giren soğutucu akışkanın kuruluk derecesinin sistem performansına etkilerinin hesaplanabilmesi için buharlaşma sıcaklığı 0 °C, gaz soğutucu basıncı 10 MPa alınmıştır. Tasarım parametrelerinin sistem performansına etkisini inceleyebilmek için sistemin tüm elemanlarına ve tamamına enerji ve ekserji analizi uygulanmış ve her bir elemanın enerji geçiş miktarı, ekserji yıkımı, entropi üretimi ve ekserji verimi ve tüm toplam ekserji yıkımı, toplam entropi üretimi ve

performans katsayısı ile çevrimin ekserji verimi hesaplanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Kritik nokta üstü CO₂ soğutma çevriminde, konvansiyonel soğutma çevrimindeki yoğuşturucu ünitesi yerine soğutucu akışkanın yoğuşmadan dış ortama ısı attığı gaz soğutucu ünitesi bulunmaktadır.

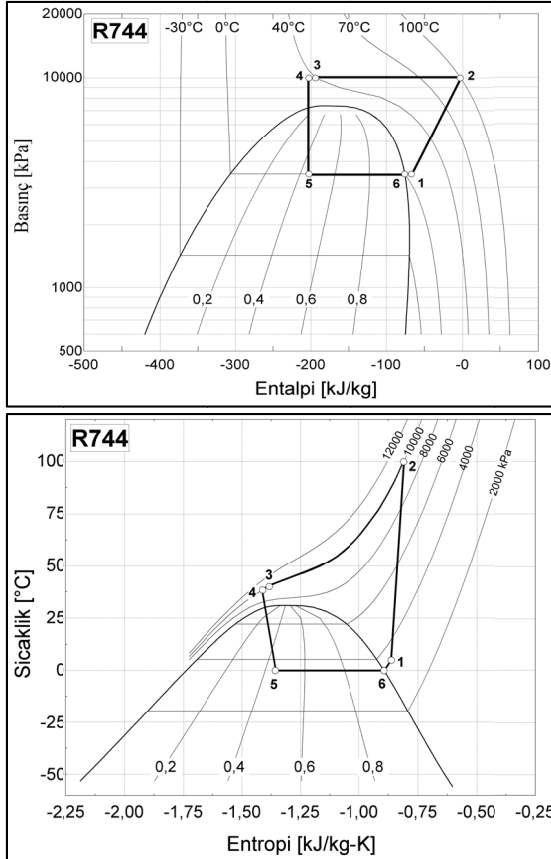
Şekil 1'de şematik olarak gösterilen soğutma çevriminde, kompresöre sıvı soğutucu akışkan girmesinin önlenmesi için buharlaştırıcı çıkışına iç ısı değiştiricisi yerleştirilmiştir. Bu ısı değiştiricisi buharlaştırıcı çıkışında soğutucu akışkanın sıcaklığını yükseltirken, gaz soğutucusu çıkışındaki soğutucu akışkanın sıcaklığının düşmesine, dolayısıyla sistemin performansının artmasına yardımcı olmaktadır. İç ısı değiştiricili kritik nokta üstü CO₂ soğutma çevriminin basınç-entalpi (P-h) ve sıcaklık-entropi (T-s) diyagramlarında gösterimi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. İç ısı değiştiricili CO₂ soğutma çevriminin şematik gösterimi [11]

Buharlaştırıcıda 0°C sıcaklığında soğutucu akışkan buharlaşırken ve gaz soğutucuda ise soğutucu akışkan 10 MPa basınçta dış ortama ısı atarken basınçlar sabit kalmaktadır. Soğutucu akışkan, yüksek basınçtan buharlaşma basıncına genişleme vanası yardımıyla kısılırken ısı ve iş etkileşimi olmaz. Diğer taraftan kompresörde soğutucu akışkanın basıncın adyabatik olarak yükseltilir. Buharlaştırıcı çıkışındaki aşırı kızgınlık değeri 0 ile 30°C, buharlaştırıcı girişindeki soğutucu akışkanın kuruluk derecesi ise 0,1 ile 0,9 aralığı

için hesaplamalar yapılmıştır. İç ısı değiştiricisinin soğutucu akışkanı kızdırma derecesi yüksek basınç hattındaki soğutucu akışkanın aşırı soğutma miktarını etkilemektedir. Kuruluk derecesi gaz soğutucusu çıkışındaki soğutucu akışkanın sıcaklığını da belirlemektedir.



Şekil 2. İç ısı değiştiricili CO₂ soğutma çevriminin basınç-entalpi ve sıcaklık-entropi diyagramları [3]

3. TERMODİMİK ANALİZ

İç ısı değiştiricili kritik nokta üstü CO₂ soğutma çevriminin enerji ve ekserji analizi yapılırken aşağıdaki kabuller kullanılmıştır.

- Tüm hal değişimleri kararlıdır ve kimyasal ve nükleer tepkimeler meydana gelmemiştir.

- Sistemin ve sistemi meydana getiren tüm elemanların kinetik ve potansiyel enerji değişimleri yoktur.
- Temel elemanlar arasındaki borularda ısı geçişi ve sürtünme kayıpları ihmal edilmiştir.
- Kompresör, genleşme vanası ve iç ısı değiştiricisindeki hal değişimleri adyabatiktir.
- Kompresörün izantropik verimi 0,7 ve iç ısı değiştiricisinin etkinliği 1'dir.
- Soğutulan ortamın sıcaklığı buharlaştırıcı sıcaklığından 8 derece daha yüksek, dış ortamın sıcaklığı ise gaz soğutucu çıkış sıcaklığından 5 derece düşük kabul edilmiştir.

Şekil 1'de gösterilen iç ısı değiştiricili kritik nokta üstü CO₂ soğutma çevriminin için Şekil 2'de gösterilen P-h veya T-s diyagramları kullanılarak hal noktalarının entalpi ve entropi değerleri bulunur. Enerji ve ekserji dengeleri sırasıyla;

$$E_{\text{ısı,g}} + E_{\text{kütle,g}} - E_{\text{ıs,ç}} = \Delta E_{\text{sis}} \quad (1a)$$

$$Ex_{\text{ısı,g}} + Ex_{\text{kütle,g}} - Ex_{\text{ıs,ç}} - Ex_{\text{yok}} = \Delta Ex_{\text{sis}} \quad (1b)$$

Eşitlik 1a ve 1b şeklinde yazılır. Kütle, ısı ve iş ile birim kütle için ekserji geçişi, Eşitlik 2a, 2b ve 2c'de belirtildiği gibi hesaplanır.

$$ex_{\text{kütle}} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (2a)$$

$$ex_{\text{ısı}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) q_i \quad (1b)$$

$$ex_{\text{ıs}} = w \quad (2c)$$

Isı, iş ve kütle ile gerçekleşen entropi geçişleri için entropi dengesi Eşitlik 3 şeklinde ifade edilir [20].

$$S_g - S_{\text{ç}} + S_{\text{üret}} = \Delta S_{\text{sis}} \quad (3)$$

Sürekli akışlı ısı sistemler için sistemin enerji, ekserji ve entropi değişimleri sıfırdır.

Sistemi oluşturan elemanlar için ekserji verimi;

$$\eta_{\text{II,sistem}} = \frac{\text{elde edilen ekserji}}{\text{sağlanan ekserji}} \quad (4)$$

Eşitlik 4 ile elde edilebilir. Enerji, ekserji ve entropi dengeleri CO₂ soğutma çevriminin tüm elemanlarına uygulanırsa aşağıdaki eşitlikler elde edilir. Kompresör için (Eşitlik 5a, 5b, 5c, 5d);

$$w_{\text{komp}}=(h_2-h_1) \quad (5a)$$

$$ex_{\text{yok}}=(\varepsilon_1-\varepsilon_2)+w_{\text{komp}} \quad (5b)$$

$$s_{\text{üret,komp}}=(s_2-s_1) \quad (5c)$$

$$\eta_{\text{II,komp}}=(\varepsilon_2-\varepsilon_1)/w_{\text{komp}} \quad (5d)$$

Gaz soğutucu için (Eşitlik 6a, 6b, 6c, 6d);

$$q_{\text{gaz}}=(h_2-h_3) \quad (6a)$$

$$ex_{\text{gaz}}=(\varepsilon_2-\varepsilon_3)-\left(1-\frac{T_0}{T_H}\right)q_{\text{gaz}} \quad (6b)$$

$$s_{\text{üret,gaz}}=(s_3-s_2)+q_{\text{gaz}}/T_H \quad (6c)$$

$$\eta_{\text{II,gaz}}=\left(1-\frac{T_0}{T_H}\right)q_{\text{gaz}}/(\varepsilon_2-\varepsilon_3) \quad (6d)$$

İç ısı değiştiricisi için (Eşitlik 7a, 7b, 7c, 7d);

$$(h_3-h_4)+(h_6-h_1)=0 \quad (7a)$$

$$ex_{\text{id}}=(\varepsilon_3-\varepsilon_4)+(\varepsilon_6-\varepsilon_1) \quad (7b)$$

$$s_{\text{üret,id}}=(s_4-s_3)+(s_1-s_6) \quad (7c)$$

$$\eta_{\text{II,id}}=(\varepsilon_1+\varepsilon_4)/(\varepsilon_6+\varepsilon_3) \quad (7d)$$

Genleşme elemanında ısı ve iş etkileşimi olmadığı için $h_4=h_5$ olur (Eşitlik 8a, 8b, 8c).

$$ex_{\text{gen}}=(\varepsilon_4-\varepsilon_5) \quad (8a)$$

$$s_{\text{üret,gen}}=(s_5-s_4) \quad (8b)$$

$$\eta_{\text{II,gen}}=\varepsilon_5/\varepsilon_4 \quad (8c)$$

Buharlaştırıcı için (Eşitlik 9a, 9b, 9c, 9d);

$$q_{\text{buhar}}=(h_6-h_5) \quad (9a)$$

$$ex_{\text{buhar}}=(\varepsilon_5-\varepsilon_6)+\left(1-\frac{T_0}{T_L}\right)q_{\text{buhar}} \quad (9b)$$

$$s_{\text{üret,buhar}}=(s_6-s_5)-q_{\text{buhar}}/T_L \quad (9c)$$

$$\eta_{\text{II,buhar}}=\left(1-\frac{T_0}{T_L}\right)q_{\text{buhar}}/(\varepsilon_6-\varepsilon_5) \quad (9d)$$

Tüm sistemin toplam ekserji yıkımı ile ve entropi üretimi Eşitlik 10a ve 10b şeklinde yazılabileceği gibi

$$ex_t=\left(1-\frac{T_0}{T_L}\right)q_{\text{buhar}}-\left(1-\frac{T_0}{T_H}\right)q_{\text{gaz}}+w_{\text{komp}} \quad (10a)$$

$$s_{\text{üret,t}}=q_{\text{gaz}}/T_H-q_{\text{buhar}}/T_L \quad (10b)$$

toplam ekserji yıkımı ile toplam entropi üretimi, sistemi oluşturan tüm elemanların ekserji yıkımları toplamı ile tüm elemanların entropi üretimleri toplamından da elde edilebilir. ($ex=T_0s_{\text{üret}}$ olduğu unutulmamalıdır.)

Soğutma sisteminin performans katsayısı, soğutulan ortamdaki çekilen ısı miktarının harcanması gereken iş miktarına oranıdır. Buna göre çevrimin soğutma performans katsayısı ile aynı iç ve dış ortam sıcaklıklarında çalışacak Carnot çevriminin performans katsayıları sırasıyla

$$COP=q_{\text{buhar}}/w_{\text{komp}} \quad (11a)$$

$$COP_C=\frac{T_L}{T_H-T_L} \quad (11b)$$

Eşitlik 11a ve 11b şeklinde ifade edilir. Soğutma makinelerinde ekserji verimi performans katsayısının, aynı şartlarda çalışan Carnot çevriminin performans katsayısına oranı Eşitlik 12'de verilmiştir [21].

$$\eta_{\text{II,sistem}}=COP/COP_C \quad (12)$$

4. BULGULAR

Buharlaştırıcı girişindeki soğutucu akışkanın kuruluk derecesinin 0,4 olduğu ve çıkışında 5 °C kızdırıldığı durum için iç ısı değiştiricili CO₂ soğutma çevriminin hal noktalarının sıcaklık, basınç, entalpi, entropi ve akış ekserji değerleri ile çevrimde gerçekleşen enerji geçişi, ekserji yıkımı, entropi üretimi değerleri ve soğutma performans katsayısı ve ekserji verimleri Çizelge 1’de

verilmiştir. Soğutma performans katsayısı 2,16 olan CO₂ soğutma çevriminde gaz soğutucusu çıkışındaki sıcaklık 37,7°C ve çevrimin ekserji verimi %18,96 olarak hesaplanmıştır. Ekserji yıkımı en fazla kompresörde (15,77 kJ/kg), en az iç ısı değiştiricisinde (1,047 kJ/kg) gerçekleşmiştir. Ekserji veriminin en yüksek olduğu eleman %99,75 ile iç ısı değiştiricisi; %19,75 ile gaz soğutucusudur.

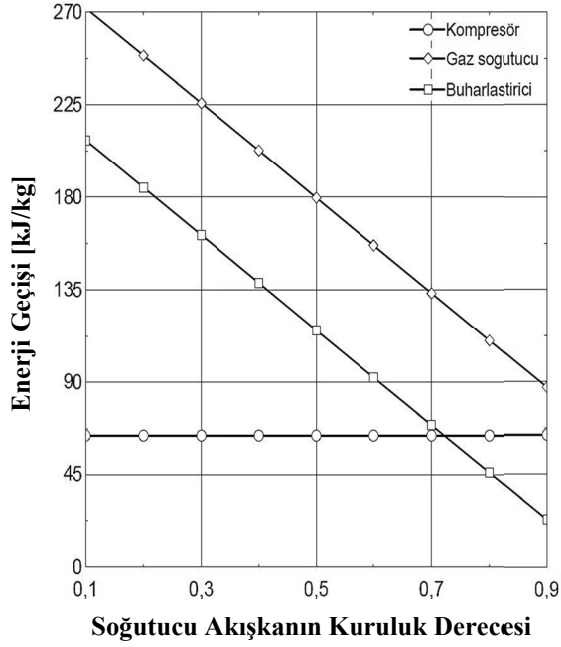
Çizelge 1. Soğutucu akışkanın kuruluk derecesi 0,4 ve kızgınlık değeri 5 °C için iç ısı değiştiricili kritik nokta üstü CO₂ soğutma çevriminin enerji ve ekserji analizinin sonuçları

Hal	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	ε (kJ/kg)
0	27,0	101,325	0,7653	0,00350	
1	5,0	3485	- 67,192	- 0,86215	191,865
2	99,8	10000	- 2,9373	- 0,80959	240,346
3	37,7	10000	- 205,73	- 1,42116	221,118
4	35,7	10000	- 214,42	- 1,44921	220,846
5	0,0	3485	- 214,42	- 1,40086	206,333
6	0,0	3485	- 75,884	- 0,89368	192,639

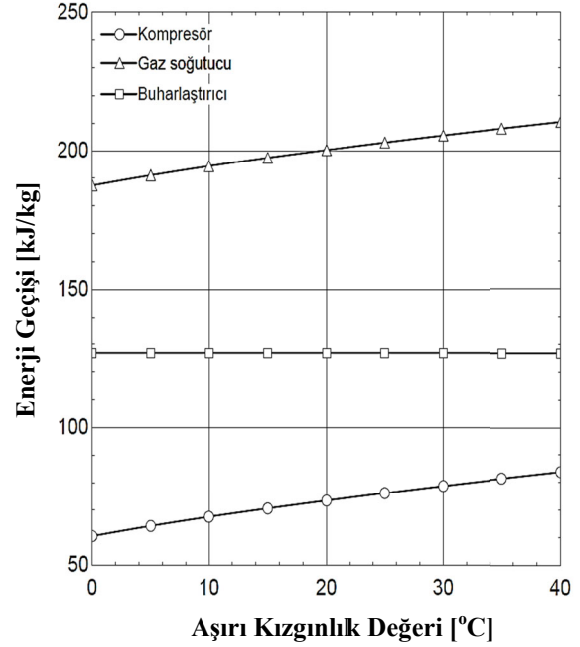
Bileşen	Enerji transferi (kJ/kg)	Performans katsayısı, COP	Ekserji yıkımı (kJ/kg)	Entropi üretimi (kJ/kgK)	Ekserji verimi (%)
Kompresör	64,25		15,77	0,05255	75,45
Gaz soğutucu	- 202,79		15,43	0,05141	19,75
İç ısı değiştiricisi	0		1,047	0,00349	99,75
Genleşme vanası	0		14,51	0,04835	93,43
Buharlaştırıcı	138,53		4,332	0,01443	68,37
Toplam	0	2,156	51,09	0,17023	18,96

Buharlaştırıcının soğutulan ortamdaki aldığı ısı, gaz soğutucusunun attığı ısı ve kompresördeki sıkıştırma işinin buharlaştırıcı girişindeki soğutucu akışkanın kuruluk derecesine göre değişimi Şekil 3’te, kızgınlık değerine göre değişimi ise Şekil 4’te gösterilmiştir. Kuruluk derecesi 0,1’den 0,9’a artırıldığında kompresör işi hiç değişmezken, buharlaştırıcının aldığı ısı miktarı 207,80 kJ/kg’dan 23,09 kJ/kg’a; gaz

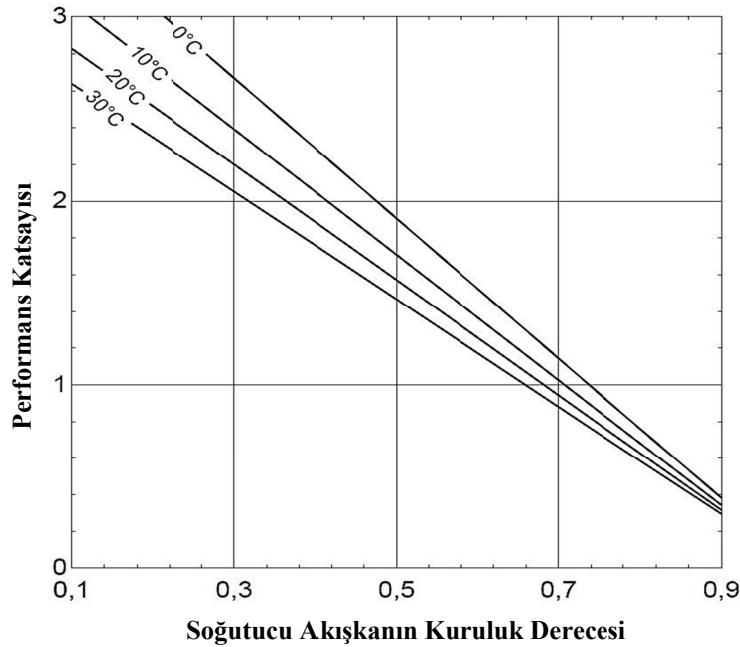
soğutucusundan atılan ısı miktarı da 272,06 kJ/kg’dan 87,34 kJ/kg’a doğrusal bir şekilde düşmüştür. Kızgınlık değeri 0 °C’den 40°C’ye artırıldığında buharlaştırıcının aldığı ısı miktarı (126,83 kJ/kg) hiç değişmezken, kompresör işi 60,56 kJ/kg’dan 83,64 kJ/kg’a; gaz soğutucusundan atılan ısı miktarı da 187,39 kJ/kg’dan 210,47 kJ/kg’a yükselmiştir.



Şekil 3. Isı ve iş geçişlerinin buharlaştırıcı girişindeki soğutucu akışkanın kuruluk derecesine göre değişimi



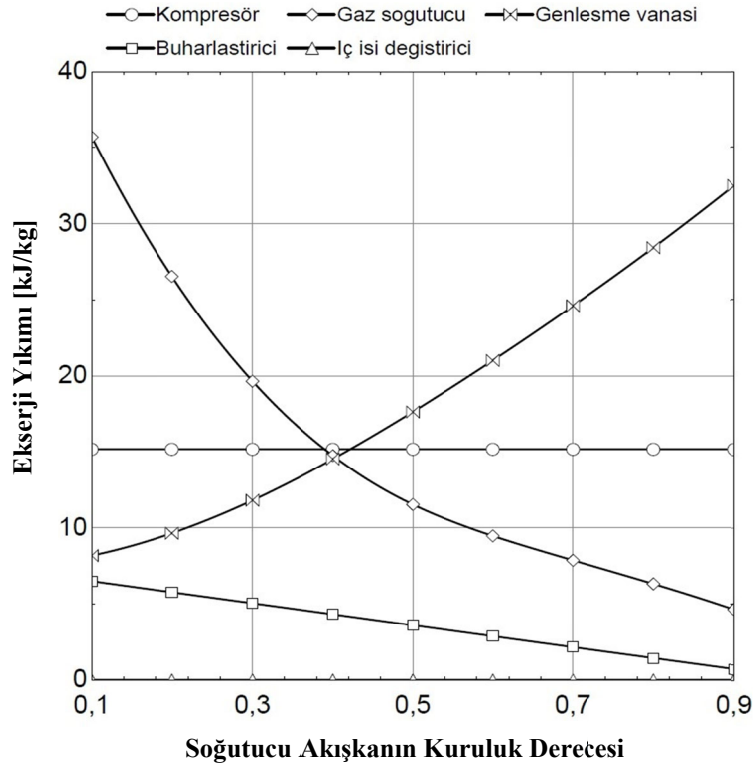
Şekil 4. Isı ve iş geçişlerinin soğutucu akışkanın kızgınlık derecesine göre değişimi



Şekil 5. Soğutma performans katsayısının farklı kızgınlık değerleri için soğutucu akışkanın kuruluk derecesine göre değişimi

Çevrimi oluşturan tüm elemanların ekserji yıkımlarının kuruluk derecesine göre nasıl değiştiği Şekil 6'da sunulmuştur. Kuruluk derecesinin 0,1'den 0,9'a yükselmesi genişleme vanasındaki ekserji yıkımını 8,179 kJ/kg'dan 32,52 kJ/kg'a çıkarırken, olumlu yönde en fazla değişimin gözlemlendiği gaz soğutucusunda ekserji

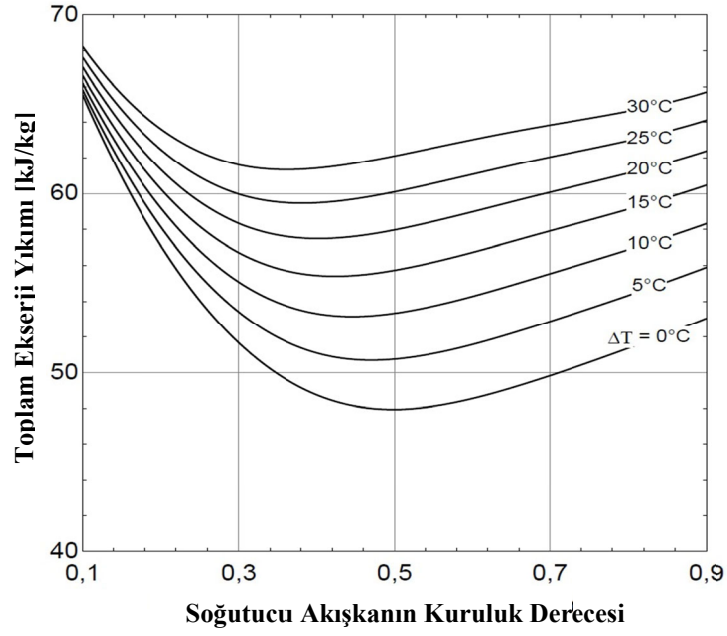
yıkımını 35 kJ/kg'dan 5,332 kJ/kg'a; buharlaştırıcıda 6,50 kJ/kg'dan 0,722 kJ/kg düşürmüştür. Ekserji yıkımının en az olduğu iç ısı değiştiricisinde de kuruluk derecesiyle ekserji yıkımı 0,379 kJ/kg'dan 1,544 kJ/kg yükselmiştir. Kompresördeki ekserji yıkımı ise 15,77 kJ/kg değerinde sabit kalmıştır.



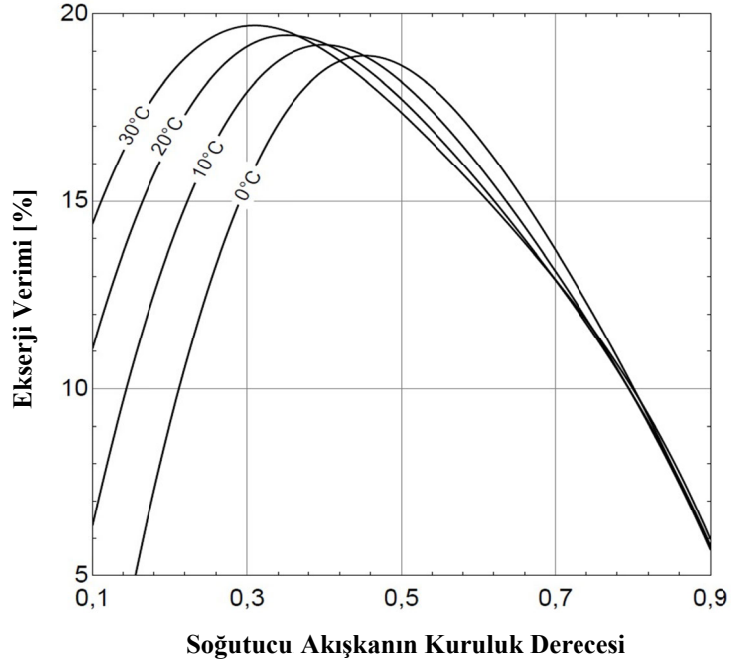
Şekil 6. Ekserji yıkımlarının soğutucu akışkanın kuruluk derecesine göre değişimi

Şekil 7'de farklı kızgınlık değerleri için soğutma çevriminin tamamındaki ekserji yıkımının kuruluk derecesine göre değişimi gösterilmiştir. Kızgınlık değeri 5°C iken 0,47 kuruluk derecesinde sistemin ekserji yıkımının en düşük değeri (50,69 kJ/kg) elde edilmiştir. Kızgınlık derecesi yükseldikçe toplam ekserji yıkımı yükselmekte ve en düşük yıkımın elde edileceği kuruluk derecesi ise 0,3'e yaklaşmaktadır. Örneğin kızgınlık değeri 0°C iken en düşük toplam ekserji yıkımı (47,9 kJ/kg) 0,49 kuruluk derecesinde; kızgınlık değeri 30°C iken en düşük toplam ekserji yıkımı (61,34 kJ/kg) 0,36 kuruluk derecesinde elde edilmiştir.

Farklı kızgınlık değerleri için soğutma çevriminin ekserji veriminin kuruluk derecesine göre değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Kızgınlık değeri 0°C iken en yüksek ekserji verimi (%18,9) 0,45 kuruluk derecesinde; kızgınlık değeri 30°C iken en yüksek ekserji verimi (%19,7) 0,31 kuruluk derecesinde elde edilmiştir. Ekserji verimi kızgınlığın artmasıyla çok az miktarda da olsa artmaktadır; örneğin kuruluk derecesi 0,4 iken kızgınlık değeri 0°C'den 30°C'de yükseldiğinde ekserji verimi %18,5'tan %19,03'e yükselmiştir.



Şekil 7. Toplam ekserji yıkımının farklı kızgınlık değerleri için soğutucu akışkanın kuruluk derecesine göre değişimi



Şekil 8. Ekserji veriminin farklı kızgınlık değerleri için soğutucu akışkanın kuruluk derecesine göre değişimi

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada iç ısı değiştiricili kritik nokta üstü CO₂ soğutma çevrimin için en uygun buharlaştırıcı girişindeki kuruluk derecesi ile buharlaştırıcı çıkışındaki kızgınlık değerinin belirlenmesi amacıyla enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Yapılan kabuller ve belirlenen çalışma şartları çerçevesinde bu çalışmada incelenen çevrim için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Soğutma performans katsayısı, kuruluk derecesi 0,3'ten 0,4; 0,4'ten 0,5'e çıkarken sırasıyla %14,3 ve %16,7 düşmüştür. Kızgınlık değerinin 5°C'den 10°C'ye yükselmesi ile %4,9 azalırken daha yüksek kızgınlık değerlerinin 40°C'lere yükselmesiyle azalma yüzdesi %2,9'lara düşmektedir.
- Toplam ekserji yıkımının en düşük olması tercih edildiği için en düşük toplam ekserji yıkımı 5°C kızgınlıkta, kuruluk derecesi 0,47; 30 °C kızgınlıkta ise 0,36 elde edilmiştir.
- En yüksek ekserji verimi 5°C kızgınlıkta, 0,42 kuruluk derecesinde; 30°C'de ise 0,31 kuruluk derecesinde elde edilmiştir.

6. KAYNAKLAR

- Bilgili, M., Şimşek, E., Karaçaylı, İ., 2016. Bir Split Klimanın Farklı Atmosfer Hava Sıcaklıklarında Enerji ve Ekserji Analizi, 1st International Conference on Engeneering Technology and Applied Sciences Afyon Kocatepe University, 703-708.
- Kasap, F., Acül, H., Canbaz, H., Erbil, S., 2011. R744 (CO₂) Soğutucu Akışkanlı Soğutma Sistemleri, Kanatlı Borulu R744 (CO₂) Evaporatör ve Gaz Soğutucu Tasarımı, X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir.
- Akdemir, Ö., Güngör, A., 2010. CO₂ Soğutma Çevrimlerinin Maksimum Performans Analizi, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 30(2), 37-43.
- Özcan, H.G., Günerhan, H., Yaldrak, H., 2013. Alternatif Soğutkan Karbondioksit ve Otobüs Klimalarında Uygulaması. XI. Teskon, İzmir, 653-697.
- Yamasaki, H., Yamanaka, M., Matsumoto, K., Shimada, G., 2004. Introduction of Transcritical Refrigeration Cycle Utilizing CO₂ as Working Fluid, International Compressor Engineering Conference, Purdue University.
- Danfoss A/S, 2008, Transcritical Refrigeration Systems with Carbon Dioxide, Danfoss Refrigeration and Air Conditioning Division.
- Kim, M.H., Pettersen, J., Bullard, C.W., 2004, Fundamental Process and System Design Issues in CO₂ Vapor Compression Systems, Prog. Energy Combust. Sci., 30(2), 119-174.
- Aksu, B., Kurt, H., 2014. CO₂ Soğutucu Akışkanlı Isı Pompasının Soğutma ve Isıtma Karakteristiklerinin İncelenmesi, 2nd Int. Sym. on Inno. Tech. in Eng. and Sci., Karabük, 1074-1083.
- Özgür, A.E., Bayrakçı, H.C., Akdağ, A.E., 2009. Kritik Nokta Üstü Çevrimli CO₂ Soğutma Sistemlerinde Optimum Gaz Soğutucu Basıncı: Yeni Bir Korelasyon, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 29(2), 23-28.
- Gullo, P., Elmegaard, B., Cortella, G., 2015. Energetic, Exergetic and Exergoeconomic Analysis of CO₂ Refrigeration Systems Operating in Hot Climates, The 28th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, France.
- Tao, Y.B., He, Y.L., Tao, W.Q., 2010. Exergetic Analysis of Transcritical CO₂ Residential Air-Conditioning System Based on Experimental Data, Applied Energy, 87, 3065-3072.
- Fartaj, A., Ting, D.S.K., Yang, W.W., 2004. Second Law Analysis of The Transcritical CO₂ Refrigeration Cycle, Energy Conversion and Management, 45, 2269-2281.
- Sarkar, J., Bhattacharyya, S., Gopal, M.R., 2005. Transcritical CO₂ Heat Pump Systems: Exergy Analysis Including Heat Transfer and Fluid Flow Effects, Energy Conversion and Management, 46, 2053-2067.
- Shariatzadeh, O.J., Abolhassani, S.S., Rahmani, M., Nejad, M.Z., 2016. Comparison of Transcritical CO₂ Refrigeration Cycle with Expander and Throttling Valve Including/Excluding Internal Heat Exchanger:

- Exergy and Energy Points of View, Applied Thermal Engineering, 93, 779–787.
15. Wang, Z., Han, F., Sunden, F., 2018. Parametric Evaluation and Performance Comparison of a Modified CO₂ Transcritical Refrigeration Cycle in Air-Conditioning Applications, Chemical Engineering Research and Design, 131, 617-625.
 16. Bellos, E., Tzivanidis, C., 2019. CO₂ Transcritical Refrigeration Cycle with Dedicated Subcooling: Mechanical Compression vs. Absorption Chiller, Applied Sciences, 9, 1605.
 17. Kılıç, B., 2017. Kritik Nokta Üzeri Çalışan Karbondioksitli Soğutma Çevrimlerinin Karşılaştırmalı Performans Analizi, Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 8(2), 510-514.
 18. Bai, T., Yu, J., Yan, G., 2016. Advanced Exergy Analyses of an Ejector Expansion Transcritical CO₂ Refrigeration System, Energy Conversion and Management, 126, 850–861.
 19. Bellos, E., Tzivanidis, C., 2019. A Comparative Study of CO₂ Refrigeration Systems, Energy Conversion and Management: X, 1, Article 100002.
 20. Yılmaz, A., Yılmaz, T., 2016. Çapraz Akışlı Paralel Borulu Boru Demetinde Entropi Üretiminin Analitik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(1), 223-230.
 21. Cengel, Y.A., Boles, M.A., 2015. Thermodynamic: An Engineering Approach. McGraw-Hill Education, New York.

η : Verim (%)

Δ : Fark

Alt indisler

0 : Ölü hal, referans

1, 2, ... : Çevrim noktaları

II : Verim için ikinci yasa veya ekserji

C : Carnot çevrimi

komp : Kompresör

ç : Çıkış

buhar : Buharlaştırıcı

g : Giriş

gaz : Gaz soğutucu

gen : Genleşme elemanı

H : Yüksek sıcaklıktaki dış ortam

ıd : İç ısı değiştiricisi

L : Düşük sıcaklıktaki soğutulan ortam

sis : sistem

t : Toplam

üret : Üretilen

yok : Yokolan

Kısaltmalar

COP : Performans katsayısı

CFC : Kloroflorokarbon

GWP : Küresel ısınma potansiyeli

HCFC : Hidrokloroflorokarbon

HFC : Hidroflorokarbon

ODP : Ozon delme potansiyeli

SEMBOLLER

E, e : Enerji (kJ), özgül enerji (kJ/kg)

Ex, ex : Ekserji (kJ), özgül ekserji (kJ/kg)

h : Özgül entalpi (kJ/kg)

P : Mutlak basınç (kPa)

q : Isı transferi miktarı (kJ/kg)

S, s : Entropi (kJ/K), özgül entropi (kJ/kgK)

T : Sıcaklık (°C veya K)

w : İş transferi miktarı (kJ/kg)

x : Kuruluk derecesi (°C veya K)

ε : Akış ekserjisi (kJ/kg)

An Experimental Evaluation of Control Modes for Pneumatic Artificial Muscles Using Fast on/off Valves

Elif Tuğba BAĞLAR^{*1}, Cabbar Veysel BAYSAL¹

¹Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Biomedical Engineering, Adana

Geliş tarihi: 25.03.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Abstract

Pneumatic Artificial Muscles (PAM) are versatile actuators having many advantages such as high force to weight ratio, soft and flexible structure, extreme safe for human, ease of maintenance and low cost. On the other hand, their inherent nonlinear characteristics yields difficulties in control actions, which is an important factor restricting wide-spread use of PAM. In literature, there are studies to resolve the control issue and their results indicate that there is still requirement for a simple and effective control system. In this work, as a first step of achieving the control goal, three common nonlinear controllers used in literature are selected for an experimental evaluation. The implemented controllers are ‘Classical PID controller’, ‘Fuzzy PID controller’ and ‘Sliding-Mode Controller’ (SMC). The evaluation is performed using a test rig, which is a 1-D robotic arm orthosis actuated by Festo PAMs operated with fast on/off valves. According to experimental results, a model-free Sugeno type combined fuzzy PID controller has yielded most successful performance indicating that it could be a simple and effective solution for PAM control issue.

Keywords: Pneumatic artificial muscle, PID control, Fuzzy PID control, Fast on/off valve

Yapay Pnömatik Kaslar için Denetim Kiplerinin Hızlı Aç/Kapa Valfler Kullanarak Deneysel Bir Değerlendirmesi

Öz

Pnömatik Yapay Kaslar (PAM), yüksek kuvvet/ağırlık oranı, yumuşak ve esnek yapı, insan için aşırı güvenli, bakım kolaylığı ve düşük maliyet gibi birçok avantaja sahip çok yönlü eyleyicilerdir. Öte yandan, doğrusal olmayan karakteristik özellikleri, PAM’ın yaygın kullanımını kısıtlayan önemli bir faktör olarak, kontrol eylemlerinde zorluklar getirir. Literatürde kontrol sorununu çözmek için çeşitli çalışmalar vardır ve o çalışmaların sonuçları hala basit ve etkili bir kontrol sistemine ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, kontrol hedefine ulaşmanın ilk adımı olarak, literatürde yaygın kullanılan üç doğrusal olmayan kontrolör, deneysel bir değerlendirme için seçilmiştir. Uygulanan kontrolörler, ‘Klasik PID denetleyici’, ‘Bulanık PID Denetleyici’ ve ‘Kayan Kipli Denetleyicidir’ (SMC). Performans değerlendirmesi, hızlı on/off valfleri ile çalıştırılan Festo PAM’lar tarafından sürülen, 1-D robotik kol ortezi olan bir test teçhizatı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, model serbest bir Sugeno tipi kombine bulanık PID kontrolörü, pnömatik yapay kasların (PAM) kontrol sorunu için basit ve etkili bir çözüm olabileceğini göstererek en başarılı performansı vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Pnömatik yapay kas, PID denetleyici, Bulanık PID denetleyici, Hızlı aç/kapa valf

^{*}Sorumlu yazar (Corresponding author): Elif Tuğba BAĞLAR, etdeveci@cu.edu.tr

1. INTRODUCTION

In robotic rehabilitation devices, different actuator types are used such as, hydraulic, electric, pneumatic actuators. Actuators operating with hydraulic pressure can produce high powers, but due to their high weight and need for special designs are not widely used in rehabilitation devices. The electric actuators are the most preferred once because of their high power capacity and easy application advantages using electrical energy. However, Caldwell and Tsagarakis [1] claimed that electric actuators are very heavy compared to pneumatic actuators and their impedances are too high to use in rehabilitation devices. As pneumatic actuators, a special type called Pneumatic Artificial Muscle (PAM), is used for rehabilitation purposes since their impedance is low and lighter than electric actuators [2]. PAMs are thought to be more suitable for rehabilitation use since they display a behavior similar to the human muscle due to nonlinear contraction and strength when it is activated [3].

Pneumatic Artificial Muscles (PAM) are type of actuators that mimic behavior of skeletal muscle by contracting and generating force in a nonlinear manner when pressurized. PAM has a radially inflation and axially contraction behavior which produces high pulling(tensile) forces along the longitudinal axis. PAM was invented firstly by Joseph L. McKibben in 1950s and it was used in artificial limbs [4]. In 1980s it was redesigned by Bridgestone Company and it was used for some applications to assist disabled individuals [5]. Nowadays, PAM is produced commercially by Festo Company and it is also called Festo fluidic muscle. The Festo muscle is structurally different from the general McKibben muscles. The fiber of the fluidic muscle is knit into the tube, offering easy assembly and improved hysteric behavior and nonlinearity compared to conventional design [6].

Even though their advantages such as high force to weight ratio, soft and flexible structure, extreme

safe for human, cleanliness, ease of maintenance and low cost exist, PAMs have some disadvantages and difficulties in modeling and controlling. These difficulties happen due to the nonlinear characteristics of the actuator like air compressibility, friction, nonlinear airflow through the valves [7], inherent properties of visco-elastic material, geometric structure of PAM and compressibility of the air [8]. Hence, the nonlinear properties of the actuator make it difficult to use in rehabilitation devices. There are several model-free and/or model-based approaches to solve the control problem that restricts the use of Pneumatic Artificial Muscles. The model-free approaches are basically PID control, fuzzy control [9], neural network based PID control [10]. In [11] Andrikopoulos et al. developed the “advanced nonlinear PID control” approach to be used in antagonist study of the Pneumatic Artificial Muscle.

Model-based approaches are basically sliding mode control and model predictive control (MPC). There are numerous works developed sliding mode control [12-14]. Andrikopoluos et al. examined “A Switching Model Predictive Control Approach” in [15]. The main purpose of this approach is to provide different optimal control for each working area of PAM and smooth control transitions between these neighboring regions. In another study, as a combination of both approaches, Chiang and Chen used the “Incremental Fuzzy Sliding Mode” for the Pneumatic Artificial Muscle control in their study [16]. They choose a fuzzy logic based controller for the control problem caused by nonlinear dynamics of PAM and they claimed that they would provide a more successful control compared to the PID controller.

On the other hand, according to a literature review [17], majority of these studies focused only a single control mode with limited experimental conditions and they have not evaluated performance of different control modes. There are very few works implemented multiple different control modes. In addition, proportional valves, servo valves, pressure regulators or on/off valves

are used as regulating elements [18]. Proportional valves or pressure regulator has been preferred in the majority of works in the literature. Although proportional valves perform well in PAM control, they are quite costly. Pressure regulators are also not sufficient for the speed range at which PAM can operate. Fast on/off valves are preferred in some works because they are both more economical and faster than others although it becomes more difficult to control PAM. Implementation results indicate that there is still requirement for a simple and effective control system. Hence, modeling and control of the Pneumatic Artificial Muscle are still challenging issues for better utilization of PAM. Although important results were obtained in these studies, there are some points not resolved yet, namely economic actuators and multi-mode control system design.

In order to bring an alternative solution to the above issues, in our implementation, fast on/off valves are preferred since it is more economical and faster than pressure regulator and proportional valves. Moreover, we briefly categorize the control methods used in the literature mentioned above as model-based and model-free controllers. In our opinion, a comparison of both approaches are still required to guide for an effective controller design with fast on/off valves. The comparison of the results is expected to aid for determination of a road map for an efficient and simple controller design. For this purpose, in our work, three nonlinear control methods are experimentally analyzed on our test rig, PID control, fuzzy PID control as model-free ones and sliding-mode control (SMC) as model-based controller. In addition, we have concluded our results with an effective comparison.

The structure of this paper as follows: in section II, our hardware implementation is given, where experimental setup and controllers are explained. In section III, experimental results and discussions are presented. In section IV conclusions are drawn.

2. IMPLEMENTATION

2.1. Experimental Setup

In this work, three nonlinear control modes are investigated using our own designed test rig, which is a 1-D robotic arm orthosis actuated by Festo PAMs operated with fast on/off valves. The controller implementations are performed in MATLAB/Simulink environment on a desktop PC which controls all mechanical, pneumatic and electronics units. The control system block diagram of the test rig is given below in Figure 1. An overview of experimental setup and components of the test rig is given in Figure 2.a and 2.b. In Figure 2.a, part A is the desktop PC where data from sensors can be viewed and processed, part B is 'DC power supply', C is 'Data acquisition unit', D is 'Analog signal amplifier & valve drive unit' and E denotes a constant load.

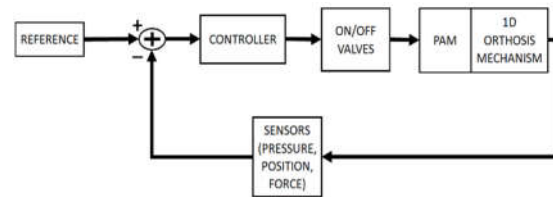


Figure 1. Control system block diagram of the test rig

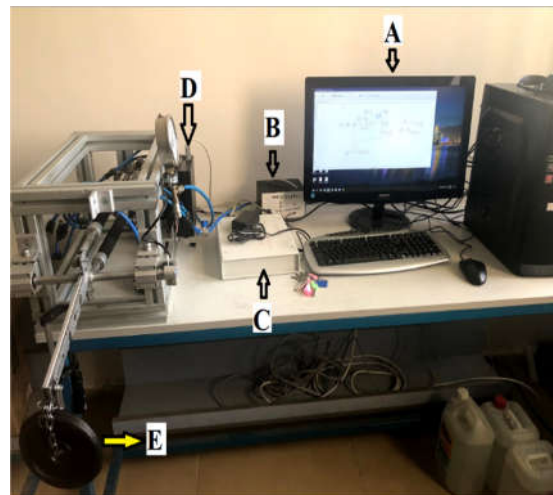


Figure 2.a. Overview of experimental setup

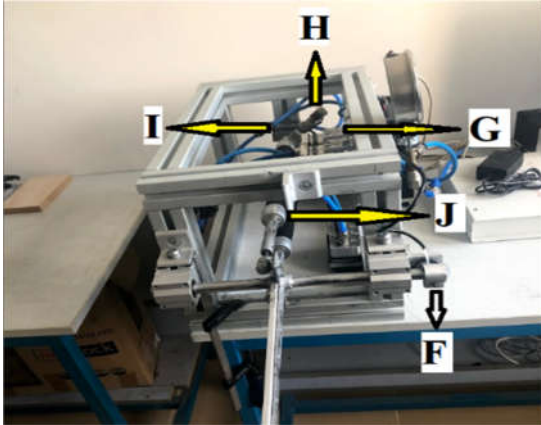


Figure 2.b. Components of the test rig

In Figure 2.b, the pneumatic artificial muscle (PAM) is indicated with J, that can work in the range of 0-6 bars, with a length of 250 mm, from the DMSP 20 series of FESTO (FESTO DMSP-20-250). Label G shows MATRIX MX890 series very fast on/off valves of used with PWM method. Label H marks HONEYWELL 24PCFFM6G series pressure sensor operating in the range of 0-100 psi. For the force measurement, ZEMIC H3-P3 type load cell of S-type with 0-100 kg range is used and marked with I. For the position measurement, BOURNE AMS22 type encoder is used and labeled with F.

During the experiments, MATLAB/Simulink blocks are used to implement controllers as well as sensors and actuator configurations. The Simulink blocks are compiled and sent to a microprocessor running in "Data Acquisition" unit. In the test rig, ATMEL Arm Cortex M3 microprocessor card included in the "Data Acquisition" unit is used to control the system.

2.2. Pneumatic Muscle Actuator Modeling

In order to implement model-based control methods, we first analyzed main modeling approaches developed for PAM. In the modeling works, the main purpose is to establish a relationship between pressure, extension of the muscle along the entire axis (displacement) and force. Pulling force, air pressure, diameter and length of the muscle, material properties play an

important role in modeling approaches. PAM's mathematical models relate these factors [19]. In general, modeling approaches depend on the static and dynamic behavior of PAM.

When developing a static model of the muscle, the basic approach is based on energy modeling. That approach provides a relationship between "actuator force, pressure and length", showing the length or degree of contraction and the diameter of the muscle formed by the forces, the actuator performance, taking into account virtual work and energy savings [18]. The Chou and Hannaford model is the simplest geometric model for the static performance of a PAM [20]. In this approach PAM actuator is modeled as a cylinder and the equation showing the expression between force, pressure and position according to this model is as follows (Equation 1).

$$F = P \frac{b^2}{4\pi n^2} (3\cos^2\theta - 1) \quad (1)$$

where b is the thread length, n indicates the number of turns of a thread, θ angle is defined as the angle between longitudinal axis and thread.

The aim of the dynamic model, also known as the phenomenological model of PAM, is to best evaluate the dynamic behavior of the pneumatic muscle. In dynamic modeling, as seen in Figure 3, the parallel configuration of the muscle, spring, damper and contractile element is used. The coefficients corresponding to these three elements depend on the input pressure of the PMA [21].

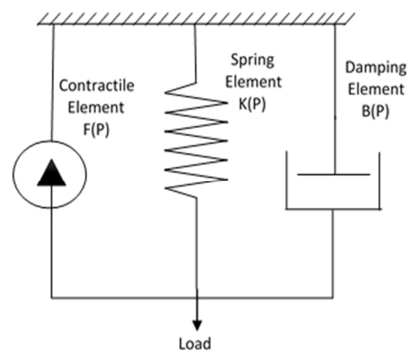


Figure 3. Three element phenomenologic model of pneumatic artificial muscle

The equations for the phenomenological model are written as follow (Equations 2-6):

$$M\ddot{x}+B(P)\dot{x}+K(P)x=F(P)-Mg \quad (2)$$

$$K(P)=K_0+K_1P \quad (3)$$

$$B(P)=B_{0i}+B_{1i}P \quad (\text{inflation}) \quad (4)$$

$$B(P)=B_{0d}+B_{1d}P \quad (\text{deflation}) \quad (5)$$

$$F(P)=F_0+F_1P \quad (6)$$

where M is the mass, g denotes the acceleration of gravity. $K(P)$ indicates the spring coefficient. $B(P)$ is damping coefficient and it depends on whether the PMA being inflated or deflated. $F(P)$ is the effective force provided by the contractile element. The coefficients in the equation are determined as in the Xing et al. study [14]. In our implementation, we used that phenomenological modeling.

2.3. Sliding Mode Controller Implementation

Sliding mode control (SMC) is a variable form of structure control that uses a plane in the state space. This plane is called the sliding surface, and the aim is to keep state values close to this surface by minimizing state errors. Ideally, if the state value is away from the surface, a switching gain is used to push the state value towards the sliding surface. Once on the surface, the states slide along the surface in what is called the sliding mode [22]. The switching brings inherent stability and robustness to the control strategy, while also introducing chattering (high frequency switching) that is undesirable in practice and can excite unmodeled dynamics.

Sliding mode is separated into two parts: the equivalent control term u_{eq} and the switching control term u_{sw} [23]. While the switching control term aims to push the state variable away from the sliding surface to the sliding surface; the term "equivalent control" aims to keep the state variable reaching the sliding surface on the sliding surface by using the system model.

Consider as a class of n -th order nonlinear systems of the form (Equations 7-8):

$$\dot{x}^n=f(x,t)+g(x,t)u(t) \quad (7)$$

$$x=[x,\dot{x}\dots x^{(n-1)}]^T, \quad y=x \quad (8)$$

where $x=[x,\dot{x}\dots x^{(n-1)}]^T \in R^n$ is the state vector of the system which is assumed to be available for measurement, $f(x,t)$ and $g(x,t)$ are unknown continuous nonlinear functions of the system, $u \in R^n$ and $y \in R^n$ are the input and output of the system, respectively. The control objective is to obtain state x for tracking a desired state $x_d=[x,\dot{x}\dots x^{(n-1)}]^T$

The tracking error has the following form generally (Equation 9):

$$e=x-x_d=[e,\dot{e}\dots e^{(n-1)}]^T \quad (9)$$

The switching function for the sliding mode called 'sliding surface' can be chosen as below (Equation 10):

$$s(x,t)=Ce=c_1e+c_2\dot{e}+\dots+c_{n-1}e^{(n-2)}+e^{(n-1)} \quad (10)$$

SMC is divided into 2 phases as approaching phase with $s(x,t) \neq 0$ and sliding phase with $s(x,t)=0$. In the sliding phase, we have $s=0$ and $\dot{s}=0$, then the equivalent control u_{eq} which will force the system dynamics to stay on the sliding surface.

According to the dynamic behavior of PAM is actually described as in [24] (Equations 11 and 12):

$$\ddot{x}=\frac{1}{M}(F_0-B_0\dot{x}-K_0x-Mg)+\frac{1}{M}(F_1-B_1\dot{x}-K_1x)P \quad (11)$$

$$y=x \quad (12)$$

where y is the trajectory of the PAM, P is the pressure of the PAM, \ddot{x} and \dot{x} are the desired acceleration and speed of the system, respectively.

According to these equations, $f(x,t)$ and $g(x,t)$ are, (Equations 13 and 14)

$$f(x,t) = \frac{1}{M} (F_0 - B_0 \dot{x} - K_0 x - Mg) \quad (13)$$

$$g(x,t) = \frac{1}{M} (F_1 - B_1 \dot{x} - K_1 x) \quad (14)$$

The control input u is the sum of the equivalent control term u_{eq} and the switching control term u_{sw} (Equation 15),

$$u = u_{eq} + u_{sw} \quad (15)$$

where (Equations 16-17),

$$u_{sw} = -\eta \operatorname{sgn}(s), \eta \geq D \quad (16)$$

$$u_{eq} = \frac{1}{g(x,t)} (-f(x,t) + \ddot{x} - c\dot{e}) \quad (17)$$

We have implemented above SMC control mode for both pressure and position control in MATLAB/ Simulink.

2.4. PID Controller Implementation

The PID algorithm is given by following control law with three terms (P, I, D), to reduce the error value in a closed loop control (Equation 18).

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(\tau) d\tau + T_D \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (18)$$

Intuitively, these values can be interpreted as follows in terms of time considering the current change; P depends on the current error, I is the sum of past errors and D is an estimate of future errors. The process controlled through the weighted sum of these three actions is used to set the desired level. In our work, PID method has been applied for both pressure control and position control. For PID tuning, Ziegler-Nichols reaction rate method is used [25].

While applying Ziegler Nichols reaction rate method using the step response of the system, P, I and D parameters were calculated as $K_p=3$, $T_I=0.2$ and $T_D=0.8$ for pressure control. For position control, $K_p=2$, $T_I=1$ and $T_D=0.19$ for the position

feedback section in the cascade structure, $K_p=4$, $T_I=1.2$ and $T_D=0.7$ for the pressure feedback section.

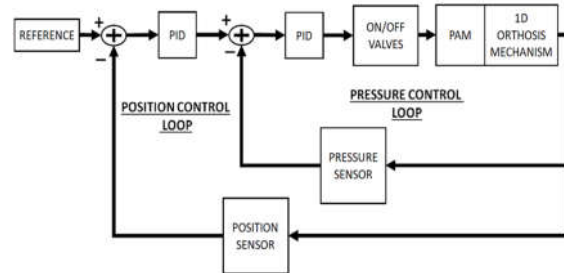


Figure 4. PID cascade controller

We have implemented a single loop PID for the pressure control and cascade PID control for the position control. We observed that single loop position control did not yield a successful result. Hence, we have used the cascade PID approach. For the position control, inner loop is chosen as pressure control since the primary control input of PAM is pressure. Performance of the implementation is given in results section.

2.5. Fuzzy PID Controller Implementation

While designing a fuzzy controller for PAM, we have chosen a direct fuzzy PID controller that is composed of fuzzy PI and fuzzy PD controllers. Figure 5.a shows the overall block diagram of the fuzzy PID control. Both fuzzy blocks are Sugeno type controllers. The fuzzy PI and fuzzy PD controllers performed simultaneously and separately; hence, their results are combined as the final output of controller. The internal structure of each fuzzy block is also given in Figure 5.b. The inputs for fuzzy PD are the error, derivative of the error and the inputs for fuzzy PI are the error, integral of the error, all with appropriate gains. The amount of error is calculated from the difference between the reference value and data from sensors. The gains are indicated by K_e for the error, K_{de} for the derivative of the error and K_{ie} for the of the integral of the error. In the Table 1, fuzzy rules are given and $f(e)$ demonstrates rule function used for both PD and PI implementation. Similar logic is used for pressure control and position control. [26].

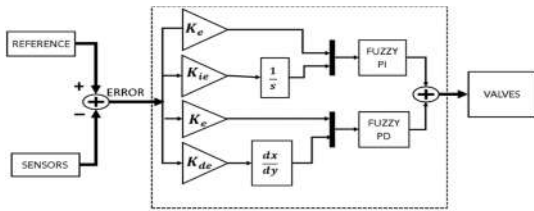


Figure 5.a. Fuzzy PID controller

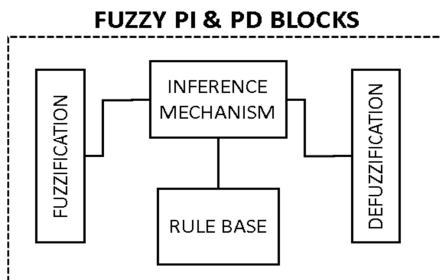


Figure 5.b. The Internal structure of fuzzy PI & PD blocks

Fuzzy PID controller implementation, error, derivative of error and integral of error are evaluated as fuzzy inputs using fuzzy memberships, and the inference mechanism yields the fuzzy output. The fuzzy output is defuzzified and resultant PWM signal is sent to the valves to provide system control with feedback. As shown in Figure 6, trapezoidal membership functions are selected for inputs in the range of [-1 1]. The seven membership functions are represented as follows: NB: Negative Big, NM: Negative Medium, NS: Negative Small, Z: Zero, PS: Positive Small, PM: Positive Medium and PB: Positive Big. Figure 7 indicates the output membership functions which use Sugeno zero-order type. In Figure 8, the control surface for the fuzzy PID controller is given.

Table 1. Fuzzy Rules for PD and PI blocks

$f(e)$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	-0.8	-0.67	-0.53	-0.4	-0.26	-0.13	0
NM	-0.67	-0.53	-0.4	-0.26	-0.13	0	0.13
NS	-0.53	-0.4	-0.26	-0.13	0	0.13	0.26
Z	-0.4	-0.26	-0.13	0	0.13	0.26	0.4
PS	-0.26	-0.13	0	0.13	0.26	0.4	0.53
PM	-0.13	0	0.13	0.26	0.4	0.53	0.67
PB	0	0.13	0.26	0.4	0.53	0.67	0.8

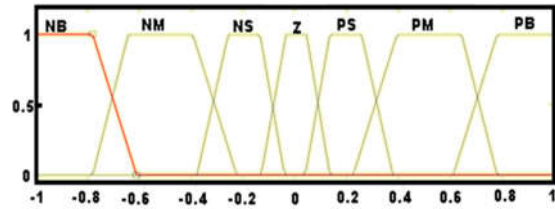


Figure 6. Membership functions for inputs (error, derror and ierror)

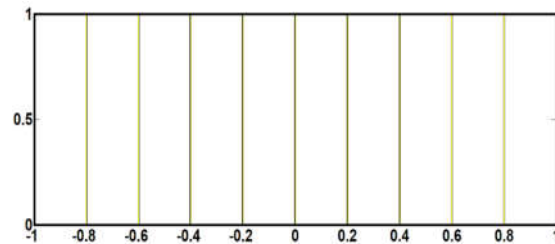


Figure 7. Membership functions for output

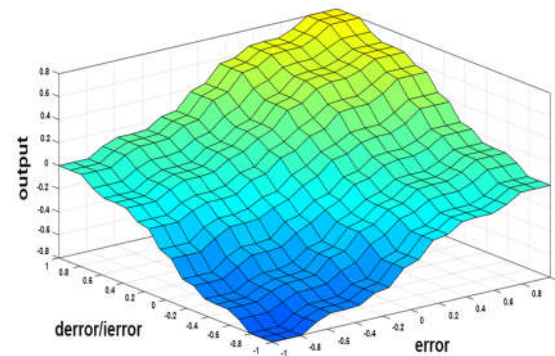


Figure 8. Control surface for fuzzy PID

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

In this study, the responses of a pneumatic artificial muscle operated with fast on/off valve to three common nonlinear control methods are investigated. Among the nonlinear control methods, as model-free ones, conventional PID control and fuzzy PID control are implemented. As model-based method, sliding mode control (SMC) is implemented. The performance of the control methods is evaluated using step response and reference sine signal tracking. The controllers are implemented for both pressure control of PAM and position control of 1-D orthosis. Range of motion

(ROM) for most of the human main extremity joints are limited to maximum 110°. The velocity of the human muscles for articulated joints are also less than 1000/sec. Hence, for a rehabilitation device, maximum 1 Hz cycling frequency for exercise is more than the required physiotherapy exercise ranges. Therefore, in our case, we have chosen 0.1 Hz and 0.5 Hz for reference sine signals to represent, passive cyclic exercise patterns. The range of motion (ROM) of the arm orthosis for rehabilitation is selected between -15 to 70 degrees for cyclic passive exercise which corresponds to the pressure range of 5-75 psi in PAM, approximately. Experiments are carried out with a fixed weight of 15 kg and flow throttling valves are used to reduce the pressure flow to prevent swing. In following text, performance test results are given as grouped for pressure control and position control, for all the control modes.

In Figure 9, step response results for PID, fuzzy PID and sliding mode control are given, respectively, for pressure control of PAM. As seen in Figure 9 and Table 2, although there is no overshoot in the traditional PID control and fuzzy PID control, an 8 % overshoot occurred in the sliding mode control. In the step response for pressure control with conventional PID an oscillation in the range of about ± 0.8 psi is observed while in SMC an oscillation in the range of about ± 3 psi is observed. Although there is a negligible small steady state error in fuzzy PID and there is no oscillation as compared to traditional PID and SMC.

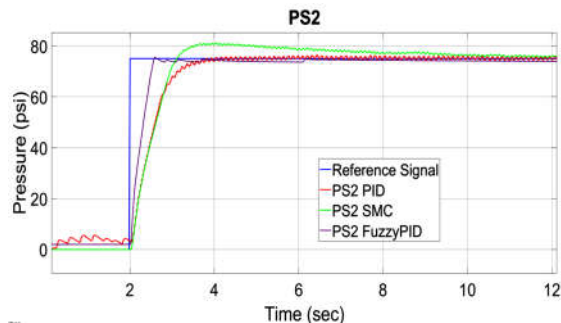


Figure 9. Step responses for pressure control using PID, fuzzy PID and SMC

Table 2. Results of applied controllers for pressure control

Controller	Overshoot (%)	Rise Time (sec)	Steady State Error (psi)
PID	~0	3.6	0.8
Fuzzy PID	~0	1.1	1.3
Sliding Mode Control (SMC)	8	2.1	3

In Figure 10, PID, fuzzy PID and Sliding mode control 0.1 Hz sine tracking results are given for pressure control, respectively.

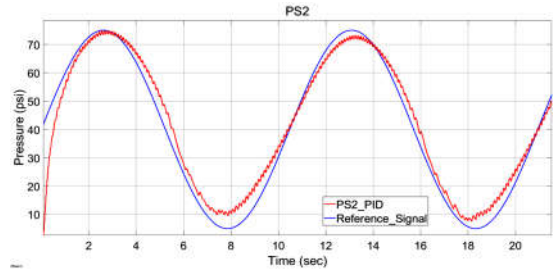


Figure 10.a. 0.1 Hz Sine tracking with PID control

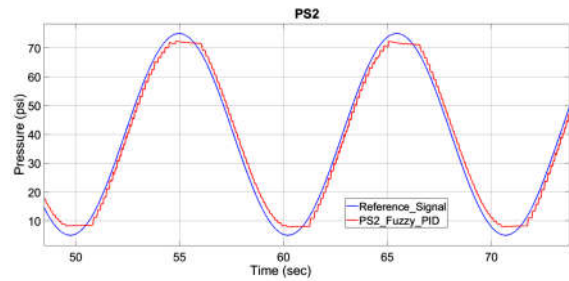


Figure 10.b. 0.1 Hz Sine tracking with fuzzy PID control

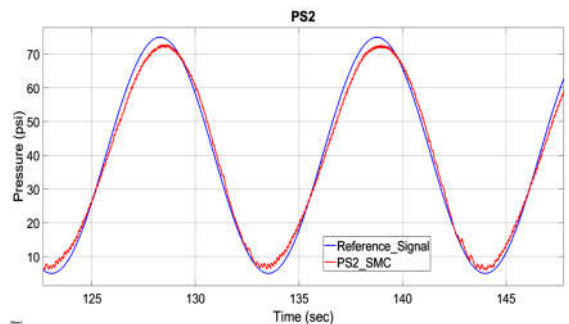


Figure 10.c. 0.1 Hz Sine tracking with SMC

In Figure 11, PID, fuzzy PID and Sliding mode control 0.5 Hz sine tracking results are given for pressure control, respectively.

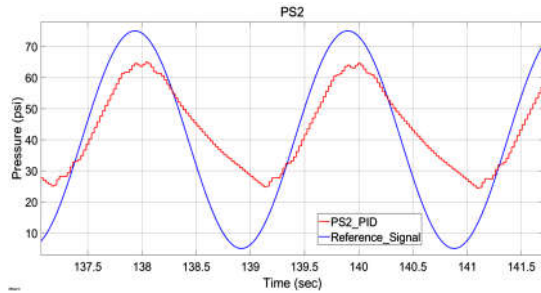


Figure 11.a.0.5 Hz Sine tracking with PID control

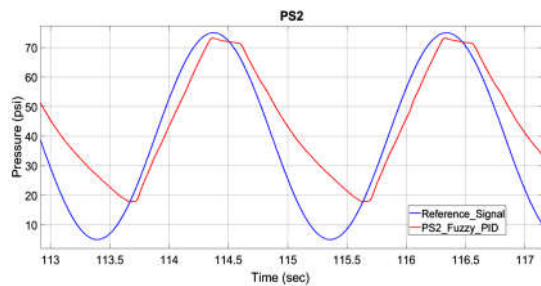


Figure 11.b. 0.5 Hz Sine tracking with fuzzy PID control

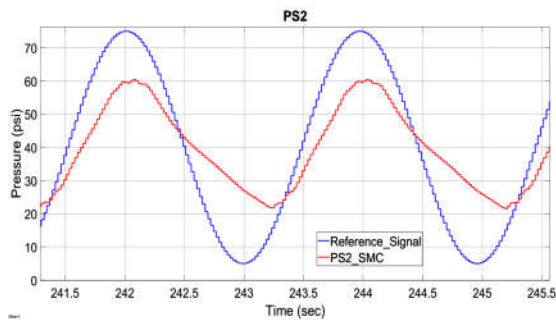


Figure 11.c. 0.5 Hz Sine tracking with SMC

When the results of the sine signal tracking in the pressure control are examined, it is seen that the error increases while the frequency increases. As seen in Figure 11, 3 controllers have good performances in 0.1 Hz frequency sine tracking. However, with the frequency rising to 0.5 Hz, as seen in Figure 11, fuzzy PID shows the best performance despite a negative error caused by the flow throttling valve.

Let's consider similar results for position control. Cascade PID control is used for position control using both pressure feedback and position feedback. The reason for using the cascade structure is that the air in-taking and releasing the muscle is provided by pressure control while the muscle contracts and relaxes, i.e. the pressure is the primary controlled system input.

In Figure 12, step response results for PID, fuzzy PID and sliding mode control are given, respectively, for position control of PAM.

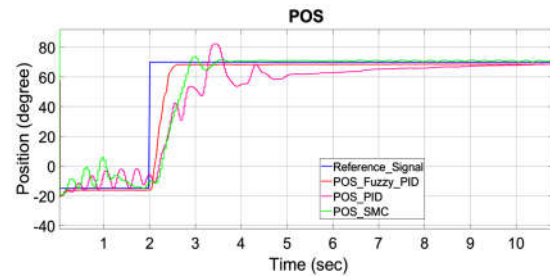


Figure 12. Step Responses for Position Control using PID, fuzzy PID and SMC

As seen in Figure 12 and Table 3, although there is no overshoot in the fuzzy PID control, a 17.85 percent overshoot occurred cascade PID control and a 5.71 percent overshoot occurred in the sliding mode control. In the step response for position control with conventional PID an oscillation in the range of about 0.8° is observed while in SMC an oscillation in the range of about 1.0° is observed. Eventually, a steady state error for fuzzy PID is 0.5°, which is a much better performance as compared to cascade PID and SMC.

Table 3. Results of applied controllers for position control

Controller	Overshoot (%)	Rise Time (sec)	Steady State Error (deg)
PID_Cascade	17.85	3.27	0.8°
Fuzzy PID	~0	2.6	0.5°
SMC	5.71	2.89	1.0°

In Figures 13 and 14, the results of sine signal tracking with 0.1 Hz and 0.5 Hz for position control with cascade PID, fuzzy PID and sliding mode control (SMC) are given respectively.

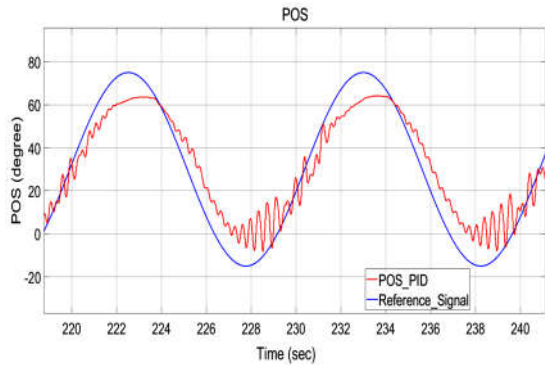


Figure 13.a. 0.1 Hz Sine tracking with PID control

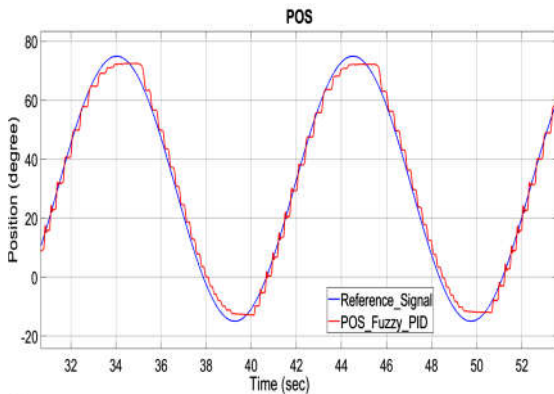


Figure 13.b. 0.1 Hz Sine tracking with fuzzy PID control

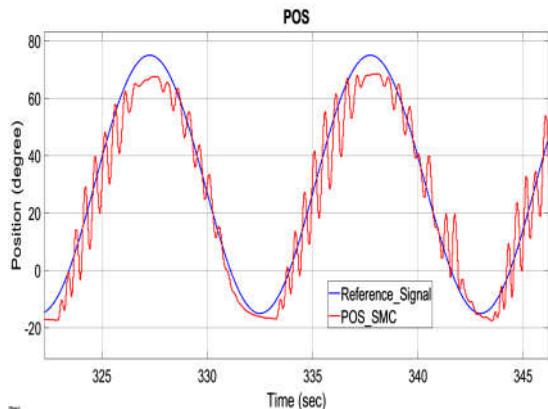


Figure 13.c. 0.1 Hz Sine tracking with SMC

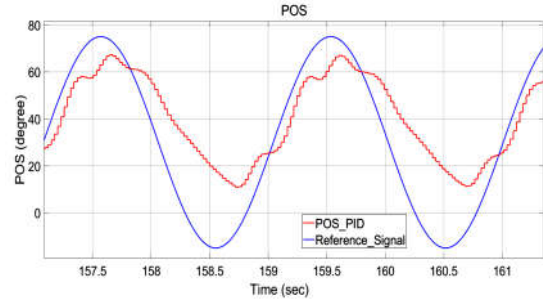


Figure 14.a. 0.5 Hz Sine tracking with PID control

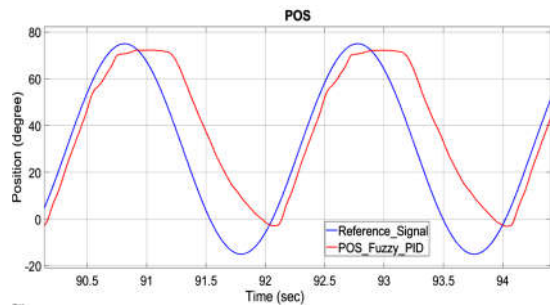


Figure 14.b. 0.5 Hz Sine tracking with fuzzy PID control

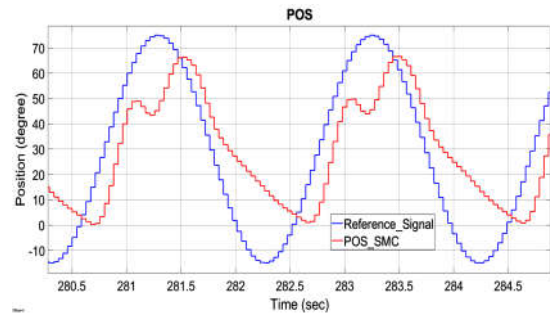


Figure 14.c. 0.5 Hz Sine tracking with SMC

When looking at the results of position control in signal tracking, as in the pressure control, it is seen that the error increases while the frequency increases. In addition, a higher error value than expected occurred during the monitoring of the sine signal at all frequency values during position control. It is thought that this is due to both the throttling valves affecting the pressure inlet and outlet, and the position is not a directly controllable parameter in the system. In addition, fuzzy PID has the smoothest following performance.

4. CONCLUSIONS

In this work, we performed an experimental evaluation of common nonlinear control modes, in order to search for simple and effective methods that is going to be used in Pneumatic Artificial Muscle rehabilitation applications. The main contribution of this work is to find an alternative method using economic actuators and a multi-mode control system approach. Fast on/off valves are preferred in some works because they are both more economical and faster than others although it becomes more difficult to control PAM.

As a first step of searching a better control method, three common nonlinear controllers used in literature are selected for an experimental evaluation. In this work, three nonlinear control methods are PID control, fuzzy PID control as model-free ones and sliding-mode control (SMC) as model-based controller. The evaluation is performed using a test rig, which is a 1-D robotic arm orthosis actuated by Festo PAMs operated with fast on/off valves. Based on our experimental results, a comparison of both approaches helps us to guide for an effective controller design with fast on/off valves. The comparison of the results enlightens the determination of a road map for an efficient and simple controller design.

In conclusion, our experimental results demonstrate that a model-free Sugeno type combined fuzzy PID controller has yielded most successful performance indicating that it could be a simple and effective solution for PAM control issue.

5. ACKNOWLEDGMENTS

This study is supported by Cukurova University Scientific Research Projects Coordination Unit. Project No: FYL-2019-12070.

6. REFERENCES

1. Caldwell, D.C., Tsagarakis, N., 2007. "Soft" Exoskeletons for Upper and Lower Body Rehabilitation-Design, Control and Testing. *Int J Humanoid Robot*, 4, 1–24.
2. Maciejasz, P., Eschweiler, J., Gerlach-Hahn, K., Jansen-Troy, A., Leonhardt, S., 2014. A Survey on Robotic Devices for Upper Limb Rehabilitation. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 11(1), 3.
3. Repperger, D.W., Phillips, C.A., Neidhard-Doll, A., Reynolds, D.B., Berlin, J., 2005. Power/energy Metrics for Controller Evaluation of Actuators Similar to Biological Systems. *Mechatronics*, 15(4), 459-469.
4. Tondu, B., P., Lopez, 2000. Modeling and Control of McKibben Artificial Muscle Robot Actuators, *IEEE Control Systems Magazine* 20(2), 15-38.
5. Daerden, F., Lefeber, D., 2002. Pneumatic Artificial Muscles: Actuators for Robotics and Automation, *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, 47(1), 11-21.
6. Festo, Fluidic Muscle DMSP/MAS, Festo Brochure, 2018.
7. Jouppila, V.T., Gadsden, S.A., Bone, G.M., Ellman, A.U., Habibi, S.R., 2014. Sliding Mode Control of a Pneumatic Muscle Actuator System with a PWM Strategy. *International Journal of Fluid Power*, 15(1), 19-31.
8. Wickramatunge, K.C., Leephakpreeda, T., 2009. Empirical Modeling of Pneumatic Artificial Muscle. In *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*, 2.
9. Chang, M.K., Liou, J.J., Chen, M.L., 2011. T-S Fuzzy Model-based Tracking Control of a One-dimensional Manipulator Actuated by Pneumatic Artificial Muscles. *Control Engineering Practice*, 19(12), 1442-1449.
10. Ahn, K.K., Thanh, T.D.C., 2005. Nonlinear PID Control to Improve the Control Performance of the Pneumatic Artificial Muscle Manipulator Using Neural Network. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 19(1), 106–115.
11. Andrikopoulos, G., Nikolakopoulos, G., Manesis, S., 2014. Advanced Nonlinear PID-based Antagonistic Control for Pneumatic Muscle Actuators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(12), 6926-6937.

12. Xing, K., Huang, J., Wang, Y., Wu, J., Xu, Q., He, J., 2010. Tracking Control of Pneumatic Artificial Muscle Actuators Based on Sliding Mode and Non-linear Disturbance Observer. *IET Control Theory & Applications*, 4(10), 2058-2070.
13. Aschemann, H., Schindele, D., 2008. Sliding-mode Control of a High-speed Linear Axis Driven by Pneumatic Muscle Actuators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 15(11), 3855-3864.
14. Xing, K., Huang, J., He, J., Wang, Y., Xu, Q., Wu, J., 2012. Sliding Mode Tracking for Actuators Comprising Pneumatic Muscle and Torsion Spring. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 34(2-3), 255-277.
15. Andrikopoulos, G., Nikolakopoulos, G., Manesis, S., 2013. Pneumatic Artificial Muscles: A Switching Model Predictive Control Approach. *Control Engineering Practice*, 21(12), 1653-1664.
16. Chiang, C., Chen, Y., 2018. Incremental Fuzzy Sliding Mode Control of Pneumatic Muscle Actuators. *International Journal of Innovative Computing Information & Control IJICIC*, 14(5), 1917-1928.
17. Krishna, S., Nagarajan, T., Rani, A., 2011. Review of Current Development of Pneumatic Artificial Muscle. *Journal of Applied Sciences*, 11, 1749-1755.
18. Jouppila, V., 2014. Modeling and Control of a Pneumatic Muscle Actuator, Tampere University of Technology, Publication; 1199.
19. Kelasidi, E., Andrikopoulos, G., Nikolakopoulos, G., Manesis, S., 2011. A Survey on Pneumatic Muscle Actuators Modeling. In 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1263-1269. IEEE.
20. Chou, C.P., Hannaford, B. 1996. Measurement and Modeling of McKibben Pneumatic Artificial Muscle, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(1), 90-102.
21. Reynolds, D., Repperger, D., Phillips, C., Bandry, G., 2003. Modeling the Dynamic Characteristics of Pneumatic Muscle. *Annals of Biomedical Engineering*, 31(3), 310-317.
22. Slotine, J.J.E., Li, W., 1991. *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall of India put. Limited, New Delhi.
23. Wang, J., Rad, A.B., Chan, P.T., 2001. Indirect Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control: Part I: Fuzzy Switching. *Fuzzy Sets and Systems*, 122(1), 21-30.
24. Qian, J., Huang, J., Ri, S., 2015. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Pneumatic Muscle Actuator. In 2015 Chinese Automation Congress (CAC), 431-436. IEEE.
25. Ziegler, J.G., Nichols, N.B., 1942. Optimum Settings for Automatic Controllers. *Transactions of the ASME*, 64, 759-768.
26. Jantzen, J., 1998. Tuning of Fuzzy PID Controllers. Technical University of Denmark, Department of Automation, Bldg, 326.

Zamanla Sinüzoidal Olarak Değişen Manyetik Alan Şiddetinin Ters Basamak Geometrisinde Akış Ayrılması ve Isı Transferine Etkisi

Harun ZONTUL¹, Beşir ŞAHİN*¹

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

Geliş tarihi: 03.06.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Akış ayrılması, aerodinamik ve ısı transferi uygulamalarında performansı büyük ölçüde etkileyen, tasarım sırasında göz ardı edilemeyecek fiziksel bir olgudur. Ters basamak geometrisi, akış ayrılmasını incelemek veya ayrılmış akışı manipüle etmeyi hedefleyen kontrol yöntemlerinin etkinliğini araştırmak amacıyla gerçekleştirilen çalışmalarda önemli bir yere sahip referans geometridir. Bu çalışmada bir aktif akış kontrol yöntemi olan manyetik alanın ters basamak geometrisinde akış ayrılması ve ısı transferine etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Manyetik alanın şiddeti zamana göre sinüzoidal bir fonksiyona bağlı kalarak sürekli şekilde değiştirilmiştir. İnceleme laminer akış koşulları ile sınırlandırılmıştır. Çalışma sıvısı olarak su bazlı demir oksit (Fe₃O₄-su) nano akışkanı kullanılmış ve nano akışkan tek fazlı olarak modellenmiştir. Sayısal simülasyonlar sonucunda incelenen yöntemin ölü akış bölgesine ve bu bölgedeki akışın sebep olduğu konveksiyon ile ısı transferine etki etmede başarılı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Akış kontrol yöntemleri, Akış ayrılması, Isı transferi, Manyetohidrodinamik, Ters basamak geometrisi

The Effect of Sinusoidally Changing Magnetic Field Strength on Flow Separation and Heat Transfer in Backward-Facing Step Geometry

Abstract

Flow separation is a physical phenomenon that greatly affects the performance in aerodynamic and heat transfer applications and cannot be neglected during design. Backward-facing step is the reference geometry, which is important in the studies carried out to examine the flow separation or to investigate the effectiveness of control methods aimed at manipulating the separated flow. In this study, the effect of the magnetic field, which is an active flow control method, on flow separation in backward-facing step geometry and heat transfer were investigated numerically. The intensity of the magnetic field was changed continuously, depending on a sinusoidal function over time. The investigation was limited to laminer flow conditions. Water based iron oxide (Fe₃O₄ – water) nanofluid was used as a working fluid and the nanofluid modeled as a single phase. As a result of numerical simulations, the method examined has been found to be successful in influencing the wake flow and the convective heat transfer caused by the flow in this zone.

Keywords: Backward-facing step, Flow control methods, Flow separation, Heat transfer, Magnetohydrodynamics

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Beşir ŞAHİN, bsahin@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Akış ayrılması ya da sınır tabaka ayrılması olarak bilinen olgu aerodinamikde kaldırma kuvvetini azaltması ve sürtünme katsayısını artırması, ısı transferi uygulamalarında taşınım ile ısı transferini olumsuz etkileyebilmesi gibi nedenlerden ötürü mühendislikte önemli bir yere sahiptir. Bu olgunun pratikteki önemi nedeniyle ayrılmanın önlenmesi, geciktirilmesi ya da ayrılmış akışın tekrar yüzeye birleştirilmesine yönelik birçok araştırma mevcuttur. Ters basamak geometrisi bu araştırmalarda sıklıkça kullanılan referans geometridir. Bu geometride ayrılmış akışın tekrar yüzeye birleştiği noktanın basamağa olan uzaklığı ya da bir başka deyişle ölü akış bölgesinin büyüklüğü, basamak yüksekliği ve Reynolds sayısı parametrelerine bağlıdır [1-3].

Reynolds sayısı ve basamak yüksekliğinden bağımsız olarak ölü akış bölesine etki etmeyi amaçlayan aktif ve pasif akış kontrol yöntemleri de mevcuttur. Bu amaçla Chun ve Sung [4] ayrılma çizgisinin yakınındaki ince bir yarıktan sinüzoidal olarak salınan jet akışı göndermişler ve belirli salınım frekans ve genlik değerlerinde yeniden birleşme mesafesinde azalma elde etmişlerdir. Kanal üst duvarına yerleştirilen engel vasıtası ile ayrılmış akışı ölü akış bölgesini küçültecek şekilde yönlendirmenin alt duvardan ısı transferini artırıcı sonuçlar doğurduğunu gösteren çalışmalar mevcuttur [5-8]. Cheng ve Tsay [9] üst duvara yerleştirilen engeller üzerine eklenen değişik ölçülerde yarıkların ısı transferi artışını olumsuz etkilemesine karşın basınç kaybını azalttığını belirtmiştir. Uruba ve arkadaşları [10] ölü akış bölgesine ardışık emme ve üfleme yöntemi ile müdahalenin etkisini incelemişler, bu yöntemin yeniden birleşme mesafesini kısalttığını ancak emme/üfleme işlemleri için kullanılan ekstra enerji talebinin yüksek olduğuna dikkat çekmişlerdir. Bir aktif akış kontrol yöntemi olarak kanal girişinde salınımlı akış koşullarının uygulanması ısı transferi uygulamalarında etkili olabildiği bilinmektedir, bu yöntemin ters basamak geometrisinde ısı transferine olumlu katkısı olduğunu gösteren çalışmalar da vardır [11-13]. Tihon ve arkadaşları [14] laminardan türbülansa geçiş koşullarında

salınımlı akışın optimum frekans değeri için yeniden birleşme mesafesini yüzde seksen kadar azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca Selimefendigil ve Öztop [15] salınımlı akışa ek olarak basamak sonrasındaki alt duvarın oluklu olduğu bir geometri için sayısal inceleme gerçekleştirmişlerdir. Akışın manyetik alan vasıtası ile manipüle edilmesi özellikle son yıllarda araştırmacıların dikkatini çeken bir yöntemdir. Abbassi ve Nassrallah [16] akış yönünün normali doğrultusunda manyetik alan etkileyen bir durumu nümerik olarak simüle ederek manyetik alanın yeniden birleşme mesafesini kısaltıcı etki yarattığını göstermişlerdir. Selimefendigil ve Öztop [17] manyetik alanı belirli açılarda uygulayarak düşük Reynolds sayılarında akış ayrılmasını önlemede oldukça başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Kanal içerisine silindir yerleştirerek ölü akışın bulunduğu bölgeden gerçekleşen ısı transferinde önemli ölçüde artış elde edilebileceğini gösteren çalışmalar mevcuttur [18,19]. Selimefendigil ve Öztop [20,21] silindiri döndürerek belirli dönüş yönleri ve hızları için durağan halden daha iyi ısı transferi sağladığını belirtmiştir. Chan ve Lien [22] basamaktan ayrılan akışı gözenekli ortamdan geçirerek akış ayrılmasına müdahale etmişler ve düşük geçirgenlikteki gözenekli ortamların ölü akış bölgesini elimine etmekte daha başarılı sonuç verdiğini rapor etmişlerdir. Plazma aktüatörleri akış ayrılmasını kontrol etmede etkili bir yöntemdir, bu yöntemin ters basamak geometrisindeki performansını inceleyen deneysel çalışmalar mevcuttur [23-27]. Inaoka ve arkadaşları [28] basamak üzerine yerleştirdiği elektromanyetik aktüatörlü kanatlara salınım hareketi vermek suretiyle alt duvardan gerçekleşen ısı transferini iyileştirmiştir. Yukarıdaki literatür araştırmasında ters basamak geometrisinde ayrılmış akışı kontrol etmeye yönelik kullanılmış yöntemler özetlenmiştir. Bu çalışmada kontrol yöntemi olarak manyetik alan seçilmiş ancak manyetik alan şiddeti sabit tutulmayıp zamanla sinüzoidal olarak değiştirilmiştir. Yöntemin etkinliği sayısal simülasyonlardan elde edilen ısı transferi ve akış karakteristiği sonuçları ile ortaya koyulmuştur.

2. PROBLEM TANIMI

Bu çalışmada içerisinde ters basamak geometrisi bulunduran bir kanaldaki akış ve kanal alt duvarı ve basamak dikey duvarından gerçekleşen konveksiyonla ısı transferi problemi incelenmiştir. Şekil 1’de şematik olarak gösterildiği üzere basamak yüksekliği kanal yüksekliğinin yarısıdır. Akışkan olarak su bazlı Fe_3O_4 nano akışkanı seçilmiştir ve akışkanın termofiziksel özelliklerinin sıcaklıkla değişmediği kabul edilmiş ancak karışık konveksiyonun mevcut olması nedeniyle yönetici denklemlerdeki efektif yoğunluk Boussinesq yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Ayrıca ışınlama ısı transferi etkileri ihmal edilmiş, akışın iki boyutlu ve laminer olduğu kabulü yapılmıştır. Tüm bu koşullar altında yönetici denklemler aşağıdaki formda olmaktadır:

Süreklilik denklemi (Eşitlik 1):

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

X yönü için momentum denklemi (Eşitlik 2):

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial X} + \\ \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) + \frac{\rho_{bf} \sigma_{bf}}{\rho_{nf} \sigma_{nf}} \frac{Ha^2}{Re} (\sin^2(2\pi\lambda)) \end{aligned} \quad (2)$$

Y yönü için momentum denklemi (Eşitlik 3):

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial Y} + \\ \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \theta \frac{Gr}{Re^2} \end{aligned} \quad (3)$$

Enerji denklemi (Eşitlik 4):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial \lambda} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \\ -\frac{1}{RePr} \frac{k_{nf}}{k_{bf}} + \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Bu denklemlerdeki terimler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\begin{aligned} X = \frac{x}{H} \quad Y = \frac{y}{H} \quad U = \frac{u}{u_0} \quad V = \frac{v}{v_0} \quad \lambda = \frac{tu_0}{H} \\ \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \quad P = \frac{p}{\rho_{bf} u_0^2} \quad Gr = \frac{g \beta_f h_c^4 \dot{q}}{k v_{bf}^2} \\ Ha = B_0 H \sqrt{\frac{\sigma_{bf}}{\mu_{bf}}} \quad Pr = \frac{v_{bf}}{\alpha_{bf}} \end{aligned}$$

Kanal duvarlarında kaymama koşulu olduğu kabulü yapılmıştır ($U=V=0$). Basamağın dikey duvarında ve basamak sonrasındaki alt duvarın $0 \leq X \leq 5H$ arasındaki bölümünde sabit ısı akışı tanımlanmıştır. Kanal çıkışında hız ve sıcaklık gradyanları sıfırdır, $(\partial U / \partial X, \partial V / \partial X, \partial \theta / \partial X)$ girişte sıcaklık sabittir ($\theta = \theta_c$) ve hız profili Eşitlik 5’te gösterildiği gibidir.

$$U = \{6[Y^2 - (H+1)Y + H]\} / \{4H - (H+1)^2\} \quad (5)$$

Çalışma sıvısı olarak su bazlı Fe_3O_4 nano akışkanı kullanılmış, nano akışkan tek fazlı olarak modellenmiştir. Nano akışkanın termofiziksel özellikleri aşağıdaki denklemler ile hesaplanmıştır. Kullanılan nano-partikül özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np} \quad (6)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho C_p)_{bf} + \phi(\rho C_p)_p \quad (7)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)(\rho\beta)_{bf} + \phi(\rho\beta)_{np} \quad (8)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{bf}}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (9)$$

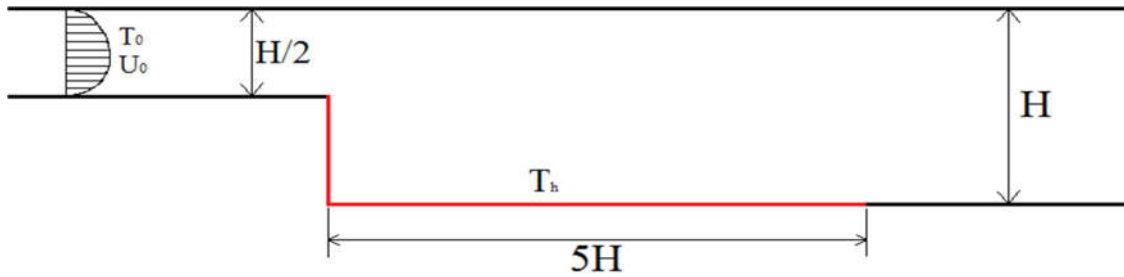
$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{(k_{np} + 2k_{bf}) - 2\phi(k_{bf} - 2k_{np})}{(k_{np} + 2k_{bf}) + \phi(k_{bf} - k_{np})} \quad (10)$$

$$\sigma_{nf} = \sigma_{bf} \left(1 + \frac{3(\sigma_{np}/\sigma_{bf} - 1)\phi}{(\sigma_{np}/\sigma_{bf} + 2) - ((\sigma_{np}/\sigma_{bf} - 1)\phi)} \right) \quad (11)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (12)$$

Yukarıda verilen dinamik viskozite, μ ısı iletim katsayısı k ve elektrik iletkenliği, σ terimlerinin hesaplanması için kullanılan 9, 10 ve 11 numaralı

eşitlikler sırasıyla Brinkman [29], Maxwell-Garnet [30] ve Maxwell [31] modellerinden alınmıştır. Isıtılan yüzeylerden meydana gelen ısı transferinin miktarı Nusselt sayısı, Nu hesaplanarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Problem geometrisinin şematik gösterimi

Çizelge 1. Nano-partikül ve suyun özellikleri

	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg K)	k (W/m K)	β (K ⁻¹)	σ
Su	997.1	4179	0.613	21×10^{-4}	0.05
Fe ₃ O ₄	5200	670	6	1.3×10^{-5}	2500

Yerel Nusselt sayısı (Eşitlik 13):

$$Nu = \frac{k_{nf}}{k_{bf}} \frac{\dot{q}}{(\theta_h - \theta_0)} H \quad (13)$$

Ortalama Nusselt sayısı (Eşitlik 14):

$$\bar{Nu} = \frac{1}{5H} \int_0^{5H} Nu \, dX \quad (14)$$

Zaman ortalamalı Nusselt sayısı (Eşitlik 15):

$$Nu = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\lambda} Nu \, d\lambda \quad (15)$$

3. ÇÖZÜM YÖNTEMİ VE DOĞRULAMA

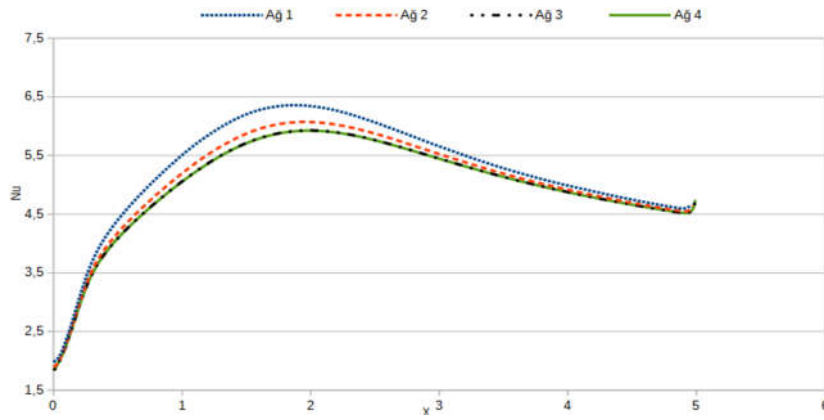
Önceki bölümde tanımlanmış olan problem Ansys Fluent Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği paket programı kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Akış alanına etki ettirilen manyetik alan Fluent yazılımının Kullanıcı Tanımlı İşlev (User Defined Function) özelliği vasıtasıyla uygulanmıştır.

Basınç ve hız alanlarının birleştirilmesi için Patankar'ın SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Mekansal ayrıklaştırmadaki gradyen terimleri için hücre tabanlı en küçük kareler yöntemi seçilmiştir. Ayrıca Eşitlik 1-4 ikinci dereceden Upwind yöntemi kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Her bir zaman adımı için itersasyonlar süreklilik ve momentum denklemi için 10^{-5} , enerji denklemi için 10^{-6} , yakınsama kriterine ulaşılan kadar devam ettirilmiştir. Simülasyon ise sıcak yüzeydeki Nusselt sayısının zamanla değişimi periyodik olana kadar sürdürülmüştür. Ayrıklaştırma işlemi için gerekli olan ağdaki eleman sayısının çözüme etkisini gidermek amacıyla farklı sayılarda dikdörtgensel eleman bulunduran dört adet ağ yapısı test edilmiştir. Maksimum eleman boyutu ve toplam eleman sayıları Çizelge 1'de verilen ağ yapıları için gerçekleştirilen simülasyonlar sonucu Nusselt sayısının ısıtılan alt duvar boyunca değişimini gösteren grafik Şekil 2'de gösterilmiş. Bu şekilden de görülebileceği gibi seyrek yapıdaki Ağ 1'den

daha sık yapıdaki Ağ 4'e doğru ağdaki eleman sayısı arttıkça Nusselt sayısının dağılımında değişimler oluşmaktadır. Ancak Ağ 3 ile Ağ 4 karşılaştığında bu iki yapının sonuçlara olan etkisinin birbirine benzer olduğu görülmektedir. Bu nedenle Ağ 3 olarak adlandırılan yapının yeterince doğru sonuçlar verdiği anlaşıldığından çözüm süresini uzatmamak adına eleman sayısı daha da artırılmamış, tüm simülasyonlar için Ağ 3 adlı ağ yapısı kullanılmıştır.

Çizelge 2. Ağdan bağımsızlaştırma testi için kullanılan eleman sayıları

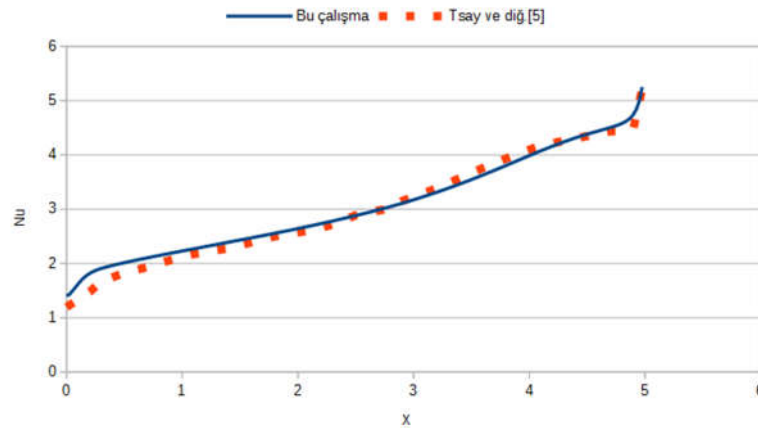
Maks. Eleman Boyutu (mm)	Eleman Sayısı	
0,005	23702	Ağ 1
0,003	53008	Ağ 2
0,001	402621	Ağ 3
0,0009	483952	Ağ 4



Şekil 2. Ağdaki farklı eleman sayılarının Nusselt sayısı dağılımına etkisi

Çözüm prosedürü, doğrulama amacıyla Tsay ve arkadaşları [5]'nin çalışmasında tanımlanan ters basamak geometrisi üzerinden akış ve ısı transferi problemine uygulanmıştır. Doğrulama için seçilen durumda Reynolds sayısı 500, Prandtl sayısı 0,7'dir ve kanal üst duvarında herhangi bir engel

bulunmamaktadır. Nusselt sayısının ısıtılan alt duvar boyunca dağılımı grafiğe döküldüğünde (Şekil 3) mevcut prosedürün Tsay ve arkadaşları [5] tarafından elde edilen verilerle oldukça uyumlu sonuçlar ürettiği görülmektedir.

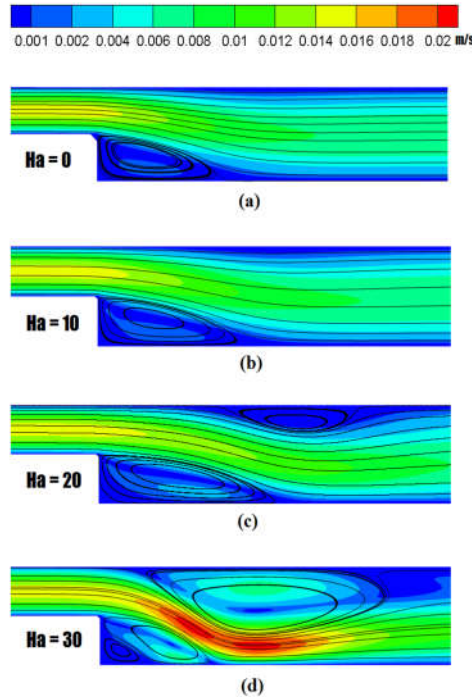


Şekil 3. Doğrulama çalışması sonuçları

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şiddeti zamanla sinüzoidal olarak değişen manyetik alanın, akış üzerindeki etkisini gösterebilmek için Şekil 4'de zaman ortalamalı akım çizgileri ve hız konturları gösterilmiştir. Şekilde incelenen durum için Reynolds sayısı değeri 100, nano-akışkanın partikül oranı %2'dir, $\phi=0,02$. Manyetik alanın olmadığı bir başka deyişle Hartman sayısının sıfır olduğu koşul ile üç farklı manyetik alan şiddetinin etki ettirildiği durumlar karşılaştırılmıştır. Manyetik alanın etki etmediği durumda standart bir ters basamak geometrisi üzerinden akışta olması beklendiği gibi basamağı terk eden ana akım katı yüzeyden ayrılmakta ve belirli bir mesafe katettikten sonra tekrar yüzeye birleşmektedir. Şekilden de görüleceği gibi basamağın dikey duvarı ile ana akımın tekrar yüzeye birleştiği noktaya kadar olan bölgede ölü akış bölgesi olarak da adlandırılan ikincil akım bölgesi oluşmaktadır. Hız konturu değerlerine baktığımızda ölü akış bölgesinde hızın ana akımdan belirgin şekilde düşük olduğu görülmektedir. Hartman sayısının değeri 10 olarak

belirlendiğinde manyetik alanın ortaya çıkardığı Lorentz kuvvetlerinin akış alanı üzerinde etkisi kısıtlı olmaktadır. Bu Hartman sayısı değerinde hız konturları ölü akış bölgesinde bir hız artışına işaret ediyor olsa da manyetik alanın asıl etkisi Hartman sayısının 20 olduğu durum için görülmektedir. Bu koşulda şekilden de görüleceği gibi kanalın üst duvarında ikinci bir sirkülasyon bölgesi oluşmaktadır. Yeni durumda oluşan bu ikinci sirkülasyon bölgesi ana akımı aşağı doğru baskılamakta ve daha dar bir kesitten geçmeye zorlamaktadır. Bunun sonucunda hız konturu değerlerinin de gösterdiği gibi ölü akış bölgesinde önceki duruma göre daha belirgin bir hız artışı gözlemlenmektedir. Hartman sayısı 30 olduğunda manyetik alanın akış üzerindeki etkisi daha agresif hale gelmiştir. Kanal üst duvarında oluşan sirkülasyon bölgesi genişleyerek ana akımı baskılama etkisini artırmıştır ve böylece ölü akış bölgesi de baskılanarak küçülmüş, ana akımın yüzeye tekrar birleşme mesafesi kısalmıştır. Ayrıca, hem sirkülasyon bölgelerinde hem de arasında kalan ana akımda bariz hız artışı gözlemlenmiştir.

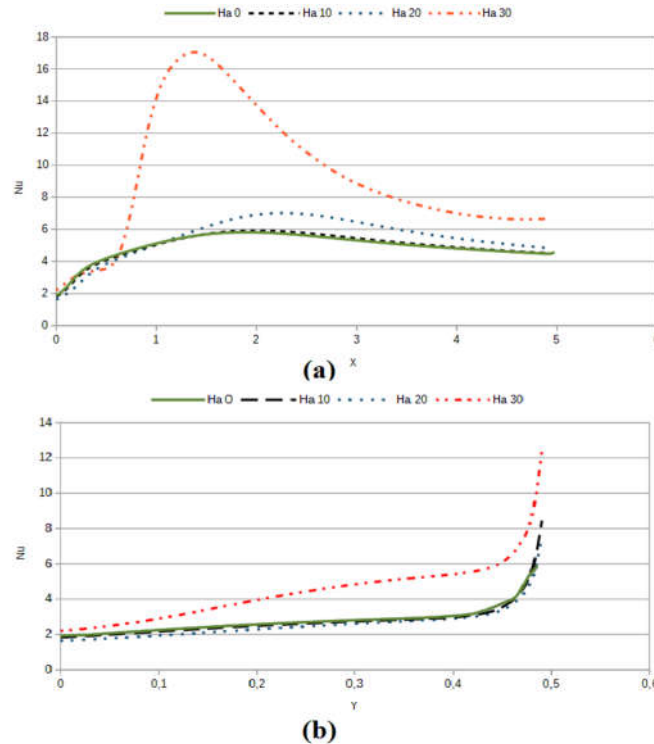


Şekil 4. $Re=100$, $\phi=0,02$, $Gr/Re^2=1$ değerleri için farklı manyetik alan şiddetlerinin akışa etkisi

Şekil 4'deki her bir koşulun basamak dikey duvarı ve kanal alt duvarından meydana gelen ısı transferine etkisi zaman ortalamalı yerel Nusselt sayısının dağılımı verilerek Şekil 5'de gösterilmiştir. $Ha=0$ ve $Ha=10$ değerleri için akış alanında önemli bir değişiklik meydana gelmemesinden de bekleneceği üzere bu iki durum için Nusselt sayısının alt duvar boyunca dağılımında kayda değer bir farklılık oluşmamıştır. $Ha=20$ olduğunda Nusselt sayısı $X \leq 2$ 'de manyetik alanın olmadığı duruma yakın seyretmekte ancak sonrasında ısı transferinin bir miktar arttığı görülmektedir. X 'in 2'den az olduğu yerde manyetik alanın sirkülasyon bölgesindeki hızla bir etkisi olmaması nedeniyle böyle bir sonuç ortaya çıkmıştır. Manyetik alanın akış üzerinde en büyük etkiyi yarattığı $Ha=30$ değerinde ısı transferi sonuçlarının oldukça yüksek çıktığı görülmektedir. $X < 1$ ile sınırlı kalan düşük hızlı ölü akış bölgesinde ısı transferi önceki durumlar ile benzer seyretmiş ancak akış hızının Şekil 4(d)'de görüldüğü gibi yüksek seyrettiği sirkülasyon

bölgesinde Nusselt sayısı yükselerek maksimum değerine ulaşmıştır. Sonrasında ısı gelişmişlik koşullarına yaklaşıldıkça beklendiği üzere ısı transferi değeri azalarak yatay seyir izlemiştir. Koşulların ısı olarak gelişmeye başladığı bölgede dahi ana akımın alt duvara baskılanması ve akışın diğer durumlara göre daha erken yüzeye birleşmesi nedeniyle ısıtılan duvara yakın bölgede hız gradyeni ve dolayısıyla ısı transferi, diğer Hartman sayılarındaki durumlara göre yüksek olmaktadır.

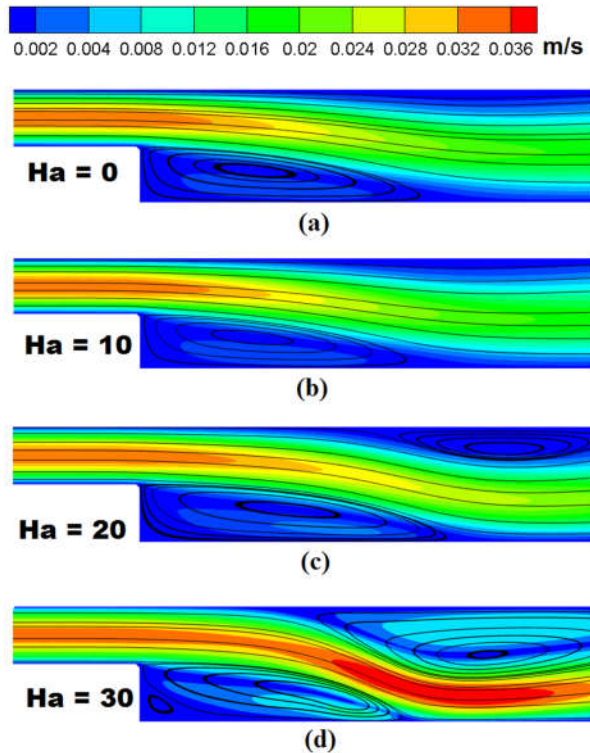
Şekil 5(b)'de Hartman sayısının basamak dikey duvarından ısı transferine etkisi gösterilmiştir. İncelenen Hartman sayıları içerisinde yalnızca $Ha=30$ değerinde dikey duvardan ısı transferi artışı yaşanmıştır. Basamak dikey duvarı yalnızca ölü akışın domine ettiği bölge ile temas etmektedir ve ancak manyetik alan yüksek Hartman sayısı değerinde bu bölgeye nüfuz edebildiğinden ısı transferinde böyle bir sonuç ortaya çıkmaktadır.



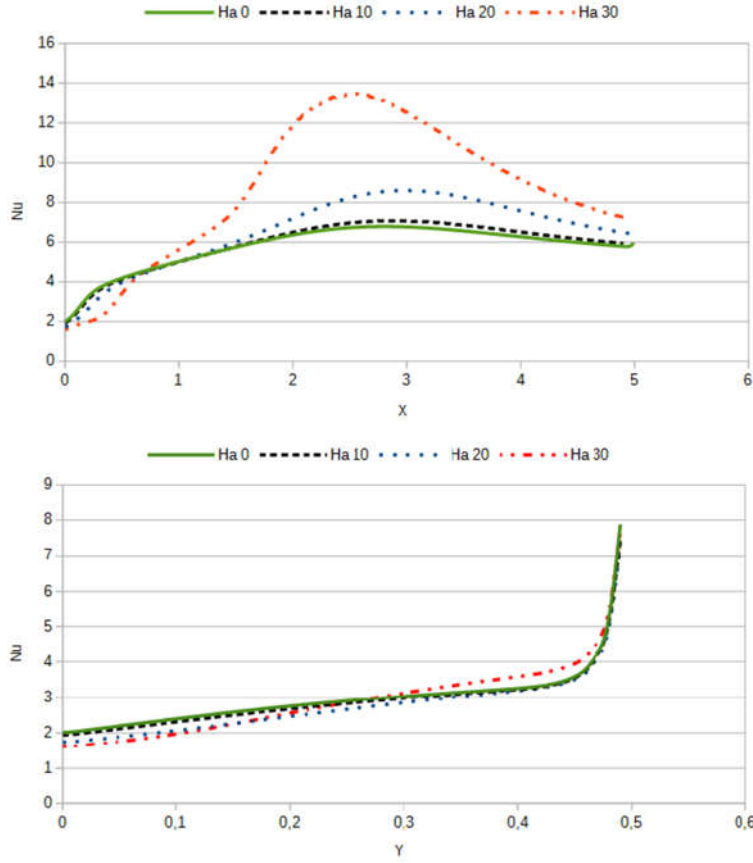
Şekil 5. Hartman sayısının $Re=100$, $\phi=0,02$, $Gr/Re^2=1$ koşullarında (a) alt duvardan, (b) basamak dikey duvarından ısı transferine etkisi

Reynolds sayısı 200 olduğunda Şekil 6(a)'da görüldüğü gibi ölü akış bölgesi aşağı akım yönünde genişlemektedir. Bu Reynolds sayısı değerinde düşük manyetik alan şiddetinin ($Ha=10$) akış üzerinde hissedilebilir bir etkisi olmamıştır. Hartman sayısının $Ha=20$ olduğu durumda Şekil 4(c)'de görülen duruma benzer bir şekilde kanal üst duvarında ikinci bir sirkülasyon bölgesi oluşmaktadır. Oluşan ikinci sirkülasyon bölgesinin etkisiyle ana akım aşağı doğru yönlendirilmiş ve ölü akış bölgesindeki sirkülasyon hızının şiddetinde bir fark ortaya çıkmış olsa da bu manyetik alan şiddetinin ölü akış bölgesi büyüklüğünü azaltmada herhangi bir etkisi olmadığı görülmektedir. En yüksek Hartman sayısı değerinde üst duvar yakınında oluşan sirkülasyon bölgesinin genişlemesi neticesinde ölü akış bölgesinde küçülme meydana gelmektedir. Ancak ölü akış bölgesindeki bu küçülme Şekil 4(d)'de meydana gelene nispetle daha az olmuş, akışın yüzeye yeniden birleştiği nokta Reynolds sayısının 100 değerinde olduğu kadar öne çekilememiştir.

Reynolds sayısının 200 olması ile genişleyen ölü akış bölgesinin ısı transferi üzerindeki etkisi Şekil 7(a)'da verilen Nusselt sayısı dağılımlarında görülmektedir. Grafikten de görüleceği gibi tüm Hartman sayısı değerlerinde Nusselt sayısının maksimum yaptığı nokta Reynolds 100'e göre daha ileridedir. Şekil 5(a)'da olduğu gibi $Ha=10$ manyetik alanın etki etmediği duruma göre kayda değer bir avantaj sağlamamıştır. Hartman sayısı 20 değerinde Nusselt sayısının zirve yaptığı nokta düşük Hartman sayılarındaki zirve noktalarından ayrılmakta sonrasında da ısı transferi aşağı akım boyunca daha yüksek seyretmektedir. Maksimum ısı transferi artışı $Ha=30$ değerinde elde edilmiştir ancak artışın aynı Hartman sayısı değerinde Reynolds 100 için gerçekleşen artıştan daha az olduğu dikkat çekmektedir. $Re = 200$ ' de manyetik alanın basamak dikey duvarından ısı transferine önemli bir etkisi olmadığı görülmektedir (Şekil 5(b)). Yalnızca $Y>0,3$ için $Ha=30$ değerinde ısı transferinde küçük bir artış olmasına karşın $Y<0,3$ 'de ısı transferi azalmıştır.



Şekil 6. $Re=200$, $\phi=0,02$, $Gr/Re^2=1$ değerleri için farklı manyetik alan şiddetlerinin akışa etkisi



Şekil 7. Hartman sayısının $Re=200$, $\phi=0,02$, $Gr/Re^2=1$ koşullarında (a) alt duvardan (b) basamak dikey duvarından ısı transferine etkisi

Çizelge 3’de tüm Hartman sayılarında kanal alt duvarı boyunca ortalama Nusselt sayılarının manyetik alan etki etmediği durumdaki ortalama Nusselt sayılarına oranları verilmiştir. Değerlerden de anlaşılacağı gibi artan manyetik alan şiddeti ısı transferine olumlu katkı sağlamaktadır. İncelenen geometride manyetik alanın ısı transferine katkısı iki şekilde olmaktadır; birinci etki sıcak duvarlar ile temas halinde bulunan bölgedeki akışın sirkülasyon hızını artırması, ikinci etki ise ölü akış bölgesini küçültmesidir.

Çizelge 3. Farklı manyetik alan şiddetlerinin ısı transferi artış oranları

	Ha 10	Ha 20	Ha 30
Re 100	1,011	1,114	1,896
Re 200	1,023	1,140	1,503

Re 100 ve Re 200 değerlerinde manyetik alanın ısı transferi artışına etkisi incelendiğinde Ha 10 ve Ha 20’de Re 200 için manyetik alanın Re 100’e göre daha iyi ısı transferi artışı getirdiği görülmektedir. Ancak Ha 30 olduğunda durum tersine dönmüştür. Re 100 için elde edilen ısı transferi artışı Re 200’de elde edilene oranla belirgin şekilde yüksektir. Bu durumun sebebi şöyle açıklanabilir; Ha 10 ve Ha 20 değerlerinde manyetik alanın ölü akış bölgesinin büyüklüğüne herhangi bir etkisi olmamaktadır. Bu manyetik alan şiddetlerinde ısı transferi artışının temel sebebi sirkülasyon bölgesindeki hız artışıdır. Ancak Hartman sayısı 30 için ölü akış bölgesinin küçülmesinin de yarattığı etkinin ısı transferine katkısı bulunmaktadır. Şekil 4(d) ve Şekil 6(d) karşılaştırıldığında görüleceği üzere Re 200’de

manyetik alan ölü akış bölgesinin küçülmesi hususunda Re 100'de olduğu kadar etkili değildir. Bir başka deyişle manyetik alan nedeniyle ortaya çıkan Lorentz kuvvelerinin, büyük atalet kuvvetlerinin söz konusu olduğu yüksek Reynolds sayısında etkisi azalmaktadır. Dolayısıyla küçülen ölü akış bölgesinin yarattığı etki Re 100'de daha fazla olduğundan ısı transferi artışı da bu Reynolds sayısında daha iyi olmuştur.

4. SONUÇLAR

Ters basamak geometrisi üzerinden akışta şiddeti zamanla değişen manyetik alanın ısı transferine etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen sayısal simülasyonlar sonucunda Hartman sayısının 20 ve 30 olduğu durumlarda manyetik alanın akış üzerinde kayda değer etki yarattığı tespit edilmiştir. Bu Hartman sayılarında kanal üst duvarında yeni bir sirkülasyon bölgesi oluşmakta ve böylece ana akım aşağı baskılanmaktadır. Ancak bu baskılanmanın neticesi olarak ölü akış bölgesinin küçülmesi yalnızca Ha 30 olduğunda gerçekleşmektedir. İncelenen tüm Hartman sayılarında ısı transferinde artış görülmektedir ancak kayda değer artış Ha=30 değerinde elde edilmiştir. Re=100 ve Re=200'de Ha=30 için sırasıyla %90 ve %50 ısı transferi artışı söz konusudur. Düşük Reynolds sayısında atalet kuvvetleri daha az olduğu için manyetik alanın ortaya çıkardığı Lorentz kuvvetleri ölü akış bölgesinin baskılanmasında daha etkili olmuştur. Böylece Re=100'de Re=200'e göre daha yüksek artış elde edilmiştir.

5. KAYNAKLAR

1. Kim, J., Kline, S.J., Johnston, J.P., 1980. Investigation of a Reattaching Turbulent Shear Layer: Flow Over a Backward-facing Step. 302-308.
2. Armaly, B.F., Dursts, F., Pereira, J.C.F., Schonung, B., 1983. Experimental and Theoretical Investigation of Backward-facing Step Flow. Journal of Fluid Mechanics 127, 473-496.
3. Adams, E.W., Eaton, J.K., 1988. An LDA Study of the Backward-facing Step Flow, Including the Effects of Velocity Bias, 275-282.
4. Chun, K.B., Sung, H.J., 1996. Control of Turbulent Separated Flow Over a Backward-facing Step by Local Forcing, Experiments in Fluids, 21, 417-426.
5. Tsay, Y.L., Chang, T.S., Cheng, J.C., 2005. Heat Transfer Enhancement of Backward-facing Step Flow in a Channel by Using Baffle Installation on the Channel Wall, Acta Mechanica, 174, 63-76.
6. Nie, Jian H., Chen, Y.T., Hsieh, H.T., 2009. Effects of a Baffle on Separated Convection Flow Adjacent to Backward-facing Step. International Journal of Thermal Sciences 48, 618-625.
7. Mohammed, Omer, H.A., Alawi, A., Wahid, M.A., 2015. Mixed Convective Nanofluid Flow in a Channel Having Backward-facing Step with a Baffle, Powder Technology, 275, 329-343.
8. Selimefendigil, F., Öztop, H.F., 2013. Numerical Analysis of Laminar Pulsating Flow at a Backward Facing Step with an Upper Wall Mounted Adiabatic Thin Fin, Computers & Fluids 88, 93-107.
9. Cheng, J.C., Tsay, Y.L., 2006. Effects of Solid and Slotted Baffles on the Convection Characteristics of Backward-facing Step Flow in a Channel, Heat and Mass Transfer, 42(9), 843-852.
10. Václav, U., Jonáš, P., Mazur, O., 2007. Control of a Channel-flow Behind a Backward-facing Step by Suction/blowing, International Journal of Heat and Fluid Flow 28(4), 665-672.
11. Velazquez, A., Arias, J.R., Mendez, B., 2008. Laminar Heat Transfer Enhancement Downstream of a Backward Facing Step by Using a Pulsating Flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, 51(7-8), 2075-2089.
12. Valencia, A., Hinojosa, L., 1997. Numerical Solutions of Pulsating Flow and Heat Transfer Characteristics in a Channel with a Backward-Facing Step, Heat and Mass Transfer, 32(3), 143-148.
13. Khanafer, K., Al-Azmi, B., Al-Shammari, A., Pop, L., 2008. Mixed Convection Analysis of Laminar Pulsating Flow and Heat Transfer Over a Backward-facing Step, International

- Journal of Heat and Mass Transfer 51(25-26), 5785-5793.
14. Tihon, J., Pěnkavová, V., Pantzali, M., 2010. The Effect of Inlet Pulsations on the Backward-facing Step Flow, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 29(3), 224-235.
 15. Selimefendigil, F., Öztop, H.F., 2017. Forced Convection and Thermal Predictions of Pulsating Nanofluid Flow Over a Backward Facing Step with a Corrugated Bottom Wall, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 110, 231-247.
 16. Abbassi, H., Ben Nassrallah, S., 2007. MHD Flow and Heat Transfer in a Backward-facing Step, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34(2), 231-237.
 17. Selimefendigil, F., Öztop, H.F., 2015. Influence of Inclination Angle of Magnetic Field on Mixed Convection of Nanofluid Flow Over a Backward Facing Step and Entropy Generation, *Advanced Powder Technology* 26(6), 1663-1675.
 18. Kumar, A., Amit K.D., 2012. Effect of a Circular Cylinder on Separated Forced Convection at a Backward-facing Step, *International Journal of Thermal Sciences*, 52, 176-185.
 19. Suzuki, H., Kida, S., Nakamae, T., Suzuki, K., 1991. Flow and Heat Transfer Over a Backward-facing Step with a Cylinder Mounted Near its Top Corner, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 12(4), 353-359.
 20. Selimefendigil, F., Öztop, H.F., 2015. Numerical Investigation and Reduced Order Model of Mixed Convection at a Backward Facing Step with a Rotating Cylinder Subjected to Nanofluid, *Computers & Fluids* 109, 27-37.
 21. Selimefendigil, F., Öztop, H.F., 2014. Effect of a Rotating Cylinder in Forced Convection of Ferrofluid Over a Backward Facing Step, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, 142-148.
 22. Edward, C., Lien, F.S., 2005. Permeability Effects of Turbulent Flow Through a Porous Insert in a Backward-facing-step Channel, *Transport in Porous Media*, 59(1), 47-71.
 23. Benard, N., Sujar Garrido, P., Bonnet, J.P., Moreau, E., 2016. Control of the Coherent Structure Dynamics Downstream of a Backward Facing Step by DBD Plasma Actuator, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 61, 158-173.
 24. Ruisi, R., Zare-Behtash, H., Kontis, K., Erfani, R., 2016. Active Flow Control Over a Backward-facing Step Using Plasma Actuation, *Acta Astronautica*, 126, 354-363.
 25. Garrido, P.S., Benard, N., Moreau, E., Bonnet, J.P., 2015. Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator to Control Turbulent Flow Downstream of a Backward-facing Step, *Experiments in Fluids*, 56(4), 70.
 26. Gholamhosein, P.S., Mirzaei, M., Hajipour, M., 2015. Experimental Study of Separation Bubble Control Behind a Backward-facing step Using Plasma Actuators, *Acta Mechanica* 226(4), 1153-1165.
 27. D'Adamo, J., Roberto, S., Artana, G., 2014. Active Control of a Backward Facing Step Flow with Plasma Actuators, *Journal of Fluids Engineering*, 136(12).
 28. Kyoji, I., Nakamura, K., Senda, M., 2004. Heat Transfer Control of a Backward-facing Step Flow in a Duct by Means of Miniature Electromagnetic Actuators, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 25(5), 711-720.
 29. Brinkman, H.C., 1952. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions, *J. Chem. Phys.* 20, 571.
 30. Society, T.R., Transactions, P., Society, R., Papers, C., Character, P., 1904. XII. Colours in Metal Glasses and in Metallic Films, *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A, Contain. Pap. a Math. or Phys. Character*, 203, 385-420.
 31. Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpay, M., Ganji, D.D., 2012. Magnetic Field Effects on Natural Convection Around a Horizontal Circular Cylinder Inside a Square Enclosure Filled with Nanofluid, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 39, 978-986.

The Effect of Design Phase Meetings on Change Orders in Building Construction Projects

OlcaY GENÇ^{*1}, Hilmi COŞKUN¹, Ercan ERDİŞ²

¹İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İskenderun

²İskenderun Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İskenderun

Geliş tarihi: 08.06.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Abstract

Management of the design phase of construction projects affects the success of the projects. Generally, architects are the main actors who dominate the whole process of the building constructions. In this study, the architects' design experiences in terms of the effect of design phase meetings on change orders in building construction projects are investigated. As a result of the study, it is concluded that there is no relationship between the frequency of meetings and requested and realized project changes in the design phase. It is also observed that, except for the architects, if the formation of the stakeholders participating in the design meetings can be varied, this can minimize the project changes and possible problems due to conflicting interests, and the participation of different groups to the design phase meetings could be a way of keeping the requests of changes in design and construction stage to a minimum.

Keywords: Change orders, Construction cost, Concurrent engineering, Construction management, Stakeholders, Project success

Bina Projelerinde Tasarım Aşaması Toplantılarının Değişiklik Emirlerine Etkisi

Öz

İnşaat projelerinde tasarım aşamasının yönetimi projelerin başarısını etkilemektedir. Genellikle bina inşaatlarının tasarım aşamasında mimarlar tüm sürece hâkim baş rol oyuncularındır. Bu çalışmada, mimarların tasarım aşamasında gerçekleştirdikleri toplantıların, bina inşaat projelerinin değişiklik talimatları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda, toplantıların sıklığı ile tasarım aşamasında talep edilen ve gerçekleştirilen proje değişiklikleri arasında bir ilişki olmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca projede yer alan mimarlar haricinde diğer paydaşların da tasarım toplantılarına katılmaları, proje değişikliklerini ve çatışan çıkarlarından kaynaklanan olası sorunları en aza indirebileceği, tasarım ve inşaat aşamasındaki değişiklik taleplerinin asgari düzeyde tutulmasına yardımcı olacağı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Değişiklik emiri, Eş zamanlı mühendislik, İnşaat maliyeti, Paydaşlar, Proje başarısı, Yapım yönetimi

*Sorumlu yazar (Corresponding author): OlcaY GENÇ, olcay.genc@iste.edu.tr

1. INTRODUCTION

Decisions taken at the beginning of the life cycle of the building projects have an important impact on the construction costs of those project. In fact, the effect of the decisions taken at this stage also affects the operating costs of the structure in the following periods. The final authority in making such decisions is the owner-client but the client must make use of the expertise of the professionals [1]. Professionals such as architects and civil engineers in the project management team carry out project planning, design and manufacturing in an integrated way. In particular, owners-clients and professionals work closely on issues such as design corrections and improvements. It can be said that the design process consists of the following actions: definition of the project, critique and analysis, testing of possibilities, synthesis of results, discussion and communication, report on findings or solutions [2]. In the early design stages of a new project, these actions can be said to be very interactive. In advanced design stages, this interaction is reduced but still exists [3]. Design is a process that requires a combination of expertise in different fields and making a large number of decisions. In design coordination, it is important to relate the pertinent work to ensure compliance across the project. This can be best achieved through effective communication at regular team meetings [4]. The proposed situation can be achieved through weekly meetings. A typical project involves many conflicts. Timely and most positive resolution of these conflicts can be ensured through open discussions. The frequency of meetings will also be affected, depending on the type and magnitude of the problems that may be encountered during the design phase. In the early stages of a building's design process, architects are the main contributors. This process can be mentioned as the first stage of a construction project. Good completion of this stage effects the success of the subsequent stages such as detailed design, construction (manufacturing) and so on, and ultimately to a large extent the customer's satisfaction. Design and construction (manufacturing) should be considered as an integrated system. Conceptual design is made up primarily by architects and then developed more

by engineers through interactions with architects. However, due to technological conditions, market conditions and many other factors, changes in design plans during the manufacturing stage are very much common. The contract prepared at the end of the design process specifies in detail the contractor's work. Often, however, changes or extra work may be required after signing the contract. In general, if the change reduces costs, the owner receives it, and if the costs increase, the owner pays the cost. The contract should state how to act in this case. The change order may arise for a number of reasons: changes to the scope of the works specified in the contract and specification; change in material, change to correct project deficiencies; change in expected conditions; abnormal climatic conditions [5]. In a study with contractors, "having many change orders at different stages of the project" are counted as one of several factors in the failure of the project [6]. In a study about project delays in the Norwegian construction industry, change orders are listed among the ten important factors. In addition, inadequate/poor communication and coordination among the parties concerned are also found to be among the main causes of delays [7]. In this study, the effect of design phase meetings on change orders in building construction projects are investigated.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 presents the materials and methods used in the study. Section 3 provides the results of the analysis and also discusses the findings. Finally, Section 4 provides the conclusions.

3. MATERIAL AND METHODS

Architects take great part in the design process of buildings although other stakeholders are also involved in this process in varying degrees [8]. Therefore, in this study, the architects' design experiences are investigated. This investigation is based on an analysis of the data obtained from a larger study carried by Coşkun et al. [9]. In the study, a questionnaire survey is carried out among the architects in Turkey. The number of architects surveyed is 94 and the questions asked are about

the design process based on the participants' experiences. The questions used in this study presented in Table 1. The data is analyzed using hypothesis -dependency test. Data are analyzed using MS Excel.

Table 1. Analyzed survey questions

No	Questions
1	Do the meetings' time (held before and/or during the design phase) affect the output or performance of a project?
2	How important these meetings are?
3	Who should attend the meetings?
4	How do project changes affect project output?
5	Would, ultimately, project changes be attributable to the number and purpose of meetings?
6	Is there a connection between the meetings and the requests for project change orders?
7	Do the meetings affect the project change order frequency?

The reasons for change orders treated as $r \times c$ contingency table and $H_0: p_{ij} = p_i \cdot p_j$; $H_1: p_{ij} \neq p_i \cdot p_j$ hypothesis test is applied. When testing a hypothesis about dependent samples, the process presented below is followed.

- ⇒ State the null and alternative hypotheses
- ⇒ Choose the level of significance
- ⇒ Set the criterion (critical values) for rejecting the null hypothesis
- ⇒ Compute the test statistic
- ⇒ Make a decision, reject or fail to reject the null hypothesis
- ⇒ Interpret the results

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The first observation is, according to the Fisher confidence intervals, it is concluded that the samples come from the population. If the expected value of any of the cells is less than 5 when the sample consistency is small, the Fisher test is used to calculate the exact significance level of a table with a $r * c$ (r row, c column). According to the

architects, owners/clients are the representatives that attend the design phase meetings mostly. They are followed by civil engineers and users, mechanical and electrical engineers, subcontractors and material suppliers, respectively (Table 2). These proportions of representatives in meetings can be expected as not illogical. One thing; subcontractor and supplier joins the team later on; their presence is increased in weekly and biweekly meetings. Based on responses, meetings are held weekly (44/94=47%). The value of the meetings can be considered in connection with the requested or realized project changes in the project. Realized or requested project changes can be for different reasons. The frequency and participants' variety of meetings depend on the type and size of the project. Perhaps it can be good for the participants to be from different groups and to talk about possible problems during the design phase. Despite all these meetings, there are still requests for changes in the project. Is the reason not brainstorming enough, not enough research for the subjects (project details, etc.) or the frequency of the meetings (although still meeting every week)? It can be good that there are less surprises in terms of project changes if the meetings are held as brainstorming weekly. It should be stated in this study that there is no choice related to this question, that is how long the design process take or that the customer does not know what he wants. But how do change orders or change requests affect the project? In some cases, the project may be delayed, sometimes costs increase, and sometimes the client/owner becomes dissatisfied (and very rarely vice versa). Therefore, thinking as well as possible at the design stage, estimating and analyzing possible mishaps may also reduce subsequent disruptions in the implementation phase. So, does the frequency of the meetings at the design stage and the identity of the participants and the extent to which they participate provide an answer? Table 3 gives the relation between design phase meeting frequency and reason for change orders. If the p-value is smaller than 0.05, this indicates that there is insufficient evidence to deny H_0 . If the null hypothesis is rejected, then it can be concluded that row and column probabilities are independent and that there is no interaction. Only for factor "c" we can say that there is an

interaction. For other factors it can be said that frequencies and the existence of a reason for there are no interactions between meeting change order.

Table 2. The participants and frequency of design phase meetings.

Representative present at the design meetings	Frequency of meeting during design phase					
	weekly		biweekly		once or at beginning	
	absent	present*	absent	present*	absent	present*
Owner/client	8	36 0.38 0.28≤p≤0.49	4	19 0.20 0.13≤p≤0.30	2	25 0.27 0.18≤p≤0.37
Civil engineers	14	30 0.32 0.23≤p≤0.42	7	16 0.17 0.10≤p≤0.26	8	19 0.20 0.13≤p≤0.30
Users	10	34 0.36 0.27≤p≤0.47	10	13 0.14 0.08≤p≤0.22	9	18 0.19 0.12≤p≤0.29
Mechanical engineer	26	18 0.19 0.12≤p≤0.29	16	7 0.07 0.03≤p≤0.15	15	12 0.13 0.07≤p≤0.21
Electrical engineer	26	18 0.19 0.12≤p≤0.29	16	7 0.07 0.03≤p≤0.15	15	12 0.13 0.07≤p≤0.21
Subcontractor	24	20 0.21 0.14≤p≤0.31	15	8 0.09 0.04≤p≤0.16	18	9 0.10 0.04≤p≤0.17
Material suppliers	32	12 0.13 0.07≤p≤0.21	14	9 0.10 0.04≤p≤0.17	21	6 0.06 0.02≤p≤0.13
Workplace safety expert **	39	5	21	2	26	1
Apartment/site manager **	42	2	22	1	25	2
Other **	42	2	23	0	26	1

* first row: observed number of responses;
 second row: \hat{p} ;
 third row: %95 confidence interval for proportion-p
 ** the confidence intervals are not computed because of the relatively low percentages.
 A 100(1- α) % confidence interval for p for any sample size according to the Fisher test are as follows:

$$\frac{Y}{Y+(n-Y+1)F_{\frac{\alpha}{2}, 2(n-Y+1), 2Y}} \leq p \leq \frac{(Y+1)F_{\frac{\alpha}{2}, 2(Y+1), 2(n-Y)}}{(n-Y)+(Y+1)F_{\frac{\alpha}{2}, 2(Y+1), 2(n-Y)}}$$
 where
 p: proportion of successes for population; n: sample size; Y: number of observed successes, (0,1,2, ..., n)
 $\hat{p} = \frac{Y}{n}$ proportion of successes in sample; an estimate of p for population.

Table 3. The relation between design phase meeting frequency and reason for change orders

Reason for change order	Frequency of meeting during design phase						p-value (between meeting frequency and reason for change order)
	weekly		biweekly		once or at beginning		
	no	yes	no	yes	no	yes	
c: incompatibility between the mechanical and architectural plans	41	3	17	6	25	2	0.05
e: details in architectural plans are vague	38	6	16	7	25	2	0.07
g: inapplicability of architectural details by the subcontractor	27	17	10	13	20	7	0.09
a: incompatibility between the static and architectural plans	36	8	14	9	21	6	0.16
d: architectural plans do not have enough detail	36	8	18	5	25	2	0.33
b: incompatibility between the electrical and architectural plans	41	3	19	4	24	3	0.41
f: request of the owner for a change	10	34	3	20	5	22	0.63
h: unavailability of the material given in architectural plans	35	9	18	5	21	6	0.98

F-test for confidence intervals can be applied as shown in Table 4. 95% confidence intervals indicate that the proportions are alright. We can conclude that the samples are from the population. Therefore for $H_0:p=\hat{p}$; and $H_1:p\neq\hat{p}$ hypothesis, H_0 was accepted as true. According to results presented in Table 4, the biggest challenge is about the factor “f” that is “request of the owner for a change”.

Table 4. The reasons for change orders are ranked according to the total number of yes

Reason for change order	observed	\hat{p}	%95 Confidence Interval
f: request of the owner for a change	76	0.81	$0.88 \leq p \leq 0.71$
g: inapplicability of architectural details by the subcontractor	37	0.39	$0.50 \leq p \leq 0.29$
a: incompatibility between the static and architectural plans	23	0.24	$0.34 \leq p \leq 0.16$
h: unavailability of the material given in architectural plans	20	0.21	$0.31 \leq p \leq 0.14$
d: architectural plans do not have enough detail	15	0.16	$0.25 \leq p \leq 0.09$
e: details in architectural plans are vague	15	0.16	$0.25 \leq p \leq 0.09$
c: incompatibility between the mechanical and architectural plans	11	0.12	$0.20 \leq p \leq 0.06$
b: incompatibility between the electrical and architectural plans	10	0.11	$0.19 \leq p \leq 0.05$

In Figure 1. only the “yes” responses about “change orders” and “frequency of design phase meetings” is shown. The shown numbers are out of total 94 responses. For example, 34 out of 94 respondents choose the “f” choice and “weekly”, and 17 out of 94 respondents choose the “g” choice and “weekly” and so on. It seems that no matter how frequent the meetings are done, owner requests (choice f) happen anyways. It is observed that to decline the owner’ change order requests on the projects, the meetings have to be held less frequently but it surely would not make any sense. The questions could be that do the meetings help to reduce change requests and is there a causality?

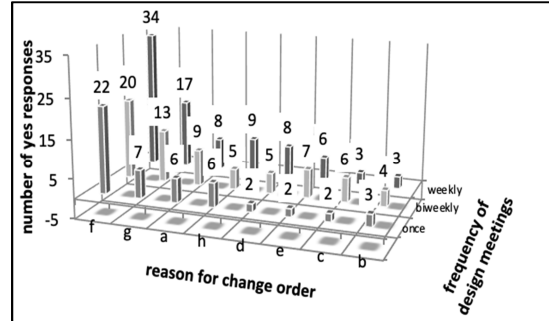


Figure 1. Two-way bar-chart for “yes” responses about change orders design meetings

In another aspect, the effectiveness of the meetings can be examined as follows. The purpose of the meetings at the design stage is to ensure that the building to be constructed in a manner that satisfies the owner. Subsequently, having less problems during the construction phase can be achieved by evaluating the opinions of different groups during the design phase. The meetings during the construction phase can be viewed as to rather to work being done related and ensuring the efficiency/efficiency in performing construction jobs. It would be appropriate to get the opinions of many different groups in the meetings at this stage. In this sense, approaches such as concurrent engineering may be proposed [9,10]. Thanks to these meetings, perhaps the requests for changes during construction phase can be kept to a minimum. This question was also asked to the architects and the answers were cross analyzed as shown in Figure 2. Chi-square analysis of the $r \times c$ contingency table presented in Figure 2 resulted with p-value of 0.29. That means there is no interaction between meeting frequency and demand for changes.

“Change order” demands frequency falls into the category “sometimes”. The “change order” requests always happen although in some projects there has been no demand for it as seen that “none” category is more than zero. As can be expected “rarely” and “often” categories are less than “sometimes” category, this may indicate an interesting thing that the more meeting at the design phase the more change order requests. The reasons for that could be:

- That particular project could be difficult
- It may be a good idea to limit the number of meetings,
- The design phase is so successful and well thought so no change order is necessary,
- The selected sample was not representing the characteristics of the universe.
- Maybe the project is so complicated that having many meetings are not enough to cover up all design issues,
- Maybe the design period is very short but not reflected in this survey. Therefore, problems are tried to be solved during construction which architects may not be aware of them.

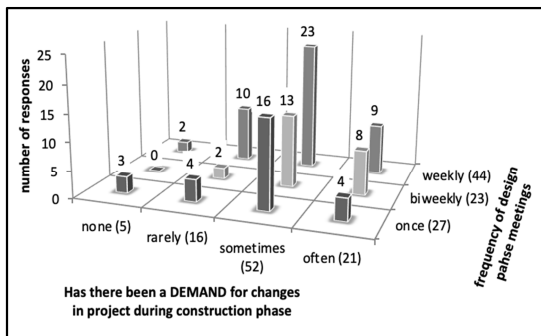


Figure 2. Two-way bar-chart for “yes” responses about change orders during construction phase and design phase meetings (numbers in parentheses are the totals for corresponding variable)

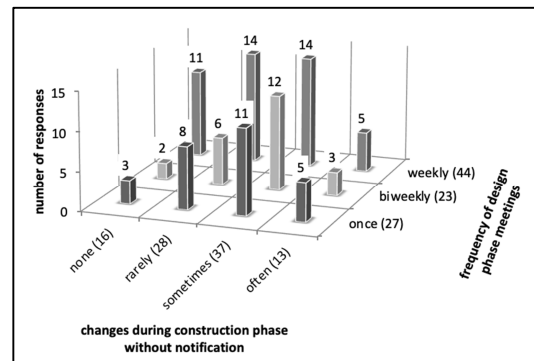


Figure 3. Two-way bar-chart for “yes” responses about design phase meeting frequency and changes during construction without notification (numbers in parentheses are the totals for corresponding variable)

It is just looked at the effect of the meetings held during the design phase on the requests for changes in the project. So, what can be said about project changes that have happened and architects have not been notified? The responses about this survey question are shown in Figure 3. For the values in Figure 3, χ^2 contingency table analysis was performed, and p-value was found as 0.48. That means there is no interaction between meetings and changes without notifications.

Changes without notification almost always happen although in some projects no changes happen as seen that none category is more than zero. The numbers here tell us that having more meetings in the design phase does not lessen the occurrence of changes. Are the critical points missed despite that many meetings are held? Maybe the focus of these meetings is not project related but some other issues (such as contractual or financial). In any case, the existence of changes during construction is still related to design deficiencies such as:

4. CONCLUSIONS

Architects usually play the leading role in the design phase of buildings. In this study, the architects’ design phase meeting experiences in terms of the effect of design phase meetings on change orders in building construction projects are investigated. The main contribution of this study to the literature is to find out the main reasons for change orders. Many choices are offered in survey questions and “request of the owner for a change” was found out to be the most influential reason for change orders. Since the main purpose of the meetings are to provide an efficient communication medium, the meetings are thought to help to reduce the reasons for change orders. In other words, there are less surprises in terms of project changes if the meetings are held weekly. However, from the survey results this assumption could not be confirmed. If the survey can be conducted using a larger group, e.g., interviewing other stakeholders, then the results can show any

relations not found in this study. For example, the relation between the participants in these meetings and change orders may be determined, if any. Future study will focus on this.

5. REFERENCES

1. Hendricksen, C., Au, T., 1989. Project Management for Construction: Fundamental Concepts for Owners, Engineers, Architects, and Builders, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
2. Crowther, P., 2010. Assessing Architectural Design Processes of Diverse Learners, Proceedings of Assessment: Sustainability, Diversity and Innovation, ATN Assessment Conference, 24-33.
3. Gaylord, E.H., Gaylord, C.N., 1979. Structural Engineering Handbook, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Company, New York.
4. Raymond, E.L., 2000. Project Management for Engineering and Construction, McGraw-Hill, 2000.
5. Ricketts, J.T., Loftin, M.K., Merritt, F.S., 2004. Standard Handbook for Civil Engineers, McGraw-Hill Education, 5 Editions.
6. Diekmann, J.E., Thrush, K.B., 1986. Project Control in Design Engineering, A Report to the Construction Industry Institute, The University of Texas at Austin, Texas.
7. Youcef, J.T., Zidane, B.A., 2018. The Top 10 Universal Delay Factors in Construction Projects, International Journal of Managing Projects in Business.
8. Kanters, J., Horvat, M., Dubois, M.C., 2014. Tools and Methods Used by Architects for Solar Design, Energy Build., 68, 721–731.
9. Coskun, H., Erdis, E., Genc, O., 2016. Improving the Performance of Construction Projects by Employing Concurrent Engineering, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(2), 47-58.
10. Genc, O., Erdis, E., Coskun, H., 2017. İnşaat Mühendisleri Özelinde Eş Zamanlı Mühendislik Yaklaşımının İrdelenmesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32(1), 31-37.

Yüzey Modifikasyonu Yapılmış Isırgan Otu Lifi Takviyeli Polyester Kompozit Üretimi ve Mekanik Özellikleri

Emel Ceyhun SABİR*¹

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

Geliş tarihi: 04.11.2019

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Bu çalışmada, bir tekstil lifi olarak bilinen ısırgan otu lifi takviyeli polyester kompozit malzeme üretilmiş ve malzemenin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Isırgan otu elyafının yüzeyi %1, %3, %5 ve %10 dört farklı oranda NaOH alkali işlemle aşındırılmıştır. Elyafın matrise takviye oranı sabit tutulmuş olup, %30 oranındadır. Lifler boyu yönde taranmış ve şerit formunda kompozit içerisine yerleştirilmiştir. Kompozit malzemeler plakalar halinde RTM teknolojisi ile üretilmiştir. Takviye elemanının kompozitin Çekme dayanımı, 3 nokta eğilme dayanımı ve darbe dayanımına etkileri araştırılmıştır. Isırgan elyafına uygulama alkali işlemin (NaOH) çekme dayanımı düşürdüğü ancak eğme ve darbe dayanımını iyileştirdiği görülmüştür. Çalışma, ısırgan otunun elyaf formunda %30 oranında kompozit malzemede takviye elemanı olarak kullanılabilceğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Kompozit, Isırgan otu lifi, Yüzey değişikliği, Mekanik özellikler, Polyester reçine

Production and Mechanical Properties of Surface Modified Nettle Fiber Reinforced Polyester Composite

Abstract

In this study nettle fiber which known as a textile fiber reinforced polyester composite material was produced and the mechanical properties of the material were investigated. The surface of the nettle fiber was abraded by 1%, 3%, 5% and 10% NaOH in four different ratios. The reinforcement ratio of the fiber to the matrix is kept constant and 30%. The fibers were scanned in the longitudinal direction and placed in the ribbon-shaped composite. Composite materials are produced with plates as RTM technology. Tensile strength of the reinforcement element, 3-point bending strength and impact strength were investigated. It has been observed that the alkali treatment (NaOH) applied to nettle fiber reduces the tensile strength but improves the bending and impact strength. The study has been shown that stinging nettle fiber can be used as a reinforcing composite material.

Keywords: Composite, Nettle fiber, Surface modification, Mechanical properties, Polyester resin

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Emel Ceyhun SABİR, emelc@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, gerek mekanik özelliklerinin üstünlüğü olması ve gerekse hafif olması nedeniyle teknolojik olarak üstün ve dayanıklı malzemelerdir. Kompozit birden çok bileşenden oluşan kompleks bir yapıdır. Kompozit malzeme mekanik avantajlarının yanı sıra üretim tekniklerinden dolayı genel olarak ucuz bir malzeme türü değildir. Kompozit en genel haliyle takviye elemanı (lif, kumaş vb. gibi) ve yapıştırıcı elemandan (matris) oluşur. Matris, lifleri bir arada tutan, kayma güçlerini yayan, kaplama olarak işlev gören [1] ve özellikleri sıcaklığa göre değişen termoset (polyester, vinilester, epoksi, poliüretan, fenolik) veya termoplastik (polietilen, polipropilen, polistiren) reçinelerdir. Lif takviyeli kompozitlerde lifler; yapıya sertlik, dayanım, termal stabilite ve diğer yapısal özellikleri kazandıran yapısal bir birimdir [2]. Geleneksel kompozitlerde takviye elemanı olarak yapıya yüksek mukavemet ve modül değerleri kazandıran cam, aramid, kevlar ve karbon gibi yüksek performanslı lifler tercih edilmektedir [3]. Son yıllarda, polimer matrislere cam lifi dışında güçlendirici olarak doğal liflerin kullanımına yönelik çalışmalarda artışlar görülmektedir. Doğal liflerin ucuz, hafif, kolay elde edilebilir olması takviye özelliklerinin araştırılmasında en önemli nedenlerdir. Doğal lifler takviye malzemesi olarak,

toz, kısa lif, liften mamul iplik ve iplikten dokunmuş kumaş şekillerinde kullanılabilir. Bir kompozit malzemenin özelliğini genel olarak lif özellikleri, reçine özellikleri, kompozitteki lif-reçine oranı, kompozitteki lif geometrisi ve yerleşimleri [3], lif-matris çekimi ve ara yüzdeki yük transferi [4] gibi parametrelerin belirlediği düşünülmektedir. Kompozite takviye özelliği taşıyan doğal lifte beklenen önemli iki özellik, kopma uzamasının ve nem alma kapasitesinin (hidrofilite) düşük olmasıdır. Doğal liflerle ilgili kompozit türündeki en istenmeyen özellik hidrofilik olmalarıdır [5,6].

Doğal liflerin takviye elemanı olarak kullanımına yönelik çalışmalar pek çoktur. Bu çalışmada ısırgan otu lifinden kompozit malzeme üretimi araştırılmıştır. Avrupa’da bir tekstil hammaddesi olarak ısırgan otu lifi kullanımı, pamuktan bile öncedir [7]. İsrırgan otu lifi, pamuktan daha mukavemetli ve ketenden ise daha incedir. Bu lifler, sulama ve zirai ilaç bakımından pamuktan daha çevre dostudur. İsrırgan lifinin iki türüne kompozit üretiminde çok rastlanır. Bunlardan birisi European nettle *Urtica dioica* ve diğeri Himalayan nettle *Girardinia diversifoli*’dur [8,9]. Çizelge 1, Elyaf mekanik özellikleri açısından kompozit kullanılan doğal lifleri karşılaştırmaktadır.

Çizelge 1. Seçilmiş doğal liflerin kompozit malzeme için önemli özellikleri [8]

Elyaf özellikleri	E-cam	Keten	Kenevir	Jüt	Kenaf	İsrırgan otu
Yoğunluk kg/m ³ (ρ)	2550	1530	1520	1520	1193	–
Elastisite modülü (GPa)	71	58	70	60	14–38	87 ± 28
Çekme dayanımı (MPa)	3400	1339	920	860	240	1594
Özgül modül ($E/1000\rho$)	28	38	46	39	12–32	–
Kopma uzaması (%)	3,4	3,27	1,7	2	–	2,11
Nem alma (%)	–	7	8	12	–	–

İsrırgan otu lifi ile ilgi geçmişten bu yana yapılan çalışmalar vardır. Bacci ve arkadaşları [10]’na göre ısırgan lifleri çapta, lignin içeriğinde ve uzamada kenevir liflerine ve gerilme dayanımında ise keten ve pamuğa benzetmişlerdir. Sap bölümleri arasında bulunan farklı fiziksel-mekanik özellikler dikkate alındığında sapların

yukarı kısımlarının tekstil endüstrisi için kullanılabileceği düşünülmüştür. İsrırgan lifinin yoğunluğu 0,72 g/cm³’dir. Bu yoğunluk değeri kenevir, pamuk ve diğer liflere göre oldukça düşüktür ve bu daha hafif ürünleri mümkün kılmaktadır. Bacci ve arkadaşları [11] kimyasal havuzlama, suda havuzlama, mikrobiyolojik ve

enzimatik metotları ile ısırgan otu lifini elde etmeye çalışmışlardır. Tüm saplar ve mekanik olarak ayrıştırılmış liflerin mikrobiyolojik havuzlanması ile suda havuzlamadan daha yüksek kalitede lifleri üretmiştir. Huang [12] ısırgan lifinin uzunluk, incelik, gerilme dayanımı ve nem absorpsiyon yeteneğini araştırmıştır. Araştırmalar ısırgan liflerinin çoğunun 20-70 mm uzunluk ve 15-40 mikron incelik aralığında, yün, pamuk ve diğer pek çok gövde lifi ile karşılaştırıldığında nem emme yeteneklerinin özel lif yapısından dolayı daha yüksek olduğunu ve sıklıkla kullanılan doğal liflerin yerine kullanılabileceğini göstermiştir. Bu özellik tekstil materyali olarak iyi bir özellik olsa da kompozit malzeme için olumlu bir özellik değildir. Eğirme denemeleri saf ısırganın pürüzsüz yüzeyi ve düz yapısından dolayı saf ısırgan lifi ile iplik üretmenin pratikte mümkün olmadığını göstermiştir. Fakat diğer uygun lifler ile karışım ipliklerinin eğrilebileceği sonucu çıkarılmıştır. Bodros ve Baley [13] ısırgan liflerinin ilgi çekici gerilme özelliklerine sahip olduğunu ve kompozit malzemelerde takviye bileşeni olarak kullanılabilmesini göstermek istemişlerdir. Cam lifi ile karşılaştırıldığında ısırgan liflerinin daha sert olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Pauksza ve arkadaşları [14], polipropilen matrisli ısırgan otu (*urtica duocia*) takviyeli kompoziti ekstrüzyon metodu ile üretmişlerdir. ısırgan otu lifinin PP matris içinde güçlü özellikler gösterdiğini bulmuşlardır. Bajpai ve arkadaşları [15] ise ısırgan otu-polipropilen kompozitin soğuk, güneşiği, yağ, nehir suyu ve toprak gibi çeşitli çevre koşulları karşısında gerilme dayanımlarını araştırmışlardır. En büyük etkinin güneşiği ve nehir suyunda olduğunu, en az etkilenmenin ise toprakta olduğunu bulmuşlardır.

Merila [16] ısırgan otu lifi takviyeli epoksi ve fenolik kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiştir. ısırgan otu lifleri tek yönlü, herhangi bir modifikasyon işlemi uygulanmadan kompozitte kullanılmıştır. Ağırlıkça %24 ısırgan otu lifi takviyeli epoksi kompozitlerinin gerilme dayanım ve sertliği, ağırlıkça %21 keten lifi takviyeli epoksi kompozitlerinin gerilme dayanımı ve sertliğinin

yaklaşık yarısı kadar değerler vermiştir. Ağırlıkça %23 ısırgan otu lifi takviyeli fenol kompoziti saf epoksiden daha düşük gerilme dayanımı ve sertlik değeri vermiştir. Mikroskopik araştırmalar lif-matris arası çekimin fenolün epoksiye göre daha iyi olduğunu göstermiştir. Fischer ve arkadaşları [17] %20, 30, 40 ağırlık oranında ısırgan otu lifi takviyeli polilaktasit (PLA) ve %30 ağırlık oranında ısırgan otu lifi takviyeli polipropilen kompozitlerini lif modifikasyonu yapmadan, liflerin boyuna yönde hizalanması suretiyle elde etmiştir. En fazla takviye etkisini %30 ağırlık oranını ile boyuna yönde ısırgan otu-PLA kompozitleri (%60'lık bir etki) göstermiştir. Eğilme modülü için tüm ısırgan otu-PLA kompozitleri takviye etkisi göstermiştir. Bajpai ve arkadaşları [18], PLA ve Polipropilen matrislerle sisal ve ısırgan otu lifi ipliklerinden dokunmuş kumaşlarla takviye edilmiş kompozitlerin mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır.

Doğal lif takviyeli kompozitlerde ara yüzey modifikasyonları yapılarak elde edilecek kompozitlerin performans özelliklerini geliştirmeyi amaçlayan çalışmalar da literatürde yer almaktadır [19-33]. Karaduman [34]'a göre, "NaOH ile alkali işlem ekonomik ve etkili olması bakımından doğal lif kompozitlerinin ara yüz modifikasyonunda çok yaygın olarak kullanıldığını göstermiştir. Alkali işlemle lif yüzeyindeki yağlar, hemiselüloz ve pektinin tamamı ile ligninin bir kısmı uzaklaşarak daha pürüzlü ve fibrilli bir lif yüzeyi elde edilir Dolayısıyla matris maddesi ile mekanik bağlanma için lifin toplam yüzey alanı artar. Bu da adhezyonu ve lif-matris ara yüzünün kalitesini artırır". ısırgan otu lifinin elde edilme koşulları ve ısırgan otu liflerinden elde edilebilecek ürünlerle ilgili bilgi olmakla beraber, ara yüzey modifikasyonu yapılarak ısırgan otu lifi takviyeli kompozit üretimiyle ilgili çalışmaya rastlanmamıştır veya kısıtlıdır. Yüzey modifikasyonu yapılmamış ısırgan otu lifinin, matrise, boyuna yönde yerleştirilmesinin kompozitin mekanik özellikleri iyileştirdiği ortaya konulmuştur [17]. Bu çalışmada yüzey modifikasyonu yapılmış ve yapılmamış şeklinde ısırgan otu lifi takviye olarak kullanılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

Çalışmada takviye malzemesi olarak ısırgan otu lifi kullanılmıştır. Kullanılan ısırgan otu lifi, Nepal menşelidir. Projede kompozit matris elemanı olarak polyester reçinenin kullanılmasına karar verilmiştir. Polyester reçine Polipol 336 kodlu olup Poliya A.Ş./Türkiye firmasından temin edilmiştir. Kalıp ayırıcı olarak yine Poliya A.Ş.'den Polivaks alınmıştır.

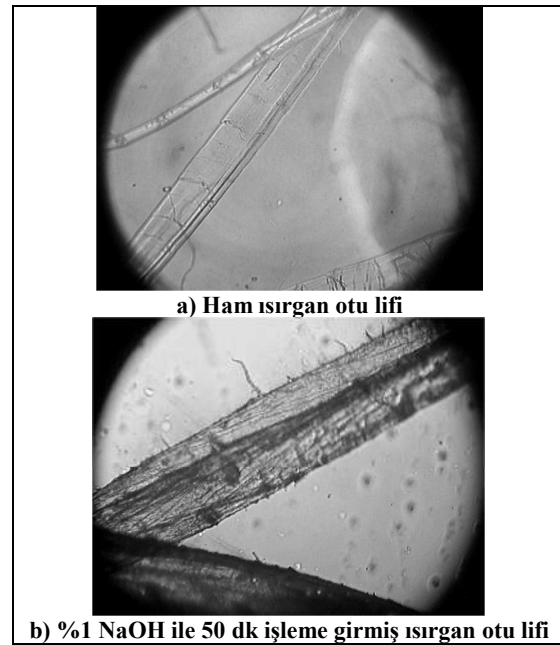
2.2. Metot

2.2.1. İsrırgan Otu Yüzey Modifikasyonu

Doğal liflerin matrisle daha iyi bir birleşme sağlaması amacıyla yüzey modifikasyonu işlemleri uygulanabilmektedir. İsrırgan otu elyafı takviyeli kompozit malzeme üretimi için öncelikli olarak ısırgan otu elyafına alkali uygulanmasına karar verilmiştir. Bu işlemlerle ısırgan otu liflerinin de kimyasal işlemler ile matris malzemeye karşı olan uyumluluğunun artırılması ile güçlü bir takviye etkisi oluşturacağı düşünülmektedir. Çalışmada, ısırgan otu lifine yüzey modifikasyon işlemleri içerisinde gerek etkili olması ve gerekse ucuz olması nedeniyle sıklıkla kostik soda, NaOH, alkali işlem kullanılmaktadır.

Literatürde farklı oranlarda uygulanabildiği görülmekle beraber bu oran genellikle %0-10 arasında değişmektedir. Bu çalışmada, NaOH, %3, %5 ve %10 oranlarında seçilmiştir. Buna göre ısırgan otu lifi, yüzey işlemi görmemiş ve yüzeyi alkali işlemle (NaOH) pürüzleştirilmiş şekilde kullanılmıştır. Bu numune lifler üzerindeki yağ ve kirlerin uzaklaştırılması için ön işlem olarak yıkama yapılmıştır (Yıkama ve Kuru Temizleme Haslık Makinesi ve Tüpleri, Gyrowash). Yapılan işlemlerde ısırgan otu lif numuneler için ağırlıklar 5 g olarak belirlenmiştir. Yıkamada %2 noniyonik deterjanla yıkama tüplerinde saf su ile 60 °C'de 1 saat yıkama işlemi yapılmıştır. Yıkanan lifler saf su ile durulanmıştır. Lif tutamları hiç su damlatmayacak şekilde el ile sıkılmış ve elyaf örneklerinin ıslak ağırlıkları kaydedilmiştir. Son olarak elyaf örnekleri 80 °C'deki etüvde 80 dk

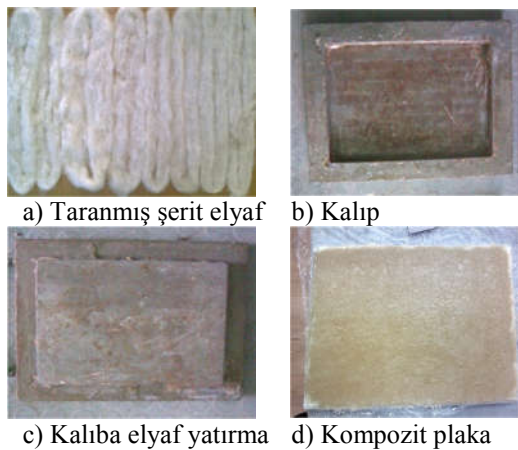
kurutulmuştur. Kuru elyaf ağırlıkları kaydedildi. Ön izlenim vermesi açısından yıkanmış ve kurutulmuş bir adet ısırgan otu elyaf numunesi oda sıcaklığında %1 alkali çözeltisinde 0. dk, 10. dk, 20. dk, 30. dk, 40. dk, 50. dk ve 60. dk işlem gördükten sonra elyafın mikroskopik kesit ve yüzey görüntüleri incelenmiştir (Şekil 1). İşlem süresinin beklendiği gibi elyaf yüzey pürüzlülüğünü zamanla artırdığı gözlemlenmiştir. Kurutulmuş elyaf numuneleri oda sıcaklığında, %3, %5 ve %10 olmak üzere 3 farklı alkali konsantrasyonda, 1 saat bekletilmiştir. İşlem sonunda elyaf numuneleri %2 seyreltik asetik asit çözeltisi ile nötralize edilmiştir. Lifler üzerinde bulunan alkali atıklar uzaklaşana kadar saf su ile yıkama işlemi yapılmıştır. Yıkanan elyaf numuneleri 80 °C'deki etüvde 80'dk süreyle kurutulmuştur. Ön işleme tabi tutulmuş ısırgan otu elyafı numuneleri numune şerit hazırlama makinesinde (Microdust Trash Analyzer MDTA3/Bossa A.Ş./Adana/Turkey) şerit haline getirilmiştir. Elyaf numuneleri arasında bulunan yabancı maddeler bu aşamada ayrıştırılmış ve lifler paralelleştirilmiştir.



Şekil 1. (a) Alkali işlemsiz (b) NaOH alkali işlemleri, ısırgan otu lifine ait mikroskop görüntüleri (x500)

2.2.2. Kompozit Plaka Üretimi

Kompozit malzeme içerisinde takviye elemanının ağırlıkça hangi oranda kullanılacağı da araştırma konularındandır. Doğal lifli takviyeli kompozit çalışmalarında ağırlıklı olarak %30 takviye malzemesi kullanımının yaygın olduğu görülmüştür. Bu nedenle çalışmada ısırgan otu lifinin kompozit içerisinde %30 oranında kullanılmasına karar verilmiştir. NaOH çözeltisi ile işleme girmiş liflerden oluşan her lif numunesi %30 oranında takviye oranında polyester reçineye uygulanmış ve başarılı şekilde kompozit üretilebilmiştir. Lifler belirlenen kalıba yerleştirilmeden önce oluşacak kompozit plakanın kalıptan kolay ayrılması için jelkot kullanılmıştır. Hava kabarcığı oluşumunu önlemek (çatlak oluşumunu engelleyecektir) ve reçinenin homojen dağılımını sağlamak için bir rulo yardımıyla reçinenin bütün liflere yayılması sağlanmıştır. Üretim yöntemi olarak RTM teknolojisi kullanılmıştır (Şekil 2). Burada polyester 100 g, Kobalt 0,03 g ve MEKP kalıp ayırıcı 2 g olarak kullanılmıştır. Isırgan otu lifinin şerit hali Şekil 2a'da, kullanılan kalıp Şekil 2b'de görülmektedir. Kalıp alt ve üst şeklinde iki parçadan oluşmakta olup şerit ısırgan otu elyaf (Şekil 2a) ve reçine bu kalıp içerisine yerleştirilmektedir. Kompozit plaka soğuk preste 8 saat bekletilmiş ve Şekil 2d'de görüldüğü şekilde elde edilmiştir.



Şekil 2. Kompozit plaka yapımında kullanılan kalıp (2 parça) ve üretilen kompozit plaka

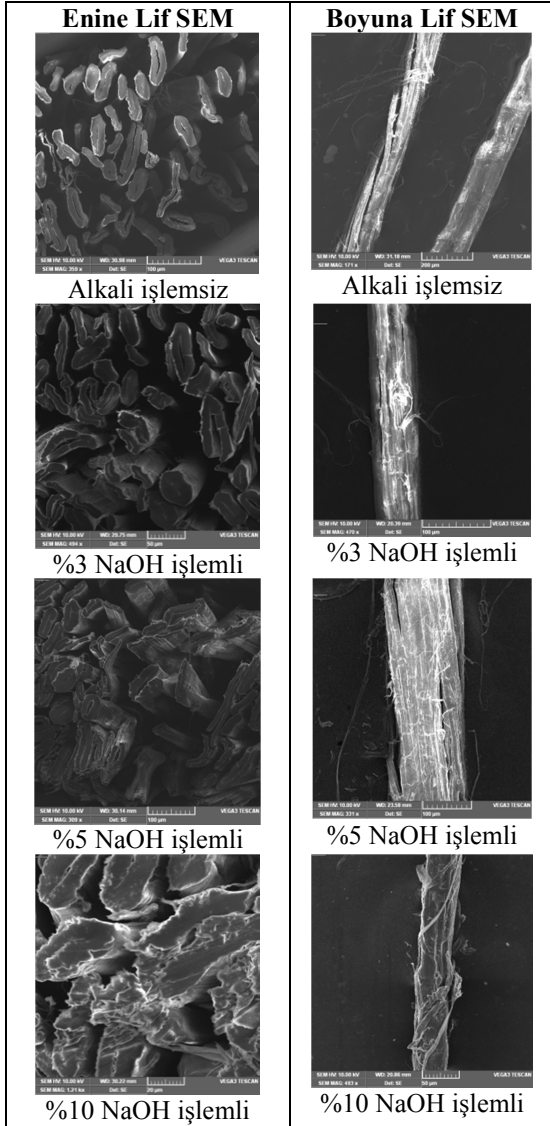
2.2.3. Mekanik Testler

Üretilen kompozit plakalara 3 adet mekanik test uygulanmıştır. Çekme Dayanımı Testi, ASTM D 638 standardına göre yapılmaktadır. Çekme Hızı 5 mm/dk ve çeneler arası mesafe 115 mm alınmıştır (Zwick/Roell Z010). 3 nokta Eğilme (eğme) Dayanımı Testi, ASTM D 790 standardına göre yapılmıştır (Zwick/Roell Z010). İzod Çentikli Darbe Dayanım Testi ise ASTM D 256 standardına göre yapılmıştır (Zwick/Roell HIT 5,5, Salınım Açısı 148). Tüm testlerde ortam sıcaklığı 21 °C'dir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Isırgan Otu Elyafı ile İlgili Bulgular

Isırgan otu, Kompozit malzemenin takviye bileşenidir. Kompozit içerisindeki oranı ağırlıkça %30'dur. Isırgan otu lifini takviye malzemesi olarak kullanırken 4 farklı örnek oluşturulmuştur. Bu örneklerden ilki ısırgan otu lifinin yüzeyinin herhangi bir işlem görmemiş halidir ve referans numunedir. Bunun dışında %3, %5 ve %10 şeklinde 4 farklı yüzey modifikasyonu işlemi uygulanmıştır. İşlemsiz ve yüzeyi pürüleştirilen ısırgan otu elyafının SEM görüntüleri lifin enine ve boyuna kesitleri için alınmıştır. Şekil 3, işlem görmemiş enine ve boyuna ısırgan otu lif görüntülerini göstermektedir. Lifin mikroskobik görüntülerine bakıldığında NaOH alkali işlemin lif kesitinde ciddi modifikasyona neden olduğu görülmüştür. Özellikle enine kesit görüntülerinde lifin katmanlara ayrıldığı, bütünlüğünün bozulduğu gözlenmiştir. Boyuna lif görüntülerinde en dikkat çeken kısım gövdeden ayrılan fibril lifli yapılardır. NaOH işleminin lif üzerindeki aşındırıcı etkisi görülebilmüş olup bu çalışmanın ana hedeflerinden birisidir. Yüzey aşındırma işleminin deneyde uygulanan NaOH işlemleri ile sağlanabildiği görülmüştür.

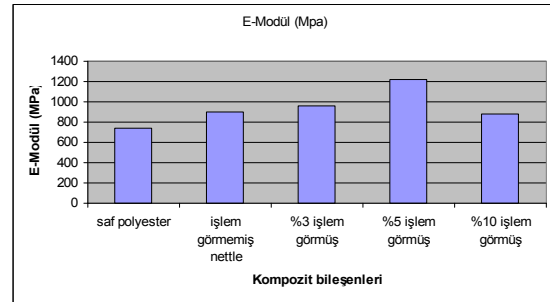


Şekil 3. Farklı konsantrasyonlarda NaOH Alkali işlemi uygulanmış ısırgan otu lifinin enine ve boyuna kesit SEM görüntüleri

3.2. Mekanik Özelliklere ait Bulgular ve Değerlendirme

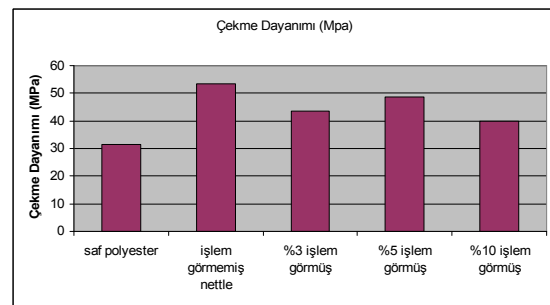
Kompozit malzemelerde elastisite modülü (E-Modül) çok önemlidir. Saf polyester de dahil olmak üzere E-Modül karşılaştırması için Şekil 4 incelenebilir. Burada öncelikle ısırgan otu takviyesinin saf polyesterin E-modülüne katkı

sağladığı görülmektedir. Tespit edilen E-Modül, cam lifli destekli kompozitlere göre daha düşüktür. Ancak, yine de ısırgan otu lifleri takviye etkisi gösterebilmiştir. Şekilden %5 işlem görmüş ısırgan otu lifli kompozitin en yüksek E-Modüle sahip olduğu görülmektedir. Yüzey işlemi uygulanmadığında E-Modül'de kayda değer bir artış görülmemiştir.



Şekil 4. Kompozit plakaların elastisite modülü

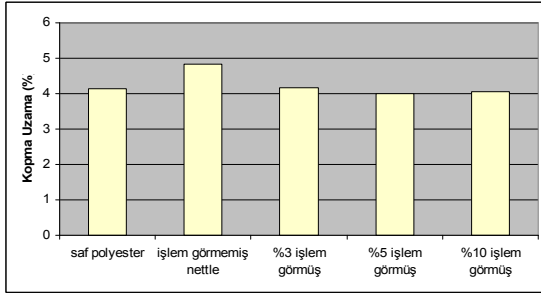
Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri içerisinde en önemli yeri Çekme dayanımı alır. Saf Polyester ile kompozitlerin çekme dayanımı karşılaştırması Şekil 5'den görülebilir. Burada ısırgan otu takviyesinin saf polyesterin çekme dayanımını artırdığı görülmektedir. ısırgan otu içeren kompozitler içerisinde işlem görmemiş ve sonrasında da %5 işlem görmüş ısırgan otu lifli kompozitin en yüksek çekme dayanımına sahip olduğu fark edilmektedir.



Şekil 5. Kompozit plakaların çekme dayanımı

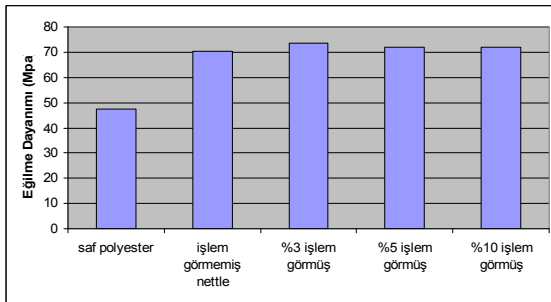
% kopma uzaması kompozit malzemeler için öncelikle bakılan bir test olmasa da boyutsal kararlılık ve rijitlik ölçüsü için önemlidir. Burada Şekil 6'da kopma uzamasında da işlem görmemiş

ısırgan otu lifi destekli kompozit yüksek kopma uzamasına sahip olarak görülmüştür.



Şekil 6. Kompozit plakaların % kopma uzaması

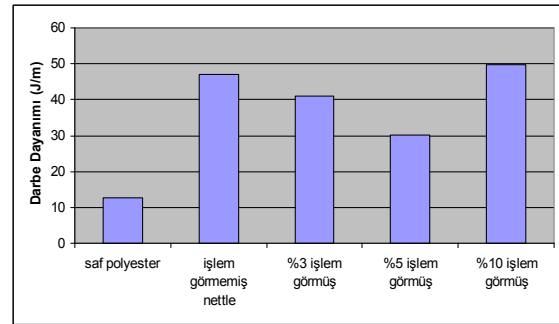
Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinden olan eğilme dayanımı, özellikle lif takviyeli kompozitlerde incelenmektedir. Saf polyester plaka ile kompozit plakaların eğilme dayanımı karşılaştırması Şekil 7'den görülebilir. Burada ısırgan otu takviyesinin saf polyesterin eğilme dayanımını dikkate değer ölçüde artırdığı görülmektedir. Isırgan otu içeren kompozitler içerisinde tüm ısırgan numuneleri birbirine yakın ve yüksek katkı yapmıştır. Lifler boyuna yerleştirilmesinin bu katkıda etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 7. Kompozit plakaların eğilme dayanımı

Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinden bir diğeri de darbe dayanımıdır. Darbeye karşı direnç kompozit malzemenin tokluğunu ve eksene dik yüklere dayanımını gösterir. Darbe deneyinde, numunenin dinamik bir zorlama altında kırılması için gereken enerji miktarı tayin edilir. Şekil 8, darbe direncini tüm plakalar için göstermektedir. Her ne kadar lifler kesikli ve taranmış halde olsa da, birbirinden bağımsız halde reçineye

yerleştirilmiş ise de saf polyester malzemeye göre oldukça iyi darbe dayanımı değerleri elde edilmiştir. Tüm ısırgan otu lifi destekli kompozit plakalarda doğal lif, takviye görevini yerine getirebilmiştir. Kompozit numuneler içinde darbe dayanımı en iyi olan bileşim işlem görmemiş lif numunesi ile %10 alkali işlem görmüş lifli numunedir. Bu iki sonuç birbiri ile çelişiyor gibi görünmektedir. Çünkü işlem görmemiş ısırgan otu doğal saf kendi halinde liftir. %10 alkali işlem görmüş olan ise en fazla deformasyona uğratılmış lif grubudur. %10 alkali işlem görmüş liflerin kesit görünüşleri önceki bölümlerde incelenmiştir. Bu liflerin oldukça yüksek deformasyona uğraması nedeniyle lifsi yapıların pek çoğunun lifin boyuna yönde serbest kaldığı ve lif demeti şeklinde hareket ettiği düşünülmektedir. Bu durumun darbe dayanımını artırmış olabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 8. Kompozit plakaların darbe dayanımı

Araştırma bulguları literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılırken ağırlıklı olarak %30 elyaf takviyesi ve reçinenin polyester olmasına dikkat edilmiştir. Çizelge 2, elde edilen sonuçların içinde mekanik özelliklerin en iyi değerlerini ve literatürden seçilmiş çalışmalarla karşılaştırmaları göstermektedir [35-38]. Bu çalışmalarda matris polyester, takviyeler ise doğal elyaftır. Doğal elyaf takviye oranlarının %25-%50 aralığında olduğu görülmektedir. %5 ısırgan otu lifli Kompozit; e-modülünde sisal ve keten elyafa yakın bir değer göstermiş olup pamuk ve jüt lifinden değer olarak kötüdür. Çekme dayanımında; sisal ve keten dan daha iyi, pamuk ve jütten daha kötü değer göstermiştir. Kopma uzamasında; sisale göre daha çok uzayan bir davranış göstermiştir.

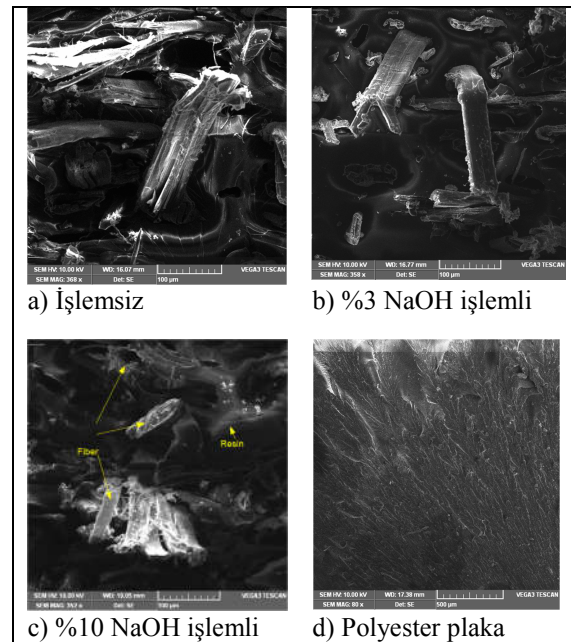
Çizelge 2. Bu çalışmadaki kompozit malzeme ile literatürden seçilmiş doğal lif takviyeli polyester kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı incelenmesi

Kompozit	E-Modül (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzama (%)	Eğilme dayanımı (MPa)	Darbe Izod dayanımı (J/m)	Darbe (Izod) İş (J)	Referans
Saf polyester	738,00	31,388	4,148	47,34	12,54	0,0738	Bu çalışmada
Aşındırılmamış ısırganotu lifi-polyester, (elyaf oranı %30)	897,80	53,322	4,846	70,246	47,02	0,2460	✓
%3 NaOH ile Aşındırılmış ısırganotu lifi-polyester, (elyaf oranı %30)	963,40	43,362	4,178	73,716	41,03	0,2150	✓
%5 NaOH ile modifiye ısırganotu lifi-polyester, (elyaf oranı %30)	1223,20	48,696	4,006	72,141	30,28	0,2040	✓
%10 NaOH ile Aşındırılmış ısırganotu lifi-polyester, (elyaf oranı %30)	884,83	39,876	4,05	72,144	49,78	0,2550	✓
Jüt-Polyester, sıcak kürlleme, (elyaf oranı %55)	2435 ± 884	78,15±7,45	5,04± 0,72				[35]
Sisal-Polyester, (elyaf oranı %50)	1150,00	29,66	9,52	59,570			[36]
Keten-Polyester, (elyaf oranı %25)	1112,00	19,40	6,10				[37]
Pamuk-Polyester, (elyaf oranı %35)	4000,00	72,00					[38]

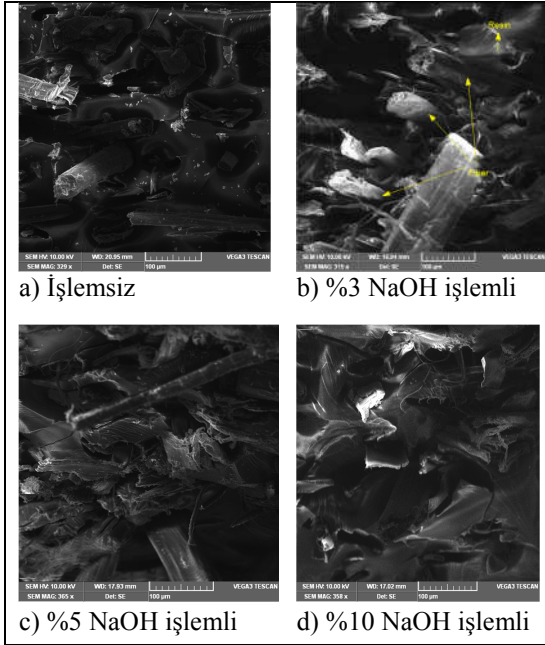
3.3. Kompozitle İlgili SEM Analizi

Çalışmada elde edilen kompozit plakalardan test yöntemine uygun olarak alınan numunelerin kesit görüntüleri de incelenmiştir. Bu görüntülerde %100 polyester plaka da numune olarak alınmış ve takviye malzemesinin polyester içerisindeki durumu daha iyi analiz edilmeye çalışılmıştır. Kompozit mekanik test numunelerinin SEM görüntüleri üzerinden yorumlar sırasıyla verilmiştir. Şekil 9a-b-c-d, çekme testindeki SEM görüntülerinde alkali işleme liflerin daha çok pürüzlendiği ve matris içinde işlemsiz liflere göre daha fazla kırılıp dağıldığı görülmüştür. İşlemsiz ısırganotu kompozitte çekme dayanımı diğer örneklerle göre daha iyi olduğu görülmüştür. SEM analizinde de kırılmamış daha rijit liflerin çoğunlukta olması bu sonuçla uyumludur. Şekil 10a-b-c-d, üretilen kompozitlerin 3 nokta eğilme testi uygulaması sonrasında alınan SEM görüntülerinde alkali işleme liflerin reçineye daha iyi yapıştığı ve eksene dik yükleri karşılamada daha iyi performans sağladığı görülmüştür. Burada SEM analizinde liflerin kırılma yüzeylerindeki durumu görülmektedir. Liflerde eksene dik uygulanan yük altında parçalanmadan kopma

şeklinde bir davranış görülmektedir. Bu durum eğme dayanımında lif katkısının yüksek olmasını doğrulamaktadır.

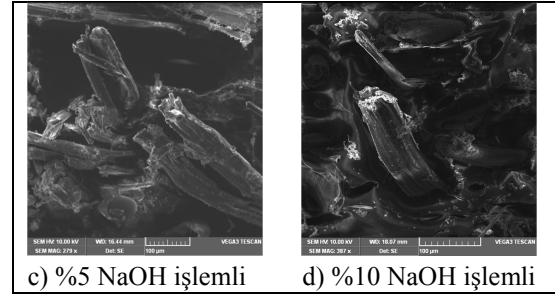
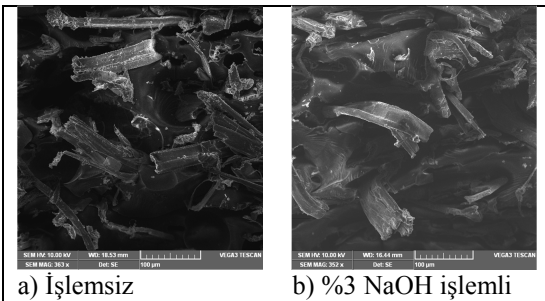


Şekil 9. Kompozit plakaların çekme testi sonrası SEM görüntüleri



Şekil 10. 3 Nokta eğilme test numunelerinin SEM görüntüleri

Şekil 11a-b-c-d'de verilen SEM görüntüleri kırılma yüzeylerindeki durumu göstermektedir. Darbe dayanımı deneyinde lifli üretilen kompozitlerin darbe dayanımı oldukça yüksek çıkmıştır. Darbe yükü, çekicinin deney numunesine çarpması şeklinde uygulanmaktadır. Kesitte bu şekildeki yüke dayanımda lifsi uzamalar saçaklanmış parçalanmış görüntüler dikkati çekmektedir. Liflerin eksene dik gelen darbe yüküne direnç gösterdikleri genel görünümünden anlaşılmaktadır. Parçalanmış kesit düz ve parlak olsaydı liflerin direnç göstermediği söylenebilirdi.



Şekil 11. Darbe test numunelerinin SEM görüntüleri

4. SONUÇ

Bu çalışmada ısırgan otu doğal lifli destekli polyester kompozit plakalar üretilmiştir. Lifler polyester plaka için boynuna yönde ve tarak şeriti halinde yerleştirilmiştir. Bu durumda üretilen plakanın en iyi mekanik dayanımı darbe dayanımında görülmüştür. Daha sonra eksene dik yüklenen eğilme dayanımının iyi olduğu, en son çekme modülü ve çekme dayanımının geldiği görülmüştür. Takviyenin doğal lif ve kesikli (sürekli) halde olması nedeniyle çekme dayanımının diğer dayanımlardan daha az çıkması doğal karşılanmıştır. Yine de işlem görmemiş ısırgan otu lifli destekli olan kompozit plakaların çekme dayanımının (53,32 MPa), saf polyester plakanın çekme dayanımından (31,4 MPa) daha iyi değerinde olduğu tespit edilmiştir. Isırgan otu elyafına uygulanan alkali işlemin, kompozitin çekme dayanımını düşürdüğü ancak eğme ve darbe dayanımını iyileştirdiği görülmüştür. Isırgan otu lifinin kompozit malzemelerde takviye olarak kullanılabilmesi zaten ucuz olan polyesterde %30 oranındaki ilaveyle bile daha iyi mekanik özellikler kazandırabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Çukurova Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimince desteklenmiştir (Proje kodu: FED-2015-4350). Projenin ön bulguları Romanya'daki 15th World Textile Conference, AUTEX2015'de poster bildirisi şeklinde sunulmuştur.

6. KAYNAKLAR

1. Riedel, U., Nickel, J., 1999. Natural Fibre Reinforced Biopolymers as Construction Materials New Discoveries, *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 272, 34–40.
2. Arıcasoy, O., 2006. Kompozit Sektör Raporu, İstanbul Ticaret Odası, İstanbul.
3. Mazumdar, S.K., 2002. Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering, CRC Press, New York.
4. Saheb, D.N., Jog, J.P., 1999. Natural Fiber Polymer Composites: A Review, *Advances in Polymer Technology*, 18(4), 351-363.
5. Li, X., Tabil, L.G., Panigrahi, S., 2007. Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review, *Journal of Polymers and the Environment*, 15(1), 25-33.
6. Davies, G.C., Bruce, D.M., 1998. Effect of Environmental Relative Humidity and Damage on the Tensile Properties of Flax and Nettle Fibres, *Textile Research Journal*, 68(9), 623-629.
7. Vogl, C.R., Hartl, A., 2003. Production and Processing of Organically Grown Fiber Nettle (*Urtica dioica* L.) and its Potential Use in the Natural Textile Industry: A Review, *American Journal of Alternative Agriculture*, 18(3), 119-128.
8. Summerscales, J., Dissanayake, N.P.J., Virk, A.S., Hall, W., 2010. A Review of Bast Fibres and Their Composites. Part 1 - Fibres as Reinforcements, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(10), 1329-1335.
9. Singh, S.C., Shrestha, R., 1987. Extraction and Chemical Analysis of Himalayan Nettle Fibre, *Research and Industry*, 32(4), 259–262.
10. Bacci, L., Baronti, S., Predieri, S., di Virgilo, N., 2008. Fiber Yield and Quality of Fiber Nettle (*Urtica Dioica* L.) Cultivated in Italy, *Industrial Crops and Products*, 29, 480-484.
11. Bacci, L., Lonardo, S.D., Albanese, L., Mastromei, G., Perito, B., 2010. Effect of Different Extraction Methods on Fiber Quality of Nettle (*Urtica dioica* L.), *Textile Research Journal*, 81(8), 827–837.
12. Huang, G., 2005. Nettle (*Urtica cannabina* L) Fibre, Properties and Spinning Practice, *Journal of the Textile Institute*, 96(1), 11-15.
13. Bodros, E., Baley, C., 2008. Study of the Tensile Properties of Stinging Nettle Fibres (*Urtica Dioica*), *Materials Letters*, 62, 2143-2145.
14. Paukszta, D., Ma Nkowski, J., Kołodziej, J., Szostak, M., 2013. Polypropylene (PP) Composites Reinforced with Stinging Nettle (*Urtica dioica* L.) Fiber, *Journal of Natural Fibers*, 10, 147–158.
15. Bajpai, P.K., Meena, D., Vatsa, S., Singh, I., 2013. Tensile Behavior of Nettle Fiber Composites Exposed to Various Environments, *Journal of Natural Fibers*, 10(3), 244-256.
16. Marila, A.J. 2010. Ms Thesis, Materials and Manufacturing Engineering/Polymer Engineering, MSc Programmes in Engineering Materials Technology (EEIGM)/2000:235, (ISSN 1402-1617/ISRN LTU-EX--00/235--SE /NR 2000:235), Lulea University of Technology, Sweden, <http://epubl.luth.se/1402-1617/2000/235/index-en.html> (Erişim: 11th Dec 2015)
17. Fischer, H., Werwein, E., Graupner, N., 2012. Nettle Fibre (*Urtica dioica* L.) Reinforced Poly (Lactic Acid): A First Approach, *Journal of Composite Materials*, 46(24), 3077–3087.
18. Bajpai, P.K., Singh, I., Madaan, J., 2012. Comparative Studies of Mechanical and Morphological Properties of Polylactic Acid and Polypropylene Based Natural Fiber Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31(24), 1712–1724.
19. Gassan, J., Bledzki, A.K., 1999. Possibilities for Improving the Mechanical Properties of Jute/Epoxy Composites by Alkali Treatment of Fibres, *Composites Science and Technology*, 59(9), 1303-1309.
20. Prasad, S.V., Pavithan, C., Rohatgi, P.K., 1983. Alkali Treatment of Coir Fibres for Coir–Polyester Composites, *Journal Material Science*, 18, 1443-1454.
21. Sydenstricker, T.H.D., Mochnaz, S., Amico, S.C., 2003. Pull-Out and Other Evaluations in Sisal Reinforced Polyester Biocomposites, *Polymer Testing*, 22, 375-380.

22. Ray, D., Sarkar, B.K., Rana, A.K., Bose, N.R., 2001. Effect of Alkali Treated Jute Fibres on Composite Properties, *Bulletin of Materials Science*, 24(2), 129-135.
23. Jacob, M., Thomas, S., Varughese, K.T., 2004. Mechanical Properties of Sisal/Oil Palm Hybrid Fiber Reinforced Natural Rubber Composites, *Composites Science and Technology*, 64, 955-965.
24. Mishra, S., Mohanty, A.K., Drzal, L.T., Misra, M., Parija, S., Nayak, S.K., Tripathy, S.S., 2003. Studies on Mechanical Performance of Biofibre/Glass Reinforced Polyester Hybrid Composites, *Composites Science and Technology*, 63, 1377-1385.
25. Liu, X.Y., Dai, G.C., 2007. Surface Modification and Micromechanical Properties of Jute Fiber Mat Reinforced Polypropylene Composites, *Express Polymer Letters*, 1(5), 299-307.
26. Van De Weyenberg, I., Ivens, J., De Coster, A., Kino, B., Baetens, E., Verpoest, I., 2003. Influence of Processing and Chemical Treatment of Flax Fibres on Their Composites, *Composites Science and Technology*, 63, 1241-1246.
27. Seki, Y., 2009. Innovative Multifunctional Siloxane Treatment of Jute Fiber Surface and Its Effect on the Mechanical Properties of Jute/Thermoset Composites, *Materials Science and Engineering A*, 508, 247-252.
28. Ray, D., Sarkar, B.K., Rana, A.K., 2002. Fracture Behavior of Vinylester Resin Matrix Composites Reinforced with Alkali Treated Jute Fibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 85, 2588-2593.
29. Razera, I.A.T., Frollini, E., 2004. Composites Based on Jute Fibers and Phenolic Matrices: Properties of Fibers and Composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 91, 1077-1085.
30. Cao, Y., Shibata, S., Fukumoto, I., 2006. Mechanical Properties of Biodegradable Composites Reinforced with Bagasse Fiber Before and After Alkali Treatments, *Composites: Part A*, 37(3), 423-429.
31. Van De Weyenberg, I., Chi Truong, T., Vangrimde, B., Verpoest, I., 2006. Improving the Properties of UD Flax Fibre Reinforced Composites by Applying an Alkaline Fibre Treatment, *Composites: Part A*, 37, 1368-1376.
32. Herrera-Franco, P.J., Valadez-Gonzalez, A., 2005. A Study of the Mechanical Properties of Short Natural-Fiber Reinforced Composites, *Composites: Part B*, 36, 597-608.
33. Cao, Y., Shibata, S., Fukumoto, I., 2006. Mechanical Properties of Biodegradable Composites Reinforced with Bagasse Fibre Before and After Alkali Treatments, *Composites Part A*, 37, 423-429.
34. Karaduman, Y., Gokcan, D., Onal, L., 2013. Effect of Enzymatic Pre-Treatment on the Mechanical Properties of Jute Fiber-Reinforced Polyester Composites, *Journal of Composite Materials*, 47(10), 1293-1302.
35. Dash, B.N., Rana, A.K., Mishra, H.K., Nayak, S.K., Mishra, S.C., Tripathy, S.S., 1999. Novel, Low-cost Jute-polyester Composites, Part 1: Processing, Mechanical Properties and SEM Analysis. *Polymer Composites*, 20(7), 62-71.
36. Singh, B., Gupta, M., Verma, M., 1996. Influence of Fiber Surface Treatment on the Properties of Sisal-polyester Composites. *Polymer Composites*, 17(6), 910-918.
37. Baiardo, M., Zini, E., Scandola, M., 2004. Flax Fibre-polyester Composites, *Composites: Part A*, 35, 703-710.
38. Gohil, P.P., Shaikh, A.A., 2010. Experimental Investigation and Micro Mechanics Assessment for Longitudinal Elastic Modulus in Unidirectional Cotton-polyester Composites. *International Journal of Engineering and Technology*, 2(2), 111-118.

Diyatomit Agregalı Blok Elemanların Yüksek Sıcaklık ve Donma-Çözülme Etkisinde Bazı Fiziko-Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

Hakan AKBABA^{*1}

¹Uşak Üniversitesi, Banaz Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, Uşak

Geliş tarihi: 22.03.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Çalışmada yüksek pozolanik özelliğe sahip olan diyatomitin, hafif beton blok üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çimento dozajı (220 kg/m^3) ve su/çimento oranı (0,15) sabit olmak üzere, farklı tane dağılımlarına (granülometri) sahip agregalar kullanılarak üretilen $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ ebatlarındaki küp numunelerin, yüksek sıcaklık ve donma-çözülme etkisi sonrasında bazı fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişiklikler incelenmiştir. Deneysel çalışmalar için agregalar 0-4 mm (ince), 4-8 mm (orta) ve 8-16 mm (iri) tane dağılım oranına sahip 5 farklı seride üretilmiştir. 28 günlük sertleşmiş numuneler üzerinde birim hacim ağırlık, porozite, ultrases, basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri belirlenerek, yüksek sıcaklık ve donma-çözülme etkisi sonrasında numunelerde oluşan fiziksel değişimler kaydedilmiştir. Deney sonuçlarında, birim hacim ağırlık değerlerinin $1182,33-1273,37 \text{ kg/m}^3$ arasında değişiklik gösterdiği, donma-çözülme sonrasında, ufalanma ve parçalanma ile ortalama %8,53 kütle azalışının yanı sıra, basınç dayanımında da azalış gözlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi ($600 \text{ }^\circ\text{C}$) ile ortalama %7,9 kütle azalışı oluşurken, basınç mukavemetinde ise ortalama %55,22 oranında artış gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Diyatomit, Hafif blok eleman, Yüksek sıcaklık (yangın), Donma-çözülme

Investigation of Some Physico-Mechanical Properties of Diatomite Aggregate Block Elements in High Temperature and Freezing-Thawing Effect

Abstract

In this study, the use of diatomite, which has a high pozzolanic property, in light concrete block production was investigated. After the high temperature and freeze-thaw effect of some $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ cube samples produced using aggregates with different grain distributions (granulometry) with cement dosage (220 kg/m^3) and water/cement ratio (0.15) constant. Changes in properties are examined. For experimental studies, aggregates were produced in 5 different series with 0-4 mm (fine), 4-8 mm (medium) and 8-16 mm (large) grain distribution ratio. Physical changes occurred in samples after high temperature and freeze-thaw effect were determined by determining unit volume weight, porosity, ultrasound, compressive strength and elasticity module values on 28 days of hardened samples. In the

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Hakan AKBABA, hakan.akbaba@usak.edu.tr

results of the experiment, it was observed that the unit volume weight values varied between 1182,33-1273,37 kg/m³, after freezing-thawing, a decrease in compressive strength was observed along with an average 8.53% mass decrease with crumbling and breaking down. While an average mass decrease of 7.9% occurred with high temperature effect (600 °C), an average increase of 55.22% was observed in compressive strength.

Keywords: Diatomite, Lightweight block materials, High temperature (fire), Freeze-thaw

1. GİRİŞ

Ülkemizde bol rezerve sahip olan hammadde kaynaklarından yararlanılarak üretilebilecek yeni yapı malzemelerinin araştırılması büyük önem taşımaktadır. Özellikle hafif yapı malzemesi alanında fiziksel koşullara karşı dayanıklı, ekonomik, sağlıklı ve kolay elde edilip kullanılabilen malzemelerin geliştirilmesi hedeflenmektedir [1,2]. Yapılan çalışmalarda hafif beton üretimi, taşıyıcı olmayan duvar malzemesi, bağlayıcı katkı maddesi olarak kullanımı ve mevcut özelliklerinin iyileştirilmesi için çeşitli deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Günümüz inşaat teknolojisinde kullanılan konstrüktif hafif yapı elemanları endüstriyel hammaddelerden üretilmektedir. Endüstriyel hammadde tanımı; kum-çakıl, kireçtaşı, killer, zeolit, talk, vermikulit, sepiolit, diyatomit, grafit ve silikadan; manyezit, perlit, pomza, feldispat, mika, wollastonit, barit, florit doğal taşlar ve gübreye kadar her çeşit mineral ve kayaçları kapsamaktadır. Türkiye, karmaşık jeolojik yapısı nedeniyle farklı tiplerde, önemli endüstriyel hammadde yataklarına sahiptir [3-6].

İnşaat teknolojisinde yapı statığı ve dinamiği açısından hafifliğin yanı sıra, yapıda bu hafifliği sağlayacak olan temel bileşenlerin standartlara uygun özellikler gösteren hammaddelerden üretilmeleri de son derece önemlidir. Günümüzde hafifliği sebebi ile farklı tanımlar altında değişik doğal ve/veya suni yapı malzemeleri inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Ancak bazı tür malzemelerin kullanımları, zaman içinde kullanım yerine bağlı olarak gelişen olumsuzluklar nedeniyle sorun oluşturmaktadır. Bu bakımdan inşaat sektöründe, değişen atmosferik koşullara karşı dayanıklı, zaman içinde teknolojik özellikleri değişmeyen hafif yapı elemanı kullanımı ve imalat sektöründe buna bağlı ürün geliştirme çalışmaları

hız kazanmıştır. Yapılarda kullanılacak çağdaş duvar malzemesinin üretilmesi, ülkemiz ihtiyaçlarına cevap verebilecek nitelikte geliştirilmesi, iç-dış ortam şartlarına, ısı ve ses yalıtımı özelliklerine sahip, fiziksel, kimyasal, biyolojik etkilere dayanıklı, yani yapı fiziği kurallarını yerine getirebilen bir yapı malzemesi olması gerekir [7,8].

Pomzaya benzer şekilde yüksek gözenekliliğe sahip olan diyatomit, hafif beton üretiminde agrega olarak kullanımı araştırılan kayaçlardan biridir. Diyatomit, su yosunları sınıfından tek hücreli mikroskobik diyatomların silisli kavkılarının birikmesi sonucu oluşmuş organik tortul kayaçtır. Diyatomit, volkanik bölgelerde yakın, tatlı ve tuzlu göl veya deniz sularında yaşayan tek hücreli, mikroskobik, silis yapılı çift karapaslı esmer bir yosun çeşidi olan diyatomelerin ölmesi ve silisli kabuklarının bir araya toplanması sonucunda meydana gelen bir mineral olarak da tanımlanmaktadır. Diyatomitin dünyada kullanımı çok eski zamanlara dayanmaktadır. MS 500'lü yıllarda İstanbul'da inşa edilmiş olan Ayasofya Camii'nin kubbesinde hafifliğinden dolayı diyatomit tuğla kullanıldığı bilinmektedir. Buna rağmen, diyatomitin Batı Avrupa'da yalıtım amaçlı olarak kesme blok ve tuğla şeklinde ticari anlamda kullanımı 1800'lü yılların ortasına rastlamaktadır [9-11].

Yapıda kullanılan malzemelerin ağırlığının azalmasına bağlı olarak temele aktarılan yükün azalacağı ve yaklaşık %15-20 oranında inşaat demiri tasarrufunun yanı sıra ısı ve ses yalıtımı olarak normal betona göre yaklaşık olarak dört kat fazla yalıtım kalitesi sağlanabilmektedir. Pomza ve ucu kül kullanılarak üretilen hafif betonların agresif şartlar altındaki mekanik özelliklerinin bilinmesi bu tür betonların agresif şartlara maruz kalması durumunda mekanik özelliklerinde

olabilecek olumsuzlukların bilinmesi ve tedbir alınması yapı güvenliği açısından önemlidir.[12]

Dünyada sanayinin birçok dalında yaygın olarak hammadde şeklinde kullanılan diyatomit, yapı sektöründe de çeşitli bağlayıcılar ile ısı yalıtım amaçlı blok (tuğla) üretiminde kullanılmaktadır. Ancak bilinen uygulamalardan farklı olarak diyatomit esaslı hafif yapı elemanı üretiminde, üre-formaldehit bağlayıcı olarak denenmiş ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Bu özellikleriyle bu elemanların hafif yapı elemanı olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır [6].

Şehirlerimizdeki hızlı sanayileşmeye bağlı oluşan nüfus artışı paralelinde ihtiyaç duyulan konut ve bölme duvar ihtiyacını temin eden tuğla üreticileri, hammadde bulabilmek için zengin tarım topraklarını yok etmektedirler. Çalışma, yapılar için gerekli duvar ve bölme eleman malzemesi temininde sık kullanılan tuğlaya alternatif olarak, üretimi kolay, hammadde sıkıntısı olmayan, ekonomik, ısı ve ses yalıtımı yüksek, sağlıklı yapı bloklarının üretilmesine katkı sağlayacaktır.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Kullanılan Malzemeler

2.1.1. Diyatomit

Diyatomitin çimento katkı maddesi, filtrasyon malzemesi, puzolanik malzeme ve yalıtım malzemesi olarak çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılabilir [13].



Şekil 1. Diyatomit kayaçlarının temin edildiği bölgenin konumu

Çalışmada agrega olarak kullanılan diyatomit Afyonkarahisar-Ankara karayolu 24. km'si üzerinde bulunan Seydiler kasabası mevkisinden temin edilmiştir (Şekil 1). Blok halindeki kayaçlar taşınabilir büyüklüğe -0,2-30kg- getirilerek, çalışmanın yapılacağı laboratuvar ortamına taşınmış, sonrasında kırma ve eleme işlemlerinden geçirilerek, deneylerde kullanılacak diyatomit agregası tane büyüklüğü olan 0-4 mm (ince), 4-8 mm (orta) ve 8-16 mm (iri) tane sınıfları [14] elde edilmiştir (Şekil 2 ve Şekil 3).



Şekil 2. Diyatomit kayaçlarının temin edildiği bölge (genel görünüm)



Şekil 3. Diyatomit agregası

2.1.2. Çimento

Karışımlarda Afyon Set Çimento A.Ş.'den temin edilen CEM I 42,5/R Portland Çimentosu kullanılmış olup, üretici firmadan temin edilen çimentoya ait kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 1'de verilmiştir [15].

Çizelge 1. CEM I 42,5/R Portland çimentosu özellikleri

Analiz Gurubu	Deney	Sonuç	Sınır Değer	
Kimyasal Özellikler	SO ₃ (%)	2,91	< 3,5	
	MgO(%)	2,33	< 5,0	
	A.Z.(%)	1,92	< 4,0	
	Cl(%)	0,06	< 0,1	
	Çözünmeyen kalıntı (%)	0,67	< 1,5	
Fiziksel Özellikler	Kıvamlılık suyu (%)	30		
	Özgül yüzey (cm ² /gr)	3685	>3500	
	Piriz süresi	Başlama (saat-dak.)	2 sa..52 dak.	> 1 sa.
		Sonu (saat-dak.)	4 sa..36 dak.	< 10 sa.
	İncelik	No.70'de kalan (%)	0,13	
		No.200'de kalan (%)	3,15	
	Özgül Ağırlık (kg/dm ³)		3,07	
	Basınç Dayanımı (N/mm ²)	2 gün	26,5	> 20
7 gün		38,7	> 31,5	

2.2. Karışımların Hazırlanması

Blok üretimde kullanılacak diyatomit agregalarının maksimum tane çapı 16 mm olarak seçilmiştir. Su/çimento oranı: 0,15 ve çimento dozajı 220 kg/m³ olarak belirlenmiş olup, sertleşmiş numuneler üzerinde yapılacak deneyler için 10x10x10 cm ebadında metal küp kalıplar kullanılmıştır.

Karışım hesapları TS 3234'de belirtilen esaslara göre yapılmış olup, blok eleman üretimi kollu briket makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir [16]. Karışıma girecek diyatomit agregası üzerinde birim hacim ağırlık, su emme ve porozite oranı değerleri belirlenmiş olup elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmalarda [6,19] belirtildiği gibi yüksek olduğu görülmektedir (Çizelge 2).

Karışım harcı Ø 630 mm x 330 mm ebatlarında, 110° yatırılabılır, 60 devir/dak. dönüş hızına sahip mikser kullanılmış olup, karışım harcının kıvamı ve çimentonun hidrasyonu için gerekli suyun agregası tarafından emilmesini engellemek amacıyla ile agregalar önce 30 dk. su içerisinde

bekletme işlemini takiben, 30 dk. süzdürüldükten sonra karışıma eklenmiştir.

Çizelge 2. Diyatomit agregası özellikleri

Agrega Özellikleri		Diyatomit		
		16-8 mm	8-4 mm	4-0 mm
Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Gevşek	0,65	0,68	0,82
	Sıkışık	0,75	0,82	0,94
Porozite (%)		38,7	39,1	-
Su Emme (%) 24 saat		24	27	-

Çizelge 3. Agregası karışım oranları

	16-8 mm (iri)	8-4 mm (orta)	4-0 mm (ince)
Seri - I	% 20	% 40	% 40
Seri - II	% 20	% 35	% 45
Seri - III	% 20	% 30	% 50
Seri - IV	% 20	% 25	% 55
Seri - V	% 20	% 20	% 60

Çimento miktarı 220 kg/m^3 ve su/çimento oranı: 0,15 sabit alınarak Çizelge 3'de belirtilen oranlarda agrega kullanılarak 5 farklı tane dağılım (granülometri) oranına sahip küp numuneler üretilmiştir.



Şekil 4. Üretilen numunelerin havada kür edilişi

Üretilen numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve laboratuvar ortamında ($20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) 28 gün boyunca havada kür uygulanmıştır (Şekil 4).

Diyatomit agregası ile üretilen bloklarda yüksek sıcaklık etkisini belirlemek amacıyla yüksek sıcaklık testi uygulanmıştır. Bu test için etüv kuru (105 $^\circ\text{C}$) numuneler önceden ısıtılmış 600 $^\circ\text{C}$ 'deki fırına konularak, 2 saat süre ile yüksek ısıya maruz bırakılmıştır (Şekil 5).



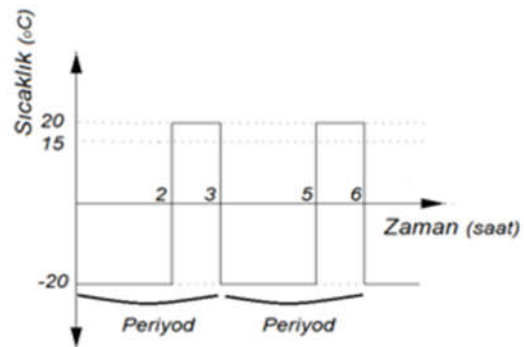
Şekil 5. Yüksek sıcaklık uygulanan fırın

Laboratuvar ortamında soğuyan numuneler terazisi ile tartılarak deney öncesi ve sonrası ağırlıkları kaydedilmiştir. Numuneler daha sonra ultrases hızı ve basınç dayanımı testlerine tabi tutulmuştur.



Şekil 6. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin genel görünümü

Laboratuvar ortamında ($20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) 28 gün süre ile havada kür edilmiş numunelerin donma-çözölmeye karşı fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla donma-çözölmeye periyodu uygulanmıştır. Etüv kuru (105 $^\circ\text{C}$) numuneler 24 saat su içerisinde bekletilerek tamamen suya doymun hale getirilmiştir. Suya doymun haldeki deney numuneleri tüm yüzeylerinin soğuk hava ile teması eşit olabilecek şekilde $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'deki derin dondurucu içerisinde 2 saat bekletilmiştir. Sonraki aşamada derin dondurucudan alınan numuneler $+20$ ila $+15 \text{ }^\circ\text{C}$ deki su dolu havuzda 1 saat bekletilerek çözölmeleri sağlanmıştır. Toplam 3 saat süren periyotlar (Şekil 7) sıralı olarak izlenerek donma-çözölmeye gerçekleştirilmiştir [3,17].



Şekil 7. Uygulanan donma-çözölmeye periyodu

Donma-çözülme işlemi 30 periyot olarak planlamasına rağmen, numunelerde görülen dağılıma, dökülme ve ufalanma sonrası, deney 15. periyotta sonlandırılmıştır. Numunelerin donma-çözülme deneyi öncesi ve sonrası numunelerin görünüşleri Şekil 8 ve Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 8. Donma-çözülme öncesi numuneler



Şekil 9. Donma-çözülme sonrası numuneler

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada üretilen diyaatomit agregalı blok elemanlar üzerinde yapılan birim hacim ağırlık, porozite, ultrases, basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri belirlenmiş, deney sonuçlarına ilişkin veriler Çizelge 4 ve Çizelge 5'de sunulmuştur.

Çizelge 4. Blok elemanlara ait fiziksel özellikler

	Havada Kür Edilen 28 Günlük Numuneler		
	B.H.A. (kg/m ³)	Porozite (%)	Ultrases Hızı (km/sn)
Seri - 1	1224	34,80	1,78
Seri - 2	1273	30,98	1,92
Seri - 3	1182	34,59	1,55
Seri - 4	1227	32,16	1,73
Seri - 5	1244	32,84	1,76

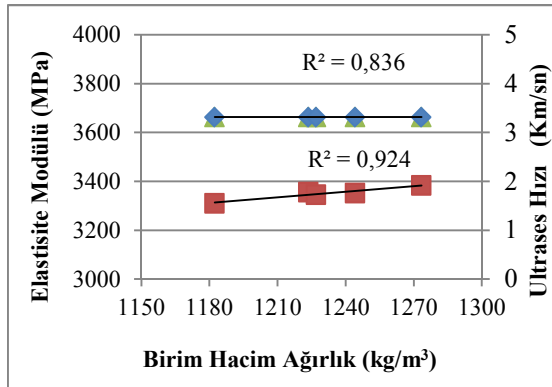
28 gün havada kür edilmiş numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin 1182-1273 kg/m³ arasında değiştiği görülmektedir. Genel olarak Seri-1'den, Seri-5'e doğru gidildikçe, ince malzeme miktarının artmasına bağlı olarak, birim hacim ağırlık değerinde artış olduğu, porozite değerinin azalmasından da anlaşılmaktadır. Numunelerin porozite oranı %30,98-34,80 mertebesindedir.

Çizelge 5. Blok elemanlara ait mekanik özellikler

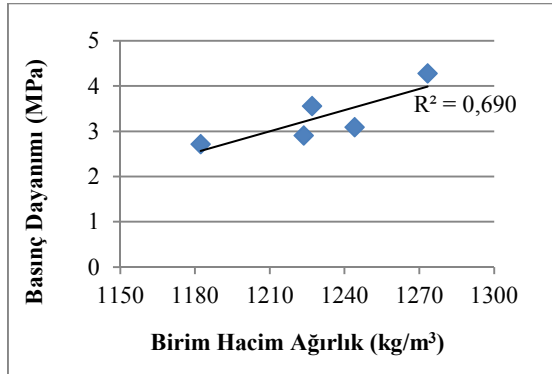
	Havada Kür Edilen 28 Günlük Numuneler	
	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Seri - 1	2,91	3662,80
Seri - 2	4,28	3984,71
Seri - 3	2,72	3230,31
Seri - 4	3,56	3746,17
Seri - 5	3,09	3588,68

Basınç dayanımı değerleri en küçük 2,72 MPa ile Seri-3, en büyük değeri ise 4,28 MPa ile Seri-2 numunelerde olduğu görülmektedir.

Diyatomit agregası kullanılarak üretilen bloklarda görülen ultrases hızının 1,55-1,92 km/s arasında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Basınç dayanımı, birim ağırlık, ultrases hızı ve elastisite modülü değerleri birlikte değerlendirildiğinde, en yüksek değerlerin, en yüksek birim hacim ağırlığa sahip numune serisi olan Seri-2 de, en küçük değerlerin ise yine en küçük birim hacim ağırlık değerine sahip olan Seri-3 numunelerden elde edilmiştir (Çizelge 4 ve Çizelge 5). Normal betonlarda görülen bu ilişkiye, diyatomit agregalı blok elemanlarda da rastlanmaktadır.



Şekil 10. B.H.A-Elastisite modülü-ultrases hızı ilişkisi



Şekil 11. B.H.A – basınç dayanımı ilişkisi

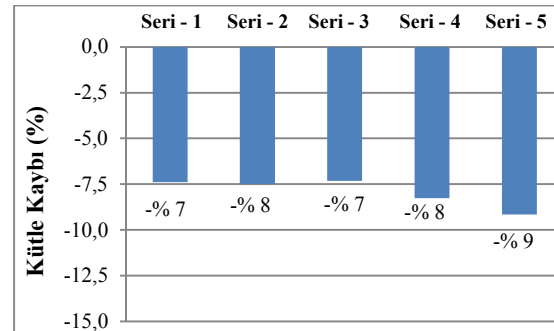
Birim hacim ağırlık-elastisite modülü arasındaki ilişki 0,836 korelasyon katsayısı ile Birim hacim ağırlık-ultrases hızı arasındaki ilişki 0,924 ve birim hacim ağırlık-basınç dayanımı arasındaki ilişki ise 0,690 korelasyon katsayısı ile lineer bir ilişki olduğu Şekil 10 ve Şekil 11'de görülmektedir.

Üretimi gerçekleştirilmiş aynı serideki diyatomit agregalı blok elemanların yüksek sıcaklık (yangın) sonrası fiziko-mekanik özelliklerindeki değişiklikleri izleyebilmek için yüksek sıcaklık testi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6'da verilmiştir.

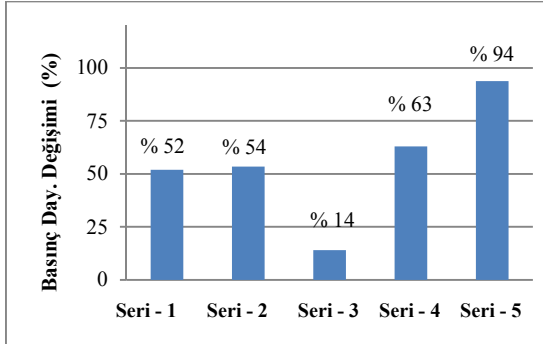
Çizelge 6. 28 yüksek sıcaklık test sonuçları

	Yüksek Sıcaklık Etkisi (28 Günlük Numuneler)			
	B.H.A (kg/m ³)	Kütle Değişimi (%)	Ultrases Hızı (km/sn)	Basınç Dayanım Değişimi (%)
Seri - 1	1108	-7,39	4,42	51,89
Seri - 2	1162	-7,50	6,57	53,50
Seri - 3	1105	-7,32	3,10	13,97
Seri - 4	1147	-8,26	5,80	62,92
Seri - 5	1173	-9,16	5,99	93,85

Yüksek sıcaklık etkisinden sonra tüm serilerdeki numunelerde kütle kaybı oluşmaktadır. Kayıp oranı %7,32–9,16 oranında değişmektedir. Basınç dayanımı değerlerinde ise ortalama % 55,22'lik bir artış gözlemlenmiştir. Bahse konu artış çok yüksek görünse de, aynı serideki referans numunelerden elde edilen basınç dayanımı değerlerinde dahi %25–30 mertebesinde sapmalara rastlanmıştır. Ancak basınç dayanımı ve ultrases hızı birlikte değerlendirildiğinde (Çizelge 6) yüksek sıcaklık sonrası tüm serilerde belirgin derecede artış görülmektedir. Literatürde [18-21] diyatomitin özelliklerinin sıcaklığın artışına bağlı olarak olumlu yönde değişiklik gösterdiğine dair çalışmalar mevcuttur.



Şekil 12. Yüksek sıcaklık sonrası serilerde oluşan kütle değişimi oranı



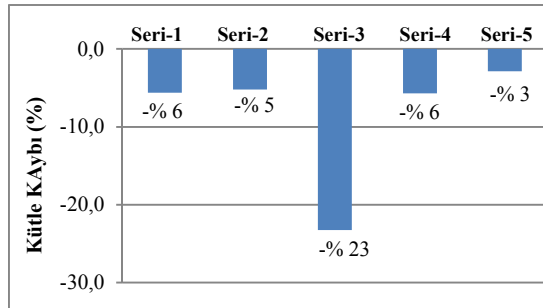
Şekil 13. Yüksek sıcaklık sonrası serilerde oluşan basınç dayanımı değişimi oranı

Ülkemizin büyük kısmında kış ikliminin görülüyor olması ve bu etkinin üretilen hafif blokların özelliklerine nasıl bir etki yaptığının belirlenmesi amacıyla, numuneler donma-çözülme periyoduna tabi tutulmuştur.

Hedeflenen donma-çözülme periyoduna (30 periyot) ulaşılmadan numunelerde gözle görülen ufalanma ve parçalanma sebebiyle (Şekil 9) deney 15. periyotta sonlandırılmıştır. Numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarından elde edilen kütle kaybı, ultrases hızı ve basınç dayanımı değerleri Çizelge 7’de verilmiştir.

Çizelge 7. Donma-çözülme testi sonuçları

	Donma - Çözülme Etkisi (28 Günlük Numuneler)			
	B.H.A (kg/m ³)	Kütle Değişimi (%)	Ultrases Hızı (km/sn)	Basınç Dayanım Değişimi (%)
Seri - 1	1097	-5,62	3,50	20,10
Seri - 2	1154	-5,21	3,98	-7,01
Seri - 3	1084	-23,27	----- Yapılamadı	----- Yapılamadı
Seri - 4	1144	-5,69	2,95	-17,28
Seri - 5	1147	-2,87	2,95	-4,53

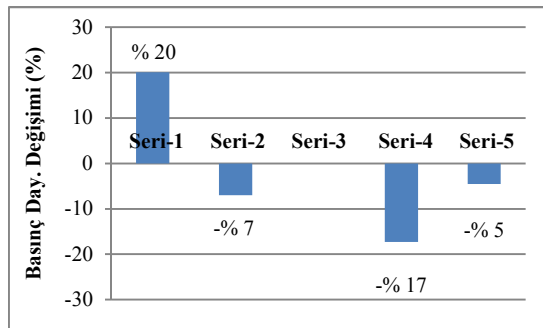


Şekil 14. Donma-çözülme sonrası serilerde oluşan kütle değişimi oranı

oluşan basınç dayanımı değişimi oranı donma-çözülme deneyi sonrasında genel olarak tüm serilerde kütle kaybı ve basınç dayanımı değişimi yaşandığı söylenebilir. Seri-1 deki basınç dayanımı artışının üretim kaynaklı bir problemden oluşabileceği düşünülmektedir. Serilerde ortalama kütle kaybının %8,53 değerinde olduğu Şekil 7’de görülmektedir. [19,22]. Seri-3 numunelerde görülen %23’lük kütle kaybı sebebiyle bu seri numunelerde ultrases ve basınç dayanımı değerleri elde edilememiştir.

4. SONUÇLAR

- Diyatomit kayacını hafif blok eleman üretiminde kullanılabilirliği ve özellikle yüksek sıcaklık ve donma çözülme etkisi altındaki fiziksel değişimlerinin araştırıldığı bu çalışmada 28 günlük numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarından elde edilen verilere göre;
- Üretilen blokların birim hacim ağırlık değerlerinin 1080-1280 kg/m³ arasında



Şekil 15. Donma-çözülme sonrası serilerde

değişiklikler gösterdiği, birim hacim ağırlık-elasticite modülü ve birim hacim ağırlık-ultrases hızı arasında sırasıyla 0,836 ve 0,924 korelasyon katsayısı ile lineer bir ilişki bulunmuştur. Ancak basınç dayanımı, elasticite modülü ve ultrases değerlerinde benzer bir ilişkiye rastlanmamıştır.

- Yüksek sıcaklığa maruziyet sonrası kütle kaybının ortalama %-7,92 değere ulaşılmasına rağmen, basınç dayanımı değerinde ortalama %55,22'lik bir artış gözlenmiştir.
- Donma-çözülme etkisi incelendiğinde, numunelerde ufalanma, dağılma ve parça kopmalarının gözle görülür seviyede ve ortalama kütle kaybının %8,53 oranında olduğu, basınç dayanımı değerlerinde ise genel olarak azalma görülmesine rağmen doğrusal bir ilişkiye rastlanmamıştır.
- Sonuç olarak diyatomit agregası kullanılarak üretilen blok elemanların yüksek sıcaklık ile fiziksel özelliklerinde olumlu yönde değişiklikler görülmesine rağmen, donma-çözülme periyotları sonrasında numunelerde önemli derecede kütle kaybı (ufalanma, parçalanma) ve basınç dayanımı değerinde önemli ölçüde düşüş olduğu tespit edilmiştir.
- Numunelerden elde edilen basınç mukavemeti değerlerinin 2-6 MPa aralığında değişiklik gösterdiği, bu sebeple yük taşımayan bölme duvar elemanı piyasadaki benzer malzemelere alternatif olarak kullanılabilen, boşluklu yapıya sahip olması sebebiyle de yalıtım malzemesi olarak değerlendirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Benzer özellikteki doğal yapıtaşları ile farklı karışımlar yapılarak, zayıf olan özelliklerin belli oranda iyileştirilmesi sağlanabilecektir.

5. KAYNAKLAR

1. Temiz, H., Akçekale, A.H., 2014. Hafif Agregalı Betonun Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(2), 7-20.
2. Mouli., M., Khelafi, H., 2008. Performance Characteristics of Lightweight Aggregate Concrete Containing Natural Pozzolan, *Building and Environment*, 43, 31-36.
3. Güçlüer, K., Ünal, O., Demir, İ., 2014. Buhar Kürlü Gazbetonun Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Pozolan Katkısının Etkisi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14,(1), 1-6.
4. Serin, G., Cankıran, O., Başyigit, C., Taş, H.H., Fenkli, M., 2007. Normal, Hafif ve Yarı Hafif Beton Blokların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması, *Teknolojik Araştırmalar: YTED (1)* 15-22.
5. Yasar, E., Atis, C.D., Kilic, A., Gulsen, H., 2003. Strength Properties of Lightweight Concrete Made with Basaltic Pumice and Fly Ash, *Materials Letters*, 57, 2267- 2270.
6. Gökçe, M.V., 2010. Diyatomit Esaslı Hafif Yapı Elemanı Üretiminde Üre-Formaldehitin Bağlayıcı Olarak Kullanılması, *Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 131, Konya, Türkiye.
7. Gündüz, L., Sarıışık, A., Tozaçan, B., Davraz, M., Uğur, İ., Çankıran, O., 1998. Pomza Teknolojisi. Cilt- I, Süleyman Demirel University, 275-285.
8. Akbaba, H., 2007. Agregat Türünün Hafif Blokların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
9. Meisinger, A.C., 1984. Diyatomite, Çeviren I. Işık, *Anadolu Üniversitesi Müh.-Mim. Fak. Dergisi*, 1(2), 141-158.
10. Lydon, F.D., 1992. *Concrete Mix Design*, Applied Science Publishers, 2nd ed., London.
11. Borat, M., 1992. Türkiye Diyatomitlerinin Özellikleri ve Filtrasyon Karakteristikleri, *Doktora Tezi., İTÜ, Fen Bilimleri Ens.*, 131. İstanbul.
12. Yıldırım, A.N., 2007. Pomza ve Uçucu Kül Kullanılarak İmal Edilen Hafif Betonların Agresif Su Ortamlarında Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 121, Konya.
13. Aruntaş, H.Y., Albayrak, M., Saka, H.A., Tokyay, M., 1998. *Ankara-Kızılcahamam ve*

- Çankırı-Çerkeş Yöresi Diyatomitlerinin Özelliklerinin Belirlenmesi, Turkey J. of Engineering and Environmental Science, 22, 337-343.
14. TS 706 EN 12620, Beton Agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
 15. TS EN 197-1: 2012 - Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri.
 16. TS 3234., Bims Beton Yapım Kuralları, Karışım Hesabı ve Deney Metotları; Türk Standartları Enstitüsü; Ankara, Eylül 1978.
 17. TS 3449., Çabuk Donma ve Çözülme Koşulları Altında Betonda Dayanıklılık Faktörü Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1980.
 18. Posi, P., Lertnimooolchai, S., Sata, V., Phoongernkham, T., Chindapasirt, P., Investigation of Properties of Lightweight Concrete with Calcined Diatomite Aggregate. KSCE Journal of Civil Engineering, 18(5), 1429-1435.
 19. Bideci, A., Bideci, Ö., 2016. Diatomit Hammaddesinin Tuğla Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(2), 76-69.
 20. Ceylan, H., Saraç, M.S., 2006. Farklı Pomza Agregaları Türlerinden Elde Edilen Hafif Betonun Sıcaklık Etkisindeki Bazı Özellikleri Üzerine Bir Araştırma, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(3), 413-421.
 21. Degirmenci, N., Yılmaz, A., 2009. Use of Diatomite as Partial Replacement for Portland Cement in Cement Mortars Construct Build Mater, 23, 284-288.
 22. Ergün, A., 2011. Effects of the Usage of Diatomite and Waste Marble Powder as Partial Replacement of Cement on the Mechanical Properties of Concrete, Construction and Building Materials, 25(2), 806-812.

Yedek Parça Envanter Politikasının Makina Kullanılabilirliğine Etkisini Değerlendirmeye Yönelik Bir Simülasyon Algoritması

Onur GÖLBAŞI*¹

¹Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara

Geliş tarihi: 22.04.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Bu çalışmada, yedek parça envanter politikasının maden makinası kullanılabilirliğine etkisini analiz edebilecek bir simülasyon algoritmasının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Planlı üretim ve bakım duraksamaları ve makina arızalarının neden olacağı rasgele duraksamalar algoritma içerisinde dikkate alınmıştır. Her bir makina parçasının mevcut envanter miktarları ve tedarik süreçleri, uygulanan bakım-onarım kararları ile birlikte değerlendirilmektedir. Böylelikle, uygulanan envanter politikasının makina kullanılabilirliğine olumsuz etkileri ölçülebilmektedir. Geliştirilen bu algoritma bir maden makinasına uygulanmış ve envanter politikası tanımlanmış on üç farklı parçasının bu makinanın kullanılabilirliğine muhtemel olumsuz etkileri detaylı şekilde incelemiştir. Simülasyon sonucunda, sekiz parçaya ait yedek parça stoklama ve tedarik sürecinin, bu parçaların arızalanma davranışıyla uyumlu olmadığı ve makina kullanılabilirliğini %9 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Maden makinası, Yedek parça, Envanter politikası, Makina kullanılabilirliği, Simülasyon algoritması

A Simulation Algorithm for Appraising the Effect of Spare Parts Inventory Model on Machine Availability

Abstract

This study intends to develop a simulation algorithm that is capable of evaluating the effect of a spare parts inventory policy on the availability of mining machinery. Scheduled production and maintenance halts and the random downtimes caused by machinery failures are regarded in the algorithm. Available inventory stock levels and the active lead times are evaluated together with these downtimes. By this way, negative effects of the applied inventory policies on machinery availabilities can be measured. The developed algorithm was implemented for a mining machinery, and the inventory policies introduced for the thirteen different components of this machinery were discussed according to their potential negative effects on the machinery availability. In the results, it was detected that eight out of thirteen components have the spare part storage and procurement policies that are not accordant with the component failure behaviors, and this situation leads to a decrease of 9% in the machinery availability.

Keywords: Mining machinery, Spare parts, Inventory policy, Machinery availability, Simulation algorithm

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Onur GÖLBAŞI, golbasi@metu.edu.tr

1. GİRİŞ

Madencilikte fabrika tarzı bir kapalı alan üretimi yapılmamasından dolayı ve ham madde piyasası, çevre ve operasyon koşullarındaki değişimlerin üretimi önemli derece etkilemesinden ötürü, bu maden sahalarındaki işletme gider kalemlerinin ve plansız üretim kayıplarının süregelen olarak denetlenmesi gerekmektedir. Bu husus, madencilik faaliyetlerinin devamlılığı ve verimliliği açısından kritik öneme sahiptir.

İşletme maliyet kalemleri arasında yer alan bakım-onarım giderleri, en kontrol edilebilir giderlerdir. Bu faaliyetler, makina kullanılabilirliğini istenilen düzeyde tutmayı amaçlayan ve arızalara yönelik düzeltici ve önleyici eylemler sunan faaliyetlerdir. Burada bahsi geçen kullanılabilirlik terimi, sistemlerin hedef çalışma süresinin aslında ne kadarında çalışabildiklerini gösteren bir yüzdesel terimdir. Bakım onarım ve destekleyici eylemler, makinanın kullanılabilirliğine en büyük etkiyi yapan faktörlerdir. Bu eylemlerinin yerine getirilmesinde yükümlülük ve sorumlulukları olan kişilerin belirlenmesi, birimler arası koordinasyon, yedek parça depolanması ile ilgili kararlar ve bakım-onarım eylemlerinin yerine getirilme sıklığı gibi hususlar entegre bir politika içerisinde yer almaktadır. Madenlerdeki uygulamalar incelendiği zaman, bu politikaların içeriklerinin genellikle subjektif deneyimlere göre belirlendiği ve değişen makina ve üretim koşullarına göre güncelliklerini koruyamadıkları görülmektedir. Maden koşullarına göre uygun olmayan bir bakım-onarım politikası, hem makina parçalarının arıza sıklığının artmasına hem de yedek parça temini ile sıkıntılara neden olacaktır.

Yedek parça envanter yönetimi, bakım-onarım politikasının ayrılmaz bir parçasıdır. Bu yönetim sisteminin içeriği oluşturulurken, her bir yedek parçanın geçmiş talep sıklığı, parça kritikliği, bu parçanın bulunduğu makinanın üretim içerisindeki önemi, tedarik süresi, potansiyel tedarikçiler ve parçanın sınıflandırması gibi faktörler göz önüne alınmalıdır. Yedek parça tedarik süreci parçalara göre farklılık gösterebilir. Bu süreçler, ilgili yedek parçanın tekrardan sipariş için gerekli sayıya inmesi, düzenli aralıklarla temin edilmesi,

düzensiz aralıklarla tahmine dayalı tedarik edilmesi veya bunların kombinasyonu şeklinde yürütülebilir.

Bir madende uygulanan yedek parça envanter politikası, kullanılan makinalara, bu makinaların faaliyet ve bakım-onarım aktivitelerine ve üretimin birim değerine göre madene özgü olarak oluşturulmalıdır. Bu bağlamda, uygun olmayan bir yedek parça politikası, yedek parça eksikliğinden kaynaklı olarak bakım-onarım duraksamalarının uzamasına ve fazladan üretim kayıplarına neden olabilir. Diğer bir durumda, yedek parçaların gereğinden fazla depolanması, yüksek kapital çıkışına, depolama alanı sorunlarına ve parçaların malzeme özelliklerinde zamana bağlı bozulmalara sebep olabilir. Bu nedenle, yedek parça temin aralıkları ve miktarları, stok fazlasını engelleyecek ama üretimde fazladan duraksamalara da yol açmayacak şekilde bir finansal denge içerisinde belirlenmesi gerekir. Ancak, üretimin birim zamandaki değerinin çok yüksek olduğu ve/veya üretim hızının planlananın çok üzerine çıkması gereken durumlarda, makina kullanılabilirliği daha büyük önem kazanabilir.

Literatürde yedek parça yönetimine dair çalışmalar, ilk tedarik aşaması, üretim aşaması ve üretim sonrası süreç olmak üzere 3 farklı fazda ele alınmaktadır. Bu araştırmalar genel itibarıyla, yedek parçaların sınıflandırılması, tedarik aralığı, tedarik miktarı, tedarikçi seçimi, yeniden sipariş düzeyi ve güvenlik stoku gibi konularda optimizasyon çalışması ve/veya mevcut durum analizi sunmaktadırlar. İlgili optimizasyon çalışmalarında amaç fonksiyonu, yedek parça siparişi, bakım-onarım, depolama ve üretim kayıplarından meydana gelecek masrafların hepsinin veya bir kısmının toplamını en aza indirmeyi amaçlamaktadır [1]. Bu bağlamda, bir envanter politikasının dinamikleri, uygulanan önleyici bakım faaliyetleri, çalışır parçaların türleri ve adetleri, bu parçaların zaman bağlı aşınma ve yıpranma davranışları ve tedarikçi profiline göre değişiklik gösterebilir [2]. Üretim sektörlerinde, (Q, R), (s, S), (s, Q), ve (R, S). yedek parça envanter politikaları sıklıkla görülmektedir. (Q, R) envanter politikası, yeniden sipariş verilmesi için parça bazlı alt limit adeti (R) ve bu limite

gelindiğinde kaç adet parça siparişinde bulunulacağını belirtir [3]. (s, S) envanter politikası, güvenli stok seviyesinin (s) altına inmeyecek şekilde, depodaki parça adetlerini tekrardan S düzeyine çıkarılmasını amaçlamaktadır [4]. (s, Q) modelinde güvenli stok seviyesi, sabit tedarik adeti ile ele alınmaktadır [5]. (R, S) modelindeki sipariş adeti, yeniden sipariş zamanına ulaşıldığında, envanter seviyesi S değerine çekecek şekilde işletilmektedir. Bu modellere ek olarak, sabit sipariş aralığının (T)'da dahil edildiği (S, T) ve (s, S, T) gibi modeller de üretim sektörlerinde gözlemlenmektedir [6]. Mevcut çalışma, madencilikte sıklıkla görülen (Q, R) politikasını dikkate almaktadır.

Geçmişte yapılmış çalışmalar incelendiğinde, madencilğe yönelik yedek parça araştırmalarının yeterli seviyede olmadığı gözlenmektedir. Bu noktada, Ghodrati ve Kumar [7] tamir edilemez yani arıza durumunda değiştirilmesi gereken parçaların yıllık gerekli stok seviyelerinin tayininde çalışma ortamının etkisini incelemiştir. Bu çalışma içerisinde, bir tekerli yükleyicinin hidrolik fren pompası için çevresel faktörlerin yıllık stok seviyesine etkisi orantılı tehlike modeli ile analiz edilmiştir. Ortam değişkenleri olarak operatör verimliliği, bakım-onarım ekibinin verimliliği, hidrolik yağ kalitesi, iklim koşulları ve fiziki çevresel faktörler ele alınmıştır. Bu değişkenler dikkate alınarak ve alınmayarak yapılan iki farklı analizin sonucunda, yıllık gereken envanter sayıları sırasıyla 12 ve 8 olarak hesaplanmıştır. Böylelikle, harici faktörlerin envanter kararlarında ne kadar etkin olabileceği gösterilmiştir. Ghodrati ve arkadaşları [8], yedek parçalar için ilgili alınabilecek kararların risklerini olay ağacı analizi ile incelemiş ve oluşturulan yöntemi bir demir madenindeki yükleyici için uygulanmışlardır. Yedek parça politikası belirlerken çalışma ortamının dikkate alınmaması, yetersiz yedek parça desteği, yetersiz yedek parça tahmini, yedek parça eksikliği, fazla makina duraksaması, üretim kaybı ve ekonomik kayıp gibi hususların gerçekleşme ve gerçekleşmeme olasılık değerlerini dikkate alarak oluşabilecek tüm kombine etkiler incelemiştir. Olasılıksal çarpımlar neticesinde oluşan değerler, yıkıcı etki, zor durum ve güvenli durum başlıkları altında ele

alınmış, envanter tahmininde en büyük etkiyi sunacak faktörler belirlenmiştir. Wang ve arkadaşları [9], düzenli bakım denetim aralığı, azami stok seviyesi, yeniden sipariş adeti ve önleyici parça değiştirme eşik değeri gibi faktörleri bir araya getiren, maliyeti minimize etmeyi amaçlayan bir envanter optimizasyon modeli üzerine çalışmışlardır. Model içerisinde makina durumunu izleme indikatörleri ve yedek parça politikasının birlikte kullanılabilmesi ve böylelikle daha verimli envanter politikaları oluşturulabileceği belirtilmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen uygulamada, maden taşıma kamyonlarının motor yağları içerisinde biriken demir ve tortu değerlerinin, motorun yıpranması hakkında bilgi verebileceği ve motor ile ilgili bir yedek parça politikası oluşturulurken bu bilgiden yararlanılabileceği iddia edilmiştir. Louit ve arkadaşları [10], yedek parça stok seviyelerinin optimizasyonunu farklı türde kriterlerle sağlayabilen bir model geliştirmişlerdir. Model içerisindeki kriterler, i) maliyetin minimize edilmesi, ii) makina kullanılabilirliğinin maksimize edilmesi, iii) anlık güvenilirlik seviyesinin maksimize edilmesi ve iv) zaman aralığı güvenilirlik seviyesinin maksimize edilmesi şeklindedir. Modelin, belirsiz bir arızalanma davranışına sahip hem tamir edilemeyen hem de tamir edilebilir parçaların envanter modellemesinde kullanılabilmesi belirtilmiştir. Çalışma, bir bakır madenindeki taşıma kamyon filosu için tamir edilebilir bir parçaya uygulanmıştır. Yukarıdaki optimizasyon kriterlerine göre, bu parça için optimum envanter seviyesi sırasıyla 14, 6, 10 ve 15 olarak bulunmuştur. Parçaya uygun kriter seçilirken, ilgili makinanın üretime doğrudan veya dolaylı etkileri ve oluşan toleranslar dikkate alınmalıdır. Martinez ve arkadaşları [11], yedek parça yönetimi ve üretim kaybına yönelik sigorta politikasını birleştiren bir ortak optimizasyon modeli geliştirmiştir. Bu model ile yedek parça maliyeti ve stokta yedek parça olmaması durumunda yaşanılacak üretim kaybı riski için bir dengeleme analizi yapılmıştır. Geliştirilen model, madenlerde kullanılan hidrolik kazıcının bir tamir edilemez parçası için uygulanmıştır. Zhang ve arkadaşları [12] ortak bir yedek parça deposu kullanan madencilik şirketleri için, toplam satın alma,

depolama, sipariş ve üretim kaybı maliyetini azaltacak bir model üzerine çalışmışlardır. Bu modelle, ortak paylaşımlı bir depolama merkezi kullanan üç altın maden şirketine yönelik bir uygulama yapılmıştır. Çalışma içerisinde, şirketlerin yedek parça envanter yönetimleri paylaşımlı merkez tarafından yürütülmekte ve parçaların adetleri kritik seviyelere indiği zaman, merkezi bir satın alma prosedürü uygulanmaktadır. Qarahasanolu ve arkadaşları [13], kamyon modeli, tekerlerin aks konumları, teker özellikleri, yağış ve sıcaklık değerleri gibi çevresel ve teknik eş değişkenleri içerecek şekilde, bir bakır madenindeki taşıma kamyonları için yedek teker sayısı kestirim modeli geliştirmişlerdir. Bu bağlamda, dört farklı kamyon markası, ön ve arka akslar olmak üzere iki farklı aks konumu, -3 °C ve +16 °C arası bir sıcaklık aralığı ve 0,26 mm ve 1,97 mm arası bir yağış aralığı hesaba katılarak, 12 farklı katmanda eş değişkenler listelenmiş ve bu değişkenlerin farklı etkileşimlerinde açığa çıkacak teker gereksinimleri analiz edilmiştir.

Maden makineleri için envanter modeli oluştururken, arıza davranışının tümevarımlı bir yaklaşımla ve makina parçaları arası etkileşim de dikkate alınarak oluşturulması gerekmektedir. Bu çalışma, mevcut bir yedek parça politikasının üretim duraksamalarına etkisini, başka bir deyişle arıza anında stokta yedek parça olmamasının makina kullanılabilirliği üzerine etkisini, bir simülasyon algoritması yardımıyla incelemektedir. Bu algoritma, sistemin çalışma profilini, bakım-onarım davranışını ve makina parçalarının üretime etkisini stokastik olarak ele almaktadır. Rastlantısallığın bu şekilde dâhil edildiği makina kullanılabilirlik modeline yedek parça stok kontrolü modeli adapte edilmektedir. Böylelikle, algoritma süregelen bir şekilde, makina arıza davranışını, stoktaki mevcut yedek parça sayılarını ve tedarik aşamasında olan yedek parçaların geliş sürelerini kısa zaman aralıklarıyla monitör edebilmektedir. Geliştirilen simülasyon algoritması, bir maden sahasına faal olarak kullanılan kazıcı makinaya uygulanmıştır.

Mevcut çalışma beş ana kısımdan oluşmaktadır. Giriş bölümünü takiben, algoritmanın geliştirilmesinde uygulanan yöntem Bölüm 2’de

ele alınmaktadır. Örnek uygulama, Bölüm 3’de sunulmaktadır. Çalışma bulgularına yönelik değerlendirmeler Bölüm 4’de tartışılmaktadır. Çalışma içeriği ve sonuçlarının özeti Bölüm 5’de verilmektedir.

2. YÖNTEM

2.1. Varsayımlar

Bu çalışma, uygulanan yedek parça politikalarının maden makinelerinin kullanılabilirliği üzerine negatif etkilerini analiz edebilen bir simülasyon algoritması geliştirmeyi amaçlamaktadır. Algoritma varsayımları şu şekildedir:

- i. Makina parçaları arasında fonksiyonel olarak seri bir ilişki olduğu, yani herhangi bir parçadaki arızanın tüm makina üretimini durdurabileceği varsayılmıştır.
- ii. Makinaların, planlı duraksamalar ve arıza sonrası gerçekleştirilen düzeltici bakım faaliyetleri dışında süregelen olarak çalıştığı düşünülmektedir.
- iii. Bakım-onarım elemanlarının sayıları, görev paylaşımları, yeterliliklerine yönelik bir kısıtlama yoktur. Yani, bir arıza meydana geldiğinde, ilk çağrıdan arızanın giderilip parçanın test edilmesine kadarki süreçte bakım-onarım ekibi ve organizasyonunda bir yetersizlik veya gecikme olmadığı düşünülmektedir.
- iv. Algoritma içerisinde, maden sahalarında sıklıkla görülen yeniden sipariş için asgari stok sayısı politikası temel alınmaktadır. Bu politikaya göre, envantere yani maden sahasındaki depoda bulunan bir yedek parça belirli bir sayının altına indiğinde, satın alma süreci başlatılır. Bu sürece göre belirli sayıda parça bir tedarik süresi içerisinde tedarikçi tarafından maden sahasına ulaştırılır.
- v. Algoritma, aynı sistem için eş zamanlı şekilde iki farklı simülasyona olanak verir. Birinci simülasyonda, makinanın parça bazlı normal

arızalanma davranışı, uygulanan bakım-onarım politikası ve önceden belirlenmiş yönetimsel duraksamalar için matematiksel ve rasgele ilişkiler kurulur. Yedek parça politikası, model içerisinde bir kısıt olarak alınmayarak makina kullanılabilirliği ve üretim kayıpları hesaplanır. Bu durum, çalışma içerisinde ideal yedek parça politikası olarak adlandırılacaktır. İkinci modelde, birinci modele ek olarak yedek parça politikası da aktif hale getirilir. Yedek parça politikası entegre edilmiş bu model için tekrardan üretim kayıpları ve makina kullanılabilirliği hesaplanır. İki modelin sonuçları arasındaki farklılığın, yedek parça envanter politikasının neden olduğu fazladan duraksamalardan kaynaklı olduğu varsayılır.

2.2. Algoritmanın Geliştirilmesi

Geliştirilen algoritma, şu alt aşamaların birbirine entegrasyonu ile çalışmaktadır: a) Makinanın çalışma sürelerinin ve arızadan kaynaklı duraksama sürelerinin Monte Carlo yöntemi ile rasgele atanmasının sağlanması, b) planlı duraksamaların algoritmaya dâhil edilmesi, c) modelin gerçek zaman çizelgesine adapte edilmesi, d) her bakım-onarım faaliyeti kararından sonra yedek parçanın stok durumunun değerlendirilmesi, e) gerekli yedek parçanın stokta olmadığı bir durum tespit edildiğinde, tedarik sürecinin aktifliğinin ve kalan tedarik süresinin analiz edilmesi. Çalışma ve arıza süreleri Monte Carlo yöntemi ile tayin edilmeden önce, bu süreler için dağılımların belirlenmiş olması gerekmektedir. İlgili makinanın bakım onarım davranışına yönelik bir geçmiş veri mevcut değil ise, arızalar arası süreler ve arıza süreleri için en iyimser, en kötümser ve en beklenen değerler tahmin edilerek üçgensel bir dağılımlar oluşturulabilir. Bu tahminlerde, imalatçı firma önerilerinden ve sektördeki uzman görüşlerinden yararlanılabilir. Eğer geçmiş veriler mevcut ise, bu verileri en iyi temsil eden dağılımlar belirlenir. Geliştirilen algoritma, Reliasoft Reno [14], programı içerisinde çalıştırılmıştır. Elde edilmiş dağılımlar bu programa tanıtılmış ve dağılımların doğasına uygun olarak Monte Carlo yöntemi ile

tekrarlayan rassal değerler türetilmesi sağlanmıştır. Bir simülasyon içerisinde Monte Carlo ile rassal değerler atanmasına yönelik detaylar [15]'den incelenebilir. Algoritma kapsamındaki karar mekanizmalarının matematiksel gösterimi Çizelge 1'de verilmektedir. Algoritmanın genel mantık akışı Şekil 1'de gösterilmiştir.

Şekil 1 ve Çizelge 1'de belirtildiği üzere, simülasyon, gözlem süresinin (t_t) belirlenmesiyle başlar. Gözlem süresi, her bir simülasyon için makina davranışının izlenileceği periyodu tanımlar. Örneğin, ilgili makinanın yıllık kullanılabilirlik değerini bulabilmek için t_t değeri 8.766 saat olarak alınabilir. Sonrasında, makinanın durumu, zaman artışı değerine (Δt) göre güncellenen her bir aktif sürede (t) algoritma tarafından analiz edilir. Düzenli makina bakım denetimleri, vardiya değişimleri, geniş makina revizyonları ve bunlar gibi planlı duraksamalar algoritma tarafından zaman çizelgesine yerleştirilir. Her bir parçanın arızalanmadan çalışabilirlik süresi (TF_i) rasgele olarak atanır. Simülasyon içindeki zaman çizelgesi sıfırdan başlatılır ve her seferinde (Δt) değeri kadar artırılarak, hedef gözlem süresine (t_t) kadar aşama aşama sistemin durumu incelenir.

Simülasyon zamanı Δt kadar arttırıldığı her noktada, sistemin planlı bir duraksamaya veya bir bakım-onarıma maruz kalıp kalmadığı sistemin her bir i bileşeni için tespit edilir. Bakım-onarımın tespit edildiği noktalar, özellikle tamir edilemez parçaların yedek parça ihtiyacına işaret eder. Bu noktada, sisteme tanımlı herhangi bir aktif tedarik sürecinin olup olmadığını TR_i değeri yardımıyla algoritma tarafından tespit eder. Tedarik sürecinin aktif olduğu durumlarda, bu değişken sıfır dışında bir değer alır ve algoritma ilgili yedek parçanın ne zaman madene ulaşacağını hesaplar. Parçanın madene geliş süresi aktif simülasyon süresinden (t) ötedeyse, mevcut envanter sayısında (S_i) bir değişiklik olmaz. Simülasyon süresi tedarik sürecinin tamamlandığını tespit ederse, ilgili parçanın mevcut envanter sayısı sipariş adeti (O_i) kadar arttırılır ve ilgili TR_i değeri aktif bir tedarik süreci olmadığı için sıfırlanır.

Çizelge 1. Algoritma içerisindeki karar mekanizmaları

<p>Aşama 1: Sabit veri ve fonksiyonların tanıtılması</p> <p>D_i: Yeniden sipariş verilmesini tetikleyecek, <i>i</i> makina parçası için depoda bulunan asgari stok seviyesi</p> <p>f(x)_i: <i>i</i> makina parçasının geçmiş arızalar arası sürelerinden türetilmiş olasılık dağılım fonksiyonu</p> <p>d(x)_i: <i>i</i> makina parçasının geçmiş tedarik sürelerinden türetilmiş olasılık dağılım fonksiyonu</p> <p>O_i: <i>i</i> makina parçası sipariş adeti</p> <p>Δt: Zaman artışı değeri</p> <p>t_i: Simülasyonun hedef gözlem süresi</p> <p>Aşama 2: Değişkenlerin tanıtılması</p> <p>TF_i: <i>i</i> makina parçası için beklenen yaşam süresinin zaman çizelgesi üzerindeki bitiş noktası</p> <p>TD_i: <i>i</i> makina parçası için, sipariş sürecinin başlatılmasından, parçanın maden sahasındaki depoya gelmesine kadarki süre</p> <p>TR_i: Sipariş edilmiş <i>i</i> makina parçasının depoya ulaşmasının, zaman çizelgesi üzerindeki tam noktası</p> <p>S_i: <i>i</i> makina parçasının <i>t</i> zamandaki stok seviyesi</p> <p>CD_{ij}: <i>i</i> makina parçası stokta olmamasından kaynaklı <i>j</i> numarası duraksama süresi</p> <p>SD: Herhangi bir makina parçasının gerekli olduğu durumlarda depoda yedeğinin olmamasından kaynaklı toplam sistem duraksaması</p> <p>t: Simülasyon içerisindeki anlık zaman</p> <p>Aşama 3: TF_i = Monte Carlo Rassal Sayı Türetici (f(x)_i) + t, Aşama 4'e git.</p> <p>Aşama 4: t₀ = 0 ve Δt ≠ 0 için, t = Δt + t, Eğer t ≥ t_i: SD = $\sum_i \sum_j \text{CD}_{ij}$ yazdır ve Simülasyonu Sonlandır, Başka eğer, Aşama 5'e git.</p> <p>Aşama 5: Eğer t ≅ TF_i, Eğer TR_i = 0: Aşama 6'ya git. Başka eğer: Eğer TR_i ≤ t: S_i = S_i + O_i, TR_i = 0, Aşama 6'ya git. Başka eğer: Aşama 4'e git.</p> <p>Aşama 6: Eğer S_i = 0: Kukla değişken k = {0, 1, ..., n} → k = k + 1, Eğer k > 1: j = j + 1, CD_{ij} = TR_i - t, Başka eğer: Aşama 4'e git. Başka eğer: k = 0, Aşama 7'ya git.</p> <p>Aşama 7: S_i = S_i - 1 Eğer S_i = D_i: TD_i = Monte Carlo Rassal Sayı Türetici (d(x)_i), TR_i = TD_i + t, Başka eğer: Aşama 3'e git.</p>
--

Bakım-onarım gereksinimi tespit edilen parçalar için algoritma içerisinde envanter modülü aktif duruma gelir. Bakım-onarım zamanlarının belirlenmesinde, parçaların olasılık dağılım fonksiyonlarından türetilen beklenen yaşam süreleri (TF_i) baz alınır ve algoritma tahmini arıza noktaları zaman çizelgesine yerleştirilir. Simülasyonun anlık zaman değeri (t) eğer bu arızalanma noktalarına yaklaşırsa, simülasyon kendi içerisinde önleyici veya düzeltici bakım kararından birini alır. Güvenilirlik bazlı bakım-onarım kararlarına ait detaylar, Golbasi ve Demirel [16]'in yaptığı çalışmadan incelenebilir. Bakım-onarım kararı alındığında, stok seviyesi (S_i) eğer

sıfırdan büyük ise, parçanın envanterden çıkışı gerçekleştirilir. Bu çıkıştan sonra stokta kalan parça adeti yeniden sipariş vermeyi tetikleyecek seviyeye (D_i) inmişse eş zamanlı olarak tedarik süreci başlatılır. Bu sürecin başlandığı noktadan, parçanın maden sahasına gelmesine kadarki süre (TD_i) üçgensel dağılımla rasgele atanır. Bu dağılım türü, tedarik sürecine dair en iyimser en kötümser ve beklenen tedarik sürelerin subjektif olarak öğrenilip kullanılabilmesi için pratik bir dağılım türüdür. Atanan sipariş süresi aktif zamana eklenerek, zaman çizelgesi üzerinde siparişin madene ulaşacağı nokta (TR_i) belirlenir.

Bakım-onarım eylemi için gereken parça, tedarik süreci bitmediğinden ötürü depoda mevcut değil ise, parça için bakım-onarım yapılamaz. Bu durumda, beklenen tedarik zamanı (TR_i) ve bakım-onarım tespitinin yapıldığı zaman arasındaki süre farkı kadar (CD_{ij}), fazladan bir üretim duraksaması yaşanır. Bu tarz bir duraksamaya bakım-onarım için harcanan süre dâhil edilmez. Algoritma içerisinde bu fazladan duraksama noktaları analiz edilerek, envanter modelinin makina kullanılabilirliğine muhtemel negatif etkileri değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, simülasyon içerisinde eş zaman olarak iki farklı analiz yürütülür. Birinci durumda, yedek parça politikası pasif duruma getirilir ve bir model kısıtı olarak değerlendirilmez. Bu durumdaki makina duruşları yönetsel ve bakım-onarım bazlı duruşlardır. İkinci durum ise yedek parça politikası aktif hale getirilir. Bu durumda, birinci modele ek olarak yedek parça stok seviyeleri, tedarik süreçleri ve bakım-onarım arasındaki dinamik etkileşim de dikkate alınır. Her iki durum için makina kullanılabilirliği ve üretim kayıpları hesaplanır. İki analiz arasındaki makina kullanılabilirliği ve üretim kaybı farkı, uygulanan yedek parça envanter politikasının makina kullanılabilirliğine muhtemel negatif etkisini ortaya koyar.

3. ÖRNEK UYGULAMA

Geliştirilen algoritmanın etkinliğini bir örnek uygulama ile değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, 30 m³ kepçe kapasitesi olan bir çekme kepçeli yerkarar hedef sistem olarak seçilmiştir. Sistemin parçalarının çalışma ve bozulma davranış fonksiyonları, Gölbaşı ve Demirel [16] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmadan temin edilmiştir. Aynı zamanda, birim üretim değerine dair veriler de aynı çalışmadan sağlanmıştır. Sistemin bütünsel çalışma davranışını incelemek için, düzenli bakım-onarım aralıkları (haftalık düzenli bakım-onarım denetimleri) ve vardiya değişimleri, planlı duraksamalar olarak algoritmaya dahil edilmiştir. Bu örnek uygulamanın kapsamı şu şekildedir:

- i. Makinanın yedek parçaları için ilk stok seviyeleri belirlidir. Makina, bu stok seviyeleri ile operasyona başlar. Belirli bir parçanın

stoktaki adeti belirli bir eşğin altına indiğinde, ilgili parça için tedarik süreci başlatılır (Çizelge 2).

- ii. Makinada, arızalanma geçmişi olan 30 ana parça olduğu belirtilmiştir. Mevcut çalışmada, bu bileşenlerin sadece on üç tanesi için envanter modeli tanımlanmış, geriye kalan bileşenler için herhangi bir yedek parça kısıtı girilmemiştir. Bunun nedeni, geriye kalan bileşenlerin arıza verilerinde yeterince tekli parça tanımlanmamış olmasıdır. Örneğin, makina dairesi bileşenleri motor, jeneratör ve yağlama ünitesi olarak belirtilmiştir. Motorda bir arıza gerçekleştiğinde genellikle motorun tamamı değil motor içerisinde bir parçaya bakım yapılmaktadır. Ancak, geçmiş verilerinde bu tarz tüm arızalar motor olarak tanımlanmıştır. Bu sebeple, tek parça olarak tanımlanmış ve bir bakım-onarım faaliyetinde yenisi ile değiştirilme ihtimali yüksek olan parçalar üzerine odaklanılmıştır. Çünkü bu parçaların bakım-onarım faaliyetleri ile envanter stok seviyeleri arasında doğrudan bir ilişki mevcuttur.
- iii. Tanımlanmış bu on üç parçanın bakım-onarım zamanlarında, meydana gelebilecek bir yedek parça yokluğu tüm sistemin üretimini durduracaktır.
- iv. Simülasyon içerisindeki hedef gözlem süresi (t_r) iki sene yani 17.532 saat olarak belirlenmiştir. Böylelikle, uzun aralıklı arızalanma davranışı gösteren parçaların profilinin daha iyi gözlenmesi amaçlanmıştır. Toplam simülasyon sayısı 1000 olarak alınmıştır.
- v. Bölüm-2’de detayları anlatılan algoritma, iki farklı durum için çalıştırılmıştır. Birinci durumda, parçaların envanterdeki stok seviyeleri için yüksek değerler girilip parçanın stokta kalmama etkisi elimine edilmiştir. Bu durum için bir sistem kullanılabilirlik oranı bulunmuş ve İdeal Envanter Politikası olarak adlandırılmıştır. İkinci durumda ise algoritma, sahada uygulanan ilk stok seviyesi ve tedarik sürecinin başlangıcını tetikleyecek asgari stok

seviyesi için çalıştırılmıştır. Bu durum ise Mevcut Envanter Politikası olarak isimlendirilmiştir. İkinci durum geçerli

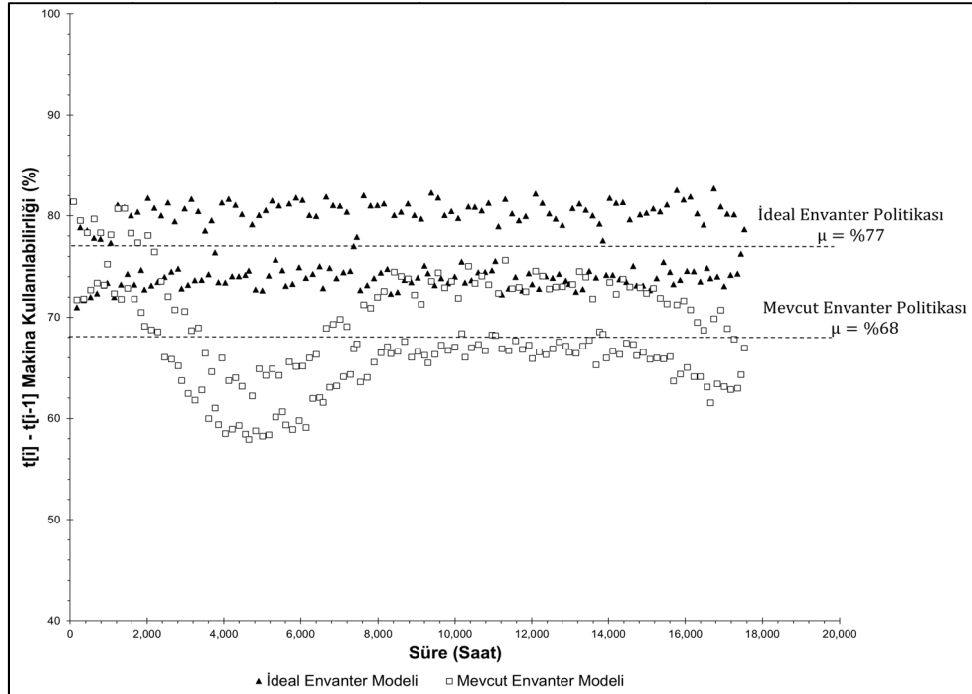
envanter girdileri, makinanın çalıştırıldığı sahadan temin edilmiş ve Çizelge 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Mevcut envanter politikası

Parça Kodu	Parça Açıklaması	İlk Stok Adeti	Yeniden Sipariş Adeti	Parça Kodu	Parça Açıklaması	İlk Stok Adeti	Yeniden Sipariş Adeti
BU2	Kepçe Zinciri	4	2	HO1	Kaldırış Freni	4	2
BU3	Kepçe Dişi	10	5	HO2	Kaldırış Halatı Aparatı	4	2
BU4	Kepçe Pimi	24	12	RI1	Terazi Soketi	8	4
BU5	Kepçe Mapası	14	7	RI2	Terazi Mapası	8	4
DR1	Çekiş Zinciri	4	2	RI5	Terazi Makarası	4	2
DR2	Çekiş Mapası	8	4				
DR3	Çekiş Halat Aparatı	4	2				
DR6	Çekiş Soketi	4	2				

Hedef gözlem süresi (t_0) olarak belirlenen 17.532 saat boyunca, simülasyon süresi kademeli olarak artırılmıştır. Her bir süre artışında $t[i]$ ve $t[i-1]$ arasındaki beklenen makina kullanılabilirlik değeri 1000 adet simülasyonun sonucu olarak ölçülmüştür (Şekil 2).

İdeal envanter politikasına sahip makinada, mevcut envanter politikasına göre daha stabil sonuçlar elde edilmiştir. Tüm anlık kullanılabilirlik değerleri hesaba katıldığında, beklenen kullanılabilirlik değerleri, ideal ve mevcut envanter politikaları için sırasıyla %77 ve %68 olduğu tespit edilmiştir.

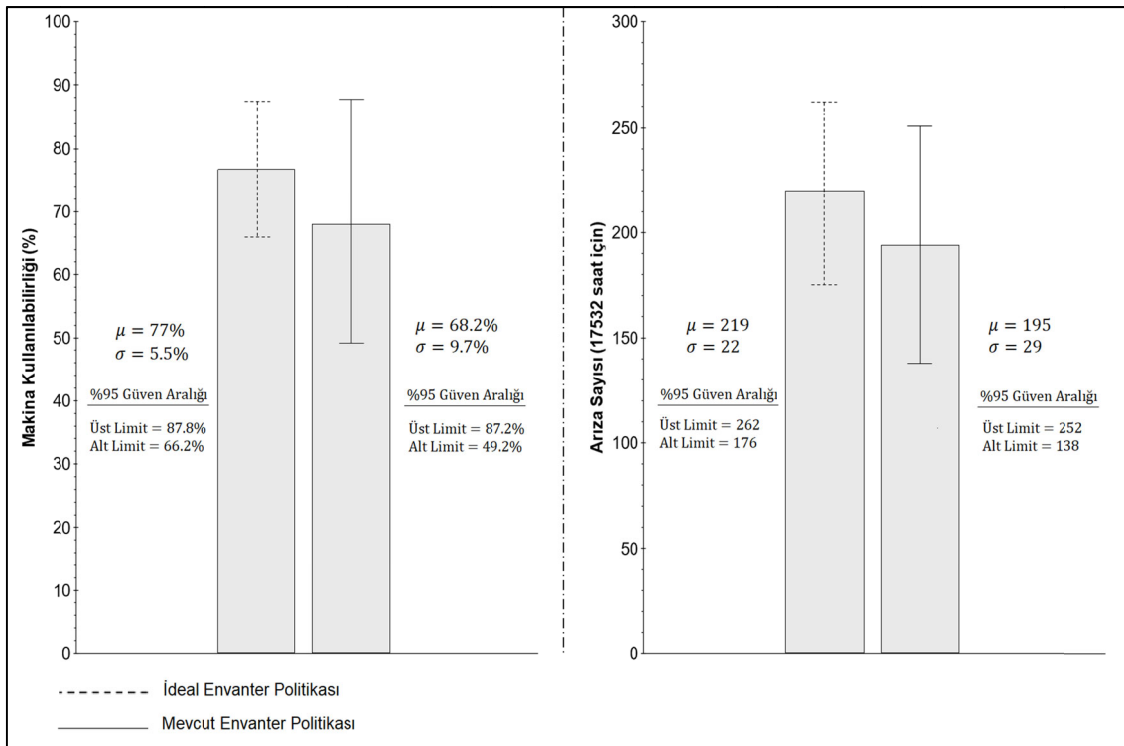


Şekil 2. Envanter politikalarına göre anlık kullanılabilirlik değerleri

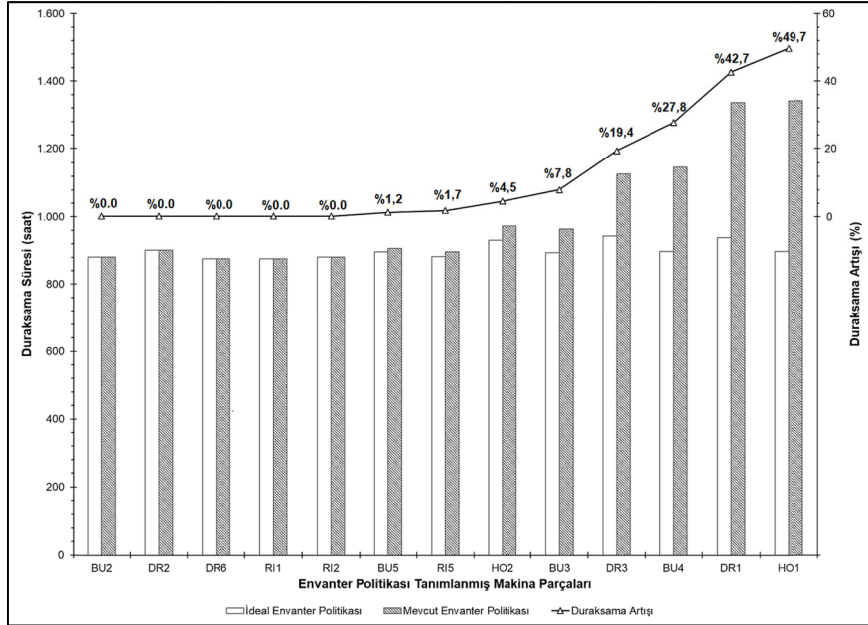
Şekil 2’de gözlemlenen dalgalanma, mevcut politikanın makina kullanılabilirliğine belirgin etkileri olabileceğini göstermektedir. Makina kullanılabilirliği ve arıza sayılarındaki belirsizlik değerleri Şekil 3’de verilmiştir. İdeal bir envanter politikası ile makina için %95 güven aralığında %88 ve %66 arası bir kullanılabilirlik beklenirken, mevcut politika ile bu aralık %87 ve %49 arasında değişmektedir. Mevcut politikanın, makina kullanılabilirliğinde yüksek bir belirsizliğe neden olabileceği, standart sapma değerleri (σ) arasındaki yüksek farklılıktan da anlaşılmaktadır. 17.532 saat boyunca gözlenmesi muhtemel arıza sayıları, ideal ve mevcut politikalar için sırasıyla 219 ve 195 olarak tespit edilmiştir. Mevcut politikada, duraksamalar artmış ve makinanın çalışabilirlik süresi kısaldığı için daha az arıza tespit edilmiştir. Bu çıkarımların yanı sıra, envanter politikası tanımlanmış on üç makina parçasının duraksamalara etkileri Şekil 4’de verilmektedir. Beş parçada envanter tabanlı bir

duraksama gözlenmezken, diğer sekiz parçada %1,2 ve %49,7 arası değişen duraksama artışları tespit edilmiştir. Makinanın kullanılabilirliğindeki ortalama %9 oranındaki azalmanın, bu sekiz parçanın envanter politikasının, makinanın arızalanma davranışına uyumsuz olmasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Özellikle, DR3 (çekiş halat aparatı), BU4 (kepçe pimi), DR1 (çekiş zinciri) ve HO1 (kaldırış freni) gibi parçaların mevcut envanter politikaları, bu parçaların arıza bazlı beklenen duraksamalarını yaklaşık %20 üzerinde arttırmıştır.

Özetlemek gerekirse, envanter modelindeki parça bazlı iyileştirmelerle yaklaşık olarak %9 oranında bir kullanılabilirlik artışı sağlanabilir. Bu tahminlerin güvenilirliği ve uygulanabilirliği, makinanın tüm parçalarının tanımlandığı bütünsel bir envanter modelinin oluşturulması ve bakım-onarım elamanı yetkinlik ve yeterlilik bilgilerinin bu modele tanıtılmasına bağlı olarak değişebilir.



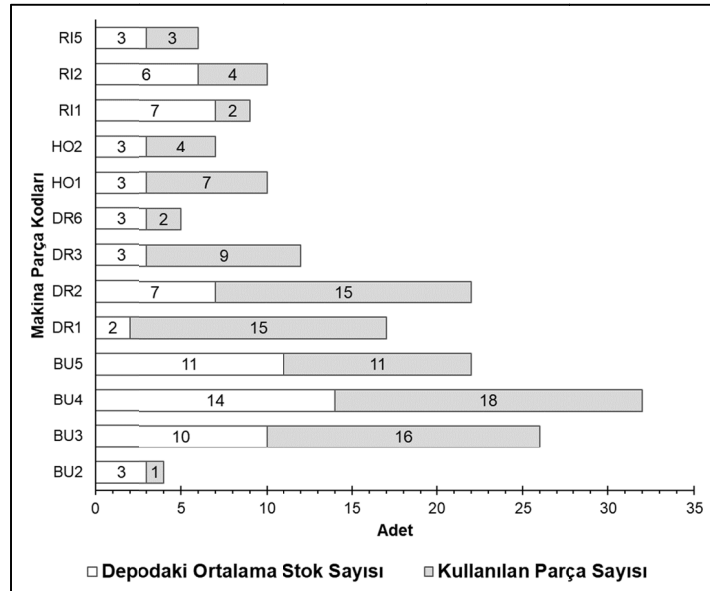
Şekil 3. Makina kullanılabilirliği ve arıza sayısına etkisi



Şekil 4. Parça bazlı duraksamalardaki değişimler (%)

Algoritma, makina parçalarının arızalanma ve tedarik süreçlerini hesaba katarak envanterden giriş ve çıkışları parça bazlı olarak kaydetmektedir. Buna göre hedef gözlem süresi içerisinde kullanılan parçalar ve ortalama depolanmış

parçalar hakkında bilgiler Şekil 5'te verilmiştir. İlgili çıktılar, ilk stok seviyeleri ve yeniden sipariş adetlerinin değerlendirilmesi hususunda yararlanılabilir.



Şekil 5. Makina parçalarına ait yedek parça envanter istatistikleri

4. TARTIŞMA

Geliştirilen algoritmanın sektördeki faal envanter politikalarına uygulanabilirliğini değerlendirirken, ilgili makina parçaları arasındaki fonksiyonel bağımlılıkların ve ilgili bakım-onarım ve envanter politikalarının çalışmadaki varsayımlara uygun olması gerekmektedir. Çalışma içerisinde, makina parçalarının çalışabilirlikleri arasında doğrudan bir bağımlılık olduğu varsayılmıştır. Böylelikle, makina içerisindeki kritik çalışır parçaların herhangi bir tanesinde bakım-onarım gereksinimi ortaya çıktığında, bütün makinanın üretimini durmaktadır. İkinci olarak, bakım-onarım ekibi yetkinliği ve yeterliliğine yönelik hususlar model içerisinde dikkate alınmamıştır. Bu hususların, mevcut ve ideal envanter modellerinde yakın etkiler yaratacağı ve çalışma bulgularını değiştirmeyeceği düşünülmüştür. Ek olarak, algoritma içerisinde (Q,R) envanter politikası, yani belirli bir sipariş seviyesinde sabit sayıda tedarikte bulunulmasına yönelik bir politika dikkate alınmıştır. Bu yedek parça envanter politikası, özellikle madencilik ve ağır iş makinası kullanımı olan diğer üretim sektörlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu politikanın, makina-yoğun faaliyetler için yedek parça temini sürecinde kolay uygulanabilir olduğu gözlenmektedir.

Çalışma varsayımlarına uygun şekilde yürütülen örnek çalışmada, bir madende kullanılan yer kazarın parçaları için uygulanan bir (Q, R) envanter politikası incelenmiştir. Pratiklik açısından, ilgili madende yeniden sipariş verilmesi için limit değerlerin (R) ve sipariş adetlerinin (Q) eşit olarak alındığı gözlenmiştir. Çalışma çıktıları, bakım-onarım ve envanter gereksinimleri arasında doğrudan bağlantı kurulabilen belirli parçaların makina kullanılabilirliğine etkisini ortaya koymaktadır. Diğer bir yandan, geliştirilen bu algoritma, rassal arıza davranışlarının izlenebilmesine olanak sağlamaktadır. Elde edilen sonuçların, gerçek arıza davranışına göre karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi simülasyonun doğrulanmasına fayda getirecektir. Böylelikle, farklı yedek parça politikaları ve

makina arızalanma profili arasındaki ilişki detaylı şekilde incelenebilmektedir.

5. SONUÇLAR

Maden makinaları, zorlu çalışma ortamlarında değişken üretim miktarlarına göre faaliyet göstermektedirler. Bu makinalar genellikle yüksek üretim kapasitelerine sahip olup, arıza veya diğer sebeplerden kaynaklı duraksamalarda oluşacak üretim kayıpları, bu makinaların operasyon içerisindeki önem ve telafi edilebilirliğine göre değişiklikler göstermektedir. Özellikle, kazı faaliyetini yürüten makinalarda meydana gelecek duraksamalar tüm maden üretime doğrudan etki edebilmektedir. Arızaya bağlı duraksamalar, makinanın çalışan parçalarının zaman içerisindeki yıpranmaları ve bu parçaların arızalanma sıklığına göre farklılıklar gösterir. Bu nedenle, uygulanacak bakım-onarım politikası ve bu politikanın tamamlayıcısı olan yedek parça envanter politikası, makinaların güncel davranışlarına yönelik hazırlanmalı veya tekrardan değerlendirilmelidir. Bu bağlamda, arıza kayıtlarının hassas ve açıklayıcı olarak tutulması ve arıza artışlarının incelenmesi, yedek parça önceliklerinin ve önemlerinin belirlenmesi ve periyodik olarak yedek parça envanter politikasının verimliliğinin analiz edilmesi üretimdeki kayıpları azaltacaktır. Aksi bir durumda, yedek parçanın gereğinden fazla depolanması ve/veya parçanın gerekli durumlarda stokta bulunmaması gibi istenmeyen olaylar yaşanabilir.

Bakım-onarım esnasında yaşanabilecek yedek parça yokluğu, tüm madencilik faaliyetlerine ve nihai üretim hedeflerine büyük etkilerde bulunabilir. Bu çalışma kapsamında, mevcut bir envanter politikasının makina kullanılabilirliğine muhtemel negatif etkilerini analiz edebilen bir simülasyon algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma, bir sistemin çalışan parçalarının rasgele arıza ve çalışma davranışı sergilemesine ve envanter durumunun zamana göre izlenmesine olanak sağlamaktadır. Örnek bir uygulamada,

geliştirilen bu algoritma bir çekme keççeli yerkazara uygulanmıştır. Bu uygulama içerisinde, makinanın arıza davranışı ve kullanılabilirliği, hem bağımsız olarak hem de yedek parça envanter politikası ile etkileşime geçirilerek analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları, mevcut envanter modelindeki iyileştirmeler ile makina kullanılabilirliğinin %9 oranında artırılabilceğini göstermiştir.

6. KAYNAKLAR

1. Samal, N.K., Pratihari, D.K., 2015. Joint Optimization of Preventive Maintenance and Spare Parts Inventory using Genetic Algorithms and Particle Swarm Optimization Algorithm. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, 6(3), 248–258. doi:10.1007/s13198-015-0349-3
2. Panagiotidou, S., 2014. Joint Optimization of Spare Parts Ordering and Maintenance Policies for Multiple Identical Items Subject to Silent Failures. *European Journal of Operational Research*, 235(1), 300–314. doi:10.1016/j.ejor.2013.10.065
3. Taleizadeh, A.A., Niaki, S.T.A., Barzinpour, F., 2011. Multiple-buyer Multiple-vendor Multi-product Multi-constraint Supply Chain Problem with Stochastic Demand and Variable Lead-time: A Harmony Search Algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 217(22), 9234–9253. doi:org/10.1016/j.amc.2011.04.001
4. Panagiotidou, S., 2019. Joint Optimization of Spare Parts Ordering and Age-Based Preventive Replacement. *International Journal of Production Research*, 1–17. doi: 10.1080/00207543.2019.1677959
5. Kader, B., Sofiene, D., Nidhal, R., Walid, E., 2013. Jointly Optimal Preventive Maintenance under Spare Parts Order Strategy. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(9), 1376-1380. doi: 10.3182/20130619-3-RU-3018.00088
6. Bounou, O., El Barkany, A., El Biyaali, A., 2017. Inventory Models for Spare Parts Management: A Review. In *International Journal of Engineering Research in Africa* Trans Tech Publications Ltd. (28, 182-198) doi: 10.4028/www.scientific.net/JERA.28.182
7. Ghodrati, B., Kumar, U., 2005. Operating Environment-Based Spare Parts Forecasting and Logistics: A Case Study. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 8(2), 95-105. doi:10.1080/13675560512331338189
8. Ghodrati, B., Akersten, P.A., Kumar, U., 2007. Spare Parts Estimation and Risk Assessment Conducted at Choghart Iron Ore Mine: A Case Study. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 13(4), 353-363. doi:10.1108/13552510710829452
9. Wang, L., Chu, J., Mao, W., 2009. A Condition-Based Replacement and Spare Provisioning Policy for Deteriorating Systems with Uncertain Deterioration to Failure. *European Journal of Operational Research*, 194, 184–205. doi:10.1016/j.ejor.2007.12.012
10. Louit, D., Pascual, R., Banjevic, D., Jardine, A., 2011. Optimization Models for Critical Spare Parts Inventories-A Reliability Approach. *Journal of the Operational Research Society*, 62, 992-1004. doi:10.1057/jors.2010.49
11. Martínez, A., Pascual, R., Maturana, S., 2016. A Methodology for Integrated Critical Spare Parts and Insurance Management. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 32(1), 90-98. doi:10.1002/asmb.2125
12. Zhang, Q., Lv, X., Shi, J., 2017. Research on Inventory Sharing Model of Frequent Mining Machinery Maintenance Spare Parts. *Proceedings of 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 1224-1229. Siem Reap: IEEE. doi:10.1109/ICIEA.2017.8283026
13. Qarahasanlou, N., Barabadi, A., Ataei, M., Einian, V., 2019. Spare Part Requirement Prediction Under Different Maintenance Strategies. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 33(3), 169-182. doi:10.1080/17480930.2017. 1373883
14. Reliasoft Reno© [Bilgisayar Yazılımı], 2019. Arizona, Tuscon.
15. Rossetti, M. D., 2015. *Simulation Modeling and Arena*. John Wiley & Sons, New Jersey.

16. Golbasi, O., Demirel, N., 2017. A Cost-Effective Simulation Algorithm for Inspection Interval Optimization: An Application to Mining Equipment. *Computers & Industrial Engineering*, 113, 525-540. doi:10.1016/j.cie.2017.09.002

Design of a Test System for Compressibility and Resilience Performance Measurement of Floor Coverings

Maher ALSAYED^{*1}, Hatice Kübra KAYNAK¹, Halil İbrahim ÇELİK¹

¹Gaziantep University, Engineering Faculty, Textile Engineering Department, Gaziantep

Geliş tarihi: 05.05.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Abstract

The quality of floor coverings is evaluated according to their resistance to texture deformation. The most important factors affecting the texture deformation of floor coverings are static loads causing the compression of floor coverings, thereby the appearance of floor coverings deteriorated unfavorably. The compressibility and resilience performance of floor covering determine the appearance retention level of pile yarns. There are two types of tests to determine the compressibility and resilience performance of floor coverings namely; thickness loss after prolonged heavy static loading and thickness loss after brief moderate static loading. In this study, it is aimed to design a test system for compressibility and resilience performance measurement of floor coverings. The test system will be capable of automatically applying necessary pressure for both brief moderate static loading and prolonged heavy static loading tests. By providing these two tests and the thickness measurement by a solo device, the test procedures will be achieved automatically.

Keywords: Compressibility, Carpet, Resilience, Static loading, Floor covering

Yer Döşemeliklerinin Sıkıştırılabilirlik ve Rezilyans Performans Ölçümü için Bir Test Sistemi Tasarımı

Öz

Yer döşemeliklerinin kalitesi, yüzey deformasyonuna karşı gösterdiği dirence göre değerlendirilmektedir. Yer döşemeliklerinin yüzey deformasyonunu etkileyen en önemli faktörler, yer döşemeliklerinin sıkıştırılmasına ve böylece yüzey görünümünün bozulmasına neden olan statik yüklerdir. Yer döşemelik ürünlerinin sıkıştırılabilirlik ve rezilyans performansı hav ipliklerinin görünüm muhafaza etme seviyelerini belirlemektedir. Yer döşemeliklerinin sıkıştırılabilirlik ve rezilyans performansını belirlemek için iki tür test kullanılmaktadır. Bunlar; uzun süreli ağır statik yüklemeye sonra kalınlık kaybı ve kısa süreli orta statik yüklemeye sonra kalınlık kaybıdır. Bu çalışmada, yer döşemeliklerinin sıkıştırılabilirlik ve rezilyans performanslarını ölçmek için bir test sistemi geliştirilmesi amaçlanmıştır. Test sistemi hem kısa süreli orta statik yükleme hem de uzun süreli ağır statik yükleme testleri için gerekli basıncı otomatik olarak uygulayabilecektir. Bu iki test ve kalınlık ölçümünün tek bir cihazla yapılmasının sağlanması ile test prosedürleri otomatik olarak gerçekleştirilecektir.

Anahtar Kelimeler: Sıkıştırılabilirlik, Halı, Rezilyans, Statik yükleme, Yer döşemelikleri

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Maher ALSAYED, ma00111@mail2.gantep.edu.tr

1. INTRODUCTION

Textile floor coverings are commonly used textile materials by people in their living areas. They are not only used to provide sound and heat insulation but also for aesthetic appearance in houses, hotels, conference rooms etc. [1].

Textile floor coverings are exposed to many stresses during usage which adversely affect their surface texture. Some of the influential stresses are static and dynamic loads. These loads cause a texture deterioration on floor covering surface. The most commonly used tests to assess the compressibility and resilience performance of floor coverings are thickness loss after brief moderate static loading and prolonged heavy static loading [1-3].

In static loading tests, a floor covering thickness measurement device and a loading mechanism are required for determination of thickness differences before and after the loading and recovery periods [4]. For static loading tests, at first sight, the thickness of the specimen is measured under 2 kPa pressure by the thickness measurement device, then the specimen is loaded with the required value of pressure according to the related standard. After the loading period, the specimen is maintained unloaded for a specific time period according to the standard and after that the thickness is measured again. The deformation of the specimen is stated as the thickness loss. According to the available standards, for prolonged heavy static loading test, the thickness of the floor covering is measured by the thickness measurement test device, then the floor covering specimen is loaded for 24 hours under 700 kPa load. After this period, the load is removed and the thickness of the specimen is measured immediately. The floor covering specimen remains unloaded for 24 hours recovery period. In the next step, the thickness of the specimen is measured after the recovery period again [5,6]. Similarly, for brief moderate static loading test, at first sight, the thickness of the specimen is measured by the thickness measurement device, then 220 kPa load is applied for 2 hours. At the end of 2 hours load application period, the

thickness of the specimen is measured under 220 kPa load. After the loading process is completed, the specimen is remained unloaded. The thickness of the specimen is measured for 15 minutes, 30 minutes, and 60 minutes recovery periods. Testing of five specimens is essential for both static loading tests. The required time for testing one sample of floor covering for the brief, moderate static loading is 10-10.5 hours, whereas it is 48 hours for prolonged heavy static loading [4,7,8]. For each of the aforementioned tests, a floor covering thickness measurement device and a different loading apparatus are required. This situation causes important investment costs for scientific and production mill laboratories. Different brands of floor covering test devices are available, either national or imported [9-12].

Furthermore, it is very laborious to follow up the both test procedure for an operator. The procedure is prone to personal operator faults. Consequently, it should be more convenient to make these tests by a solo test device by eliminating the probable operator faults and by decreasing the investment cost of laboratories.

Several studies have been conducted to develop testing instruments or to measure the properties of textiles. Mecit and Roye presented a test method to investigate the compression behavior of spacer fabrics. It was concluded that the proposed testing way can be applied to measure the compression behavior of spacer fabrics [13]. Fujimoto et al. developed a sensor to measure the surface property of pile materials. The developed sensor was found to be able to quantify the friction that has previously been difficult to be measured [14]. Yao and Li presented a measurement system and new test method based on a virtual instrument for integrated evaluation of fabric handle. The system is able to measure, record, and analyze the thermal and mechanical sensory properties of textile materials [15]. A measurement method of fabric touch feels which named fabric touch tester was reported by Li et al. Four different modules namely; compression, thermal, bending, and surface were used to simultaneously measure the fabric touch feel, which significantly reduce the testing cost [16]. A developed testing equipment

for determining the wear viability of various lunar wheel tread materials with service lives of up to ten years and 10000 km was presented by Joshua et al [17]. Sengupta et al. [18] in their research presented a testing instrument for measuring bending behavior for technical textiles. The proposed instrument is able to test a wide range of fabrics with different thickness and structures. In addition, the developed instrument can be set for required speed and sample size. As it can be seen from previous studies, there is an effort to provide a user-friendly and versatile textile test device for accurate, precise, low cost and high-speed test procedure. However, a developed design or system for providing a solo test device for thickness measurement and static load application for floor coverings has not been studied yet.

In this study, it is aimed to design a multi-functional and innovative test system for measurement of thickness loss after static loading tests by using an automatic solo test device.

2. REASONS FOR DEVELOPING A NEW TEST SYSTEM

The test system will be capable of automatically applying the necessary pressure for brief, moderate static loading test, prolonged heavy static loading test, and thickness measurement in relation to relevant standards, by a solo test device. In this way, it will be possible to perform the tests that need to be accomplished with three test devices: thickness measurement gauge, Figure

1.A, brief, moderate static loading test device and prolonged heavy static loading test device, Figure 1.B, by only utilizing the proposed test device. By this way, the investment cost of floor covering performance test laboratories can be decreased considerably. Moreover, providing these different procedures by the newly developed system will minimize the place requirement of the laboratory.

The test system will be superior to the existing test devices for providing the following features:

- Obtaining accurate and precise thickness property measurements in a computer environment.
- Tests will be implemented automatically not manually.
- Having the results of tests automatically analyzed and immediately after the test.
- All the tests can be implemented by only one technician.
- Minimizing the place requirement of the laboratory.
- The developed test system will be able to test samples of thicker materials such as 3D fabrics.

The loading, unloading and thickness measurements can be implemented automatically for the aforementioned tests. The test results can be automatically obtained and digitally stored. It will be much easier to get the test results for statistical analysis in a digital environment.



A



B

Figure 1. A) Carpet thickness measurement gauge, B) prolonged static loading test device

3. PRINCIPLE OF OPERATION

Figure 2 represents the 3-D isometric view of the prototype and its components. The reason behind using the screws and the hex nuts as the feet of the test device is to ensure its balance by calibrating them before conducting tests.

The working principle of the prototype is, receiving the instructions from an interface that will be designed by the App designer editor of MATLAB software. A USB connection between MATLAB and Arduino will be used to control each component of the prototype.

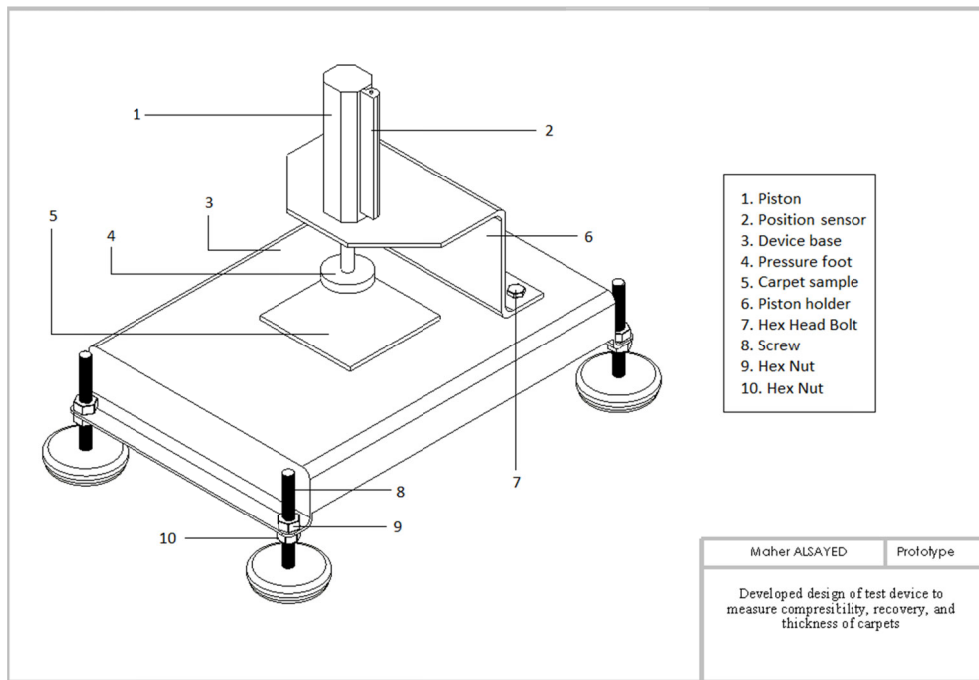


Figure 2. 3-D isometric view of the prototype and its components

The test will initialize when the solenoid receives a command to be opened, from the main controller, then the piston will move down due to the provided air from the pressure regulator and the piston will press on the sample through its pressure foot. The pressure foot will be made of Aluminum for two reasons; reaching light loads while conducting the tests such as 2 kPa and benefiting from the hardness of Aluminum which is required for high loads of tests such as 220 kPa, and 700 kPa as defined in the related standards. The piston will apply the required loads on the sample. The value of applied load will be detected precisely and continuously during the loading duration of test procedure by a load cell which will be located under the sample. The measured

values of loads will be sent to the main controller to be compared with the required load value. If the measured value is correct, the supplied air pressure will be kept constant, otherwise, a feedback signal will be sent to the pressure regulator to regulate the supplied air pressure. This closed loop feedback operation will be carried out during the pressure application.

The position sensor, which is attached to the piston, will play an essential role in determining the stroke of the piston continually. With the help of the position sensor, the thickness of the sample will be measured. All the obtained measurements will be stored and displayed in the interface of MATLAB software.

Basically, the system will be able to implement the required pressure (2 kPa) for thickness measurement and finally the thickness loss after the brief moderate or prolonged heavy static loading tests will be determined.

The steps of the tests are explained below in Figure 3.

The following diagram, Figure 4, represents the control block diagram of the prototype.

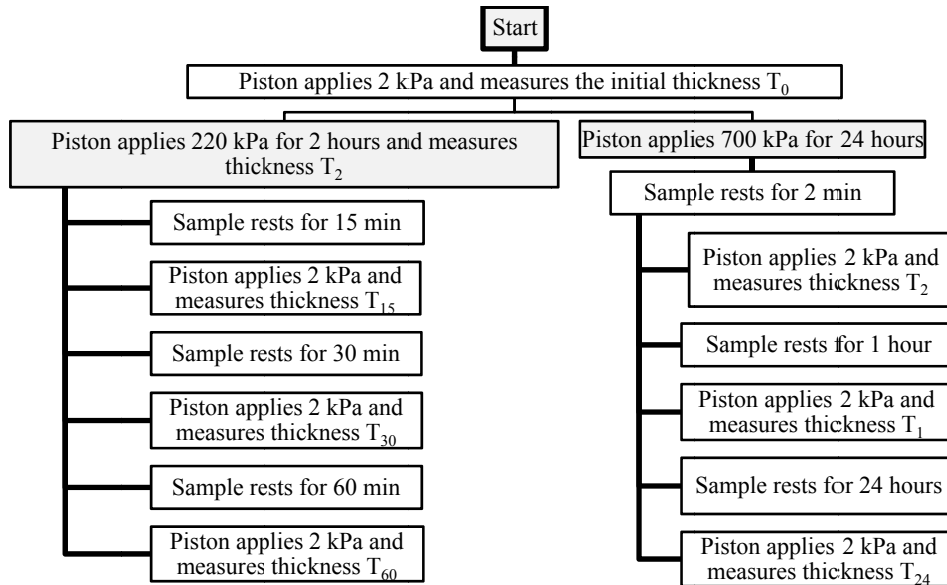


Figure 3. Thickness loss after brief, moderate and prolonged heavy static loading tests

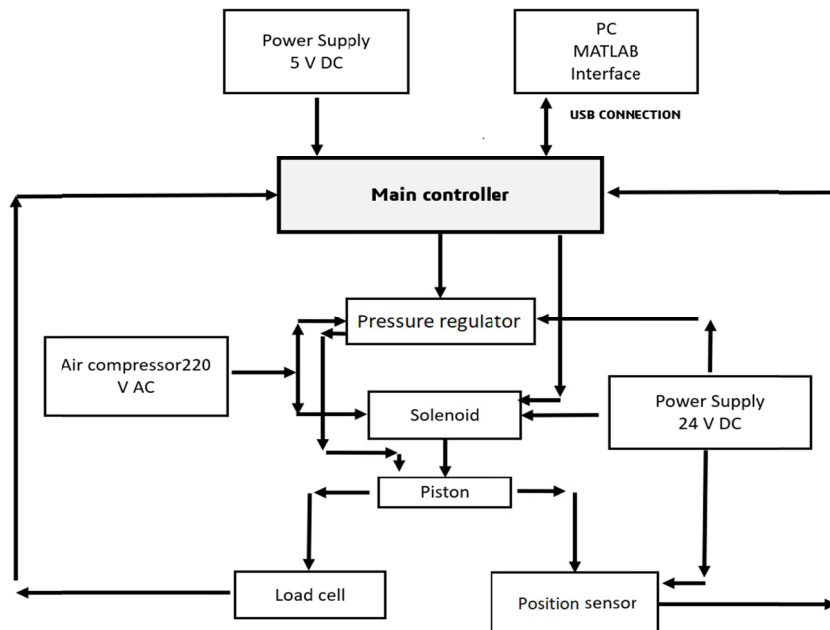


Figure 4. Block diagram of the communication in the testing process

The main controller is the core of the control circuit. By the cooperation between the main controller and the position sensor, the thickness values will be measured.

The main controller is responsible for;

- Generating required signals to send commands to the pressure regulator and the solenoid valve
- Receiving data from the load cell and the position sensor
- Reading and writing data to the user interface

Figure 5 represents the pneumatic circuit and the movement system of the test device. It can be noticed that the piston moves linearly and perpendicularly on to the device base. The piston has 9 cm stroke and makes this stroke in 1 second. The moving component of the mechanism is the

piston. The degree of freedom of the piston in the presented mechanism is 1 since the piston is able to move linearly in one direction (up and down). Figure 5 explains the pneumatic circle of the test device and its components. The two-position and three-way 3/2 pneumatic solenoid valve is the responsible component for the determination of movement direction. 3/2 refers to two working positions and three ports in the piston body, namely 1 the inlet port, 2 and 3 are the outlet ports, as it is shown in Figure 5. The inlet port 1 is where the air is supplied to the valve, port 2 is where the supplied air pushes the piston, and port 3 is where the exhausted air goes outside the circuit. When the circuit is closed, the solenoid allows the air to go to the upper part of the piston, thereby the pressure of air P1 becomes bigger than the pressure of air in the lower part of the piston P2 so the piston goes down, and vice versa.

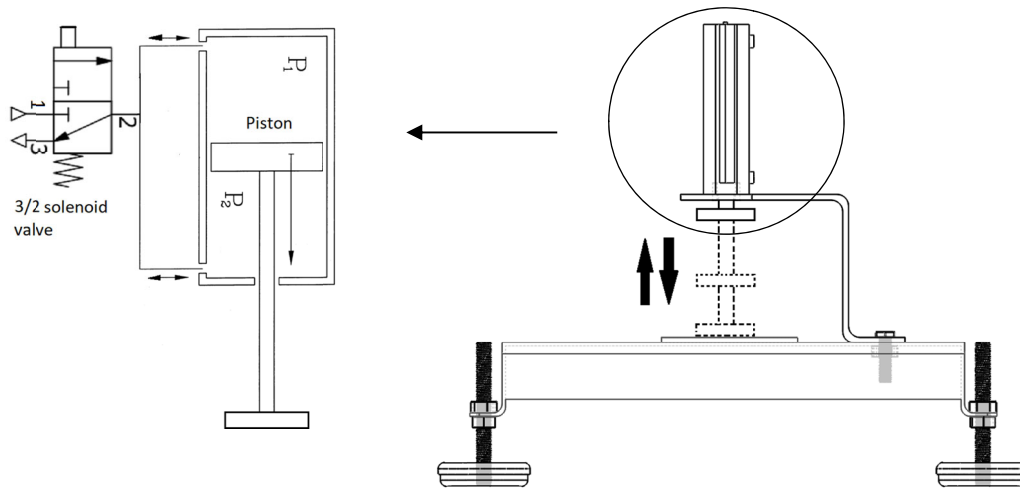


Figure 5. The pneumatic circuit and the movement system of the test device

4. CONCLUSIONS

In this research, a multi-functional and innovative test system design was presented for compressibility and resilience performance measurement of floor coverings. The developed test system will be capable of automatically applying necessary pressures for brief, moderate static loading test and prolonged heavy static loading test for necessary time duration. The system will also get the thickness

measurement in relation to relevant standards. Therefore, the investment cost of floor covering performance test laboratory can be decreased considerably.

The test results can be obtained automatically and saved digitally. It will be much easier to get the test results for statistical analysis in a computer environment. The loading, unloading and thickness measurement can be done automatically for the

aforementioned tests. In this way, the personal testing faults and difficulties of following the loading periods can be eliminated, thereby the measurements can be done more precisely.

5. ACKNOWLEDGMENT

This work was financially supported by Scientific Research Projects Governing Unit of Gaziantep University (project no: MF.YLT.18.26).

Authors are thankful to Dr. Burak ŞAHİN for designing and production the frame of the prototype test device.

6. REFERENCES

1. Gupta, S.K., Goswami, K.K., 2018. Floor Covering Wear Performance. The Textile Institute Book Series, second Edition, Elsevier Ltd., 443-466.
2. Dayiary, M., Najar, S.S., Shamsi, M., 2009. A New Theoretical Approach to Cut-pile Floor Covering Compression Based on Elastic-stored Bending Energy, *J. Text. Inst.*, 100(8), 688-694.
3. Camaby, G.A., Wood, E.J., 1989. The Physics of Floor coverings, *The Journal of The Textile Institute*, 71-90.
4. British Standard, 1975. Determination of Thickness, Compression, and Recovery Characteristics of Textile Floor, C: BS 4098.
5. British Standard, 1987. Method for Determination of Thickness Loss of Textile Floor Coverings After Prolonged Heavy Static Loading, BS 4939.
6. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2017. Standard Test Method for Measuring Recovery Properties of Floor Coverings after Static Loading, ASTM F970.
7. Turkish Standard, 1991. Textile Floor Coverings-Determination of Thickness Loss After Brief, Moderate Static Loading, TS 3378.
8. British Standard, 1987. Method for Determination of Thickness of Textile Floor Coverings, BS 4051.
9. WIRA Instrumentation, WIRA Floor Covering Static Loading Tester, [cited 2020 01 May]; Available from: <http://www.wira.com/media/other/37656/WiraStaticLoading.pdf>
10. WIRA Instrumentation, WIRA Digital Thickness Gauge Floor coverings, [cited 2020 01 May]; Available from: <http://www.wira.com/media/other/37656/WiraDigitalThickness.pdf>
11. IDM instrument, Static Load Tester for carpet. [cited 2020 01 May]; Available from: http://www.idminstruments.com.au/sites/default/files/S0011%20-%20static%20load%20tester%20for%20carpet_0.pdf
12. WIRA Instrumentation, WIRA Dynamic load machine, [cited 2020 01 May]; Available from: <http://www.wira.com/media/other/37656/WiraDynamicLoading.pdf>
13. Mecit, D., Roye, A., 2009. Investigation of a Testing Method for Compression Behavior of Spacer Fabrics Designed for Concrete Applications, *Textile Research Journal*, 79(10), 867-875.
14. Fujimoto, T., Sunderland, M., Tandon, S., Asano, C., Asano, A., Murata, C., Fukuyama, H., 2008. Measurement of Surface Property Using a Special Sensor Developed of Pile Materials, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 33, 253-257.
15. Yi, L., Yao, B., 2011. Virtual Instrument Based Measurement System for Handle Properties Evaluation of Textile Materials, *Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, IEEE, Shanghai, China, 3, 1120-1223.
16. Yi Li, X., Hu, J., Wu, X., Li, Q.A., 2014. Simultaneous Measurement Method to Characterize Touch Properties of Textile Materials, *Springer Link Journal, Fibers and Polymers*, 1548-1559.
17. Orr, M., Stowe, D., Thoe, S., Northup, K., Torok, M., ODell, A., Summers, J., Blouin, V., Joseph, P., 2013. Design of a Scaled Off-vehicle Wheel Testing Device for Textile Tread Wear, *Conference: SAE World Congress*, SAE Technical Paper. Detroit, Michigan, United States.
18. Sengupta, S., Debnath, S., Sengupta, A., 2016. Fabric Bending Behaviour Testing Instrument for Technical Textiles, *Measurement*, 205-215.

Evrişimli Sinir Ağları için Maksimum Ortaklama Devre Tasarımları

Büşra BÜLBÜL^{*1}, Mustafa GÖK¹

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Adana

Geliş tarihi: 15.10.2019

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Derin Öğrenme uygulamaları hızla gelişmekte özellikle de mobil cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu platformlardaki mevcut performans, güç ve alan kısıtları, uygulamaya özgü donanım tasarımlarına ihtiyacı artırmaktadır. Görüntü işleme alanındaki en güncel yöntemlerden başlıcası Evrişimli Sinir Ağları'dır. Bu çalışmada gelişkin Evrişimli Sinir Ağı mimarilerinin önemli bir işlem bloğu olan maksimum ortaklama ünite tasarımları sunulmuştur. Maksimum-ortaklama katmanı Evrişimli Sinir Ağı tasarımlarının kritik gecikme yolunda olup, boru hatlı bir tümleşik devrenin ana çevrim hızını etki edebilecek önemdedir. Önerilen tasarımların toplam çerçeve işleme süreleri Standart Tasarıma göre çok daha kısadır. Önerilen tasarımlar farklı boru hatlı yapılara entegre edilebilecektir. Tasarımlar VHDL ile modellenmiş ve güncel bir FPGA platformu üzerinde sentezlenmiştir. Sentez sonuçları, önerilen tasarımların en hızlısının Standart Tasarımla karşılaştırıldığında 128x128'lik bir çerçeveyi yaklaşık 8,1 kat daha hızlı işlediğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Maksimum-ortaklama, Evrişimli sinir ağı, Sayısal tasarım

Max-Pooling Circuit Designs for Convolutional Neural Networks

Abstract

Deep Learning applications are rapidly developing, especially in mobile devices. Existing performance, power and space constraints on these platforms increase the need for application-specific hardware designs. One of the most current methods in image processing is Convolutional Neural Networks. In this study, max-pooling unit designs, which is an important process block of Convolutional Neural Networks, are presented. The max-pooling layer is in the critical delay path of the Convolutional Neural Network design and is important to influence the main conversion rate of a pipeline integrated circuit. The total frame processing times of the proposed designs are much shorter than the Standard Design. The proposed designs can be integrated into different pipeline structures. All designs are modeled with VHDL and synthesized on a current FPGA platform. The synthesis results show that the fastest of the proposed designs processes a 128x128 frame around 8.1 times faster than the Standard Design.

Keywords: Max-pooling, Convolutional neural network, Digital design

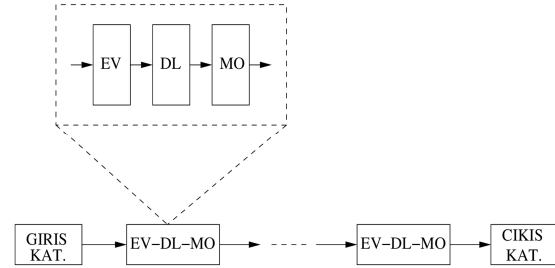
*Sorumlu yazar (Corresponding author): Büşra BÜLBÜL, bbulbul@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Derin öğrenme tabanlı uygulamalar modern hayatımızın vazgeçilmez bir unsuru haline gelmek üzeredir. Görüntü tanıma, ses tanıma, zaman dizisi analizi gibi alanlarda son yıllardaki ilerlemeler çok katmanlı derin ağların kullanılması sayesinde mümkün olmuştur [1]. Evrişimsel Sinir Ağı (ESA) modeli, derin öğrenme algoritmalarının yaygın olarak kullanılan bir çeşididir. Bu ağların işlem performansını artırmak için uygulamaya yönelik devre tasarımları son yıllarda oldukça ilgi çekmektedir [2-4]. Gerçek zamanlı sınıflandırma [5], hedef tespiti [6], bilgisayar destekli teşhis koyma [7], nesne algılama [8], konuşma tanıma [9], yüz tanıma [10] gibi pek çok alanda kullanılan donanım tasarımları yapılmaktadır.

ESA algoritmalarının çalıştırıldığı donanımlar kabaca üç sınıfa ayrılabilir. Birinci sınıfta Grafik İşlemci Tabanlı kartlar olup bunlar genelde algoritma tasarım ve ilk uygulama fazında kullanılan esnek donanımlardır. Grafik kartları kişisel bilgisayarlarda kullanılabileceği gibi bulut hizmetlerinin yığınlarına da eklenebilmektedir. Ancak, büyüklük ve güç tüketimi açısından ciddi dezavantajları vardır. Dolayısıyla bu donanımlar geliştirme aşamasında ve eğitim fazında tercih edilir. İkinci sınıfta FPGA tabanlı uygulamalar olup grafik tabanlı uygulamalara göre performans avantajına sahiptir. FPGA'lerin yeniden programlanabilir olmaları ve düşük miktarlarda üretimde maliyeti düşürmeleri gibi avantajları dolayısıyla tercih edilebilmektedir. FPGA tabanlı tasarımlar hem eğitim fazında hem de son ürün aşamasında kullanılabilir. Üçüncü sınıftaki donanımları Uygulamaya Yönelik İşlemciler sınıfına sokabiliriz. Bu donanımların eğitim fazından ziyade eğitilmiş ağların gerçekleştirilmesinde kullanımı uygundur. Yüksek performans isteminin maliyet kaygısına baskın olduğu alanlarda (askeri, sağlık vb.) tercih edilebilecek çözümlerdir. Son yıllarda cep telefonlarının işlemcileri ile bütünleşik çalışan yapay sinir ağı yongalarının da sisteme yerleştirilmesi yaygınlaşmaktadır. Bu donanımların büyük bir kısmı Uygulamaya Yönelik İşlemci sınıfındadır. Ancak, yığın üretimin daha düşük seviyede olduğu diğer alanlarda FPGA donanımlarına aktarılan fikri

mülkiyet (Intellectual Property) modelleri satılmaktadır.



Şekil 1. ESA genel katman yapısı

Bu çalışmadaki tasarımlar FPGA platformlarına yerleştirileceği düşünülerek hazırlanmıştır. FPGA tabanlı uygulamalarda önemli olan sistem kaynaklarını dengeli kullanabilecek bir üst tasarım organizasyonu kurmaktır. Bu platformlarda performans kısıtı çoğu zaman boru hatlı bir organizasyon ile aşılmaya çalışılır. Bu nedenle tasarımlar şu anda üzerinde çalışılan boru hatlı çok katmanlı bir ESA tasarımına entegre olabilecek şekilde hazırlanmıştır.

2. EVRİŞİMLİ SİNİR AĞI YAPISI

ESA'nın giriş ve çıkış katmanları haricindeki derin yapısını oluşturan ara katmanlar genel olarak üç farklı işlem katmanının bir araya getirilmesi ile oluşmaktadır. Bu iç katmanları sırasıyla Evrişim katmanı (EV), Doğrultulmuş Lineer (DL) katman ve Maksimum Ortaklama (MO) olarak adlandırabiliriz. Şekil 1'de verilen blok şemada bu katmanların temsili sıralanması gösterilmiştir. Görüldüğü üzere işlem blokları kolayca boru hattı bir donanım organizasyonu ile gerçekleştirilebilir. Boru hatlı bu yapıda EV en yoğun işlem yapılan katman olup genelde tasarım araştırmaları bu katmana yoğunlaşmıştır. DL katmanının görevi negatif değerli verileri sıfırla değiştirmek olduğu için minimum seviyede donanım kullanarak gerçekleştirilebilir. Çoğu zaman bu katman EV ile birleştirilir. Bu çalışmada MO katmanını gerçekleştirmeye yönelik devre tasarımları sunulmuştur. EV'nin de kendi içinde birkaç seviyeli boru hattına ayrılması durumunda MO performansı genel saat çevrim hızını etkileyecektir.

2	5	9	4	11	2.3
4	1	5.6	9	0.3	1
5	11	5	3.4	8	5
9	3	7	4.6	6	8
9	4.5	6.8	0.8	3	6.4
11	4	9	8	3	8

→

5	9	11
11	7	8
11	9	8

Şekil 2. Maksimum ortaklama örneği

3. MAKSİMUM-ORTAKLAMA İŞLEMİ

Alt-örnekleme katmanı olarak da bilinen ortaklama katmanının amacı işleme giren çerçeve boyutunu azaltmaktır. Bu işlem, maksimum ya da ortalama ortaklama yöntemlerini kullanarak gerçekleştirilebilir. MO katmanına giren veriler EV-DL katmanından aktarılan sabit noktalı pozitif verilerdir. Şekil 2’de ortaklama işlemine giren 6x6’lık bir çerçeve örnek olarak gösterilmiştir. Örnekte ortaklama 2x2’lik pencereler üzerinde yapılmaktadır. Her adımda pencere içindeki dört değer karşılaştırılmaktadır. Ortaklama çoğu zaman çakışmayan pencereler üzerinde yapılır. Bunu sağlamak için aşma miktarı (stride) 2 olarak belirlenir. Örnekte birbirinden bağımsız dokuz pencere vardır ve dokuz pencerenin maksimum değerlerinden oluşan yeni pencere sağ tarafta gösterilmektedir. Bu örnekteki değerler EV-DL katmanından çıkmıştır dolayısıyla tüm değerler pozitif sabit noktalı sayılardır.

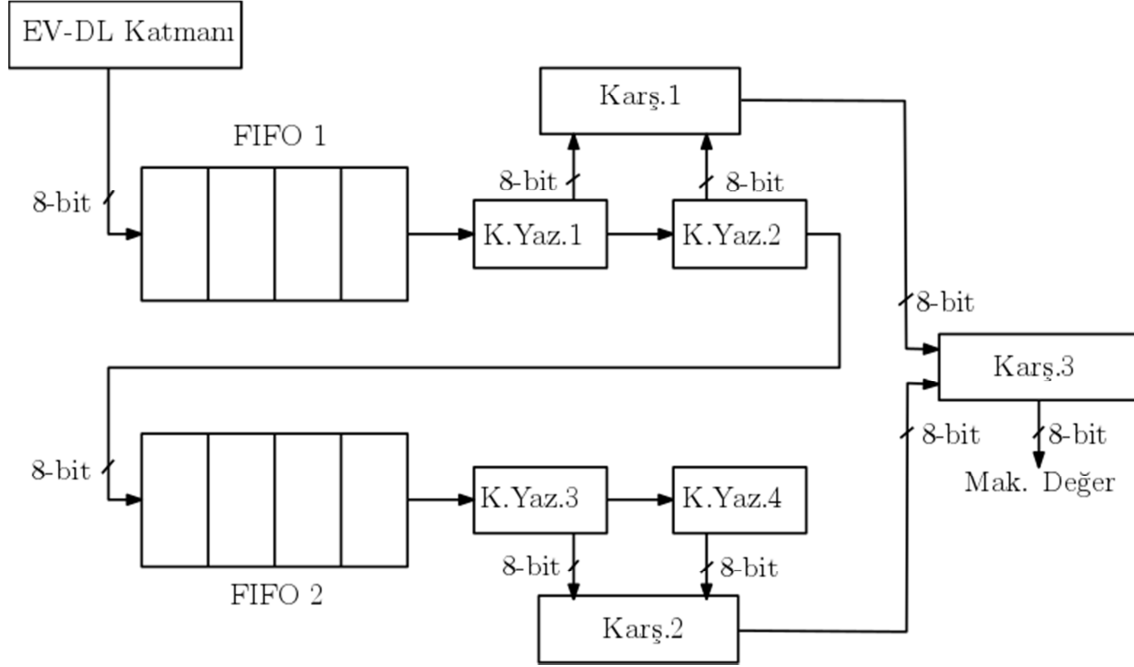
2x2’lik pencere en sık kullanılan olmakla beraber 3x3’lük pencere kullanan uygulamalarda mevcuttur. 3x3’lük pencere de aşma miktarı genelde 1 tutulur. Bu pencerelerin birbiriyle çakışmasına neden olur. Maksimum ortaklama

dışında ortalama-ortaklama olarak adlandırılan ve çerçeve içindeki değerlerin ortalamasını alan işlem de vardır. Ancak, birtakım dezavantajları nedeniyle bu işlem güncel uygulamalarda terk edilmiştir.

3.1. Standart Tasarım

Şekil 3’de en sık kullanılan 2x2 maksimum ortaklama devre tasarımının blok şeması gösterilmiştir. İşlenen çerçevenin mxm boyutunda olduğu kabul edilirse FIFO’ların büyüklükleri m-2 bayttır. Bu devrede ayrıca dört adet kaydırıcı-yazmaç ve iki adet karşılaştırma devresi mevcuttur. Veri işleme akışının adımları şu şekildedir:

- 1) Birinci ve ikinci FIFO ve yazmaçlara EV-DL katmanından gelen çerçeve verilerinin birinci ve ikinci satırı 2 m çevrimde doldurulur.
- 2) Sonraki adımda her çevrimde FIFO’dan okunan değerler önce ikişer ikişer Karşılaştırıcı 1 ve 2’de karşılaştırılır. Bulunan büyük değerler Karşılaştırıcı 3’de son defa kıyaslanarak penceredeki maksimum değer bulunur.



Şekil 3. İki FIFO'lu standart tasarım maksimum ortaklama devresi: ardışıl olarak çalışmaktadır

Standart tasarım $m \times m$ 'lik bir penceredeki tüm maksimumları $(3m^2+m)/2$ çevrimde bulur. FIFO'lar dolduktan sonra her iki çevrimde bir 2×2 'lik yeni pencerenin maksimum değeri bulunur. Önceki çalışmalarda kullanılan standart maksimum ortaklama donanımları genelde bu yapıdadır.

4. TASARIMLAR

Bu kısımda farklı iki boru hatlı organizasyonuna uygun 2×2 'lik pencere ve aşma miktarı 2 olan tasarımlar anlatılmaktadır. MO katmanında bu tasarımların birden fazla kopyasının aynı anda işlem yapacağı farz edilmiştir.

4.1. Tasarım 1

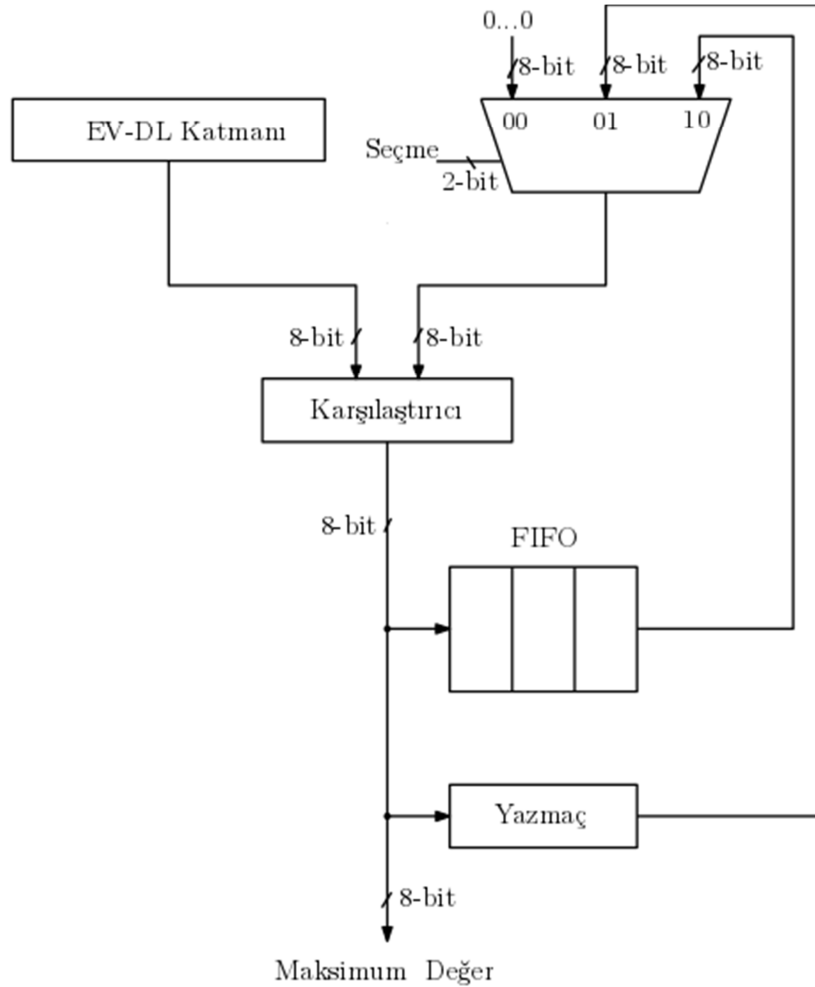
Birinci MO tasarımı her saat çevriminde EV-DL katmanından bir adet değer gönderildiği kabul edilerek hazırlanmıştır. Şekil 4'de blok şeması gösterilen ünite bir adet 8-bitlik yazmaç, bir adet karşılaştırıcı, bir adet multipleksör, bir adet FIFO kullanılmıştır. İşlenen çerçevenin $m \times m$ boyutunda olduğunu kabul edilirse FIFO'nun büyüklüğü $m/2$

bayt kadardır. Çerçevenin tamamı işlendikten sonra çerçevenin boyutu $m/2 \times m/2$ 'ye düşecektir. Sürecin ana adımları şu şekilde gerçekleşir:

- 1) Girişteki değer genlik karşılaştırıcıya gönderilir. Tek sayılı çevrimlerde multipleksörün '00' girişi seçilir; gelen değer yazmaca kaydedilir; FIFO'ya yazma izni verilmez.
- 2) Bir sonraki çevrimde multipleksörün '01' girişi seçilir. Girişe gelen ikinci değer yazmaçta bulunan değerle karşılaştırılır; büyük olan FIFO'ya yazılır. Bir önceki adımla bu adım çerçevenin bir satırı bitene kadar sürdürülür. 1. ve 2. adımlar m çevrim süresince tekrarlanır.
- 3) Yeni satıra geçildiğinde; tek sayılı çevrimlerde multipleksörün '10' girişi seçilir, bu durumda yeni gelen değerler FIFO'dakilerle karşılaştırılır. Çift sayılı çevrimlerde ise multipleksörün '01' girişi seçilir ve yeni gelen değerler yazmaçtaki değerlerle karşılaştırılır. Karşılaştırıcının çıkışı her çevrimde yazmaca yazılır. Bu adım da m çevrim sürdürülür.

Özetle tasarım tek sayılı satırlardan gelen değerleri ikişer ikişer karşılaştırıp FIFO'ya kaydeder. Çift sayılı satırlardan gelen değerler ise FIFO'daki değerlerle karşılaştırılır. Tasarım 1, FIFO

dolduktan sonra her iki çevrimde bir maksimum değer bulur. Bu nedenle $m \times m$ 'lik bir çerçeve üzerinde MO işlemi toplam m^2 çevrimde gerçekleşir.



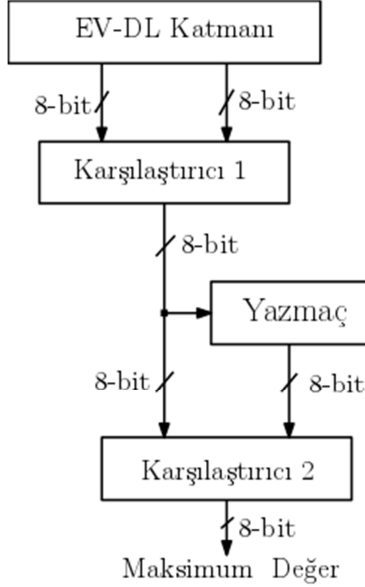
Şekil 4. Tek FIFO'lu maksimum ortaklama tasarımı: $m \times m$ 'lik pencere işleme hızı m^2

4.2. Tasarım 2

Tasarım 2, EV-DL katmanında çerçevenin iki satırını aynı anda işleyen donanımın kullanılması durumunda tercih edilebilecektir. Şekil 5'de blok şeması gösterilen üniteye bir adet yazmaç, iki adet karşılaştırıcı kullanılmıştır. Bir önceki tasarımda kullanılan FIFO'ya ve multipleksıra ihtiyaç duyulmamıştır. Bu tasarımın çalışmasının veri akışının ana adımları aşağıda verilmiştir.

- 1) İki değer karşılaştırıcıda karşılaştırılır ve büyük olan yazmaca kayıt edilir.
- 2) İkinci çevrimde gelen iki değer büyük bulunduğundan sonra yazmaçtaki değerle ikinci karşılaştırıcı tarafından karşılaştırılır. Çift sayılı çevrimlerde yazmaca yeni değer girişine izin verilmez.

Tasarım 2’de her iki çevrimde $m \times m$ ’lik bir çerçeve üzerinde MO işlemini toplam $m^2/2$ çevrimde gerçekleştirir.



Şekil 5. İki veri yollu maksimum ortaklama devresi: $m \times m$ ’lik pencere işleme hızı $m^2/2$

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada sunulan maksimum-ortaklama devre tasarımları VHDL ile modellenmiştir. Sentezlenen modeller 128×128 ’lik bir pencereyi işleyecek boyutta üretilmiştir. Pencerenin boyutu FIFO büyüklüğünü doğrudan etkileyici bir faktör olduğu için boyut özellikle belirtilmiştir. Tasarım FIFO boyutu değiştirilerek daha küçük veya daha büyük pencereleri işleyecek şekilde ölçeklenebilir. Penceredeki her bir piksel 8 bitlik sabit noktalı sayı olarak kabul edilmiştir. Her tasarım için karşılaştırma devrelerinde çıkartma ünitesi veya genlik karşılaştırma ünitesi kullanılmıştır. Bunun nedeni karşılaştırma devrelerinin kritik gecikme yolu üzerinde olmalarıdır. Nitekim genlik karşılaştırma devreleri ile sentezlenen tasarımlar daha yüksek saat hızı sonuçları vermiştir. Her tasarımın iki versiyonu da fonksiyonel olarak doğrulandıktan sonra Quartus II yazılımı ile Intel Cyclone V: 5CGXFC7C7F23C8 FPGA’sı üzerine aktarılmıştır. Çizelge 1’de FPGA donanım kaynaklarının kullanımı verileri sunulmuştur. Bu

veriler çizelgedeki 1. sütunda sırasıyla; uyarlanabilir mantık modülü, bilişimli uyarlanabilir aramalı tablo, atanmış mantık yazmaçları, giriş/çıkış pini, maksimum çıkış yelpazesi, toplam çıkış yelpazesi ve ortalama çıkış yelpazesi olmak üzere yedi başlık altında verilmiştir. Bu çizelgede 2., 3., 5. ve 6. sütunlarda önerilen tasarımların sonuçları, 4. ve 7. sütunlarda standart tasarımın sonuçları gösterilmektedir. Standart Tasarım tüm başlıklarda daha fazla FPGA kaynağı kullanmaktadır. Standart Tasarımın en önemli dezavantajı ihtiyaç duyduğu FIFO büyüklüğünün fazla olmasıdır. Tasarım 2 donanım kaynakları kullanımı bakımından tüm tasarımlardan daha iyi durumdadır. Bunun başlıca sebebi FIFO kullanmaması ve düzenli bir bağlantı yapısına sahip olmasındandır. Tasarım 2’nin EV-DL katmanından çift veri yolu ile beslenmesi gerektiği unutulmamalıdır.

Çizelge 1. FPGA donanım kaynaklarının kullanımı

Kaynak	Genlik-karş. kullananlar			Çıkartma dev. kullananlar		
	T1	T2	ST	T1	T2	ST
Mantık modülü	74	20	129	70	19	125
LUT	97	28	172	100	37	178
Yazm.	59	10	138	59	10	138
G/Ç pini	18	26	18	18	26	18
Maks. çıkış	67	10	154	67	17	154
Toplam çıkış	734	193	1426	705	192	1415
Ort. çıkış	3,67	2,14	3,94	3,47	1,94	3,85

Çizelge 2’de ise 85C ve 0C modelleri üzerinde hesaplanan maksimum frekans sonuçları verilmiştir. Standart Tasarımın maksimum frekans sonucu Tasarım 1’den daha hızlı Tasarım 2’den daha yavaştır. Diğer yandan toplam çerçeve işlem zamanı da önemlidir. $m \times m$ ’lik bir çerçeveyi Tasarım 1 toplam m^2 çevrimde, Tasarım 2 $m^2/2$ çevrimde, Standart Tasarım $(3m^2+m)/2$ çevrimde hesaplamaktadır. Bu göz önüne alınırsa her ne kadar Tasarım 1’in saat hızı Standart Tasarım’dan yavaşsa da çerçeve işlem süresi daha kısa olacaktır. Örneğin Tasarım 1, 128×128 ’lik çerçeveyi yaklaşık $141 \mu s$ ’de hesaplarken, Standart

Tasarım 154 μ s'de hesaplar. Bu çerçeveyi Tasarım 2 ise 19 μ s'de hesaplar. Tasarım 2'nin üstünlüğü çift veri yolu ile beslenmesi ve daha kısa kritik-yol yapısına sahip olmasındandır.

Sonuç olarak Tasarım 2 kullanılması ESA'nın MO hesaplama aşamasında hızlandırılmasını sağlayacaktır. Tasarım 2'nin kullanılması için önceki işlem katmanlarının da ona uygun olarak tasarlanması gerekecektir.

Çizelge 2. FPGA maksimum saat çevrim sonuçları

Tasarım	Genlik-karş. kullananlar		Çıkartma dev. kullananlar	
	Slow 1100mV 85C (MHz)	Slow 1100mV 0C (MHz)	Slow 1100mV 85C (MHz)	Slow 1100mV 0C (MHz)
T1	115,89	114,09	114,78	111,20
T2	426,08	442,87	408,50	419,46
ST	160,03	161,92	150,22	150,15

6. KAYNAKLAR

- Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., 2016. Deep Learning. MIT Press.
- Hamdan, M.K., Rover, D.T., 2017. VHDL Generator for a High Performance Convolutional Neural Network FPGA-based Accelerator. In 2017 International Conference on ReConfigurable Computing and FPGAs (ReConFig) 1-6. IEEE.
- Dinelli, G., Meoni, G., Rapuano, E., Benelli, G., Fanucci, L., 2019. An FPGA-based Hardware Accelerator for CNNs Using On-chip Memories Only: Design and Benchmarking with Intel Movidius Neural Compute Stick. International Journal of Reconfigurable Computing. Hindawi.
- Shawahna, A., Sait, S.M., El-Maleh, A., 2018. FPGA-based Accelerators of Deep Learning Networks for Learning and Classification: A Review, 7823-7859. IEEE Access.
- Hwang, W.J., Jhang, Y.J., Tai, T.M., 2017. An Efficient FPGA-based Architecture for Convolutional Neural Networks. In 2017 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 582-588, IEEE.
- Li, Y., Song, B., Kang, X., Du, X., Guizani, M., 2018. Vehicle-type Detection Based on Compressed Sensing and Deep Learning in Vehicular Networks. Sensors, 18(12), 4500.
- Rajaraman, S., Candemir, S., Kim, I., Thoma, G., Antani, S., 2018. Visualization and Interpretation of Convolutional Neural Network Predictions in Detecting Pneumonia in Pediatric Chest Radiographs. Applied Sciences, 8(10), 1715.
- Ren, S., He, K., Girshick, R., Sun, J., 2015. Faster r-cnn: Towards Real-time Object Detection with Region Proposal Networks. In Advances in Neural Information Processing Systems, 91-99.
- Abdel-Hamid, O., Mohamed, A.R., Jiang, H., Penn, G., 2012. Applying Convolutional Neural Networks Concepts to Hybrid NN-HMM Model for Speech Recognition. In 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 4277-4280, IEEE.
- Qiao, S., Ma, J., 2018. FPGA Implementation of Face Recognition System Based on Convolution Neural Network. In 2018 Chinese Automation Congress (CAC), 2430-2434, IEEE.

Gürleşen-Tülü (Doğu Toroslar) Yöresinde Yüzeyleyen Paleozoyik ve Mesozoyik Birimlerin Petrografisi ve Stratigrafisi

Nusret NURLU*¹, Ahmet Can AKINCI²

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

Geliş tarihi: 11.06.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Bu araştırmada, Saimbeyli ilçesi ile Gürleşen-Tülü köyleri (Adana) arasında kalan alan içinde yüzeyleyen birimlerin detaylı petrografik ve stratigrafik incelenmesi yapılmıştır. İnceleme alanında temelde Ordovisiyen yaşlı şeyl, şistli şeyl ardalanmasından oluşan Armutludere formasyonu yer almaktadır. Bu birim üzerine Erken Devoniyen yaşlı kumtaşı, çamurtaşı, şeyl, killi kireçtaşı ardalanması ile temsil olunan Ayıtepesi formasyonu uyumsuz olarak gelmektedir. Ayıtepesi formasyonu üzerinde uyumlu olarak Orta Devoniyen yaşlı dolomitize kireçtaşlarından oluşan Şafaktepe formasyonu yer almakta olup, bu birim üzerine Geç Devoniyen yaşlı kumtaşı, şeyl, kireçtaşı ardalanması ile Gümüşali formasyonu uyumlu olarak gelmektedir. Genellikle kireçtaşları ile temsil edilen Permiyen yaşlı Yığıltepe formasyonu, Gümüşali formasyonu üzerinde uyumsuz olarak yer almaktadır. Bu formasyon üzerine kumtaşı, marn, killi kireçtaşından oluşmuş Triyas yaşlı Katarası formasyonu uyumlu olarak gelmektedir. Gri, bej renkli kireçtaşlarından oluşan Jura-Kretase yaşlı Köroğlutepesi formasyonu, Katarası formasyonu üzerinde uyumsuz olarak gelmektedir. İnceleme alanından derlenen numunelerden hazırlanan 21 adet ince kesit üzerinde yapılan petrografik çalışmalar sonucunda bölgedeki kırıntılı çökellerin genellikle düşük enerjili bir ortamda işlendiği ve kum boyu bileşenlerin iyi yıkanmadığı, karbonat kayaçların ise genellikle mikrosparitik özellikte olduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Petrografi, Stratigrafı, Doğu Toros, Gürleşen-Tülü

Petrography and Stratigraphy of the Paleozoic and Mesozoic Units Exposed in the Gürleşen-Tülü (Adana, Eastern Taurus) Area

Abstract

In this research, detailed petrographic and stratigraphic examinations of the units in the area between Saimbeyli and Gürleşen-Tülü villages (Adana) were presented. In the study area, Ordovician aged shale and schist shale alternation of the Armutludere formation form the basement. The Ayıtepesi formation, which consists of an alternation of Early Devonian aged sandstone, mudstone, shale and clayey limestone unconformably overlies this unit. Above, the Şafaktepe formation, which composed of the Middle

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Nusret NURLU, nusretnurlu@gmail.com

Devonian dolomitized limestones conformably overlying Ayıtepesi formation. On top of this unit, the Gümüşali formation consisting of an alternation of Late Devonian aged sandstone, shale, limestone deposited concordantly. The Permian age Yığıltepe formation consisting of limestones is discordant on the Gümüşali formation. The Lower Triassic age Katarası formation composed of sandstone, marl and clayey limestone overlies this formation concordantly. The Jura-Cretaceous age Köroğlutepesi formation, consisting of grey and beige limestones, is unconformably sitting on the Katarası formation. As a result of petrographic studies carried out on 21 thin sections compiled from the region, it was revealed that clastic sediments in the area are generally re-worked in a low-energy environment, sand-rich components are not washed well and most of the carbonate rocks in the region are microsparitic.

Keywords: Petrography, Stratigraphy, Eastern Taurus, Gürleşen-Tülü

1. GİRİŞ

Blumenthal [1], Kayseri, Adana illerini kapsayan çalışmasında Paleozoyik birimlerinin Devoniyen'e kadar olanlarını "Devoniyen dentritikleri" olarak kabul etmiş, Permiyen-Karbonifer ayrımını yapmadan genellikle siyah renkli kireçtaşları ile temsil edilen birimi "Permo-Karbonifer" olarak haritalamıştır. Kratese, Eosen, Miyosen birimlerini ise ayrı olarak haritalamıştır. Yalçınlar [2] Feke, Saimbeyli yöresinde yaptığı araştırma ile ilk kez Graptolitli şistlerle karakterize olan Silüriyen'in varlığını ortaya koymuştur. Özgül ve arkadaşları [3] Tufanbeyli-Sarız bölgelerinde yaptıkları çalışmada ilk kez Kambriyen yaşlı kireçtaşları üzerine uyumlu bir ilişki ile gelen Alt Ordovisiyen çökellerini derledikleri Trilobit fosilleri ile saptamışlardır. Bölgede tektonik açıdan Özellikle Alpin Orojenezi'nin etkili olduğu, Hersiniyen orojenik fazının ise sadece Üst Permiyen tabanındaki uyumsuzlukla karakterize olduğu belirtilir [4]. Çalışma alanında GB-KD ve K-G yönlerinde gelişmiş iki ana kırık sistemi bulunmaktadır [5]. Yukarıda belirtilen otokton kaya birimleri ile çalışma alanında GD'dan KB'ya doğru bir sürüklenme ile gelen allokton birim, Binboğa Masifi olarak adlandırılmakta olup bu birim Devoniyen-Kretase yaşlı kayaçların düşük dereceli bir metamorfizmaya uğramaları sonucunda meydana gelmiştir. Ayrıca Kuzey Gondvana kıyı kenarı sığ su sekanslarının sedimantolojik ve fasiyes olarak incelendiği çalışma [6] Orta ve Doğu Toroslar bölgesinde ortaya konulmuştur. Alp-Himalaya kuşağında yer alan Alt Paleozoyik birimlerinin dağılımı ve

paleocoğrafik kısıtlar Göncüoğlu ve arkadaşları [7] tarafından çalışılmıştır. Yine Bulgaristan ve KB Türkiye bölgelerini kapsayacak şekilde, Paleozoyik birimleri Yanev ve arkadaşları [8] tarafından çalışılmıştır. Yurtsever ve arkadaşları [9] Aladağ yöresinde yaptıkları araştırmalarında Üst Devoniyen-Triyas yaşlı birimlerin depeolanma ortamlarını ve hidrokarbon potansiyellerini ortaya koymuşlardır.

2. MATERYAL VE METOD

Çalışma alanı, Doğu Toroslar'ın batı kesiminde yer alan, Adana iline bağlı Saimbeyli yöresinin güney kesimini kapsamaktadır (Gürleşen-Tülü). Çalışma alanı Doğu Toroslar'ın batı kesiminde, Gaziantep M36 a1 ve a2 paftaları içinde yer almaktadır. Bu bölgede yapılan stratigrafik-petrografik çalışmalarla yedi farklı litostratigrafik birim ayırtlanmış ve incelenmiştir. Bu çalışma ile birimlerin stratigrafik özellikleri ile birlikte petrografik karakteristikleri belirlenerek çökeltme ortamları belirlenmeye çalışılmıştır. Bölgedeki yoğun tektonik ve deformasyonlar nedeni ile detaylı ölçülü kesit alımı yapılmamış, saha gözlemleri, güzergâh boyu traversleme ile harita alımı gerçekleştirilerek bunların üzerinden ünitelerin tahmini kalınlıkları belirlenmeye çalışılmıştır.

2.1. İnce Kesit Hazırlanması

Arazi çalışmasından sonraki laboratuvar aşamasında, örneklerin ince kesitleri, ince kesit

atölyesinde hazırlanmış ve petrografi analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

2.2. Petrografik Analizler

Dunham [17] sınıflamasına göre temelde tane destekli ve karbonat çamuru destekli karbonatlar için değişik adlandırmalar yapılmış ve birbirinden ayırt edilmiştir. Kristalin karbonatlar diyajenez süreçleri ile çökme dokuları gözlenmeyen veya tanınmayacak hale gelmiş olan, fakat granüllerin özelliklerinin veya genel şeklinin kısmen korunmuş olması durumunda granüllerin orijinine göre isimlendirilen kireçtaşları olarak kabul edilmektedir. Bağlantısı, çökme esnasında granüllerin (organizmalar tarafından) birbirleriyle bağlandığı kireçtaşlarıdır. Tanetaşı ise karbonat çamuru (mikrit) barındırmayan, çimentosuz veya çimentolu granüllerden oluşan kireçtaşlarıdır. İstiftaşı, granülleri birbiri ile temas eder vaziyette izlenen ve taneleri arası mikritik çamur ile bağlanmış kireçtaşları ile karakterize edilir. Vaketaşı, granülleri arası mikritik-sparitik çamur içinde heterojen dağılmış olarak gözlenen kireçtaşlarıdır. Güncel ve yaygın olarak Folk [16] sınıflaması karbonatlar için kullanılmaktadır. Bu sınıflamalarda ortokemler ve allokem kullanılmaktadır. Allokemler ise çökme havzası içerisinde çökme sürerken taşınarak depolanmış taneler olup litoklastlar çökme havzası dışından gelen mağmatik, metamorfik ve sedimanter kayaç parçaları olarak tarif edilmiştir. Organizma kalıntıları ise fosil, biyoklastlar ile temsil edilir. Yapılan çalışmalar sırasında örneklerin fosil içeriği ve tane bileşimi oranları doğrultusunda sınıflandırılması gerçekleştirildi, istiflerin çökme ortamları yorumlanmıştır.

3. STRATİGRAFİ

3.1. Paleozoyik

3.1.1. Armutludere Formasyonu (Oa)

Formasyon adı ilk kez Demirtaşlı [10] tarafından adlandırılmış olup daha sonra Özgül ve arkadaşları [3] ve Metin ve arkadaşları [11]'da aynı adı

kullanmıştır. Formasyon, çalışma alanında Saimbeyli ilçesi ile Gürleşen köyü arasında, K-G uzanımlı bir yüzlek sunar (Şekil 1). Armutludere formasyonu, çalışma alanı dışında alt dokanağında Kambriyen yaşlı Değirmentaş kireçtaşı üzerine uyumlu olarak gelmektedir [3] (Şekil 2). Armutludere formasyonu genel olarak az metamorfizma geçirmiş şistli şeyllerle, şeylden oluşmaktadır. Şeyller çoğunlukla lamine ve bazen yapraklanmalı olup, yapraklanma yüzeyleri oldukça parlaktır. Çok dağılgan ve dayanımsız olan bu kayaçlar bölgede geniş düzlükler meydana getirmişlerdir. Birimin mostrada en ayırt edici özelliği yer yer konkresyon yapıları sunmasıdır. Kilttaşları orta-ince katmanlı olup, genellikle koyu kahverenkli. Kilttaşları şistli şeyllerle ardalanma gösterir. Bünyesinde tabaka içi kıvrımlanmalar (Şekil 3a) sunmakta olup ayrıca iyi gelişmiş yapraklanma göstermektedir. Yalçınlar [12] Sultan dağlarında aynı birim içinde Graptolit, Trilobit ve brakiyopodlardan *Discina* sp. faunası tespit ederek birime Ordovisien-Silüriyen yaşını vermiştir. Armutludere formasyonunun, bir şelf ortamında depolanmış killi çökellerin depolanma sonrası düşük dereceli metamorfizmaya uğramasıyla oluştuğu düşünülmektedir.

3.1.2. Ayıtepesi Formasyonu (Da)

Ayıtepesi formasyonu, araştırma alanının batı kesiminde yaklaşık K-G uzanımlı bir hat boyunca yüzeylemektedir. Formasyon, Kabaktepe'den başlamakta, Alibey yaylası sırtı, Armenek sırtı, Kızılkaya sırtının kuzeyinde son bulmaktadır (Şekil 1). Formasyon Alibey yaylasında yüzeyletiği gibi Ordovisiyen yaşlı Armutludere formasyonu üzerine uyumsuz olarak gelmektedir. Birim üst dokanağında Yığıltepe formasyonu ile uyumsuz olup bazı bölgelerde ise Orta Devoniyen yaşlı Şafaktepe formasyonu ile tektonik dokanaklı olarak gözlenmektedir (Şekil 2). Çalışılan formasyon genel olarak kumtaşı-çamurtaşı-şeylkilli kireçtaşı ardalanmasından oluşmaktadır. Kumtaşları orta-kalın katmanlı olup genellikle koyu kahverenkli olarak gözlenmektedir. Çamurtaşları boz-koyu renkli ince katmanlı ve bazen lamine. Şeyller lamine, dağılgan, koyu

renkli ve fosilsiz olup kumtaşı ve kireçtaşı ile ardalanmalıdır. Killi kireçtaşları sarı-kahverenkli ve kendi içinde bol mikro kıvrımlıdır (Şekil 3b). İnce-orta katmanlı olan bu kireçtaşlarında Alt Devoniyen brakiyopodları gözlenmektedir. Formasyonun inceleme alanında kalınlığı yanal değişiklikler göstermesine karşın ortalama kalınlığı 430 metre olarak saptanmıştır. Demirtaşlı [10], Ayıtepesi formasyonunun tabanında bulunan kumlu killi kireçtaşı düzeyinde yer yer boyları 50 cm'ye varan *Orthoceras* sp. faunası tespit etmiş ve bu fosilleri içeren seviyeyi Armutludere formasyonu üzerine uyumsuz olarak gelen bir kılavuz olarak tanımlamıştır. Ayrıca formasyonu üst düzeylerine *Acrospirifer* sp., *Spirifer* cf. *undiferus* fosilleri saptamış olup Ayıtepesi formasyonunun yaşını Alt Devoniyen olarak belirlemiştir. Ayıtepesi formasyonunu oluşturan kaya türü ve fosil içeriği göz önüne alındığında, sıcak ve en fazla 200 m derinlikte, gel-git olaylarının etkili olduğu (subtidal) sığ denizel çökeltme ortamına işaret ettiği söylenebilir.

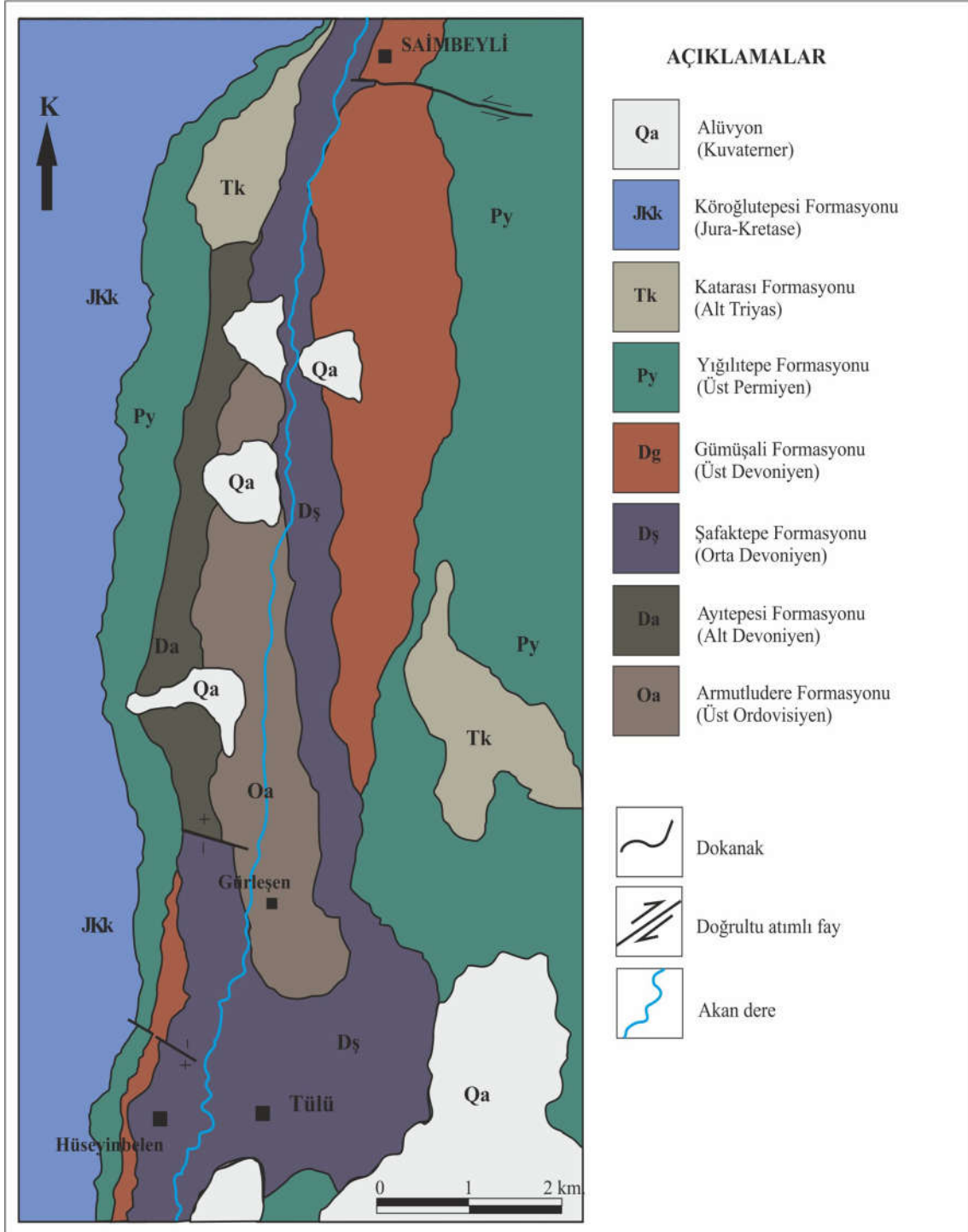
3.1.3. Şafaktepe Formasyonu (Dş)

Şafaktepe formasyonunun araştırma alanındaki yayılımı çok geniştir (Şekil 1). Batıda Dazlan Tepe, Yelibelen Tepe'nin doğu yamacı, güneyde Kaktık Tepe, Hüseyinbelen Mahallesi, Tülü, Domuz Tepe, Korkuyu Dere. Doğuda Kayabaşı Tepe, Kepez Kayası, Küçükkepez Kaya, Kuzeyde Hörç Dere, Saimbeyli'ye kadar devam etmektedir. Şafaktepe formasyonu, alt dokanağında Alt Devoniyen yaşlı Ayıtepesi formasyonu, üst dokanağında ise Üst Devoniyen yaşlı Gümüşali formasyonu ile uyumludur (Şekil 2). Şafaktepe formasyonunu oluşturan egemen kaya türü dolomitize kireçtaşı olarak gözlemlenmiştir (Şekil 3c). Bu kireçtaşları, boz-koyu gri ve bazen siyahımsı kahve renkli olup, çok iyi katmanlı ve kötü gelişmiş eklemlidir. Çatlaklar çoğunlukla kalsit damarları ile doldurulmuş olup bazen limonitleşme görülür. Katman kalınlığının yer yer 50-80 cm'ye kadar vardığı gözlenmiştir. Çok sert olan bu kireçtaşları bazen kuvarsitlerle arakatlıdır. Formasyon tabandan tavana doğru incelendiğinde en altta orta-kalın katmanlı

dolomitize kireçtaşı, üste doğru dolomitler ve son olarak en üstte kireçtaşlarının yer aldığı gözlenir. Formasyon en belirgin özelliği bazı yüzeylerinin bol miktarda *Amphipora* sp. içermesidir [13]. Şafaktepe formasyonunun inceleme bölgesindeki ortalama kalınlığı 780 metre olarak saptanmıştır. Şafaktepe formasyonu inceleme alanında sert topografya oluşturmaktadır. Yalçınlar [2], birimin, *Amphipora ramosa* ve *Thamnophyllum* sp. faunasına göre Orta Devoniyen yaşında olduğu belirlemiştir. Şafaktepe formasyonu, sıcak ve dalga enerjisinin etkin olduğu sınırlı dolaşımli şelf ortamı koşullarını yansıtmaktadır.

3.1.4. Gümüşali Formasyonu (Dg)

İncelenen birim genellikle çalışma alanının doğu kesimlerinde yüzeylemektedir. Özellikle Kayabaşı Tepe, Kızılkuyu Tepe, Yelibelen Sırtı, Yelibelen Tepe, Bağlar Sırtı'nın batı yamacı, Saimbeyli'nin doğusunda kalan bölgelerde mostralar vermektedir. Gümüşali formasyonu, altta Orta Devoniyen yaşlı Şafaktepe formasyonu ile uyumlu olup, Yığılítepe formasyonu ile ise uyumsuzdur. Birimi oluşturan egemen litoloji, kumtaşı-şeyl-kireçtaşı ardalanmasından oluşmaktadır (Şekil 6). Kumtaşları genellikle koyu kahverenkli, ince-orta katmanlı, kötü gelişmiş eklemlidir. Şeyller çok ince katmanlı, laminalı, oldukça yumuşak ve kahverenkli olarak gözlenmektedir. Kireçtaşları ise koyu kül renkli, ince-orta katmanlı, kötü gelişmiş eklemlidir. Formasyonun arazi gözlemlerine göre tahmini kalınlığı 470 metre civarındadır. Kireçtaşları bol miktarda mercan ve brakiyopod içermektedir. Birime ait kireçtaşları içinde *Disphyllum* fosili tespit edilmiştir (Şekil 3d). Özgül ve arkadaşları [3] Gümüşali formasyonunun çeşitli düzeylerinden alınan kayaç örneklerinde *Spinatrypa* sp., *Crytospirifer* sp., *Cyphoterorhynchus* sp., *Hexagonaria* sp., *Zaphrentis* sp., *Thamnopora* sp. fosilleri saptamış olup birimin yaşını Üst Devoniyen olarak belirtmişlerdir. Formasyonu oluşturan kaya türü ve fosil içeriği değerlendirildiğinde birimin sahile yakın, sığ ve sıcak bir ortamda çökeldiği söylenebilir.



Şekil 1. İnceleme alanının basitleştirilmiş jeoloji haritası

P A L E O Z O Y İ K		M E S O Z O Y İ K		SEN- ZOYİK	ÜST SİSTEM	
ORDOVİSİYEN	PERMİYEN	TRİYAS	JURA	KRETASE	SİSTEM	
Üst	Üst	Alt	Üst	Alt	SERİ	
Armutludere	Yığılutepe	Katarası	Köroğlutepe		FORMASYON	
540	270	220	130		ORT. KALINLIK (metre)	
Oa	Py	Tk	Jkk		Simge	
					LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
						Alüvyon ve yamaç molozu
						Kireçtaşı
						Kumtaşı-marn-kireçtaşı ardalanması
						Kireçtaşı
						Kumtaşı-şeyl-kireçtaşı ardalanması
						Dolomitize kireçtaşı
						Kumtaşı-çamurtaşı-şeyl-kireçtaşı ardalanması
						Şistly Şeyl-kiltaşı

Şekil 2. Çalışma alanında yüzeyleyen birimlerin geliştirilmiş stratigrafik sütun kesiti

3.1.5. Yığılítepe Formasyonu (Py)

Birim çalışma alanının batısında Alibeykayası, Selatak dere, Cıgırkıpınar dere, Payapaça dere, Hörç derenin üst kısımlarında, Kayabaşı tepe, Kocalan dere ve Derinderenin üst kısımlarında, doğuda ise Alak tepe, Armutluseki sırtı, Bebek sırtı, Göl tepe, Çağal tepe, Göyntükkır tepe, Geyik tepe, Übet tepe, Karatepe sırtı arasında kalan alanda yüzelemektedir (Şekil 1). Yığılítepe formasyonu çalışma alanının batısında gözleendiği gibi Üst Devonyen yaşlı Gümüşali formasyonu üzerinde; Alteli burun tepe, Alak tepe, Karatepe sırtında gözleendiği gibi Orta Devonyen yaşlı Şafaktepe formasyonu üzerinde uyumsuz olarak yer alır. Üst dokanağında ise Göle tepe, Delikkaya tepe, Kızıldölek tepede gözleendiği gibi Triyas yaşlı Katarası formasyonu ile uyumludur (Şekil 2). Yığılítepe formasyonunu oluşturan egemen kaya türü kireçtaşıdır. Kireçtaşlarının yüzeyi koyu gri, teze yüzeyi ise siyahtır. Orta-kalın katmanlı kötü gelişmiş eklemli ve çatlaklıdır (Şekil 3e,f). Formasyonun kalınlığı saha gözlemleri ile tahmini 300-350 metredir. Kutrman [5] kireçtaşlarında bulunan *Mizzia* sp., *Hemigordius* sp., *Globivalvulina* sp., *Permocalculus* sp. faunasına göre yaşını Geç Permiyen olarak belirlemiştir. Formasyonu oluşturan kaya türü ve fosiller incelendiğinde en az 270 metre derinliğe kadar inebilen, sıg, sıcak bir lagün ortamını karakterize ettiği anlaşılmaktadır.

3.2. Mesozoyik

3.2.1. Katarası Formasyonu (Tk)

Formasyon çalışma alanının doğusunda Göl tepenin batı yamacı, Kayabaşı tepe, Maltepe, Kızıldölek tepe, Delikkaya tepe, batıda ise Ağçapınar dere ve Saimbeyli'nin batı kesimlerinde mostra vermektedir. Katarası formasyonu Delikkaya tepede ve Kayabaşı tepede gözleendiği gibi alt dokanağında Permiyen yaşlı Yığılítepe formasyonunun üzerinde uyumlu (Şekil 2), Ağçapınar derede ise alt dokanağı Şafaktepe formasyonu ile faylıdır. Katarası formasyonu kumtaşı, marn, killi kireçtaşı araldanmasından

oluşmaktadır. Kumtaşları; alacalı renkli, orta-ince katmanlı, katman kalınlığı 5-10 cm, kötü gelişmiş eklemli olup, taneler az yuvarlak ve kötü boylanmış kuvarstan oluşmaktadır. Kumlu-killi kireçtaşları; sarımsı kahverenkli, dağılgan, yumuşak, orta-ince katmanlı ve eklem takımlıdır. Çalışma alanında formasyonun tahmini kalınlığı 220 metredir. Çalışma alanından derlenen kayaç numunelerinde karakteristik fosil içeriği tespit edilmemiştir. Metin ve arkadaşları [11] çalışma alanının kuzey kesimlerinde aynı formasyonun çeşitli seviyelerinde Erken Triyas yaşına işaret eden fosiller (*Glomospira* sp., *Cyclogyra* sp., *Nodosaria* sp.) tespit etmişlerdir. Katarası formasyonunu oluşturan kaya türü ve ince kabuklu brakiyopodlar göz önüne alınırsa sıg denizel ve dalga tabanı altında çöklediği söylenebilir.

3.2.2. Köroğlutepesi Formasyonu (JKk)

Birim çalışma alanının sadece batısında Kızılbaz tepe, Tavşancı tepe, Gökyumru tepe, Kel Yagup kayası, Meydancık mevki, Akaya tepe, Mihli tepe, Hasandede tepe, Hörç tepe, Doğantaş tepe, Ağçapür tepe ve çevresinde yüzelemektedir. Köroğlutepesi formasyonu Permiyen yaşlı Yığılítepe formasyonu üzerine açısız uyumsuz olarak gelir. Köroğlutepesi formasyonunu oluşturan egemen kaya türü kireçtaşıdır. Genellikle gri, bej, siyah ve beyaz olan bu kireçtaşlarının en belirgin özelliği tabakalara paralel 10-20 cm kalınlıkta silis bantları içermeleridir. Katmanlanmanın çok düzgün olduğu birim çok kötü gelişmiş eklemlidir. Oldukça sert ve 1 metreye varan katman kalınlığına sahip bu kireçtaşlarının çatlakları kalsitle dolu olup sık tabaka içi kıvrım yapıları içermektedir. Karstik yapılar da içeren formasyonun inceleme alanındaki kalınlığı yaklaşık olarak 130 metre olarak tahmin edilmektedir. Abdüsselamoğlu [14] birimden derlediği *Orbitolina* sp., *Cyclamina* sp., *Textularidea* sp., *Trocholina* sp., *Valvulina* sp., *Endothura* sp. ile Gastropoda faunasına göre formasyonun yaşını Geç Jura- Erken Kretase olarak belirlemiştir. Alg ve foraminiferce zengin olan Köroğlutepesi formasyonunun sıg, sıcak bir self ortamında depolandığı anlaşılmaktadır.

4. PETROGRAFI

Çalışma alanında Gürleşen-Tülü ve Saimbeyli arasında yüzeyleyen birimlerden derlenen örneklerin sedimanter petrografik incelemesi yapılmış ve aşağıda sunulmuştur. Bu petrografik çalışmalarda kırıntılı kayaçların tanımlamasında Pettijohn ve arkadaşları [15], karbonatlı kayaçların tanımlamasında ise Folk [16] ile Dunham [17] sınıflandırmalarından yararlanılmıştır. Çalışmada, Ayıtepesi formasyonundan 4 (A.T.), Şafaktepe formasyonundan 5 (Ş.T.), Yığılıtepe formasyonundan 2 (Y.T.), Katarası formasyonundan 2 (K.T.A.) ve Köroğlutepesi formasyonundan 2 (K.R.T.) adet olmak üzere toplam 15 kaya türü ayırtlanmış ve tanımlanmıştır.

A.T.-1) Litik Vake: Kayaç içerisinde %40 kuvars, %5 feldspat ve %55 oranında kayaç parçası bulunmaktadır (Şekil 4a). Taneler killi çimento bağlayıcı (% 10-15 oranında) ile bağlanmıştır. İçerdiği kuvars oranı %50' den az olduğu için kayaç mineralojik olarak olgunlaşmamışken, taneler çok iyi yuvarlaklaşmadığı için dokusal olarak yarı olgun olarak tanımlanmıştır. Yer yer glokonit mineralleri gözlenmektedir.

A.T.-2) Çamurtaşı: Kayaç killi karbonatlardan oluşur. Kayaçtaki %9-10 kadar ince silt ve kum boyu parçacıkların çoğunluğu kuvars ve feldspatlardan oluşur. Düzensiz olarak gelişen mikro çatlaklar kalsit dolguludur (Şekil 4b).

A.T. -3) İstif taşı-Sık paketlenmiş İntrabiyomikrit: İncelenen kesit içerisinde foraminifer fosillerine rastlanmıştır (Şekil 4c). Kayaç allokem olarak intraklast ve biyoklastlardan oluşurken, bu taneler mikritik bağlayıcı ile bağlanmıştır. Kayaç içerisinde dolomit gözlenmemekte olup kalsit kristalleri içermektedir. Çatlaklar birbirini dike yakın açılar ile kesmekte olup kalsit dolguludur. Kaya sınıflaması Folk [11]'e göre sık paketlenmiş intrabiyomikrit olarak, Dunham [15]' ye göre istif taşı olarak sınıflandırılmıştır.

A.T.-4) Kuvars Vake: İçerisinde %90 kuvars, %5 feldspat, %5 kayaç parçası bulunmaktadır. Taneler birbirine kil çimento ile bağlanmış olup az miktarda opak mineral de bulunmaktadır (Şekil 4d). Kayaç parçaları metamorfik (gnays) parçalarından oluşmuştur. Kuvars miktarı %50'den fazla olduğundan mineralojik olarak olgun, taneler çok iyi yuvarlaklaşmadığından dokusal olarak yarı olgundur. Düzensiz gelişmiş çatlaklar kalsit dolguludur.

Ş.T.-1) Vake taşı-Pelintramikrit: Kayaç içerisinde fosil gözlenmemektedir. Taneler intraklast, pellet ve ekstraklastlardan oluşmaktadır. İntraklastlar kalsit ve mikritten meydana gelmiş olup, ekstraklastlar ise kuvars tanelerinden ibarettir. Taneler mikrit çimento ile bağlanmış olup, yer yer sparit çimentoda gözlenmiştir. Kayaç düzensiz çatlaklı ve çatlaklar kalsit dolguludur (Şekil 4f). Kaya sınıflaması Folk [15]'a göre seyrek paketlenmiş pelintramikrit, Dunham [17]'a göre ise vake taşı olarak sınıflandırılmıştır.

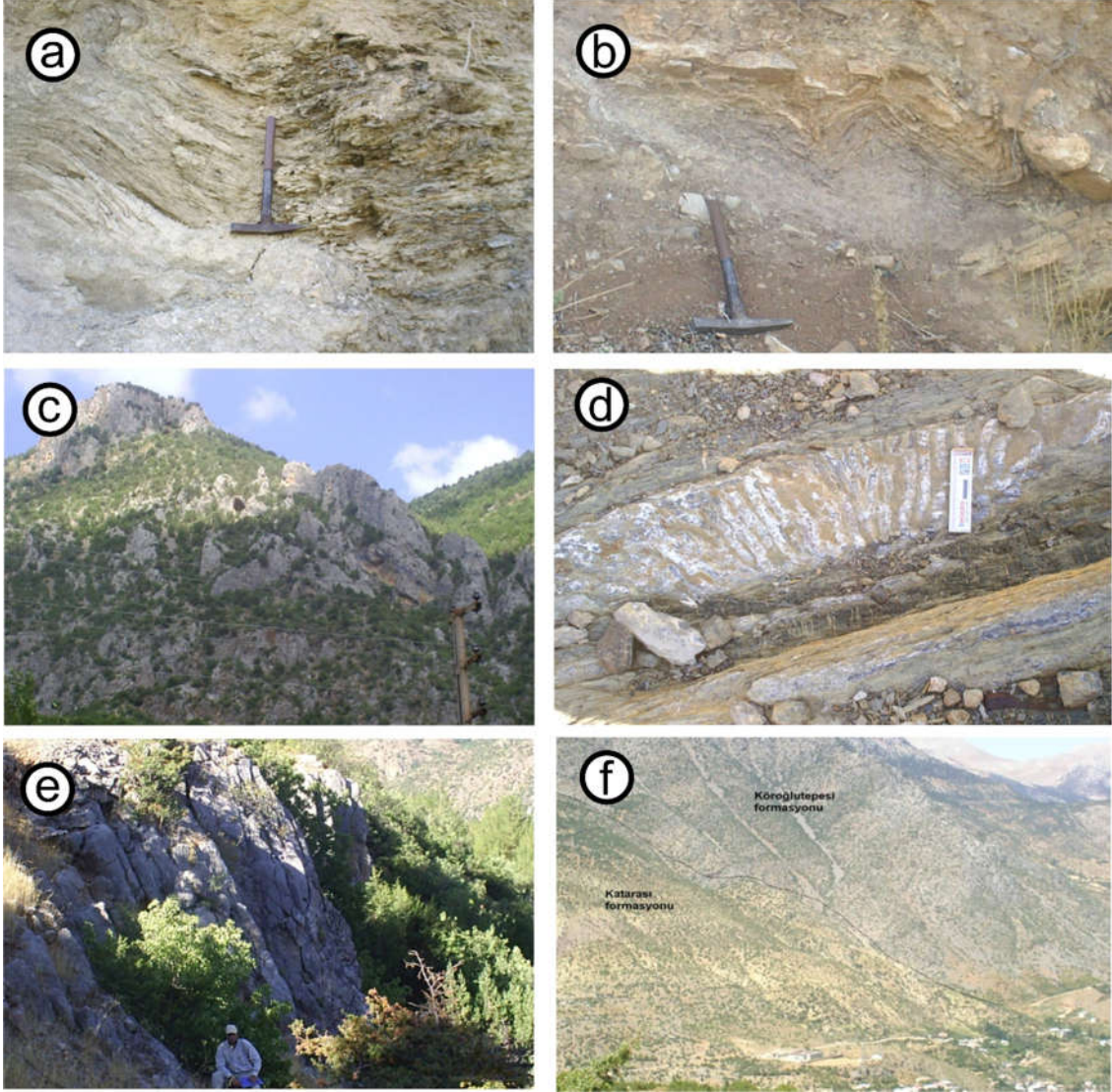
Ş.T.-2) Çamurtaşı-Dismikrit: Kesit içerisinde fosile rastlanmamıştır. Kayaç %5-6 intraklast içermekte olup, tamamen kireç çamurundan oluşmuştur. %90 oranında mikrit, %10 sparit bulundurmaktadır. İntraklastlar kalsit tanelerinden ibaret olup iri dolomit kristalleri gözlenmektedir (Şekil 4g). Kayaç düzensiz çatlaklı ve çatlaklar kalsit dolguludur. Kaya sınıflaması Folk [16]'a göre dismikrit (mikrit), Dunham [17]'a göre ise çamurtaşı olarak sınıflandırılmıştır.

Ş.T.-3) Vake taşı-Pelintramikrit: Kayaç içerisinde fosile rastlanmamıştır. Taneler intraklast ve pelletlerden oluşmuştur. İntraklastlar kalsit ve mikritten meydana gelmiştir. Taneler mikrit çimento ile bağlanmış olup, yer yer sparit çimentoda gözlenmiştir. Kayaç düzensiz çatlaklı ve çatlaklar kalsit dolguludur. Kaya sınıflaması Folk [16]'a göre Seyrek paketlenmiş pelintramikrit, Dunham [17]'a göre ise vake taşı olarak sınıflandırılmıştır.

Ş.T.-4) Tane taşı-İntrasparit: Kesit içerisinde fosile rastlanmamıştır. Kayaç intraklastlardan

meydana gelmiş olup, bu tanelerin %90'ı dolomit, %10'u ise kalsitten meydana gelmiştir. Taneler sparit çimento ile bağlanmış olup az miktarda

mikrit çimentoda gözlenmiştir. Birbirine paralel çatlaklar demiroksit sıvamaalıdır.

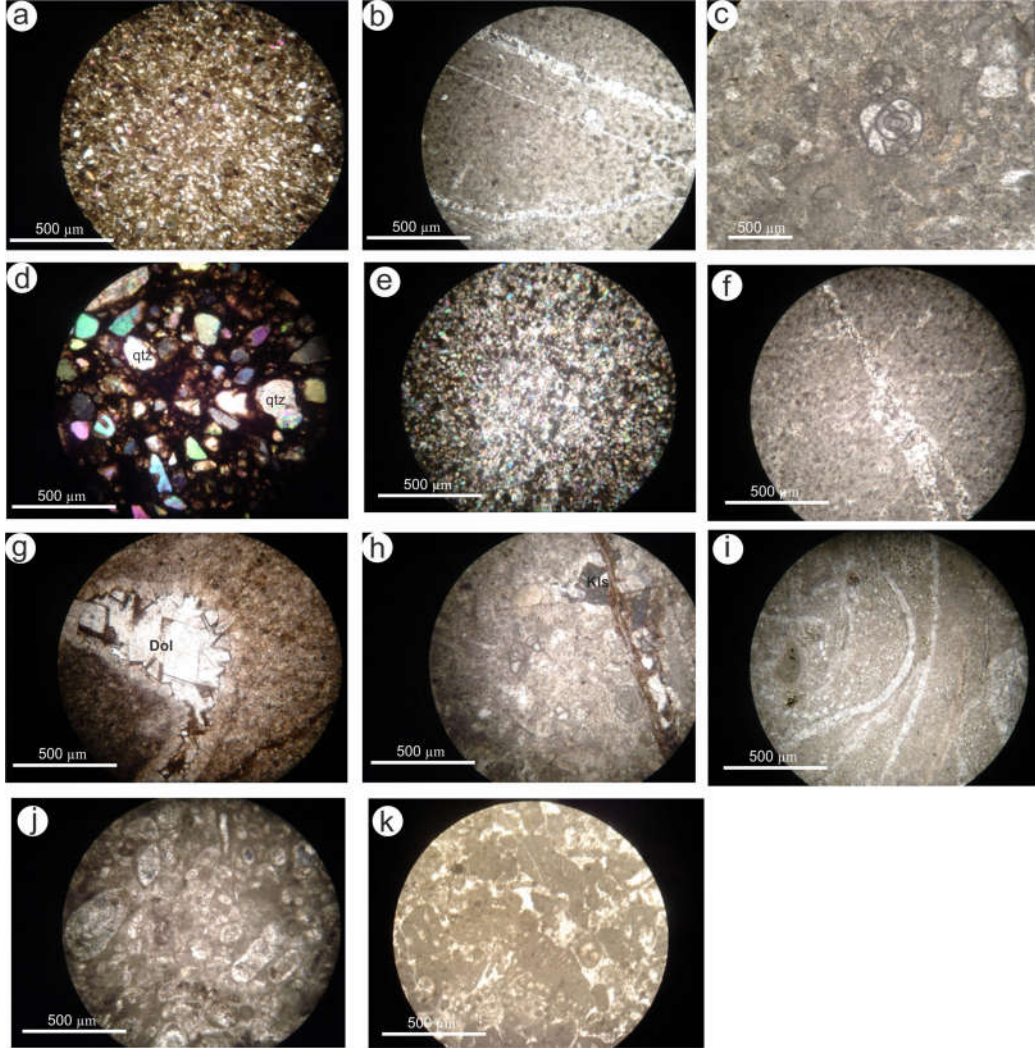


Şekil 3. a) Armutludere formasyonuna ait şistler içerisinde gözlenen mikro kıvrımlar; b) Ayıtepesi Formasyonuna ait kireçtaşlarında gözlenen mikro kıvrımlar; c) Şafaktepe formasyonuna ait bir görünüm; d) Gümüşali formasyonuna ait kireçtaşı içerisinde gözlenen *Disphyllum* fosili; e) Yığılıtepe formasyonuna ait orta-kalın katmanlı kireçtaşlarının arazi görünümü; f) Yığılıtepe formasyonu ile Koroğlutepesi formasyonun birbiri ile olan ilişkisi

Kaya sınıflaması Folk [16]'a göre bağlanmamış İntrasparit, Dunham [17]'a göre ise tane taşı olarak sınıflandırılmıştır.

Ş.T.-5) Tane taşı-İntrasparit: Kayaç içerisinde fosile rastlanmamıştır. Kesit intraklast içermekte olup, bunlar kalsit kristallerinden oluşmuştur.

Tanelerin tamamı mikrosparitik karbonat çimento ile tutturulmuştur. Düzensiz çatlaklar kalsit dolguludur. Kaya sınıflaması Folk [16]'a göre bağlanmamış intrasparit, Dunham [17]'a göre tanetaşı olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 4. a) Litik Vake; ince taneli kum boyu bileşenler genellikle kil çimento ile tutturulmuştur (Çift Nikol), b) Çamurtaşı içerisinde gözlenen mikro çatlak ve kalsit dolgu (Tek Nikol), c) Ayıtepesi formasyonundaki kireçtaşı parçalarında gözlenen foraminiferler (Tek Nikol), d) Kuvars Vake; kil çimento ile tutturulmuş köşeli-yarıköşeli kuvars taneleri gözlenmekte (Çift Nikol), e) Litik vake; İnce-orta kum boyu bileşenler genellikle kil çimento ile bağlanmıştır (Çift Nikol), f) Şafaktepe formasyonuna ait kireçtaşlarında gözlenen kalsit dolgulu çatlaklar (Tek Nikol), g) Şafaktepe formasyonuna ait kireçtaşlarında gözlenen dolomit kristalleri (Tek Nikol), h) Yığılıtepe formasyonundaki kireçtaşlarında mikritik çimento ile tutturulmuş allokemler (Tek Nikol), i) Katarası formasyonundaki kireçtaşlarında gözlenen lamellibrans kavkısı (Tek Nikol), j) Köroğlu formasyonunda mikrit çimento ile tutturulmuş taneler (Tek Nikol), k) Köroğlu formasyonunda mikrosparitik çimento ile tutturulmuş foraminifer fosilleri (Tek Nikol)

Y.T.-1) İstif taşı- İntrabiyomikrit: Kesit içerisinde Gastropod, Alg ve Lamellibrans kavkısına rastlanmıştır. Taneler intraklast ve biyoklastlardan meydana gelmiş olup mikritik karbonat çamuru ile tutturulmuştur. Kayaçta dolomit gözlenmemekte olup intraklastlar genellikle kalsit kristallerinden ibarettir (Şekil 4h). Düzensiz çatlaklar kalsit dolguludur. Kaya sınıflaması Folk [16]'a göre sık paketlenmiş intrabiyomikrit, Dunham [17]'a göre ise istif taşı olarak sınıflandırılmıştır.

Y.T.-2) Vake taşı-İntrapelmikrit: Kayaç içerisinde fosile rastlanmamıştır. Kesit intraklast ve pellet tanelerinden meydana gelirken bu taneler mikritik karbonat çamuru ile tutturulmuştur. İntraklastlar kalsit kristallerinden oluşmuştur ve dolomit kristali gözlenmektedir. Birbirine paralel gelişen çatlaklar kalsit dolguludur. Kaya sınıflaması Folk [15]'a göre seyrek paketlenmiş intrapelmikrit, Dunham [17]'a göre vake taşı olarak sınıflandırılmıştır.

K.T.A.-1) Kuvars Vake: Kayaç içerisinde %95 kuvars, %5 kayaç parçası bulunmaktadır. Taneler birbirine demiroksit çimento ile bağlanmış olup az miktarda opak mineral bulunmaktadır. Taneler çok küçük olduğundan kayaç parçaları tanımlanamamıştır ve kayaç ince taneli kum taşı olarak sınıflandırılmıştır.

K.T.A.-2) Tane taşı-İntrabiyosparit: Kayaç içerisinde intraklastlar ve biyoklastlar, sparit çimento ile bağlanmıştır. İntraklastlar kalsit kristallerinden oluşurken dolomit kristalleri de gözlenmiştir. Kesit içerisinde lamellibrans fosil kavkularına rastlanmıştır (Şekil 4i). Çatlaklar düzensiz olup kalsit dolguludur. Kaya sınıflaması Folk [16]'a göre boylanmamış intrabiyosparit, Dunham [17]'a göre tane taşı olarak sınıflandırılmıştır. Yer yer demiroksit sıvamarları gözlenmektedir.

K.R.T.-1) İstif taşı-Biyomikrit: Kesit içerisinde bol miktarda alg fosiline rastlanmıştır. Kayaç intraklast ve biyoklastlardan oluşmuş olup, bu taneler mikritik karbonat çamuru ile birbirine bağlanmıştır (Şekil 4j). İntraklastlar kalsit kristallerinden oluşmuştur. Düzensiz çatlaklar

kalsit dolguludur. Az miktarda mikrospritik bağlayıcı oranı düşük olduğundan adlamaya dahil edilmemiştir. Kaya sınıflaması Folk [16]'a göre sık paketlenmiş intrabiyomikrit, Dunham [17]'a göre istif taşı olarak sınıflandırılmıştır.

K.R.T.-2) İstif taşı-pelintrabiyosparit: Kayaç içerisinde gastropod ve foraminifer fosillerine rastlanmıştır. Kayaç pellet, intraklast ve biyoklastlardan oluşmuş olup sparitik karbonat çamuru ile bağlanmıştır (Şekil 4k). İntraklastların %95'i kalsit, %5'i dolomit kristallerinden meydana gelmiş olup dolomit oranı dikkate alınarak sınıflamaya dahil edilmemiştir. Birbirine paralel gelişmiş çatlaklar kalsit dolguludur. Kaya sınıflaması Folk [16]'a göre pelintrabiyosparit, Dunham [17]'a göre ise istif taşı olarak sınıflandırılmıştır.

5. SONUÇLAR

Saimbeyli-Gürleşen bölgesinde Devoniyen yaşlı birimler ve Geç Permiyen ile Erken Triyas yaşlı birimler birbirleri ile uyumlu olup, Ordovisiyen ile Devoniyen, Erken Triyas ile Geç Jura-Erken Kratese ve Kuvaterner yaşlı birimlerin ise birbirleri ile uyumsuz oldukları gözlenmiştir. Birimlerin çökme ortamları ise yaşlıdan gence doğru: Armutludere formasyonu'nun bir şelf ortamında depolanmış killi çökellerin düşük dereceli metamorfizmaya uğramasıyla oluştuğu, Ayıtepesi formasyonunun ise sıcak, gel-git etkili ve en fazla 200 m derinlikte bir sığ denizel ortamında çökeldiği belirlenmiştir. Şafaktepe formasyonu, sıcak ve dalga enerjisinin etkin olduğu sınırlı dolaşımli şelf ortamı koşullarına işaret ederken, Gümüşali formasyonunun ise muhtemelen sığ ve sıcak bir sublitoral ortamda çökeldiği anlaşılmaktadır. Yığılutepe formasyonunun sığ, sıcak bir lagün ortamını karakterize ettiği söylenebilir. Katarası formasyonunu oluşturan kaya türü ve ince kavkılı brakiyapod içeriği göz önüne alındığında sığ denizel ve dalga tabanı altında çökelmiş olabileceği. Köroğlutepesi formasyonu'nun litolojik özelliklerine göre sığ, sıcak bir şelf ortamında oluştuğu düşünülmektedir. Bölgeden derlenen numunelerden hazırlanan karakterize 21 adet ince kesit üzerinde petrografik çalışmalar sonucunda kayaçların çoğunun

mikrospartitik kireçtaşı olduğu ortaya konulmuştur. Sparitik çimento genellikle kayacın sıg, sıcak ve dalgasız bir sedimantasyon ortamında çökeldiğini göstermektedir. Mikritik kayalar ise durgun-sakin deniz ortamını karakterize etmektedir. Kumtaşlarındaki bağlayıcı malzeme miktarının fazla olması, tanelerin yuvarlaklığının ve boylanmanın kötü olması, kırıntılarının düşük enerjili bir ortamda işlendiğini ve kum boyu bileşenlerin iyi yıkanmadığını göstermektedir.

6. KAYNAKLAR

1. Blumenthal, M.M., 1944. Kayseri ile Malatya Arasındaki Bölümün Permo-karbonifer Arazisi. MTA Dergisi, 1/31, 105.
2. Yalçınlar, İ., 1955. Structures Geologiques de la Chaîne du Taurus Dans la Region de Feke-Saimbeyli, İstanbul Üniv. Jeol.Enst. Rece. (Inst. Ed.) No: 13 (1970-71) 55-56.
3. Özgül, N., Metin, S., Göğler, İ., Bingöl, İ., Baydar, O., 1973. Tufanbeyli Dolayının Kambriyen Tersiyer Kayaları. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 16(1), 82-101.
4. Tutkun, S.Z., 1989. Saimbeyli (Adana) Yöresinin Tektonik Özellikleri. Jeoloji Mühendisliği, 34-35, 57-63.
5. Kurtman, F., 1978. Geology and Tectonic Characteristics of the Gürün Area. MTA Dergisi, 91, 1-12.
6. Wehrmann, A., Yılmaz, İ., Yalçın, M.N., Wilde, V., Schindler, E., Weddige, K., Saydam, G.R., Ozkan, R., Nazik, A., Nalcioglu, G., Kozlu, H., Karshioğlu, O., Jansen, U., Ertug, K., Brocke, R., Bozdoğan, N., 2009. Devonian Shallow-water Sequences from the North Gondwana Coastal Margin (Central and Eastern Taurides, Turkey): Sedimentology, Facies and Global Events, Gondwana Research, 17(2-3), 546-560.
7. Göncüoğlu, M.C., 1997: Distribution of Lower Paleozoic Units in the Alpine Terranes of Turkey. Paleogeographic Constrains in: Göncüoğlu, M.C. and Derman, A.S. (Eds), Lower Paleozoic Evolution in Northwest Gondwana, Turkish Assoc. Petrol. Geol., Spec. Publ., No: 3, 13-24, Ankara.
8. Yanev, S., Göncüoğlu, M.C., Gedik, I., Lakova, I., Boncheva, I., Sachanski, V., Okuyucu, C., Özgül, N., Timur, E., Maliakov, Y., Saydam, G., 2006. Stratigraphy, Correlations and Palaeogeography of Palaeozoic Terranes of Bulgaria and NW Turkey: a Review of Recent Data, in A.H.F. Robertson and D. Mountrakis (eds.) Tectonic Development of the Eastern Mediterranean Region, Geological Society, London, Special Publications, 260, 51-67.
9. Yurtsever, Ş., Bora, G., Demirel, H.İ., 2000. Depositional Environment and Hydrocarbon Source Rock Potential of the Upper Devonian-Triassic Sequence of the Aladağ Unit Middle Taurids, Turkey. Geological Bulletin of Turkey, 43(1), 33-57.
10. Demirtaşlı, E., 1967. Pınarbaşı- Sarız- Mağara İlçeleri Arasındaki Sahanın Litostratigrafi Birimleri ve Petrol İmkanları. M.T.A Raporu:4389 (yayınlanmamıştır).
11. Metin, S., 1983. Doğu Toroslarda Derebaşı (Develi) Armutalan ve Gedikli (Saimbeyli) Köyleri Arasında Jeolojisi, Doktora Tezi, İ.Ü. Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Müh. Bölümü, 362, İstanbul.
12. Yalçınlar, İ., 2012. Çukurova Fırat Arasındaki Torosların Morfo-strüktürel Özellikleri. Coğrafya Dergisi, 0(7).
13. Tutkun, S.Z., 1984. Saimbeyli (Adana) Yöresinin Stratigrafisi, Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, Seri-A, Yerbilimleri 1(1), 31-44.
14. Abdüsselamoğlu, Ş., 1958. Yukarı Seyhan Bölgesinde Doğu Torosların Jeolojik Etüdü. M.T.A. Rapor No:2668 (yayınlanmamıştır).
15. Pettijohn, F.J., Potter, P.E., Siever, R., 1987. Sand and Sandstone. New York, NY, USA: Springer.
16. Folk, R.L., 1962. Spectral Subdivision of Limestone Types, Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem. 1, 62-84.
17. Dunham, R.J., 1962. Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Textures: Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem. 1, 108-121.

Fonksiyonel Derecelenmiş Malzemeli Kirişlerin Sönümlü ve Sönümsüz Zorlanmış Titreşim Analizi

Timuçin Alp ASLAN^{*1}, Ahmad Reshad NOORI², Beytullah TEMEL¹

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

²İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

Geliş tarihi: 27.05.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Bu çalışmada, kesit yüksekliği boyunca fonksiyonel olarak derecelendirilmiş (FD) malzemeli kirişlerin çeşitli dinamik yükler altında zorlanmış titreşim davranışı üzerine bir araştırma yapılmıştır. Farklı sınır koşulları, uzunluk-yükseklik (L/h) oranları ve malzeme değişim katsayılarının Euler-Bernoulli ve Timoshenko kirişlerinin sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşimleri üzerindeki etkileri de parametrik olarak incelenmiştir. FD malzemeli çubukların davranışını idare eden hareket denklemleri, minimum toplam enerji prensibi yardımıyla elde edilmiştir. Elde edilen kanonik diferansiyel denklemler, Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi (TFY) yardımıyla Laplace uzayında sayısal olarak çözülmüştür. Viskoelastik malzeme durumunda Kelvin tipi sönüm modeli kullanılmıştır. Bu modelde elastik sabitler, elastik-viskoelastik analogi ile Laplace uzayındaki kompleks karşılıkları ile değiştirilir. Önerilen yöntemin sonuçlarının doğruluğu, ANSYS sonlu elemanlar paket programının sonuçları ile karşılaştırılarak kanıtlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Fonksiyonel derecelenmiş malzeme; Tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi, Ters Laplace dönüşümü, Kelvin sönüm modeli

Damped and Undamped Forced Vibration Analysis of Beams Made of Functionally Graded Materials

Abstract

In this study, a research has been conducted on the forced vibration behavior of beams with functionally graded (FG) material along the height of the cross-section under various dynamic loads. The effects of different boundary conditions, length-height (L/h) ratios and material variation coefficients on damped and undamped forced vibrations of Euler-Bernoulli and Timoshenko beams are also examined parametrically. The equations of motion which govern the behavior of the beams with FG material have been obtained with the help of the minimum total energy principle. The canonical differential equations

*Sorumlu (Corresponding author) yazar: Timuçin Alp ASLAN, taslan@cu.edu.tr

obtained are solved numerically in the Laplace space with the aid of Complementary Functions Method (CFM). Kelvin type damping model is used in case of viscoelastic material. In this model, elastic constants are replaced by their complex counterparts in the Laplace space by means of the elastic-viscoelastic analogy. The accuracy of the results of the proposed method has been confirmed by comparing it with the results of the ANSYS finite element package program.

Keywords: Functionally graded materials, Complementary functions method, Inverse Laplace transform, Kelvin damping model

1. GİRİŞ

FD malzemeler, mekanik özellikleri bir noktadan diğer bir noktaya sürekli olarak değişen malzemelerdir. Farklı malzemelerin üstün özellikleri bir araya getirilerek oluşturulan FD kirişler, modern mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple FD kirişlerin çeşitli yüklemeler altında davranışı önem kazanmış ve bu konu üzerine birçok araştırma yapılmıştır.

Qian ve Ching [1], galerkin yöntemini kullanarak FD ankastre mesnetli kirişin dinamik analizini incelemiştir. Aydoğdu [2], basit mesnetli kalınlık boyunca FD kirişin serbest titreşimini çeşitli yüksek mertebeli ve klasik kiriş teorilerini kullanarak araştırmıştır. Hamilton prensibini kullanarak hareket denklemlerini elde edip, Navier yöntemi yardımıyla kirişin doğal titreşim frekanslarını bulmuştur. Li [3], FD kirişlerin dinamik davranışlarını araştırmak için yeni bir birleşik yaklaşım yöntemi ortaya koymuştur. Teorisinde, dördüncü dereceden kısmi diferansiyel denklemi türetmek problemin fiziksel niceliklerini bu denklemin çözümü yardımıyla elde etmiştir. Kirişin frekans denklemini belirleyerek serbest titreşim analizini yapmıştır. Sina ve arkadaşları [4], FD kirişlerin serbest titreşim frekanslarını hesaplamışlardır. Yanal normal gerilmelerin sıfır olduğu varsayımına dayanarak Hamilton prensibi yardımıyla hareket denklemlerini elde etmişlerdir. Analitik yöntemi kullanarak buldukları değerler ile farklı kiriş teorileri kullanılarak elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Civalek ve Kiracıoğlu [5], Timoshenko kirişinin serbest titreşim frekansını ayrık tekil konvolüsyon yöntemiyle hesaplamışlardır. Alshorbagy ve

arkadaşları [6], FD kirişin serbest titreşim analizini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Çeşitli sınır şartlarının, malzeme dağılımlarının ve kalınlık oranlarının kirişin dinamik karakteristiği üzerindeki etkilerini incelemiştir. Atmane ve arkadaşları [7], değişken kalınlıklı FD kirişlerin serbest titreşim analizini yapmışlardır. Malzeme için eksponansiyel değişim kabulü yapmışlardır. Anandrao ve arkadaşları [8], çalışmalarında Euler-Bernoulli kiriş teorisi ve Timoshenko kiriş teorisine dayanan iki ayrı sonlu eleman formülasyonu geliştirerek kirişlerin serbest titreşim frekanslarını bulmuşlardır. Sonlu elemanlar yönteminin denklem sistemini elde etmek için virtüel iş prensibini kullanmışlardır. Pradhan ve Chakraverty [9], kalınlık boyunca malzeme özellikleri değişen, farklı sınır şartlarına sahip FD kirişlerin serbest titreşim analizlerini, klasik ve birinci mertebeli kayma deformasyon kiriş teorilerine dayandırarak incelemiştir. Kiriş kesitlerinin yer değiştirme bileşenlerini gösteren deneme fonksiyonlarını, hesaplama kolaylığı için temel sınır koşullarını sağlayacak şekilde basit cebirsel polinom formlarında ifade etmişlerdir. Rayleigh-Ritz metodunu kullanarak temel denklemleri elde etmişlerdir. Demir ve Öz [10], viskoelastik sınır koşulları altında FD bir kirişin boyutsuz titreşim frekans parametrelerini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak hesaplamışlardır. Su ve Banerjee [11], kalınlık boyunca FD kirişlerin serbest titreşim frekanslarını dinamik rijitlik matrisini geliştirerek araştırmışlardır. Çalışmalarında, Wittrick-Williams algoritmasını çözüm tekniği olarak kullanmışlardır. Jing ve arkadaşları [12], düzgün yayılı yük etkisi altında FD kirişlerin titreşim analizi için merkezi sonlu hacim yöntemi ve Timoshenko kiriş teorisini

kombinasyonuna dayanan yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Analizlerinde farklı kayma düzeltme faktörlerinin etkisini incelemişlerdir. Avcar ve Alwan [13], Rayleigh kiriş teorisine göre türetilen denklemleri kullanarak FD kirişin serbest titreşim analizini yapmışlardır. Lee ve Lee [14], Euler-Bernoulli kirişlerinin serbest titreşim davranışlarını transfer matris metoduyla incelemişlerdir. Kirişin iki ucunda, sınır şartları arasında bir ilişki kurarak FD malzemeli kiriş için kesin transfer matrisini elde etmişlerdir. Turan ve Kahya [15], çalışmalarında, FD Timoshenko kirişlerin doğal frekanslarını Navier tipi çözüm yöntemini kullanarak elde etmişlerdir. Akbaş [16], FD konsol kirişin serbest titreşim davranışını ortotropik malzeme modeli kullanarak incelemiştir. Kalınlık boyunca FD kirişin titreşim analizi için düzlem parçalı sürekli ortam modeli ve sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Nam ve arkadaşları [17], birinci mertbe kayma deformasyon teorisine ve interpolasyon polinomlarına dayalı formülasyonların çözümü ile değişken kalınlıklı FD kirişlerin titreşim analizini yapmışlardır.

Bu çalışmada kullanılan TFY, daha önceki çalışmalarda birçok mühendislik mekaniği probleminin çözümünde etkin bir şekilde uygulanmıştır [18-28].

Yapılan literatür taramasında, FD kirişlerin serbest titreşimine ait pek çok çalışma bulunmuştur. Ancak, bu kirişlerin dinamik yükler altındaki sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşim analizi ile ilgili çalışmaların kısıtlı olduğu anlaşılmaktadır. Yazarların yapmış olduğu araştırmalarda, kalınlık boyunca FD malzemeli, Euler-Bernoulli ve Timoshenko kirişlerinin sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşim davranışını TFY ile inceleyen herhangi bir çalışmayla karşılaşılmaştır. Bu tür kirişlerin dinamik yükler etkisindeki davranışları, ilk defa bu çalışmada TFY ile analiz edilmiştir. Olayı idare eden kanonik denklemler, minimum toplam enerji prensibi ile elde edilmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı, kalınlık boyunca FD malzemeli kirişlerin dinamik yükler altında

beklenen davranışını belirlemenin yanı sıra, bu metodun etkin ve kolayca uygulanabilirliğini de göstermektir.

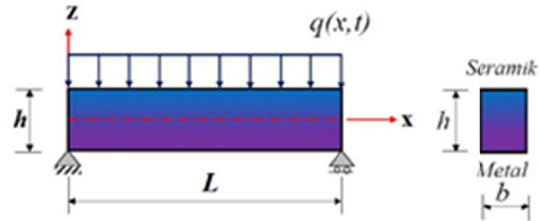
Bu çalışmada, Fortran dilinde bir bilgisayar programı yazılarak, Euler-Bernoulli ve Timoshenko kirişlerinin zorlanmış titreşim analizleri yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Şekil 1’de görülen FD malzemeli kirişin malzeme değişim fonksiyonu Eşitlik 1’de verilmektedir.

$$P(z) = (P_a - P_s) \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^{n_z} + P_s \quad (1)$$

Burada n_z malzeme değişim katsayısı, P_a ve P_s ise, sırasıyla alüminyum ve seramik bileşenlerine ait malzeme özellikleridir. Buna göre, elastisite modülü, $E(z)$ ve kütleli yoğunluk, $\rho(z)$ kiriş kalınlığı boyunca üstel olarak değişmektedir. Eksenel ve düşey yer değiştirmeler U_x ve U_z , şekil değiştirmeler ise ϵ_x ve γ_{xz} olup, bu büyüklükler.



Şekil 1. FD kiriş ve malzeme değişimi

Timoshenko kiriş teorisine için sırasıyla Eşitlik 2-4’de verilmektedir.

$$U_x = u(x,t) + z \theta(x,t) ; U_z = w(x,t) \quad (2)$$

$$\epsilon_x = \frac{\partial U_x}{\partial x} = u' + z \theta' \quad (3)$$

$$\gamma_{xz} = \theta + w' \quad (4)$$

İç kuvvetler ve gerilmeler arasındaki ilişkiler Eşitlik 5-7’de verilmektedir.

$$N_x = b \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_x dz = b \int_{-h/2}^{+h/2} E(z) (\epsilon_x) dz \quad (5)$$

$$M_x = b \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_x z dz = b \int_{-h/2}^{+h/2} E(z)(\epsilon_x) z dz \quad (6)$$

$$Q_z = b \int_{-h/2}^{+h/2} k_s \tau_{xz} dz = b \int_{-h/2}^{+h/2} k_s \frac{E(z)}{2(1+\nu)} \gamma_{xz} dz \quad (7)$$

Burada k_s , kayma düzeltme faktörü ve ν ise Poisson oranı olup, bu çalışmada sabit olarak alınmaktadır. Kesit tesirlerinin açık ifadesi ise Eşitlik 8-10'da verilmiştir.

$$N_x = b (A_{11}u' + A_{12}\theta') \quad (8)$$

$$Q_z = b A_{33}(\theta + w') \quad (9)$$

$$M_x = b (A_{12}u' + A_{22}\theta') \quad (10)$$

Bu denklemlerde görülen A_{11}, A_{12}, A_{22} ve A_{33} kesit rijitlik sabitlerini ifade etmekte olup, Eşitlik 11-14'de verilen integrallerden hesaplanmaktadır.

$$A_{11} = \int_{-h/2}^{+h/2} E(z) dz \quad (11)$$

$$A_{12} = \int_{-h/2}^{+h/2} E(z) z dz \quad (12)$$

$$A_{22} = \int_{-h/2}^{+h/2} E(z) z^2 dz \quad (13)$$

$$A_{33} = k_s \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{E(z)}{2(1+\nu)} dz \quad (14)$$

FD çubuklar için kinetik enerji ve toplam potansiyel enerji ifadeleri, Eşitlik 15 ve 16 integralleri ile tanımlanmaktadır.

$$\Pi_t = \int_0^1 \int_A \frac{1}{2} (\sigma_x \epsilon_x + \tau_{xz} \gamma_{xz}) - (p_x u + p_z w) dAdx \quad (15)$$

$$T = \frac{1}{2} \int_0^1 \int_A \rho(z) (\dot{U}_x^2 + \dot{U}_z^2) dAdx \quad (16)$$

Burada \dot{U}_x ve \dot{U}_z ise sırasıyla, kiriş üzerindeki bir noktanın hızının x (yatay) ve z (düşey) bileşenlerini ifade etmektedir.

Kinetik enerjiden potansiyel enerji çıkartılarak sistemin Langrangian'ı elde edilmekte ve Eşitlik 17'de verilmektedir.

$$L = T - \Pi_t \quad (17)$$

Hamilton Prensibi ise, Lagrangian'ın zamana göre integralinin varyasyonunu sıfır yapan varsayımdır.

$$\delta \int_{t_0}^{t_1} L dt = 0 \quad (18)$$

Gerekli büyüklüklerin impulsif bileşenleri ve türevleri teşkil edilerek, kalınlık boyunca FD malzemeli kirişlerin zorlanmış titreşim davranışını idare eden kısmi diferansiyel denklemler elde edilmiş ve Eşitlik 19-24'de verilmiştir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{A_{12}M_x - A_{22}N_x}{b(A_{12}^2 - A_{11}A_{22})} \quad (19)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{Q_z}{b k_s A_{33}} - \theta \quad (20)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{-A_{11}M_x + A_{12}N_x}{b(A_{12}^2 - A_{11}A_{22})} \quad (21)$$

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} = -p_x + I_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + I_1 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (22)$$

$$\frac{\partial Q_z}{\partial x} = -p_z + I_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (23)$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} = Q_z + I_1 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + I_2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (24)$$

Burada I_0, I_1 ve I_2 , kütleli atalet momentlerini temsil etmektedir. Euler-Bernoulli kiriş teorisi kullanıldığında, Eşitlik 20'deki $\frac{Q_z}{b k_s A_{33}}$ terimi

ihmal edilecektir. Sönümlü zorlanmış titreşim durumunda Kelvin tipi viskoz sönüm modeli, $E_v = E(1+g_s)$ kullanılmıştır (bkz.[29-31]). Burada g_s , sönüm oranıdır. Eşitlik 19-24'de sıfır başlangıç şartları altında Laplace dönüşümü alındığında, sistem hareket denklemleri dönüşmüş uzayda adi diferansiyel denklem takımı haline gelmektedir. Böylece, FD malzemeli kirişlerin zorlanmış titreşim davranışını idare eden adi diferansiyel denklem takımı, kanonik formda elde edilmektedir.

Eşitlik 25-30'da $(\bar{\cdot})$ ile gösterilen terimler, ilgili büyüklüklerin Laplace dönüşümünü belirtmektedir. s , Laplace parametresi olup,

kompleks bir sayıdır. Eşitlik 25-30 matris formunda aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\frac{d\bar{u}}{dx} = \frac{A_{12}\bar{M}_x - A_{22}\bar{N}_x}{b(A_{12}^2 - A_{11}A_{22})} \quad (25)$$

$$\frac{d\bar{w}}{dx} = \frac{\bar{Q}_z}{b k_s A_{33}} - \bar{\theta} \quad (26)$$

$$\frac{d\bar{\theta}}{dx} = \frac{-A_{11}\bar{M}_x + A_{12}\bar{N}_x}{b(A_{12}^2 - A_{11}A_{22})} \quad (27)$$

$$\frac{d\bar{N}_x}{dx} = -\bar{p}_x + I_0 s^2 \bar{u} + I_1 s^2 \bar{\theta} \quad (28)$$

$$\frac{d\bar{Q}_z}{dx} = -\bar{p}_z + I_0 s^2 \bar{w} \quad (29)$$

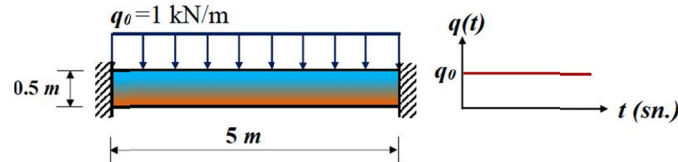
$$\frac{d\bar{M}_x}{dx} = \bar{Q}_z + I_1 s^2 \bar{u} + I_2 s^2 \bar{\theta} \quad (30)$$

Burada x , bağımsız değişkendir. Eşitlik 31, TFY ile çözülmektedir. Bu yöntem, iki noktalı sınır değer problemini başlangıç değer problemine indirgemektedir. Bu denklemin genel çözümü ise Eşitlik 32'deki gibidir.

$$\frac{d\{\bar{Y}(x,s)\}}{dx} = [\bar{A}(x,s)]\{\bar{Y}(x,s)\} + \{\bar{F}(x,s)\} \quad (31)$$

$$\{Y(x,s)\} = \sum_{m=1}^n C_m [\bar{U}^{(m)}(x,s)] + \{\bar{V}(x,s)\} \quad (32)$$

Burada $[U^{(m)}(x, s)]$ homojen çözüm olup, m 'inci bileşenine 1, diğerlerine sıfır değeri verilerek elde edilir. $\{V(x, s)\}$ ise özel çözüm olup, başlangıç şartları sıfır alınarak elde edilmektedir. İntegrasyon sabitleri (C_m) ise, problemin sınır şartlarından elde edilmektedir (bkz. [18-28]).



Şekil 2. FD kiriş ve dinamik yük fonksiyonu

TFY ve sonlu elemanlar [34] ile elde edilen sonuçlar birlikte Şekil 3'de gösterilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, TFY ile Laplace uzayında

3. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu çalışmada, kalınlık boyunca FD malzemeli kirişlerin farklı dinamik yükler altında elastik ve viskoelastik analizlerini yapan Fortran dilinde bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Programda, TFY'ye dayalı başlangıç değer probleminin Laplace uzayında çözümü RK5 algoritması ile yapılmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçların zaman uzayına dönüşümü için Durbin [32] ve Temel [33] tarafından verilen, modifiye edilmiş ters Laplace metodu uygulanmıştır.

Sayısal uygulamalarda FD malzemeler için Çizelge 1'de verilen malzeme özellikleri kullanılmıştır.

Çizelge 1. Malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	E (Gpa)	ρ (kg/m ³)
Alüminyum (P_a)	70	2702
Seramik (P_s)	380	3960

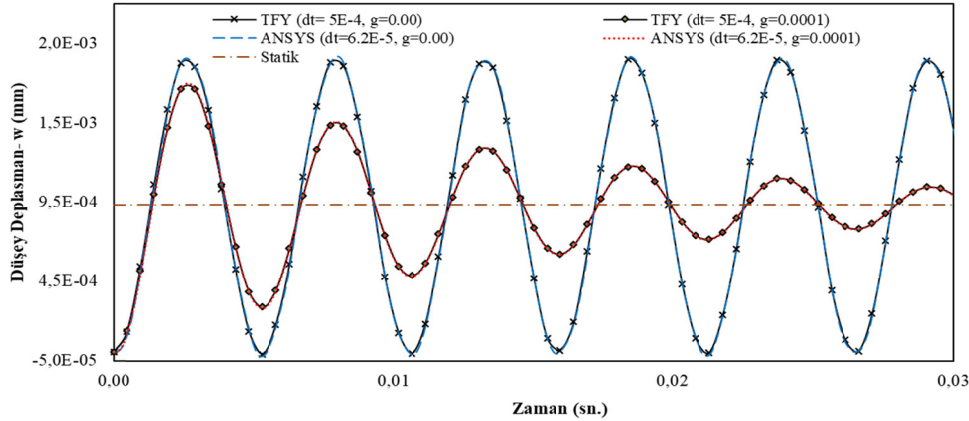
Ele alınan tüm FD kirişlere ait geometrik özellikler şöyledir: kesit kare ($b=h$) olup, Timoshenko kirişi için kayma düzeltme faktörü 5/6 olarak alınmıştır.

Uygulama 1

İlk olarak önerilen metotla ankastre-ankastre sınır şartlarına sahip adım tipi yük etkisindeki homojen izotrop Timoshenko kirişin (Şekil 2) elastik ve viskoelastik ($\eta=0,0001$) analizleri yapılmıştır. Aynı durumlar göz önünde bulundurularak, ANSYS sonlu eleman paket programı ile de çözümler elde edilmiştir.

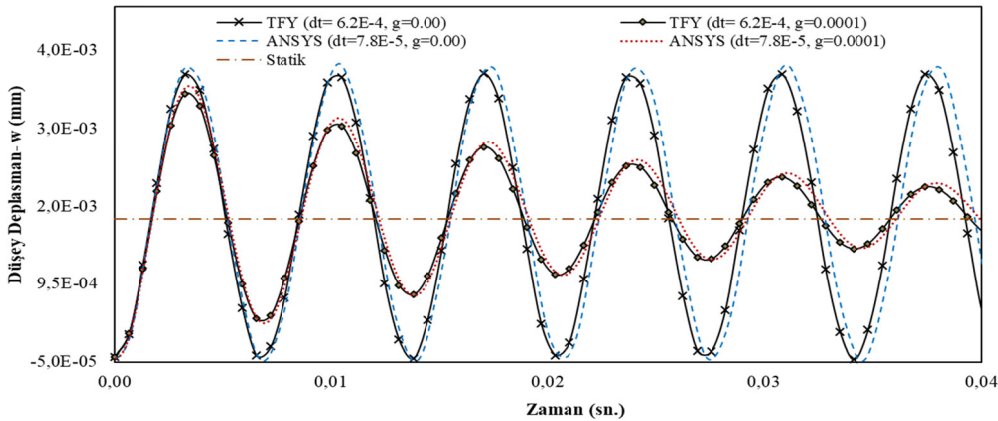
az sayıda zaman adımı ve kaba zaman artımı (64 adım, $dt=0,0005$ sn) kullanılarak elde edilen deplasman değerlerinin, sonlu elemanlar ile çok

sayıda zaman adımı ve çok sık zaman artımı sonuçlarının üst üste düştüğü görülmektedir (512 adım, $dt=0,000062$ sn) alınarak elde edilen (Şekil 3).



Şekil 3. Adım tipi yükleme için homojen izotrop ($n_z=0$) kirişin ortasındaki düşey deplasman

Aynı geometri ve yüklemeler ve $n_z=1$ için FD kirişin dinamik davranışı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4’de karşılaştırılmış ve uyum içerisinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4. Adım tipi yükleme ve $n_z=1$ için FD kirişin ortasındaki düşey deplasman

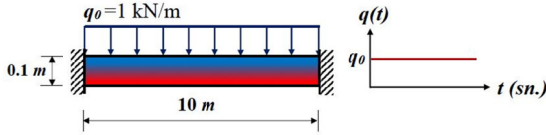
ANSYS ile modellemede BEAM188 kiriş elemanı kullanılmıştır. Bu eleman kalın kirişlerin analizi için uygun bir eleman olup, Timoshenko kiriş teorisine dayanmaktadır. Bu elemanın her düğümünde x, y ve z doğrultularında ötelenmeler ve bu eksenler etrafında dönmeler olmak üzere toplam 6 adet serbestlik bulunmaktadır.

ANSYS modelinde FD malzemeyi tanımlayabilmek için kiriş, uzunluğu boyunca 50 elemana ve kalınlığı boyunca ise 18 katmana bölünmüştür. Her bir katman için Eşitlik 1 ile

verilen elastisite modülü ve yoğunluk değerleri ayrı ayrı tanımlanmıştır.

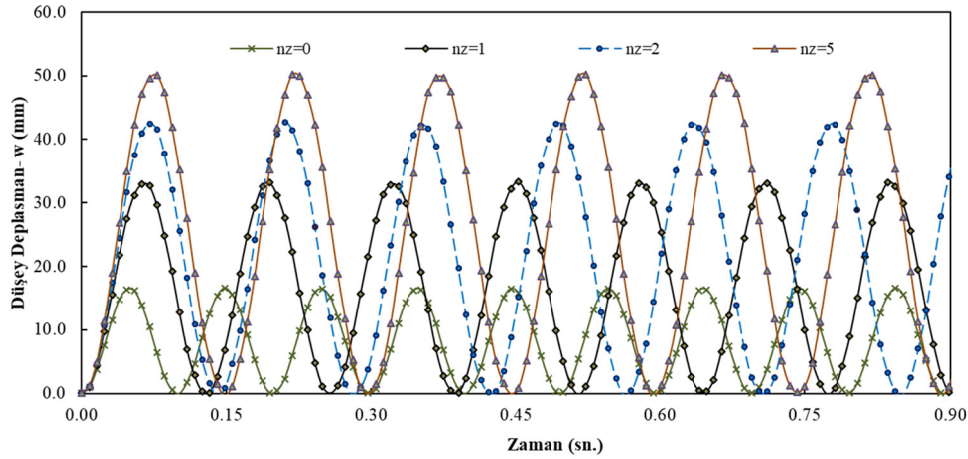
Uygulama 2

Bu uygulamada, Euler-Bernoulli ve Timoshenko kirişlerinin (Şekil 5), adım tipi dinamik yük etkisinde farklı FD malzeme değişim katsayıları ($n_z=0,1,2,5$) ve $L/h=100$ oranı için elastik davranışı araştırılmıştır. $n_z=0$, izotropik homojen malzeme durumunu göstermektedir.

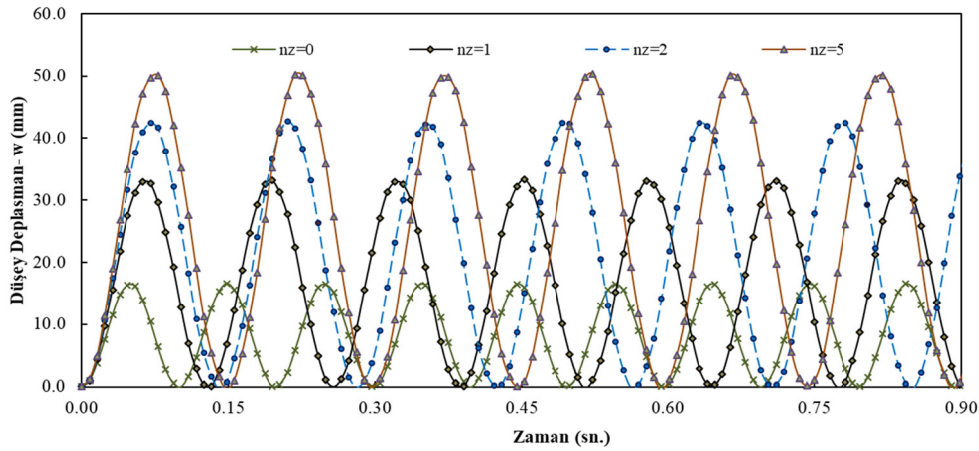


Verilen kirişlerin ortasındaki düşey deplasman, Euler-Bernoulli teorisi (EBT) için Şekil 6'da, Timoshenko teorisi (TBT) için ise Şekil 7'de verilmiştir.

Şekil 5. FD kiriş ve dinamik yük fonksiyonu



Şekil 6. Adım tipi yükleme için FD Euler-Bernoulli kirişinin ortasındaki düşey deplasman



Şekil 7. Adım tipi yükleme için FD Timoshenko kirişinin ortasındaki düşey deplasman

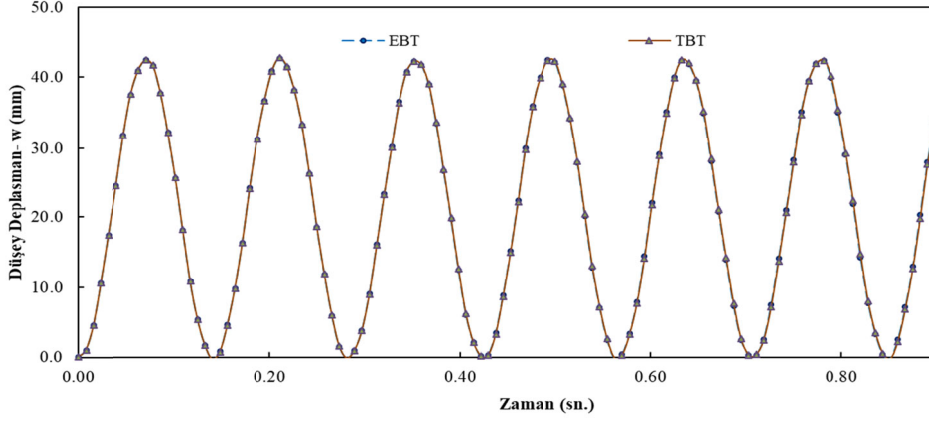
Grafikler incelendiğinde, her iki kiriş teorisi için malzeme değişim katsayısı arttıkça düşey deplasmanların da arttığı görülmektedir. Ayrıca, $n_z=2$ durumu için her iki kiriş teorisi kullanılarak elde edilen FD kirişin ortasındaki deplasman değerleri Şekil 8'de karşılaştırılmıştır. Grafikten görüldüğü üzere, $L/h=100$ için sonuçların tamamen örtüştüğü anlaşılmaktadır. İnce çubuk

durumunu yansıtan $L/h=100$ oranı için kayma şekil değiştirmesi etkisinin olmadığı ortaya çıkmaktadır.

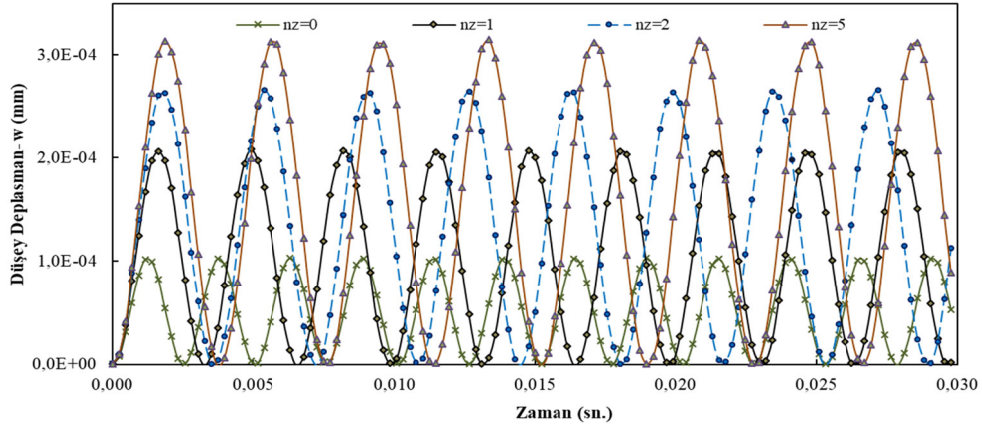
Uygulama 3

İki uçundan ankastre mesnetli Euler-Bernoulli (EBT) ve Timoshenko (TBT) kirişlerinin (Şekil 5.) $L/h=5$ oranı ve farklı malzeme değişim katsayıları

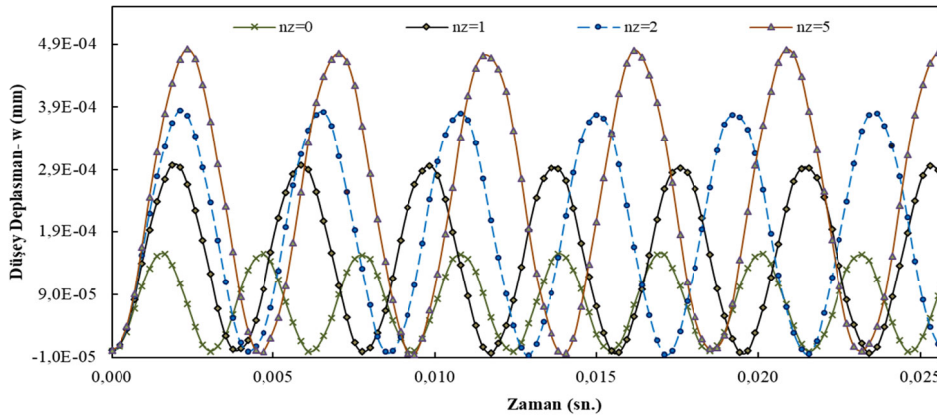
($n_z=0,1,2,5$) için çözümleri sırasıyla, Şekil 9-11'de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, malzeme değişim katsayısı arttıkça periyotların ve genliklerin arttığı gözlemlenmektedir.



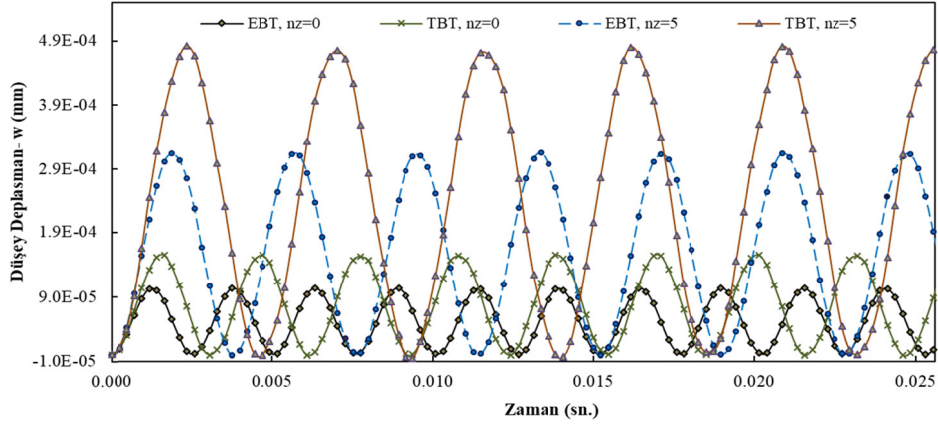
Şekil 8. Adım tipi yükleme için FD kirişin ortasındaki düşey deplasman



Şekil 9. Adım tipi yükleme için FD Euler-Bernoulli kirişinin ortasındaki düşey deplasman

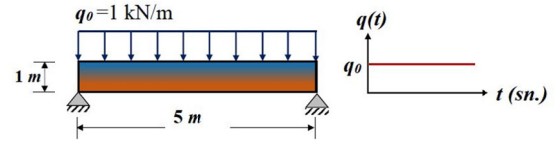


Şekil 10. Adım tipi yükleme için FD Timoshenko kirişinin ortasındaki düşey deplasman



Şekil 11. Adım tipi yükleme için FD kirişin ortasındaki düşey deplasman

$L/h=5$ oranı için, iki ucundan ankastre mesnetli Euler-Bernoulli ve Timoshenko kirişlerinin farklı malzeme değişim katsayılarına ($n_z = 0$ ve 5) ait çözümler Şekil 11’de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, homojen izotrop ($n_z = 0$) ve FD ($n_z = 5$) malzeme durumlarında, oran $L/h=5$ olduğunda, kayma şekil değiştirmesi etkisinin büyük olduğu anlaşılmaktadır.



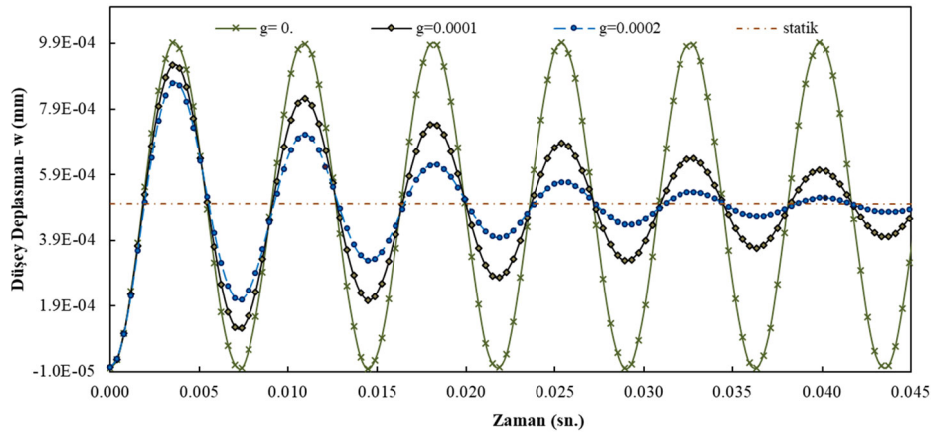
Şekil 12. FD kiriş ve dinamik yük fonksiyonu

Uygulama 4

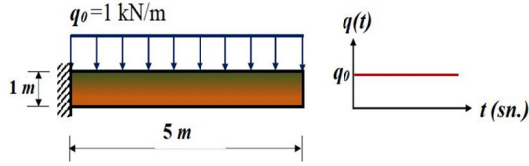
İki ucundan sabit mesnetli FD ($n_z = 1$) Timoshenko kirişinin (Şekil 12) adım tipi dinamik yükleme altında viskoelastik zorlanmış titreşimi araştırılmıştır. Kiriş ortasındaki deplasmanın zamanla değişimi çeşitli sönüm oranları ($g=0,000$, $g=0,0001$ ve $g=0,0002$) için Şekil 13’de çizilmiştir.

Uygulama 5

Şekil 14’de verilen FD ($n_z=5$) konsol kirişinin adım tipi dinamik yükleme altında elastik ve viskoelastik zorlanmış titreşim davranışları analiz edilmiştir. Ele alınan kirişin serbest ucundaki dönmesinin zamanla değişimi, çeşitli sönüm oranları ($g=0,000$, $g=0,0001$ ve $g=0,0002$) için hesaplanarak Şekil 15’de sunulmuştur.

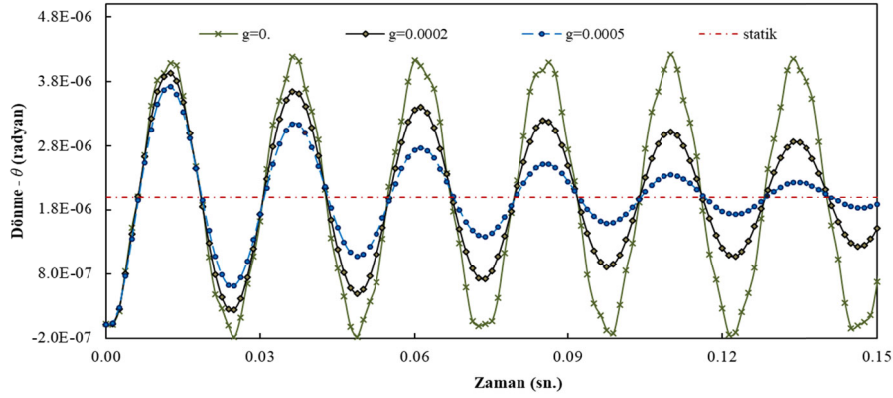


Şekil 13. Adım tipi yükleme için FD kirişin ortasındaki düşey deplasman



Şekil 14. FD kiriş ve dinamik yük fonksiyonu

Şekil 13 ve Şekil 15 incelendiğinde, viskoelastik malzeme durumunda deplasman ve dönme genliklerinin zamanla küçüldüğü görülmektedir. Sönüm oranı arttıkça bu titreşim genliklerinin statik değere daha çabuk yaklaştığı görülmektedir. Adım tipi dinamik yükünün Laplace dönüşümü, literatürde kapalı formda mevcuttur [35].

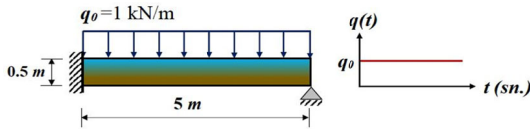


Şekil 15. Adım tipi yükleme için FD Timoshenko kirişinin konsol ucundaki dönme deplasman

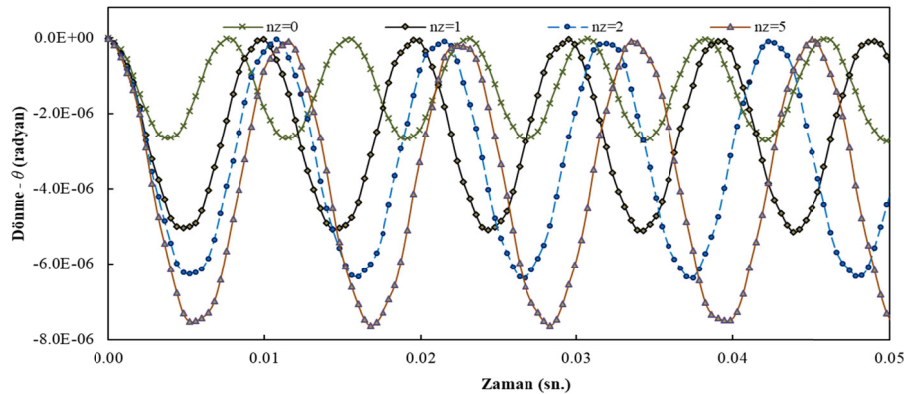
Uygulama 6

Ankastre-sabit sınır koşullarına sahip olan FD kirişinin (Şekil 16) adım tipi dinamik yük etkisinde elastik davranışı ele alınmıştır.

Kirişin sabit mesnedindeki dönmenin zamanla değişimi çeşitli malzeme değişim katsayıları için elde edilmiş ve Şekil 17'de verilmiştir. n_z değerleri arttıkça, elastik titreşim davranışın genlikleri ve periyotları artmaktadır.



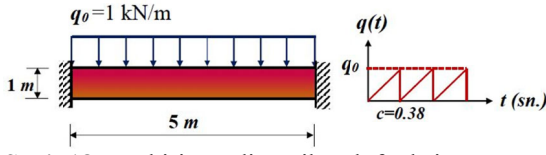
Şekil 16. FD kiriş ve dinamik yük fonksiyonu



Şekil 17. Adım tipi yükleme için FD Timoshenko kirişinin sabit mesnedindeki dönme deplasman

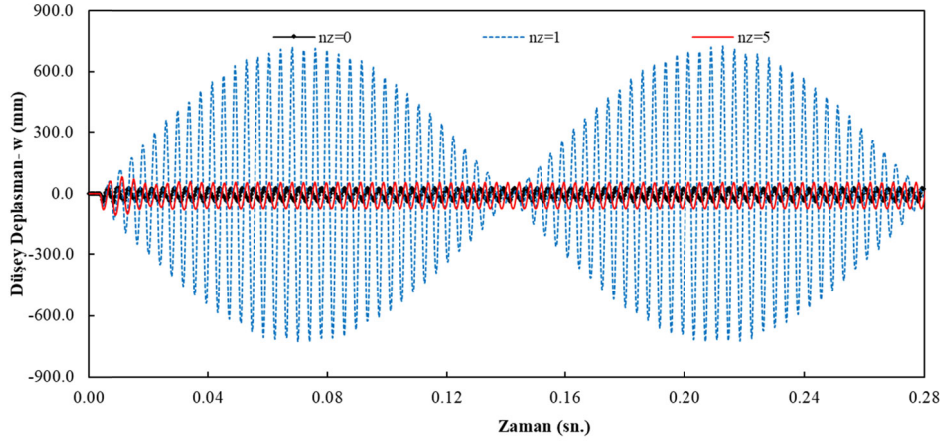
Uygulama 7

İki ucundan ankastre mesnetli Timoshenko kirişinin (Şekil 18) testere dişi dalga tipi yük etkisindeki zorlanmış titreşim davranışı çeşitli malzeme değişim katsayıları ($n_z = 0, 1, 5$) için araştırılmıştır.



Şekil 18. FD kiriş ve dinamik yük fonksiyonu

Uygulanan periyodik dalga tipi yükün frekansının (263 Hz), FDM ($n_z=1$) kirişinin doğal titreşim frekansına oldukça yakın olmasından dolayı, Şekil 19'da görüldüğü üzere, bu kirişte vuruş olayı gözlemlenmiştir. Uygulanan bu yükün frekansının, dikkate alınan diğer iki FDM ($n_z=0$ ve 5) kirişin doğal titreşim frekanslarına uzak olduğu için kirişlerde normal elastik davranış gözlemlenmiştir. Bu örnekte ele alınan FD kirişlerin serbest titreşim frekansları [26] çalışmasında verilmektedir. Testere dişi dalga tipi dinamik yükünün Laplace dönüşümü ise, literatürde kapalı formda mevcuttur [35].



Şekil 19. Testere dişi dalga tipi için FD Timoshenko kirişinin ortasındaki düşey deplasman

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kesit yüksekliği boyunca FD kirişlerin zorlanmış titreşim davranışı TFY ile Laplace uzayında sayısal olarak analiz edilmiştir. Problemin hareketini idare eden denklemler, toplam enerji prensibi yardımıyla önce zaman uzayında elde edilmiş, daha sonra Laplace uzayına taşınmıştır.

Viskoelastik malzeme sabitleri, Kelvin tipi sönüm modeli için dönüşmüş uzayda elde edilen denklemlere kolaylıkla eklenmiştir. Laplace uzayında elde edilen sonuçlar, etkin bir ters Laplace dönüşüm tekniği ile zaman uzayına taşınmıştır.

Çeşitli malzeme değişim katsayıları, sınır koşulları ve L/h oranlarının, ele alınan problemlerin zorlanmış titreşim davranışı üzerindeki etkileri ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır. Yapılan parametrik çalışmalar; FD malzeme değişim katsayılarının, problemin hem sönümlü hem de sönümsüz dinamik davranışları üzerine önemli etkiler yaptığını göstermiştir. Testere dişi gibi dalga tipi periyodik yüklemeler için yükün frekansı, problemin doğal titreşim frekansına çok yakın olduğunda vuruş olayının meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Ayrıca kayma deformasyonunun, FD kirişlerin zorlanmış titreşim davranışına nasıl etki yaptığı da

araştırılmıştır. L/h oranı (<10) küçüldükçe, bu etki analizlere dahil edilmesi gerekmektedir.

Son olarak bu çalışmada önerilen metodun, ele alınan problemlerin analizi için oldukça etkin ve kolayca uygulanabilir olduğu anlaşılmıştır.

5. KAYNAKLAR

1. Qian, L.F., Ching, K.H., 2004. Static and Dynamic Analysis of 2-D Functionally Graded Elasticity by Using Meshless Local Petrov-Galerkin Method. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 27(4), 491-503.
2. Aydoğdu, M., Taşkın, V., 2007. Free Vibration Analysis of Functionally Graded Beams with Simply Supported Edges. *Materials & Design*, 28(5), 1651-1656.
3. Li, X.F., 2008. A Unified Approach for Analyzing Static and Dynamic Behaviors of Functionally Graded Timoshenko and Euler-Bernoulli Beams. *Journal of Sound and Vibrations*, 318, 1210-1229.
4. Sina, S.A., Navazi, H.M., Haddadpour, H., 2009. An Analytical Method for Free Vibration Analysis of Functionally Graded Beams. *Materials and Design*, 30, 741-747.
5. Civalek, Ö., Kiracioglu, O., 2010. Free Vibration Analysis of Timoshenko Beams by DSC Method. *Int. J. Numer. Meth. Biomed. Engng.*, 26, 1890-1898.
6. Alshorbagy, A.E., Eltaher, M.A., Mahmoud, F.F., 2011. Free Vibration Characteristics of a Functionally Graded Beam by Finite Element Method. *Applied Mathematical Modelling*, 35, 412-425.
7. Atmane, H.A., Tounsi, A., Meftah, S.A., Belhadj, H.A., 2011. Free Vibration Behavior of Exponential Functionally Graded Beams with Varying Cross-section. *Journal of Vibration and Control*, 17(2), 311-318.
8. Anand Rao, K.S., Gupta, R.K., Ramachandran, P., Rao, G.V., 2012. Free Vibration Analysis of Functionally Graded Beams. *Defence Science Journal*, 62(3), 139-146.
9. Pradhan, K.K., Chakraverty, S., 2013. Free Vibration of Euler and Timoshenko Functionally Graded Beams by Rayleigh-Ritz Method. *Composites: Part B*, 51, 175-184.
10. Demir, C., Öz, F.E., 2013. Free Vibration Analysis of a Functionally Graded Viscoelastic Supported Beam. *Journal of Vibration and Control*. DOI: 10.1177/1077546313479634.
11. Su, H., Banerjee, J.R., 2015. Development of Dynamic Stiffness Method for Free Vibration of Functionally Graded Timoshenko Beams. *Computers and Structures* 147, 107-116.
12. Jing, L.L., Ming, P.J., Zhang, W.P., Fu, L.R., Cao, Y.P., 2016. Static and Free Vibration Analysis of Functionally Graded Beams by Combination Timoshenko Theory and Finite Volume Method. *Composite Structures*, 138, 192-213.
13. Avcar, M., Alwan, H.H.A., 2017. Free Vibration of Functionally Graded Rayleigh Beam. *International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS)*, 9(2), 127-137.
14. Lee, J.W., Lee, J.Y., 2017. Free Vibration Analysis of Functionally Graded Bernoulli-Euler Beams Using an Exact Transfer Matrix Expression. *International Journal of Mechanical Sciences*, 122, 1-17.
15. Turan, M., Kahya, V., 2018. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kirişlerin Serbest Titreşim Analizi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 119-130, DOI: 10.31466/kfbd.453833.
16. Akbaş, Ş.D., 2018. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Ortotropik Bir Kirişin Statik ve Titreşim Davranışlarının İncelenmesi, *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, 20(1), 69-82.
17. Nam, V.H., Vinh, P.V., Nguyen Van Chinh, N.V., Thom, D.V., Hong, T.T., 2019. A New Beam Model for Simulation of the Mechanical Behaviour of Variable Thickness Functionally Graded Material Beams Based on Modified First Order Shear Deformation Theory. *Materials*, doi: 10.3390/ma12030404.
18. Noori, A.R., Aslan, T.A., Temel, B., 2020. Static Analysis of FG Beams via Complementary Functions Method. *European Mechanical Science*, 4(1), 1-6.
19. Yıldırım, S., Tütüncü, N., 2018. On the Inertio-Elastic Instability of Variable-thickness Functionally-graded Disks. *Mechanics Research Communications*, 91, 1-6.

20. Yıldırım, S., Tütüncü, N., 2019. Effect of Magneto-Thermal Loads on the Rotational Instability of Heterogeneous Rotors. *AIAA Journal*, 57 (5) 2069-2074.
21. Yontar, O., Aydın K., Keleş, İ., 2020. Practical Jointed Approach to Thermal Performance of Functionally Graded Material Annular Fin. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 34(1), 144-149.
22. Çelebi, K., Yarımabaç, D., Tütüncü, N., 2018. Free Vibration Analysis of Functionally Graded Beams Using Complementary Functions Method. *Archive of Applied Mechanics*, 88, 729-739.
23. Temo, A., Yarımabaç, D., 2019. The Effect of Uniform Magnetic Field on Pressurized FG Cylindrical and Spherical Vessels. *European Mechanical Science*, 3(4), 133-141.
24. Çalım, F.F., 2020. Vibration Analysis of Functionally Graded Timoshenko Beams on Winkler-pasternak Elastic Foundation. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44, 901-920.
25. Çalım, F.F., 2016. Transient Analysis of Axially Functionally Graded Timoshenko Beams with Variable Cross-section. *Composite Part B: Engineering*, 98, 472-483.
26. Aslan, T.A., Noori, A.R., Temel B., 2019. Birinci Mertebe Kayma Deformasyon Teorisine Dayalı FD Düz Eksenli Kirişlerin Serbest Titreşim Analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(4), 21-28.
27. Aslan, T.A., Noori, A.R., Temel, B., 2019. Çift Yönlü Fonksiyonel Derecelenmiş Malzemeli Timoshenko Kirişlerinin Serbest Titreşim Analizi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(3), 30-36.
28. Temel B., Noori, A.R., 2020. A Unified Solution for the Vibration Analysis of Two-directional Functionally Graded Axisymmetric Mindlin-Reissner Plates with Variable Thickness. *International Journal of Mechanical Sciences*, 174, 1-20.
29. Boley, B.A., Weiner, J.H., 1960. *Theory of Thermal Stresses*, John Wiley and Sons, New York.
30. Aslan, T.A., Noori, A.R., Temel, B., 2018. Dikdörtgen Kesitli Viskoelastik Sikloid Çubukların Zorlanmış Titreşimi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(1), 151-162.
31. Temel, B., Çalım, F.F., Tütüncü, N., 2004. Quasi-Static and Dynamic Response of Viscoelastic Helical Rods. *Journal of Sound and Vibration*, 271, 921-935.
32. Durbin, F., 1974. Numerical Inversion of Laplace Transforms: an Efficient Improvement to Dubner and Abate's Method. *Computer Journal*, 17, 371-376.
33. Temel, B., 2004. Transient Analysis of Viscoelastic Helical Rods Subject to Time-Dependent Loads. *International Journal of Solids and Structures*, 41, 1605-1624.
34. ANSYS, 2013. Inc Release 15.0, Canonsburg, PA.
35. Spiegel, M.R., 1965. *Laplace Transforms*, McGraw-Hill New York.

Van Gölü Havzası Doğu ve Kuzey Bölgesindeki Killerin Standart ve Modifiye Proktor Özelliklerinin Belirlenmesi

Ali ÖZVAN^{*1}, Onur SARAN², Murat MUVAFIK²

¹Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Van

²Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Van

Geliş tarihi: 25.06.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Bu çalışmada kompaksiyonun önemli bir parametresi olan sıkıştırma enerjisinin, zemine farklı miktarlarda uygulanması durumunda zeminin mühendislik özelliklerindeki değişiklikler araştırılmıştır. Çalışma için Van Gölü'nün doğu ve kuzeyindeki farklı konulardan elde edilen bozulmuş kil örnekleri kullanılmıştır. Tüm zeminler öncelikle Proktor deneylerine tabi tutularak zeminlerin optimum su içeriği (ω_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{k-max}) değerleri belirlenmiştir. İkinci aşamada, kompaksiyon deneyinden alınan numuneler konsolidasyon deneyine tabi tutulmuştur. Konsolidasyon sonuçlarına bakıldığında zemine uygulanan kompaksiyon enerjisi arttıkça zeminin kuru birim hacim ağırlığının ve ön konsolidasyon basıncının arttığı, optimum su içeriğinin ve boşluk oranının azaldığı belirlenmiştir. Bölgeden alınan örneklerin proktor değerleri incelendiğinde, Çaldıran bölgesi hariç tüm kil örneklerinin dolguda kullanılabileceği belirlenmiştir. Ayrıca, bu killerin Plastik Limit değerleri ile Proktor sıkışma parametreleri arasında yapılan korelasyonlarda yüksek belirleme katsayısı ($R^2 > 0.90$) elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kil, Proktor deneyi, Kompaksiyon enerjisi, Van

Determination of Standard and Modified Proctor Properties of Clay Soils in Eastern and Northern of Van Lake

Abstract

In this study, the changes in the engineering properties of the soil in case of application of compaction energy, which is an important parameters of the compaction, in different amounts have been investigated. For the study, disturbed clay samples obtained from different locations in eastern and northern of Van Lake, have been used. Firstly, all clay soils were subjected to Proctor experiments and optimum water content (ω_{opt}) and maximum dry unit volume weight (γ_{k-max}) values were determined. In the second stage,

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ali ÖZVAN, aozvan@yyu.edu.tr

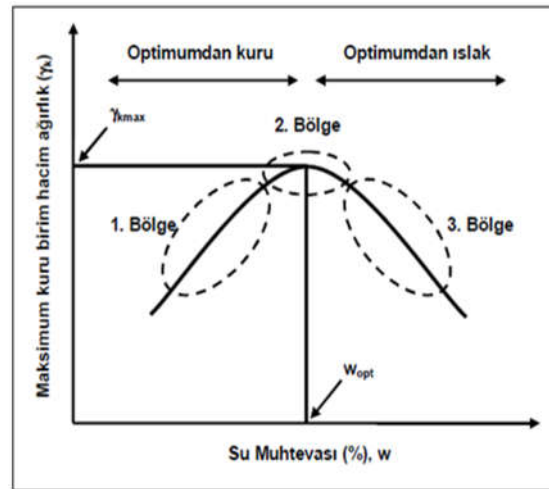
samples taken from the compaction test were subjected to consolidation test. Considering the results of consolidation, it was determined that as the compaction energy applied to the soil increases, the dry unit volume weight and pre-consolidation pressure increase while the optimum water content and void ratio decrease. When the proctor values of the samples taken from the region are analyzed, it was determined that all clay samples can be used in the filling except the Çaldıran region. In addition, high correlation coefficient was obtained in the correlations between the Plastic Limit values and the Proctor compaction parameters of these clays.

Keywords: Clay, Proctor compaction test, Compaction energy, Van

1. GİRİŞ

Mekanik stabilizasyon yöntemlerinden biri olan kompaksiyon, mekanik enerji uygulanması yoluyla yoğunluğun artırılması işlemidir [1]. Sıkıştırılmış zeminler cinslerine ve kompaksiyon yöntemlerine bağlı olarak farklı özelliklere sahiptirler ve projelendirme aşamalarında zeminlerin sıkıştırılmış haldeki özellikleri önemli bir faktördür. Burada bahsedilen özellikler geçirimsizlik (permeabilite), sıkışabilirlik yeteneği, gerilme-deformasyon ilişkisi ve kayma direncidir.

Zeminlerin geçirimsizliği ile boşluk oranları arasındaki ilişki göz önüne alınacak olursa, kuru birim hacim ağırlığın artması durumunda, porozitenin azalması ve buna bağlı olarak geçirimsizliğin de azalması beklenir [2]. En büyük kuru birim hacim ağırlığın değişimi kompaksiyon deneyi ile belirlenebilir. Kompaksiyon deney verileri kullanılarak çizilen kompaksiyon eğrileri optimumdan kuru, optimum ve optimumdan ıslak olmak üzere üç kısımdan oluşur (Şekil 1). Lambe [3], optimumdan kuru bölgede sıkıştırılan zemindeki su muhtevası arttıkça zeminin geçirimsizliğinin azaldığını, optimum su muhtevasında minimum olduğunu, optimumdan ıslak bölgede ise başlangıçta azalıp daha sonra arttığını gözlemlemiştir (Şekil 1). Ayrıca, kompaksiyon deneyinde artan su içeriğine bağlı olarak kilin yapısı incelendiğinde; optimumdan kuru bölgede parçacıklar arasındaki kenar-kenar temasları, optimum su içeriğinin yakınında esas olarak kenar-yüzey ve yüzey-yüzey temasları haline gelmekte ve su içeriği arttıkça yüzey-yüzey temas sayıları artmaktadır [5].

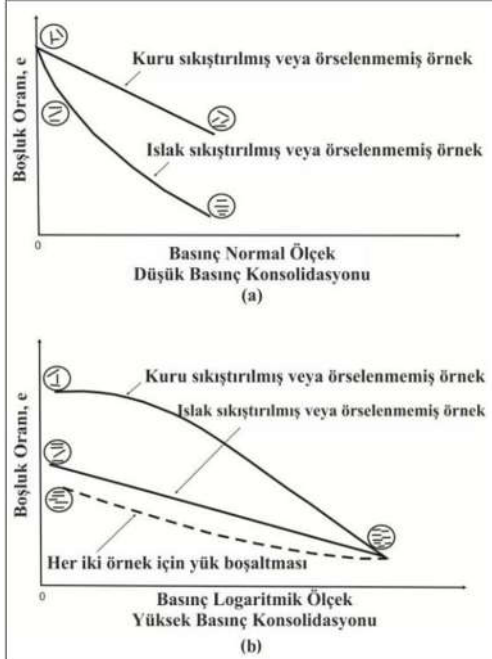


Şekil 1. Sıkıştırılmış bir zeminde kuru birim hacim ağırlık (γ_k) - su muhtevası (ω) ilişkisi

Yüksek sıkıştırma enerjisi de zeminlerde kuru yoğunluğun artmasını ve boşluk oranının azalmasını sağlar. Optimumdan ıslak bölgede, yüksek enerji ile sıkıştırılan zeminlerde tane dizilimlerinin paralel olmasıyla birlikte tane düzlemine dik doğrultudaki geçirimsizlik azalırken diğer yönde önemli bir değişim yaşanmamaktadır [2-4].

Sıkıştırılmış kilde; sıkışabilirlik, zemin yapısının ve su muhtevasının belirgin olarak etkilendiği bir başka özelliktir. Lambe [3], aynı kuru birim hacim ağırlık değerine sahip optimumdan kuru bölgede sıkıştırılan kilin sıkışabilirliğinin, optimumdan ıslak bölgede sıkıştırılan kilin sıkışabilirliğinden daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. Şekil 2a'da düşük basınç uygulanan, Şekil 2b'de ise yüksek basınç uygulanan, optimumdan kuru ve

optimumdan ıslak bölgelerde sıkıştırılmış killerin bir boyutlu konsolidasyon özellikleri verilmiştir.



Şekil 2. Sıkıştırmanın bir boyutlu konsolidasyona etkisi, a) Düşük basınçta, b) Yüksek basınçta [4]

Şekillerden görüldüğü gibi, yüksek basınç uygulandığı durumda, optimumdan kuru bölgede sıkıştırılan kilin sıkışabilirliği optimumdan ıslak bölgede sıkıştırılana göre daha yüksektir. Düşük

basınç uygulandığı durumda ise tam tersi durum söz konusudur. Yani bu durumda, optimumdan ıslak bölgede sıkıştırılan kilin sıkışabilirliği optimumdan kuru bölgede sıkıştırılana göre daha yüksektir [3].

Bu çalışmada, Ateş 2010'da [6] fiziksel ve mineralojik özellikleri verilen killerin farklı sıkışma enerjisine bağlı olarak kompaksiyon ve konsolidasyon özelliklerinin nasıl değiştiği ve elde edilen değerler ile bu malzemelerin Van Gölü etrafında yapımı planlanan ve devam eden mühendislik yapılarında kullanılabilirliğinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Ayrıca, bu killerin indeks özellikleri ile kompaksiyon değerleri arasında bir ilişkinin varlığının araştırılması da çalışmanın bir diğer amacı olarak hedeflenmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Bu çalışmada, Van Gölü doğu ve kuzeyinde Ateş 2010 [6] tarafından kil özellikleri belirlenmiş koordinatlardan numuneler alınmıştır. Çalışma kapsamında, verilen koordinatlar veya yakın çevresinden örselenmiş zemin örneği alınarak laboratuvara getirilmiştir. Ateş 2010'da [6] kil olarak tanımlanmış zeminlerin alındığı koordinatlar Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışma kapsamında kullanılan killerin alındığı yerler ve ondalık derece cinsinden konumları

Numune Kodu	Alındığı Bölge	Konum	
		Enlem	Boylam
GR-1	Gürpınar-Van Karayolu	38,348317°	43,421102°
GR-2	Gürpınar Karayolu üzeri	38,331243°	43,240738°
GR-3	Gürpınar Karayolu üzeri	38,328577°	43,235542°
EDR-1	Edremit-Gölkaşı	38,351911°	43,210157°
EDR-2	Edremit-Gölkaşı	38,348092°	43,207526°
EDR-3	Edremit-Dönemeç	38,336196°	43,233035°
EDR-4	Edremit-Çiçekli	38,349359°	43,190238°
BKC-1	Van-Merkez-Bakacık	38,434101°	43,344547°
BKC-2	Van-Merkez-Bakacık	38,433934°	43,344080°
BD-1	Van-Bardakçı Köyü	38,568064°	43,270740°
CL-1	Çaldıran	39,096750°	43,913524°
CL-2	Çaldıran	39,063667°	43,997969°
MR-1	Muradiye-Merkez	38,971961°	43,723336°

Zeminlerin indeks özelliklerini belirlemek için elek takımı ve hidrometre deney takımı, özgül ağırlık deney seti, Casagrande cihazı kullanılmıştır. Kompaksiyon karakteristiklerini elde etmek amacıyla Standart ve Otomatik Proktor deneylerinde 2,5 kg'lık tokmak, Modifiye Proktor deneyinde ise 4,5 kg'lık tokmak ve hepsinde 10,5 cm çaplı Proktor kalıbı kullanılmıştır. Konsolidasyon deneyleri sabit halkalı ödometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.2. Metot

Çizelge 1'de konumları verilen killerin [6] bulunduğu arazilerden laboratuvar deneylerini yapmak için örselenmiş numuneler alınmıştır. Numunelerin indeks özelliklerinin belirlenmesi amacıyla özgül ağırlık, tane boyu (elek analizi ve hidrometre) analizi ve Atterberg (kıvam) limitleri deneyleri ASTM [7-11] standartlarına uygun olarak yapılmıştır.

Çalışma kapsamında toplanan zemin numunelerinin her birine Modifiye Proktor, Standart Proktor ve Otomatik Proktor (Standart Proktor tokmağı kullanılarak) kompaksiyon deneyleri yapılarak kompaksiyon eğrileri çizilmiş ve bu eğrilerden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri ASTM D 698 ve D 1557'ye göre [12-13] elde edilmiştir. Bu su muhtevalarında sıkıştırılan zeminlerden konsolidasyon için örnek alınarak ASTM D 2435'e göre [14] konsolidasyon

deneyleri yapılmıştır. Çizelge 2'de kompaksiyon deneylerinde zemine uygulanan kompaksiyon enerjisi değerleri verilmiştir. Otomatik Proktor deneyi, Standart Proktor tokmağı kullanılarak yapıldığı için her iki deneyde uygulanan kompaksiyon enerjileri aynıdır. Bu çalışmada hem aynı sıkıştırma enerjisinde manuel ve makine ile sıkıştırma yapılması durumunda hem de farklı sıkıştırma enerjisinde zeminin mühendislik özelliklerinin nasıl değiştiği araştırılmıştır.

Çizelge 2. Zemine uygulanan kompaksiyon enerjisi miktarları [12-13]

Kompaksiyon Yöntemi	Kompaksiyon Enerjisi (CE) (kN-m/m ³)
Standart Proktor	~600
Otomatik Proktor	~600
Modifiye Proktor	~2700

3. BULGULAR

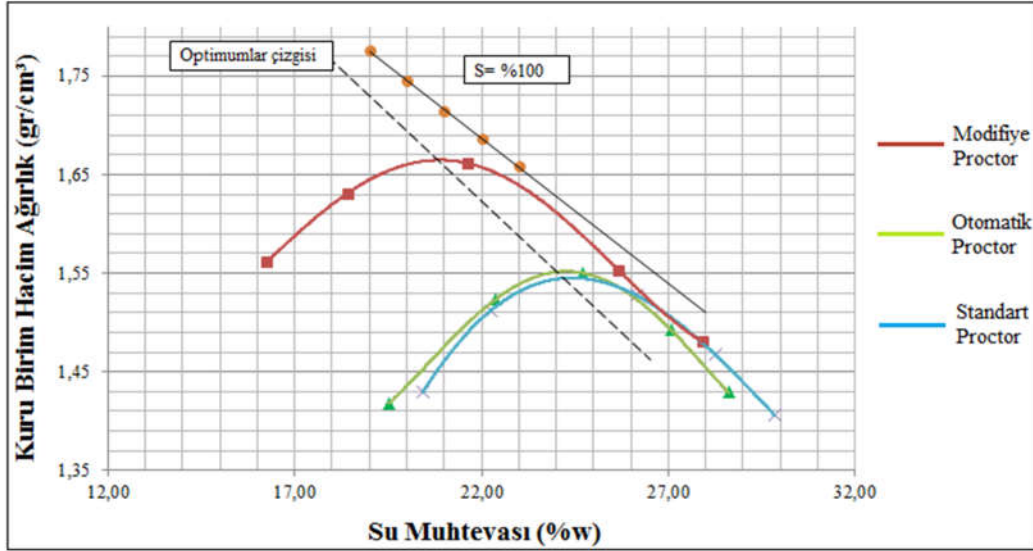
Zeminin indeks özelliklerini belirlemek için yapılan deneyler neticesinde Çizelge 3'te verilen değerler elde edilmiştir. Zeminler, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre sınıflandırılmıştır. Plastisite kartına bakıldığında numunelerin büyük çoğunluğu düşük plastisiteli kil (CL) olarak sınıflandırılmıştır. CL-2 örneği yüksek plastisiteli kil (CH), CL-1 örneği ise ML (düşük plastisiteli silt) veya OL (düşük plastisiteli organik silt-kil) olarak sınıflandırılmıştır (Çizelge 3).

Çizelge 3. Zeminlerin indeks özelliklerini belirlemek için yapılan deney sonuçları

Sıra No.	Numune İşareti	Özgül Ağırlık	Tane Boyu (%)				Kıvam Limitleri			USCS Zemin Sınıfı
			Kil	Silt	Kum	Çakıl	w _L	w _p	I _p	
1	GR-1	2,63	41,70	47,60	10,70	0	46,95	22,01	24,94	CL
2	GR-2	2,66	22,00	59,71	18,29	0	29,1	20,75	8,35	CL
3	GR-3	2,63	20,10	65,46	14,44	0	28,9	20,79	8,11	CL
4	EDR-1	2,66	24,00	61,10	14,90	0	27,3	19,97	7,33	CL
5	EDR-2	2,69	36,00	60,42	3,58	0	29	20,65	8,35	CL
6	EDR-3	2,62	33,00	53,06	13,94	0	34,3	21,49	12,81	CL
7	EDR-4	2,68	30,20	60,62	9,18	0	30,8	20,61	10,19	CL
8	BKC-1	2,65	29,90	56,03	14,07	0	32,6	19,59	13,01	CL
9	BKC-2	2,6	31,70	54,72	13,58	0	37,98	23,01	14,97	CL
10	BD-1	2,65	39,80	45,07	15,13	0	42,4	21,6	20,8	CL
11	CL-1	2,5	27,00	54,06	18,94	0	37,25	28,98	8,27	ML veya OL
12	CL-2	2,68	50,00	42,02	7,98	0	61,4	28,41	32,99	CH
13	MR-1	2,66	20,20	64,95	14,85	0	30,7	22,47	8,23	CL

Çalışma kapsamında araziden toplanan örselenmiş zemin numuneleri üzerinde Standart, Otomatik (Standart Proktor tokmağı kullanılarak) ve Modifiye Proktor enerji seviyelerinde su içeriği artırılarak her bir deneyde beş farklı su içeriğinde

kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak kompaksiyon eğrileri çizilmiştir (Şekil 3-6). Bu eğrilerden zeminlere ait maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3. CL-2 Proktor deneylerinin kompaksiyon eğrileri

Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'teki kompaksiyon grafikleri optimumdan kuru, optimum ve optimumdan ıslak olmak üzere üç ayrı kısımda yorumlanmıştır. Standart ve Otomatik Proktor deneylerinde uygulanan sıkıştırma enerjisi aynı olduğu için bunlar birbiri içerisinde değerlendirilmiştir. Modifiye Proktor deneyinde Standart ve Otomatik Proktor deneylerine göre daha yüksek sıkıştırma enerjisi uygulanmıştır.

Kompaksiyon eğrilerinin optimumdan kuru bölgelerine bakıldığında, eğrilerin birbirine yaklaşık olarak paralel durumda olduğu görülmektedir. Bu durum sıkıştırma enerjisindeki farkın önemli ölçüde olduğunu göstermektedir.

Eğrilerin optimum bölgelerine bakıldığında, enerjideki artışa bağlı olarak eğri pik noktalarının sola doğru kaydığı ve yükseldiği görülmektedir. Bu değişim, kompaksiyon enerjisindeki artışa bağlı olarak optimum su muhtevasının azaldığını, kuru birim hacim ağırlığının ise arttığını göstermektedir.

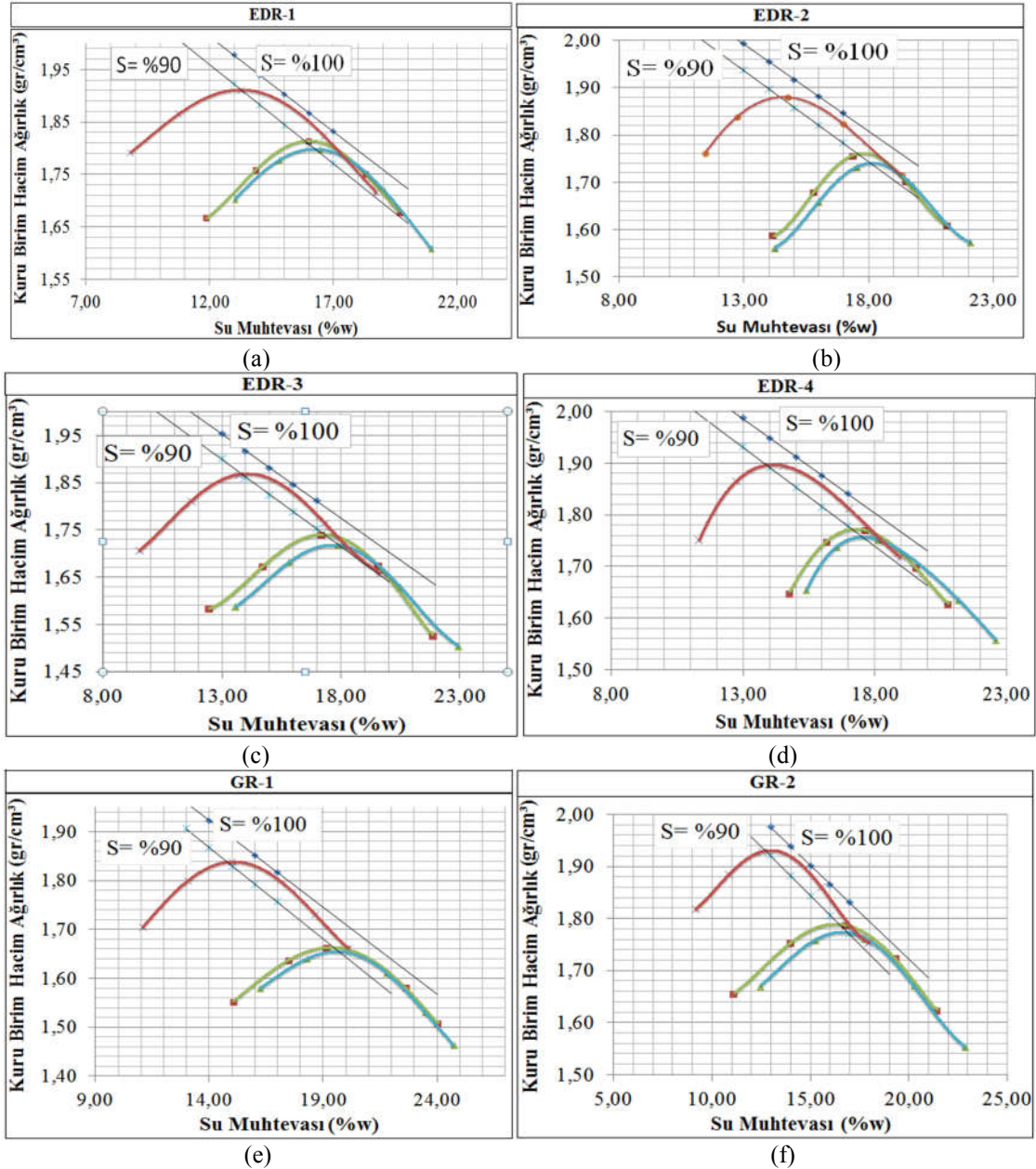
Eğrilerin optimumdan ıslak bölgelerine bakıldığında ise eğrilerin birbirini kestiği gözlenmektedir. Bu durumun sebebi, optimumdan ıslak bölgede, zemin içerisinde fazla miktarda su bulunması ve suyun sıkıştırılamaz olmasından kaynaklanmaktadır.

Kompaksiyon eğrilerinin maksimum noktalarından geçen çizgi optimumlar çizgisidir. Bu çizgi %100 doygunluk çizgisi ile yaklaşık olarak paraleldir. Bu paralellik, iki çizgide de su muhtevası düşerken kuru birim hacim ağırlığının artmasından kaynaklanmaktadır.

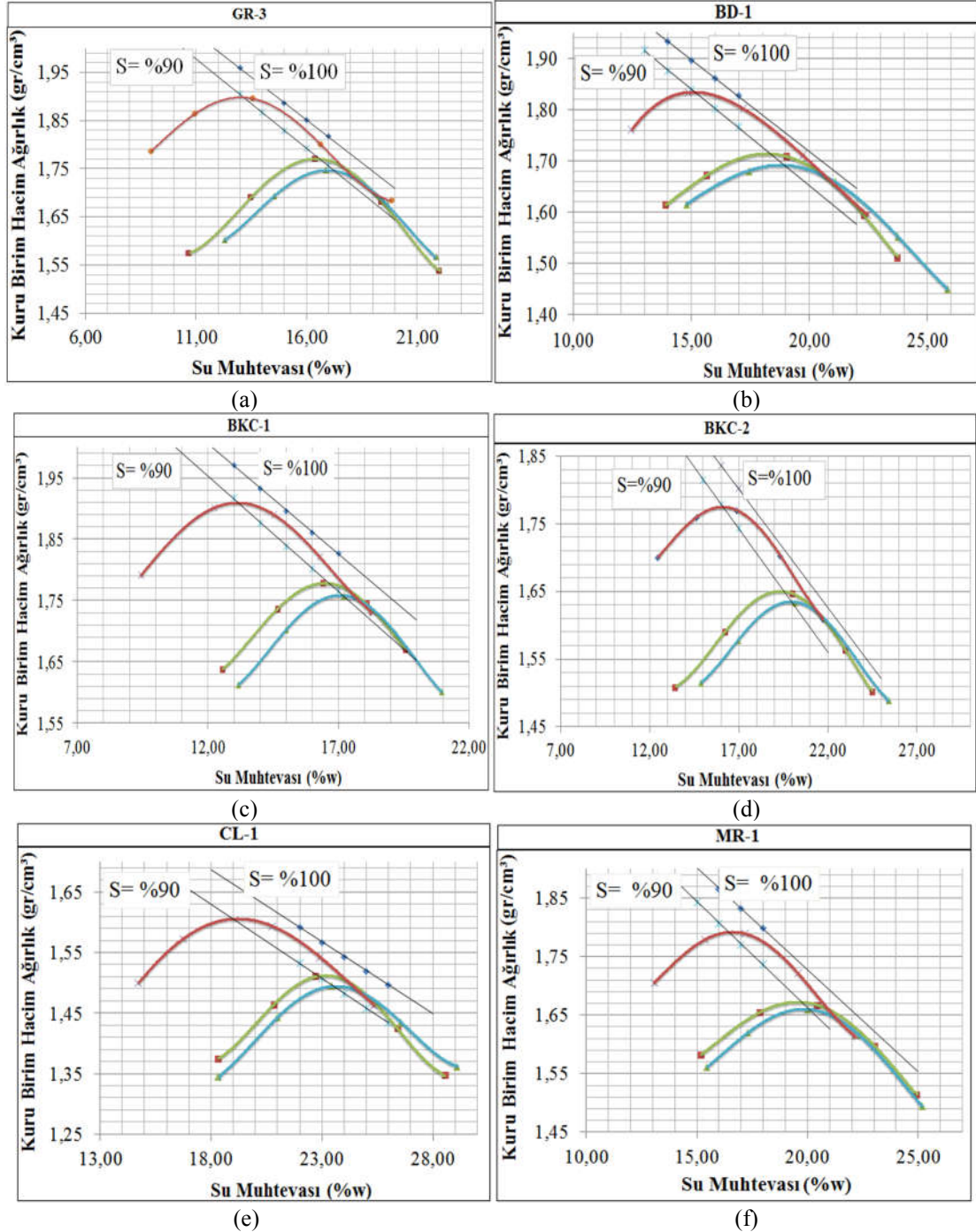
Kompaksiyon eğrileri genel olarak incelendiğinde, bütün eğrilerin %100 doygunluk çizgisinin solunda kaldığı görülmektedir. Bu durum, kompaksiyon enerjisindeki artışa rağmen zeminin içerisinde bir miktar hava kaldığını göstermektedir. Kompaksiyon eğrisinin pik noktasındaki doygunluk derecesi ne kadar yüksek olursa o kadar iyi bir sıkıştırma elde edilir.

Standart ve Otomatik Proktor eğrileri genel olarak incelendiğinde ise aynı sıkıştırma enerjisi uygulanmasına rağmen Otomatik Proktor deneyinde az da olsa yüksek kuru birim hacim ağırlık ve daha düşük su muhtevası değerleri elde

edilmiştir. Bu durum, Otomatik Proktor aletinin düzenli bir vuruş sisteminin olması ve darbelerin zemin yüzeyine eşit olarak dağılmasından ve her vuruş için istenilen vuruş yüksekliğinin tam olarak sağlanmasından kaynaklanmaktadır.



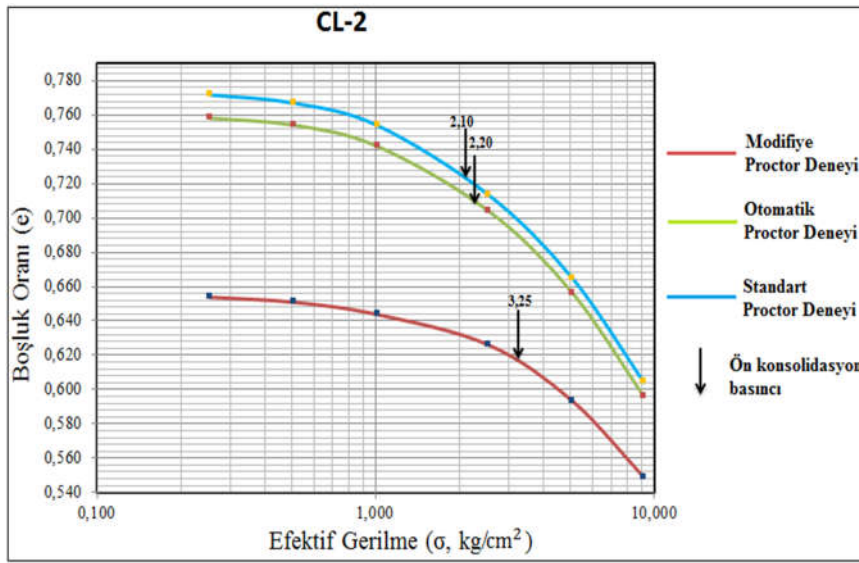
Şekil 4. Çalışma kapsamındaki zeminlerin kompaksiyon grafikleri, a) EDR-1, b) EDR-2, c) EDR-3, d) EDR-4, e) GR-1, f) GR-2



Şekil 5. Çalışma kapsamındaki zeminlerin kompaksiyon grafikleri, a) GR-3, b) BD-1, c) BKC-1, d)BKC-2, e) CL-1, f) MR-1

Dolgular sıkıştırılmış yapılar olmasına rağmen zaman geçtikçe hem üzerine inşa edilen yapıların hem de dolgunun kendi ağırlığından kaynaklı oturmalar oluşabilir. Dolgu üzerine inşa edilen yapıların zarar görmemesi için bu oturmaların belirli sınırlar içinde olması istenir. Bu yüzden zeminde oluşacak oturma miktarı hesaplanmalıdır. Bu oturma miktarı konsolidasyon deneyi ile bulunur. Ön konsolidasyon basıncı veya efektif gerilme (σ_p) zeminde oluşacak olan oturmanın bir ölçüsüdür.

Standart, modifiye ve otomatik Proktor kompaksiyon deneyleri sonucu belirlenen maksimum sıkışmanın elde edildiği su muhtevası değerlerinde yeniden sıkıştırılan zemin örnekleri üzerinde konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Konsolidasyon deneyi sonucunda, farklı kompaksiyon yöntemleri ile sıkıştırılan zeminlerin Casagrande [15] yöntemi ile ön konsolidasyon basınçları ve gerilme altındaki davranışları belirlenmiştir (Şekil 6-8).

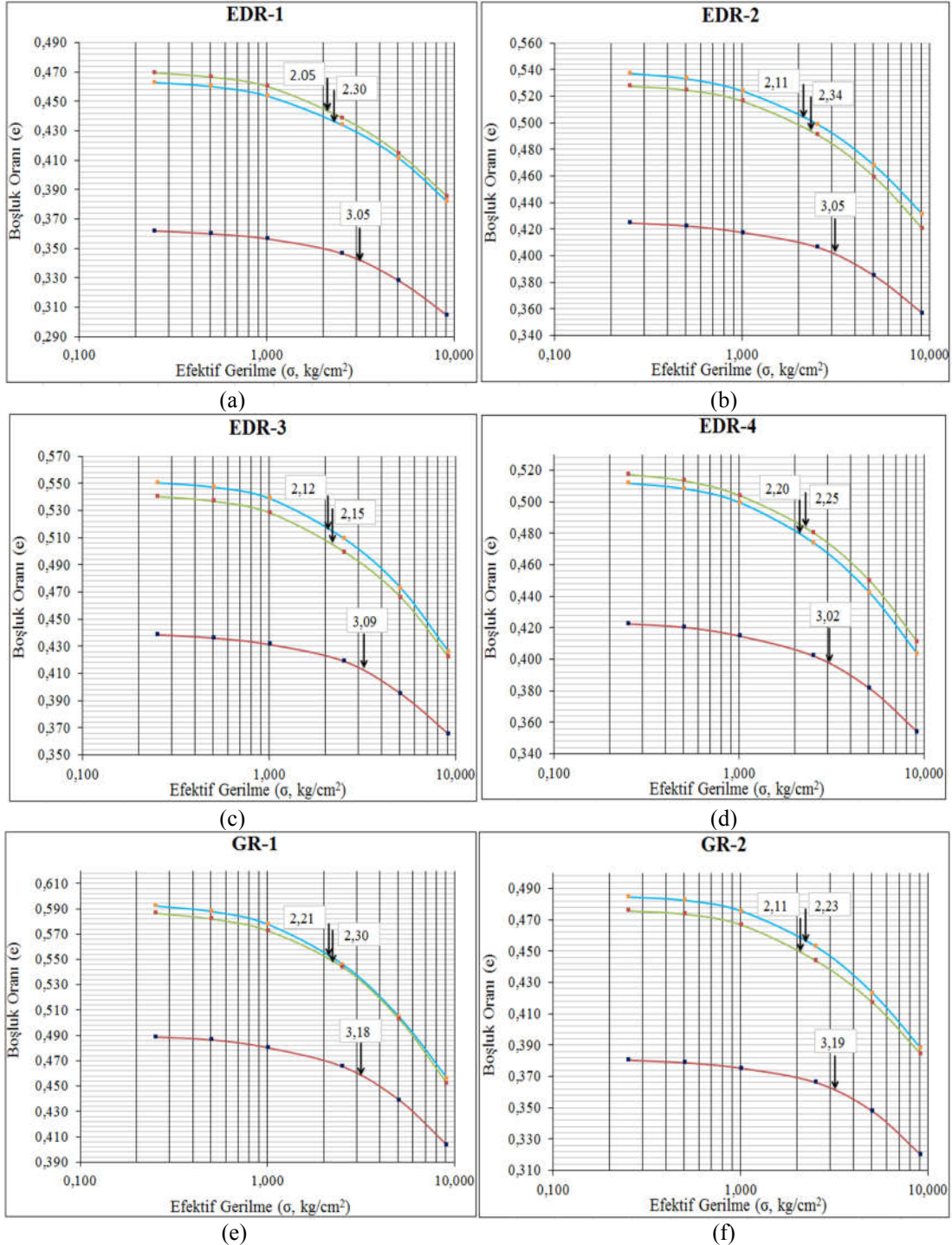


Şekil 6. CL-2 kompaksiyon deneylerine karşılık gelen konsolidasyon eğrileri

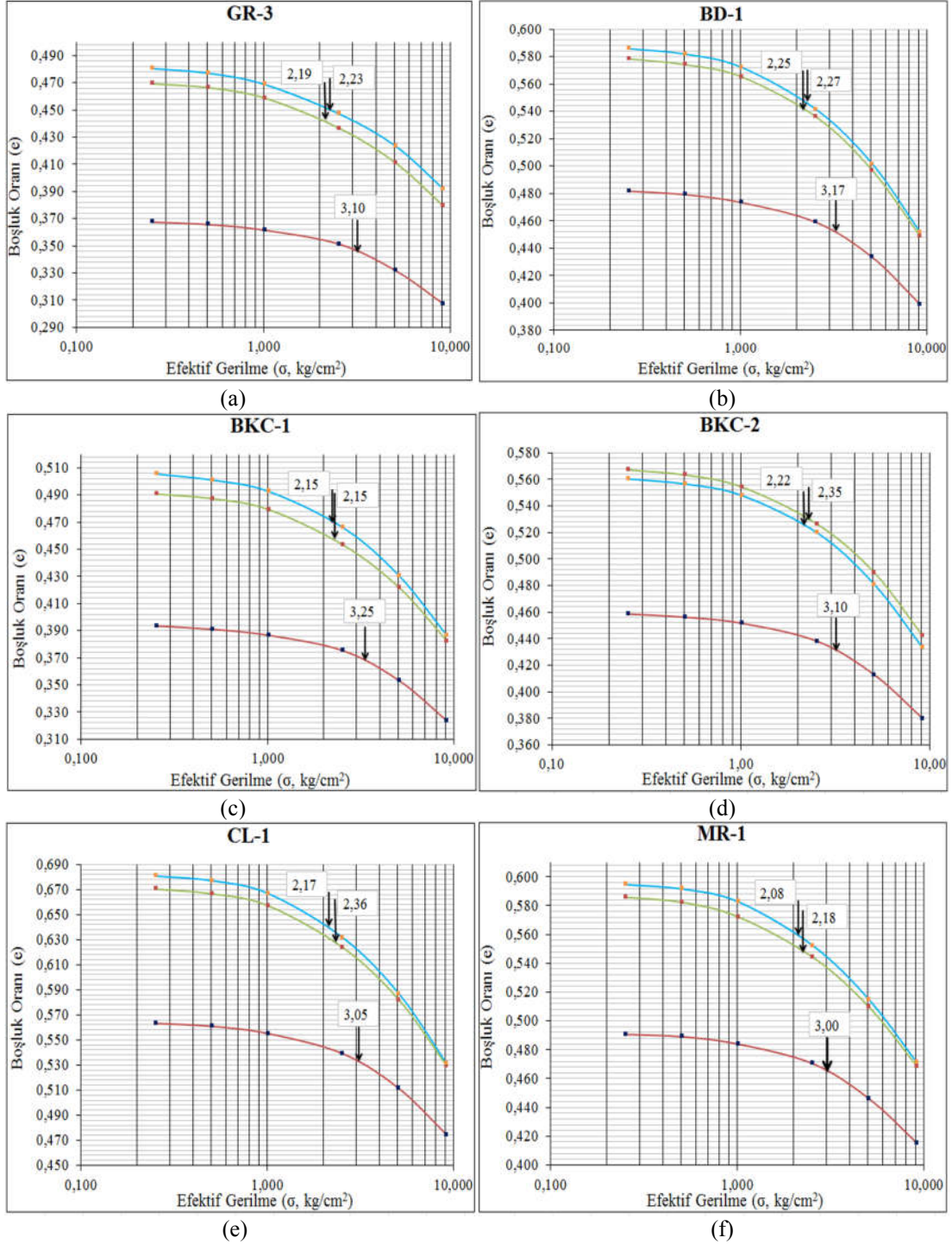
Şekil 6-8'deki konsolidasyon grafikleri incelendiğinde konsolidasyon eğrilerinin hepsinde efektif gerilmedeki artışa bağlı olarak boşluk oranının azaldığı görülmektedir. Bu durumun nedeni zeminin maruz kaldığı gerilme değerindeki artışa bağlı olarak zeminin boşluklarındaki su ve havanın dışarı atılması ve zemin tanelerinin daha sıkı bir yapıya sahip olmasıdır. Ayrıca boşluk oranı değerleri, ön konsolidasyon basıncının altındaki gerilmelerde çok fazla değişmezken, ön konsolidasyon basıncından yüksek gerilmelerde çok fazla azalmaktadır. Bu durum göz önüne alınacak olursa zemine uygulanacak gerilmelerin; ön konsolidasyon basıncından yüksek olması halinde zeminde oluşacak deformasyonların fazla, ön konsolidasyon basıncından düşük olması

halinde ise bu deformasyonların daha az olacağı söylenebilir.

Konsolidasyon grafikleri genel olarak incelendiğinde kompaksiyon enerjisindeki artışa bağlı olarak boşluk oranlarının azaldığı, ön konsolidasyon basınçlarının ise arttığı görülmektedir. Kompaksiyon enerjisindeki artış, tanelerin birbirlerine daha fazla yaklaşmasına ve kenetlenmesine neden olduğu için zemindeki boşluk oranı azalır ve böylece ön konsolidasyon basıncı artar. Boşluk oranı kompaksiyon enerjisindeki artışa bağlı olarak azalmasına rağmen kompaksiyon eğrilerinin %100 doyunluk çizgisi ile kesilmemesi zemin içerisinde her zaman bir miktar boşluk kaldığını göstermektedir.



Şekil 7. Çalışma kapsamındaki zeminlerin konsolidasyon grafikleri, a) EDR-1, b) EDR-2, c) EDR-3, d) EDR-4, e) GR-1, f) GR-2

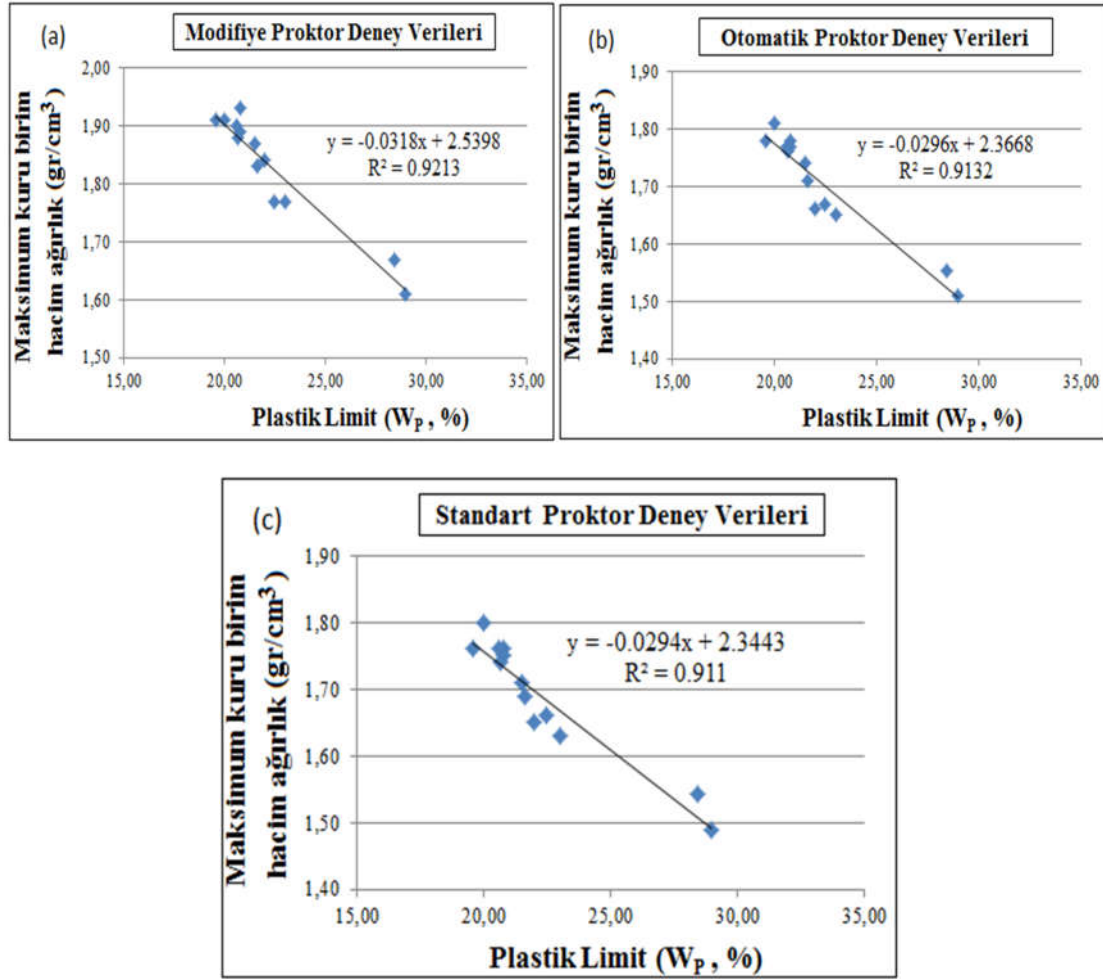


Şekil 8. Çalışma kapsamındaki zeminlerin konsolidasyon grafikleri, a) GR-3, b) BD-1, c) BKC-1, d) BKC-2, e) CL-1, f) MR-1

3.1. Plastik Limit (w_p) ile Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (γ_{k-max}) ve Optimum Su Muhtevası (w_{opt}) Arasındaki İlişkiler

DeneySEL çalışmalar sonrasında elde edilen veriler arasındaki bazı ilişkiler incelenmiştir. Şekil 9'da görüldüğü gibi maksimum kuru birim hacim ağırlık

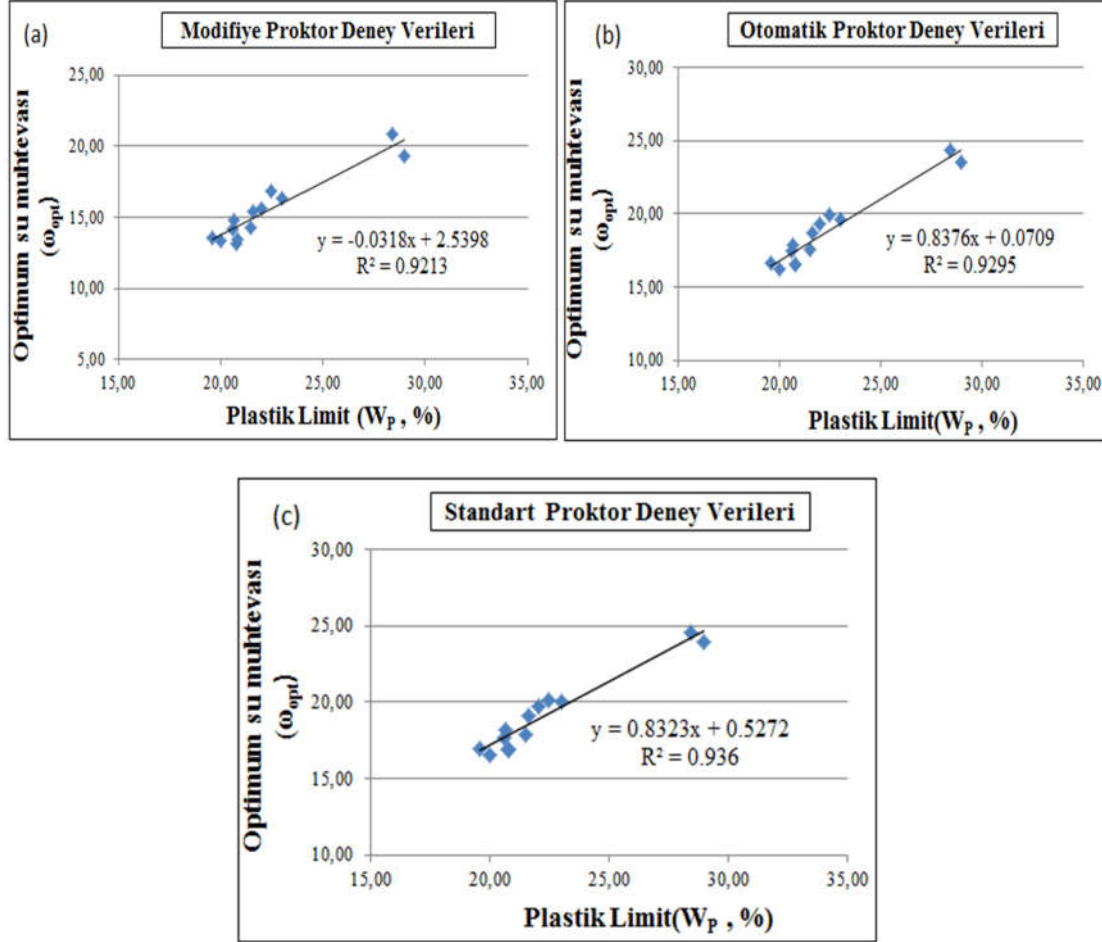
ile plastik limit arasında yüksek korelasyon ilişkisi elde edilmiştir. Her üç tip Proktor deneyinden elde edilen maksimum kuru birim hacim değerlerinin plastik limit ile yüksek korelasyon katsayısına sahip olduğu ve her iki değer arasında azalan bir doğrusal ilişkinin olduğu belirlenmiştir.



Şekil 9. Plastik limit (w_p) – maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{k-max}) ilişkisi a) Modifiye Proktor, b) Otomatik Proktor ve c) Standart Proktor deney verileri

Şekil 10'da görüldüğü gibi plastik limit ile optimum su muhtevası arasında da yüksek korelasyona sahip bir ilişkiye rastlanmıştır. Bu ilişkide maksimum kuru

birim hacim ağırlık ile olan ilişkinin tersine her iki değer arasında artan doğrusal bir ilişki elde edilmiştir.



Şekil 10. Plastik limit (w_p) – Optimum su muhtevası (w_{opt}) ilişkisi a) Modifiye Proktor, b) Otomatik Proktor ve c) Standart Proktor deney verileri

Elde edilen bu ilişkiler, kil zeminlerde laboratuvarında kolay belirlenebilen Plastik Limit değeri ile Proktor değerlerinin tahmininde kullanılarak, malzemenin sıkışabilirlik özelliklerini hızlı değerlendirmede yol gösterici olabilir. Her ne kadar bu çalışmada kullanılan killer için bu parametreler arasında yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiş olsa da, çalışmada kullanılan numune sayısı 13 ile sınırlı kalmıştır. Korelasyon grafiklerinden elde edilen denklemlerin daha kullanılabilir olması için numune sayısının artırılarak eşitliğin güvenilirliğinin artırılması önerilmektedir.

3.2. Van Gölü Çevresindeki Killerin Sıkışabilirlik Özelliklerinin Değerlendirmesi

Zeminlerin yol dolgularında veya kil çekirdek dolgu barajlarda kullanılabilmesi için belirli şartları sağlamaları gerekmektedir. Bu şartlar Karayolları Teknik Şartnamesi [16] ve DSİ Teknik Şartnamesi'nde [17] yer almaktadır.

Van Gölü etrafındaki 13 farklı noktadan alınan kil zeminlere ait Proktor değerleri mühendislik yapılarında kullanılabilirlik açısından da değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan kil numunelerinden elde edilen tüm sonuçlar her iki

şartnameye göre değerlendirildiğinde, Proktor değerleri açısından Van Gölü kuzeyindeki organik içerikli CL-1 numunesi ile Plastisite İndisi yüksek olan CL-2 numunesinin KGM Teknik Şartnamesine uygun olmadığı belirlenmiştir

(Çizelge 4). DSİ Şartnamesi açısından ise sadece Bakacak bölgesindeki BKC-2 ve Bardakçı bölgesindeki BD-1 numunelerinin sıkışma özelliklerinin uygun olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4).

Çizelge 4. Zeminlerin şartname sınırları uygunluk kontrolü

Numune No	Numune Kodu	Özgül Ağırlık (G_s)	Likit Limit (LL)	Standart Proktor Max. kuru birim hacim ağırlık (gr/cm^3)	Plastisite İndisi (%)	KGM Teknik Şartname	DSİ Teknik Şartname
1	GR-1	2,63	46,95	1,65	24,94	✓	X
2	GR-2	2,66	29,1	1,76	8,35	✓	X
3	GR-3	2,63	28,9	1,75	8,11	✓	X
4	EDR-1	2,66	27,3	1,80	7,33	✓	X
5	EDR-2	2,69	29	1,74	8,35	✓	X
6	EDR-3	2,62	34,3	1,71	12,81	✓	X
7	EDR-4	2,68	30,8	1,76	10,19	✓	X
8	BKC-1	2,65	32,6	1,76	13,01	✓	X
9	BKC-2	2,6	37,98	1,63	14,97	✓	✓
10	BD-1	2,65	42,4	1,69	20,8	✓	✓
11	CL-1	2,5	37,25	1,49	8,27	X	X
12	CL-2	2,68	61,4	1,54	32,99	X	X
13	MR-1	2,66	30,7	1,66	8,23	✓	X
Uygulanan Standart	KGM	-	≤ 60	$\geq 1,45$	≤ 35		
	DSİ	2,5-2,8	40-50	1,43-1,87	14-20		

4. SONUÇLAR

Bu çalışmanın sonucunda; kompaksiyon eğrilerinin optimum bölgelerine bakıldığında, enerjideki artışa bağlı olarak eğri pik noktalarının sola doğru kaydığı ve yükseldiği görülmektedir. Bu değişim, kompaksiyon enerjisindeki artışa bağlı olarak optimum su muhtevasının azaldığını, kuru birim hacim ağırlığın ise arttığını göstermektedir.

İncelenen numunelerin optimum su muhtevası, Modifiye Proktor deneylerinde 13,2 ile 20,9 arasında, Standart Proktor deneylerinde 16,5 ile 24,5 arasında ve Otomatik Proktor deneylerinde 16,2 ile 24,3 arasında belirlenmiştir. En yüksek su muhtevası değerleri Van Gölünün en kuzeyindeki CL-1 ve CL-2 numunelerinde, en düşük su muhtevası değerleri ise en güneydeki EDR-1 ve GR-2 numunelerinde elde edilmiştir.

Kompaksiyon eğrilerinin optimumdan kuru bölgesine bakıldığında, eğrilerin birbirine yaklaşık

paralel durumda olduğu görülürken optimumdan ıslak bölgede ise birbirini kesmiştir. Bu durum optimumdan kuru bölgede sıkıştırma enerjisindeki farkın önemli ölçüde olduğunu, optimumdan ıslak bölgede ise bir noktadan sonra sıkıştırma enerjisindeki artışın zemin sıkışmasına herhangi bir etkisinin olmadığını ortaya koymaktadır.

Ayrıca bütün kompaksiyon eğrilerinin %100 doygunluk çizgisinin solunda kaldığı yani kompaksiyon enerjisindeki artışa rağmen zeminin içerisinde bir miktar hava kaldığı tespit edilmiştir.

Standart ve Otomatik Proktor kompaksiyon eğrilerinden, aynı sıkıştırma enerjisi (600 kN-m^3) uygulanmasına rağmen Otomatik Proktor deneyinde az da olsa yüksek kuru birim hacim ağırlık ve daha düşük su muhtevası değerleri elde edilmiştir.

Konsolidasyon deneylerinde ise Standart ve Otomatik Proktor yöntemi ile sıkıştırılan numunelere aynı sıkıştırma enerjisi uygulandığı

için birbirine yakın boşluk oranı ve ön konsolidasyon basıncı değerleri elde edilmiştir.

Tüm zeminlerin konsolidasyon grafikleri genel olarak incelendiğinde kompaksiyon enerjisindeki artışa bağlı olarak boşluk oranlarının azaldığı, ön konsolidasyon basınçlarının ise arttığı görülmektedir.

Çalışma sonucunda, seçilen zemin numunelerinin plastik limit değeri ile maksimum kuru birim hacim ağırlığı arasında doğrusal azalan, optimum su muhtevası ile de doğrusal artan yüksek korelasyon katsayısına sahip bir ilişki elde edilmiştir. Ancak denklemlerin kullanılabilir olması için numune sayısının artırılarak denklemlerin güvenilirliğinin artırılması önerilmektedir.

Van Gölü etrafındaki killerin sıkışabilirlik özellikleri değerlendirildiğinde, CL-1 (Proktor değeri sınırda olduğu için) ve CL-2 (LL>60 olduğu için) haricindeki tüm killerin Karayolları Teknik Şartnamesine (2013) göre yol dolgularında kullanılabilirliği belirlenmiştir. DSİ (1993) şartnamesine göre Van Gölü etrafındaki killer değerlendirildiğinde ise, sadece BKC-2 ve BD-1 numunelerinin kil çekirdek dolgu tipi barajların kil çekirdek kısmında kullanılabilir nitelikte olduğu tespit edilmiştir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bilgi ve birikimleri ile her türlü desteği veren kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet TÜRK MENOĞLU'na, arazi ve laboratuvar çalışmalarında çok büyük katkısı olan Jeoloji Mühendisi Engin TURGUT'a teşekkür ederim. Bu çalışma, VAN Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2018-6852 No'lu proje olarak desteklenmiştir.

6. KAYNAKLAR

1. Aytekin, M., 2004. Compaction-Related Tests, Teknik Yayınevi, 624, Ankara.

2. Lambe, T.W., 1958a. The Structure of Compacted Clay, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 84 (1654), 1-34.
3. Lambe, T.W., 1962. Foundation Engineering, Chap.4. Soil Stabilization, Mc. Graw-Hill, 88, New York.
4. Lambe, T.W., 1958b. The Structure of Compacted Clay, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 84 (1655), 1-34.
5. Cetin, H., Fener, M., Soylemez, M., Gunaydin, O., 2007. Soil Structure Changes During Compaction of a Cohesive Soil, Engineering Geology, 92, 38-48.
6. Ateş, Y., 2010. Van Gölü Havzası Killerinin Mineralojik, Fiziksel, Kimyasal Özellikleri ve Kullanım Alanlarının Belirlenmesi (Doktora Tezi). YYÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
7. ASTM D854-14, 2014. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
8. ASTM D2216-19, 2019. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
9. ASTM D2487-17e1, 2017. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
10. ASTM D422-63e2, 2007. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
11. ASTM D4318-17e1, 2017. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
12. ASTM D698-12e2, 2012. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
13. ASTM D1557-12e1, 2012. Standard Test Methods for Laboratory Compaction

- Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
14. ASTM D2435-03, 2003. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
 15. Casagrande, A., 1936. The Determination of the Pre-Consolidation Load and its Practical Significance, Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp60-64, 22-26 Haziran 1936, Cambridge.
 16. KGM, 2013. Karayolu Teknik Şartnamesi, KGM Genel Müdürlüğü, Ankara.
 17. DSİ, 1993. Barajlara ait Teknik Şartname, DSİ Genel Müdürlüğü, Ankara.

Openair® Plazma Sisteminin Polyester İçerikli Çözümlü Örme Kumaşlara Etkisinin İncelenmesi

Sabiha SEZGİN BOZOK*¹, R. Tuğrul OĞULATA¹, Serin MEZARCIÖZ¹

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

Geliş tarihi: 01.06.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Plazma, tekniği düşük enerji, su, kimyasal madde tüketimi sağlayabilmesi gibi avantajlarla konvansiyonel yaş işlemlere göre daha çevre dostu bir uygulamadır. Daha önce yapılmış çalışmalarda termal olmayan farklı plazma sistemleri tekstil yüzeylerine uygulanmış ve bazı uygulamalarda malzemenin boya alımında artış olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada daha önce tekstil yüzeylerinin boyanabilirliğine etkisi denenmemiş bir teknik olan Openair® plazma sistemi üzerinde çalışılmıştır. %100 polyester içerikli çözümlü örme kumaşlara Openair® plazma sistemiyle 3 farklı sürede işlem uygulanmıştır. Ardından işlem görmemiş referans numune ve işlem görmüş numuneler dispers ve pigment boyarmaddelerle eşit boyama şartlarında renklendirilmiştir. Numunelere SEM ve FT/IR analizleri, spektrofotometre ile renk ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çözümlü örme kumaş, Sürdürülebilir bitim işlemi, Plazma tekniği, Openair® plazma, Boyanabilirlik

Investigation of the Effects of Openair® Plasma System on Polyester Contained Warp Knitted Fabrics

Abstract

Plasma is more environmentally friendly application compared to conventional wet processes with its advantages such as low energy, water and chemical consumption. In previous studies different non-thermal plasma systems have been applied to textile surfaces, and in some applications, an increase in the dye uptake of the material has been determined. In this study, Openair® plasma system, a technique that has not been evaluated yet its effect on the dyeability of textile surfaces, has been studied. The warp knitted fabrics with 100% polyester content were treated with Openair® plasma system in 3 different times. Then untreated reference sample and treated samples were colored with dispers and pigment dyes under equal dyeing conditions. SEM and FT/IR analyzes and color measurements with a spectrophotometer were performed.

Keywords: Warp knitted fabric, Sustainable finishing, Plasma technique, Openair® plasma, Dyeability

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Sabiha SEZGİN BOZOK, sbozok@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Maddenin dördüncü hali olan plazma ilk kez 1880'lerde M. Faraday tarafından keşfedilmiştir ve ilk olarak 1980'de Langmuir tarafından plazma kavramı önerilmiştir [1]. Plazma, negatif ve pozitif yüklerin eşit yoğunlukta olduğu iyonize bir gazdır ve geniş bir sıcaklık ile basınç aralığında var olabilmektedirler. Plazma serbest elektronlar, iyonlar, radikal UV radyasyonu ve kullanılan gaz türüne bağlı olarak farklı partiküllerden oluşmaktadır. İyonlaşma, parçalanma ve uyarma işlemleri sonucunda oluşan reaktif plazma türleri çok çeşitli kimyasal bağları ayrıştırmak için yeterlidir ve bu da önemli sayıda eş zamanlı rekombinasyon mekanizmasına yol açar [2]. Yarı iletken fiziğinde iyi bilinen plazma, polimer endüstriyel uygulamalar için gözeneksiz, tek tip ince üretimin özel avantajlarının ortaya çıktığı yeni sanayi olanakları sunmaktadır. Günümüzde, genişliği 1 metreden büyük olan tekstil kumaşları, ticari bir ölçekte rulodan ruloya düşük basınç plazmayla muamele edilebilmektedir [3]. Plazma polimerizasyon tekniğinin birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlar;

- 1) Tüm organik, organo-metalik ve hetero-atomik organik bileşenlere uygulanabilmektedir,
- 2) Kütle özelliklerini değiştirmeden yüzey özellikleri modifiye edilebilmektedir,
- 3) Konvansiyonel tekniklere göre daha az su kullanımı ve enerji tüketimi sağlar,
- 4) Malzeme verdiği zarar çok düşüktür.

Plazma işleminin etkinliği cihaz parametrelerine ve süre, basınç, güç, frekans, akış hızı, gaz gibi işlem şartlarına bağlıdır [4]. İşlem için kullanılan iki tip gaz bulunmaktadır: (I) Polimer oluşturan veya biriken plazma, (II) Birikmeyen ve polimer oluşturmayan plazma [5]. Oksijen, azot, argon, hidrojen vs. polimer oluşturmayan gazlar, aseton, metanol, alilamin, akrilik asit etilen, florakarbon gibi gazlar ise polimer oluşturan gazlardır. Polimer oluşturmayan gazlar lif yüzeyindeki polimer zincirinden hidrojen atomu alır ve serbest radikaller oluşturur. Polimer oluşturan gazlar ise radikal/iyonik mekanizmalarla polimer oluşumunu sağlar ve lif yüzeyinde reaktif fonksiyonel gruplar

içeren polimerik film meydana getirir. Plazma tekniğinin yüksek reaktivite özelliğinin sayesinde tekstil malzemelerinde farklı özellikler elde edilebilmektedir [6]. Bunlar;

- Malzemenin hidrofilik veya hidrofobik özelliklerini geliştirmek: Oksijen, amonyak, hava, azot gibi gazların plazma hali ile sentetik polimerlerin ıslanabilirliği geliştirilebilmektedir. Pamuk, yünü ipek gibi doğal liflerin hidrofobik bitim işlemi uygulamak için siloksan, perflorkarbon, akrilat gibi kimyasallar kullanılmaktadır.
- Adhezyon artırma: Plazma tekniğiyle, nihai ürünün mekanik özelliklerini geliştirerek sentetik liflerin yüzey enerjisi artırabilmektedir. Bu şekilde lif ile kaplama arasındaki adhezyon artırılmaktadır.
- Boyama ve baskı: Literatürde plazma tekniği ile tekstil yüzeylerinin boyanabilirliğinin (boyayı alabilme) artırılması ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Yüzey alanının geliştirilmesi, kapilaritenin artırılması, kristalinitenin düşmesi, lif yüzeyinde reaktif alanların oluşturulması gibi birçok farklı durumlarla polimerlerin boyanabilirliği geliştirilmektedir.
- Elektriksel özellikler: Sentetik liflere antistatik özellikler verilebilmektedir. Bunun yanında literatürde yüksek iletken özellikli kumaşların elde edildiği çalışmalar da mevcuttur.
- Akıllı filtrasyon özellikler

Plazma işleminin çok yönlü oluşu; güç tutuşurluk, kırılmaya karşı dayanım, antimikrobiyal, biyolojik uyumluluk, UV koruma, yumuşaklık gibi tekstil için çok önemli olan farklı özellikleri kazandırma imkanı sunmaktadır.

Sentetik lifler, mükemmel mekanik ve fiziksel özellikleri nedeniyle elyaf, film ve plastik biçimde hazır giyim ve teknik tekstil malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte ıslanabilirliğinin düşük olması adhezyon, boyama, fonksiyonel bitim işlemi gibi birçok alanda kısıt yaratmaktadır [4,7]. [Boya emilim bölgeleri olarak küçük amorf bölgelerine sahip olan, kompakt ve kristal yapıya sahip sentetik bir lif olan polysterin boyama işlemi yüksek

sıcaklıkta yüksek basınç altında sentetik dispers boyalarla gerçekleştirilmektedir. Sentetik tekstil yüzeylerinin boyama işleminin; boya banyosundan boyanın difüzyonu, boyanın elyafın dış yüzeyine adsorpsiyonu ve boyanın adsorbe edilmiş yüzeyden elyafın içine difüzyonu dahil üç sürekli adımdan oluştuğu bilinmektedir. Dolayısıyla lifin yüzey özellikleri boya alımını etkilemektedir [8]. Sentetik polimerin boya alımındaki artışı sağlayabilen faktörler [1];

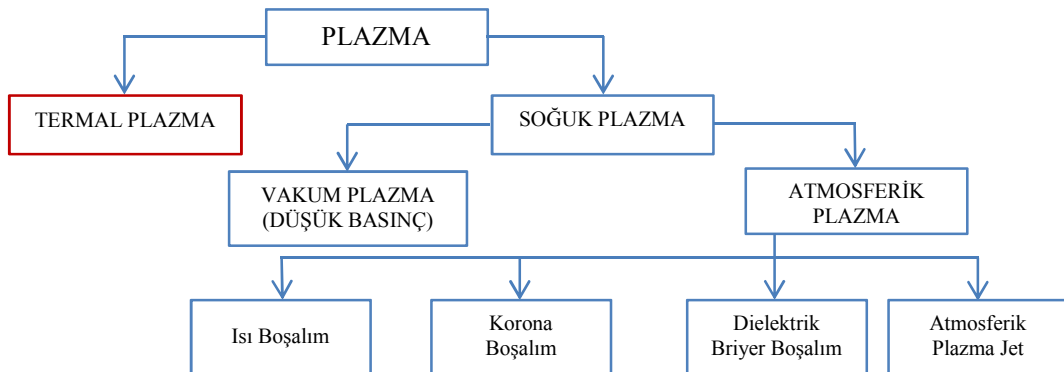
- Yüzey aşınmasıyla kumaş yüzey alanının birim hacim başına değişmesi,
- Plazma etkisinin elyaf üzerindeki aşındırıcı etkisi ve yüzey kirliliklerinin giderilmesi

şeklinde sıralanabilmektedir. Sentetik liflere uygulanan plazma işlemi, lifin aşınmasını ve boyanabilirliği sağlayan polar grupların girmesini sağlar. Plazma tekniği ile sentetik tekstil ürünlerinin boya alma yeteneğinin artırılması hakkında literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Ferrero (2004) polyester için akrilik asit bazlı plazma işlemi uygulamıştır. Bazik boyarmadde ile boyanan kumaşların renk kuvvetlerinde artış olduğunu tespit etmiştir [9]. Oktem ve arkadaşları (1999) polyester ve poliamid içerikli kumaşlara akrilik asit, su, hava, argon ve oksijen gaz plazmaları ile işlem uygulamıştır. Sonuçlarda uygulanan tüm plazma polimerizasyonlarının numunelerin ıslanabilirliği, boyanabilirliği, lekeye karşı direncini arttırdığını tespit etmişlerdir [10].

Başka bir çalışmada argon ve oksijen gazları polyester yüzeye uygulanmış ve yüzeyin

işlevselleşmesiyle boyanabilirliğin dramatik olarak arttığı gözlemlenmiştir [11].

Plazma uygulamaları basınç açısından; düşük ve atmosferik plazma olarak; sıcaklık açısından düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık olarak ikiye ayrılmaktadır (Şekil 1). Isıl plazmalarda uygulanan yüksek sıcaklık polimerlerin yapısında bozulmalara neden olmaktadır. Bu nedenle pek çok tekstil yüzeyi için soğuk plazma işlemi uygulanmaktadır. Atmosferik plazma işlemi; düşük maliyet, yüksek proses hızı ve sisteminin basit olması sebebiyle en çok tercih edilen tekniktir [12]. Plazma işleminde enerji girişi; katı, sıvı ve gaz agregasyon halleri üzerinden gerçekleşir. Gaz halindeki maddeye ek olarak elektriksel boşalma basınç yoluyla enerji girişinde bulunulursa plazma oluşur. Bu esnada elektronlar atom kabuğundan kopabilirler ve bağlar kopmaya başlar. Bu da serbest elektron, iyon ve molekül fragmanlarının oluşumlarıyla sonuçlanır. Normal basınç altında bu durum kararsızlığından dolayı neredeyse kullanılamaz. Özel bir firma, 1995 yılında geliştirdikleri nozül sistemi ile bu durumu endüstriyel amaçlar için ve aynı hatta kullanılabilir hale getirmiştir [13]. Openair® plazma sistemi adıyla ticari olarak farklı yüzeylere uygulanan bu sistemde farklı gazlar kullanılarak nözüller ile plazma aktivasyonu gerçekleştirilir ve malzemede yüzey enerjisi elde edilir. Bu sistem atmosferik plazma sistemi sınıfına giren bir teknik olup tekstil yüzeylerine uygulanması bakımından üzerinde fazla çalışma yapılmamıştır.



Şekil 1. Plazma türleri [10]

Bu çalışmada Openair® plazma sisteminin %100 polyester içerikli çözgümlü örme kumaşlara etkisi incelenmek istenmiş ve boya alımında artış sağlayıp sağlamadığının tespit edilmesi hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Çalışmada döşemelik olarak üretilmiş ticari çözgümlü örme kumaş (267,9 gr/m²) kullanılmıştır. Ön terbiye işleminden geçmiş ve boyanmamış şekilde işletmeden temin edilmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Kumaş özellikleri

Özellik	
Kumaş Türü	Trikot
Örgü	Kapalı Triko
Makine İnceliği	28
Kumaş Üretim Hızı	2000 devir/hız
İlme Sıra Sıklığı	22,5 sıra/cm
İlme Çubuk Sıklığı	11 çubuk/cm

Uygulanan plazma işlemi şartları Çizelge 2'deki gibidir. İşlem, kumaşın zarar görmemesi için düşük sıcaklıkta ve azot gazı ile gerçekleştirilmiştir. Kumaş numuneleri hareketli parçalar üzerine yerleştirilmiş ve PFW 70 plazma jet ile uygulama yapılmıştır. İşleme maruz kalma süresinin etkisini görmek amacıyla numunelere ayrı ayrı 3 farklı hızda işlem yapılmıştır. 4 tekrarlı olarak uygulanan her işlemde aynı zamanda kumaşların hem ön hem arka yüzleri işlem görmüştür. İşlem sonrasında numuneler alüminyum folyoya sarılıp streçlenmiştir.

Çizelge 2. Uygulanan plazma işleminin özellikleri

İşlem	Özellikleri
Kullanılan gaz türü	Azot
Elektrot ile yüzey arasındaki mesafe	3 mm
Güç	280 V – 1.5 kVA
Hava basıncı	4 bar
Frekans	21 kHz
Uygulama akış hızı	10 m/dk; 15 m/dk; 20 m/dk
Kullanılan gaz türü	Azot

2.2. Metod

Plazma işleminden sonra numunelere boyama işlemi uygulanmıştır. Boyama işlemi için emdirme, kurutma ve fiksaj (pad-dry-cure metodu) işlemleri uygulanmıştır. İşlemin farklı boyalara etkisini görebilmek için pigment ve dispers boyarmaddeler ile 2 tekrarlı olarak boyanan numunelerin diğer tüm boyama şartları eşit şekilde ayarlanmıştır. Boyama reçeteleri Çizelge 3 ve Çizelge 4'de verilmiştir. Boyama işleminde kumaşlar 2 kez boya banyosuna daldırılmış olup ardından silindirler arasından geçirilmiştir. Silindirden geçiş hızı 3 m/dk, silindir basıncı 2 bar olarak ayarlanmıştır. Boyama sonrası 130 °C'de kurutma, 220 °C'de fiksaj işlemi yapılmıştır.

Çizelge 3. Pigment boyama reçetesi

Boyarmadde ve Kimyasallar	Miktar
Pigment Black King	1:50
AC 186	75 g/L
FX S31	7,5 g/L
Primasol AM	10 g/L
Seramet CAS	3 g/L

Çizelge 4. Dispers boyama reçetesi

Boyarmadde ve Kimyasallar	Miktar
Setapers Black EC2G	1:50
Primasol AM	10 g/L
Permasulin FF	2,5 g/L
Serawet CAS	3 g/L
Asetik Asit	pH 4-4,5

İşlem görmemiş referans kumaş ve işlem gören numunelerin karakterizasyonu için SEM (taramalı elektron mikroskopu) Çukurova Üniversitesi Merkezi Laboratuvarda bulunan FEI Quanta 650 Field Emission SEM cihazı kullanılarak, JASCO FT/IR-6800 spektrometresi ile de FTIR analizi uygulanmış ve ortaya çıkan görüntü ve grafikler değerlendirilmiştir.

Numunelerin kaplama sonrası renk değişimi ve boyama sonrası renk kuvvetlerini ölçmek için Çukurova Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Minolta marka CM 3600 model bu cihaz ile gözlemci açısı 10° olacak şekilde, D65 gün ışığı altında ve 400-700 nm dalga

boyları arasında ölçümler yapılmıştır. Bilgisayara bağlı olarak çalışan spektrofotometre cihazında analizler için özel bir yazılım olan RealColor1.3® kullanılmıştır. Ölçümler sonrası L* (açıklık-koyuluk), a*(kırmızılık-yeşillik), b*(sarı-mavilik), C* (doygunluk), h (renk ölçüsü) değerleri kaydedilmiştir. Daha sonra numunelerin işlem öncesi ve sonrası renk farkını hesaplamak için CIELab 1976 formülü kullanılarak ΔL^* , Δa^* , Δb^* , ΔC^* , Δh^* , ΔE (toplam renk farkı) değerleri elde edilmiştir [14]. Bu değerler aşağıdaki Eşitlik 1-6'ya göre hesaplanmaktadır.

$$\Delta L^* = (L^* \text{ numune} - L^* \text{ standart}) \quad (1)$$

$$\Delta a^* = (a^* \text{ numune} - a^* \text{ standart}) \quad (2)$$

$$\Delta b^* = (b^* \text{ numune} - b^* \text{ standart}) \quad (3)$$

$$\Delta C^* = (C^* \text{ numune} - C^* \text{ standart}) \quad (4)$$

$$\Delta h^* = (h^* \text{ numune} - h^* \text{ standart}) \quad (5)$$

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (6)$$

Ayrıca numunelerin boyama sonrası renk kuvvetlerini belirleyebilmek için aşağıda bulunan Kubelka-Munk formülünden faydalanılmıştır. R; renkli malzemenin reflektans değeri olarak kabul edilmektedir. Tek tek yapılan ölçümlerin sonuçları karşılaştırılmıştır (Eşitlik 7).

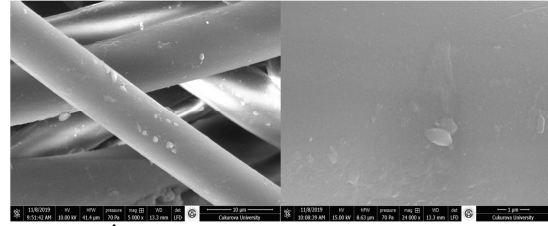
$$K/S = (1-R)^2 / (2R) \quad (7)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

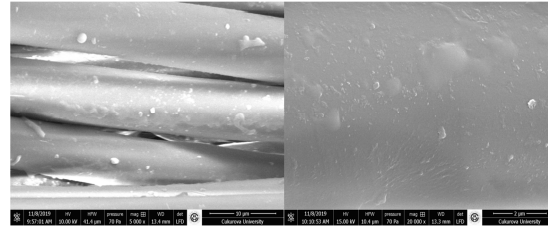
3.1. SEM Analizi

İşlem görmemiş referans numune ve 3 farklı hızda işlem görmüş numunelerin x5000 ve x20000 ile elde edilmiş görüntüleri Şekil 2, 3, 4, 5'de sıralanmıştır. Görüntüler genel olarak değerlendirildiğinde; işlem görmemiş numunenin lif yüzeylerinin daha düz ve pürüzsüz olduğu, plazma işlemi uygulanan numunelerin ise yüzeylerinde aşınmaların olduğu tespit edilmiştir. Bu da işlemin malzemede bir değişime neden

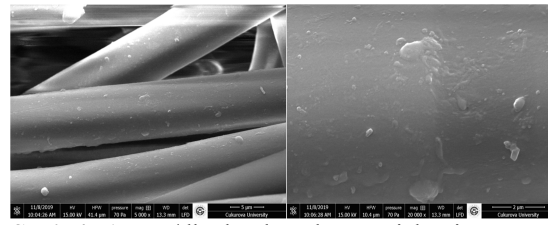
olduğunu dolayısıyla bir etkisinin olduğunu kanıtlamıştır. Görsel değerlendirme yapılırsa; 10 m/dk hızda plazma işlemi gören numunenin geçiş hızı diğerlerine göre daha yavaş olduğu için, bu numuneler işleme daha uzun süre maruz kalmıştır. Bu nedenle bu numunenin yüzeyinin diğer numunelere göre daha fazla pürüzlü olduğu söylenebilmektedir.



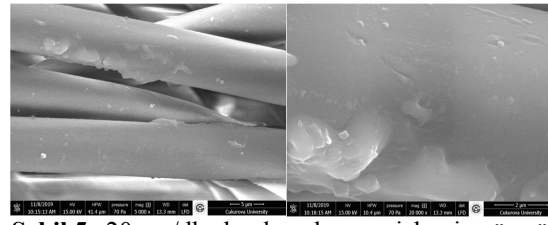
Şekil 2. İşlem görmemiş numuneye ait görüntüler



Şekil 3. 10 m/dk hızda plazma işlemi görmüş numuneye ait görüntüler



Şekil 4. 15 m/dk hızda plazma işlemi görmüş numuneye ait görüntüler

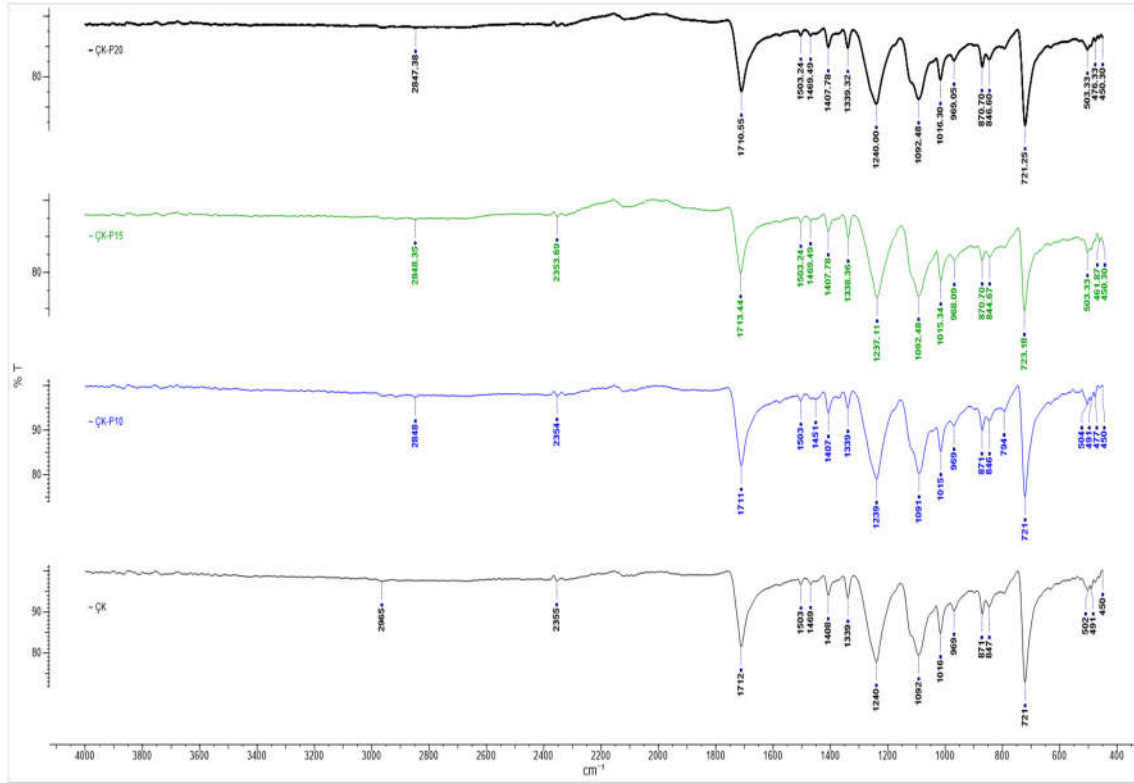


Şekil 5. 20 m/dk hızda plazma işlemi görmüş numuneye ait görüntüler

3.2. FT/IR Analizi

İşlem görmemiş referans numune ve 3 farklı hızda işlem görmüş numunelerin FT/IR analizi ile elde edilmiş multispektrum grafikleri Şekil 6'da verilmiştir. Grafik genel olarak değerlendirildiğinde numunelerin pik değerlerinin eş noktalarda olduğu, kimyasal yapılarının benzer

olduğu görülmektedir. Bu da işlem hızındaki değişikliklerin numuneler üzerindeki kimyasal gruplarda bir farklılığa neden olmadığını göstermektedir. En yüksek pik değeri olan 1710-1715 cm^{-1} bandındaki titreşimler polyesterin sahip olduğu ester gruplarından kaynaklanmıştır. 1237-1240 cm^{-1} dolaylarındaki piklere ise ester bağlarındaki C-O streci sebep olmuştur.



Şekil 6. Numunelerin FT/IR analizi sonuçları

4.3. Plazma sonrası, Boyama Öncesi Spektrofotometre Ölçümleri

Plazma sonrası boyanmamış numunelerde renk değişimi miktarını belirleyebilmek için yapılan bu işlemden toplam renk farkı değerleri esas alınmıştır. İşlem görmemiş numune ile plazma işlemi görmüş numunelerin ΔE (toplam renk farkı) değerleri Çizelge 5'te verilmiştir. Uygulanan Openair® plazma işleminin numunelerde renk değişimine sebep olduğu, en fazla değişimin ise 10 m/dk hızda plazma işlemi gören (en fazla maruz kalan) numunede olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5. İşlem görmemiş ve işlem görmüş numuneler arasındaki toplam renk farkı

Karşılaştırma Yapılan Numuneler	ΔE (Toplam renk farkı)
İşlem görmemiş numune - 10 m/dk hızda plazma işlemi gören numune	3,09
İşlem görmemiş numune - 15 m/dk hızda plazma işlemi gören numune	2,72
İşlem görmemiş numune - 20 m/dk hızda plazma işlemi gören numune	3,02

4.4. Boyama Sonrası Numunelerin Spektrofotometre Ölçümleri

Çalışmada uygulanan Openair® plazma işleminin polyester içerikli kumaşın boyanabilirliğine etkisini görmek amacıyla uygulanan renk ölçüm analizlerinin sonucu Çizelge 6 ve Çizelge 7’de verilmiştir. 10 m/dk hız’da işlem gören numuneler, 15 m/dk hız’da işlem gören numuneler, 20 m/dk hız’da işlem gören numuneler sırasıyla “P-10”, “P-15”, “P-20” şeklinde kodlanmıştır. Her iki boyarmadde ile boyanan numune gruplarında da en yüksek K/S değeri referans numunelerine ait olmuştur. Bu da işlem görmemiş numunenin renk kuvvetinin, boya alımının daha iyi olduğunu göstermektedir. Beklenenin aksine plazma işlemi numunelerin boya alımını olumsuz yönde etkilemiş, renklerinin daha zayıf olmasına yol açmıştır. Polyester içerikli tekstil malzemelerinin kimyasal olarak yapısına uygun olan dispers boyarmadde ile yapılan boyamalarda bile alınan kötü sonuç, Openair® sisteminin bu tür kumaşların boyanması için uygun olmadığını göstermiştir. Beklendiği gibi pigment boyarmadde ile boyanan numunelerin K/S değerleri, dispers boya ile renklendirilen numunelere göre oldukça düşük çıkmıştır. Boyanmış işlem görmemiş ve işlem görmüş numuneler arasındaki renk farklılığı değerleri Çizelge 8’de sunulmuştur. Dispers boyarmadde ile boyanan plazma işlemi görmüş numuneler işlem görmemiş numuneye göre daha yeşil, daha mavi ve daha açık hale gelirken; pigment boyarmadde ile boyanan plazma işlemi görmüş numuneler işlem görmemiş numunelere göre daha sarı, daha mavi ve daha açık hale gelmiştir. Referans numuneye göre diğer numunelerin toplam renk farklılığı yüksek çıkmıştır. Bu farklılık ise renk açıklığı değerlerinin (ΔL^*) oldukça yüksek olmasından kaynaklanmıştır.

Çizelge 6. Dispers boyarmadde ile boyanan numunelerin K/S değerleri

Numune	Boyarmadde Türü	K/S Değeri (600 nm)
Referans	Dispers	25,19
P-10	Dispers	24,65
P-15	Dispers	22,48
P-20	Dispers	24,39

Çizelge 7. Pigment boyarmadde ile boyanan numunelerin K/S değerleri

Numune	Boyarmadde Türü	K/S Değeri (600 nm)
Reference	Pigment	9,33
P-10	Pigment	7,85
P-15	Pigment	8,39
P-20	Pigment	8,46

Çizelge 8. İşlem görmemiş ve işlem görmüş boyalı numuneler arasındaki renk farkı

Numune	BM Türü	Renk Farkı Değerleri			
		Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔE^*
P-10	D	-0,004	-0,52	0,571	0,77
P-15	D	-0,024	-1,268	1,754	2,16
P-20	D	-0,054	-1,358	0,943	1,65
P-10	P	0,065	-0,216	2,263	2,27
P-15	P	0,107	-0,07	1,336	1,34
P-20	P	0,109	-0,125	1,232	1,24

BM: Boyarmadde, D: Dispers boyarmadde, P: Pigment boyarmadde.

4. SONUÇLAR

Plazma işlemi, enerji/su sarfiyatının düşük olması, çevre dostu olması, tekstil yapısına zarar vermemesi gibi avantajlarla tekstil alanında üzerinde en çok çalışılan tekniklerden biri haline gelmiştir. Bu teknik ile güç, frekans, basınç, gaz türü gibi farklı parametrelerle yüzeyde sağlanan fonksiyonel özellikler çeşitlendirilebilmektedir. Ekolojik açıdan değerlendirildiğinde kimyasal atığı azaltan bu sistemle ilgili geçmişte yapılan çalışmalarda genel olarak atmosferik plazma sistemleri üzerinde uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Atmosferik plazma işleminin farklı teknikleriyle uygulanan işlemlerin sentetik içerikli tekstil malzemelerinin boyanabilirliğini kısmen arttırılabildiği daha önce yapılmış ilgili bazı çalışmalarda kanıtlanmıştır. Bu çalışmada ise daha önce polyester içerikli çözümlü kumaşların boyanabilirliğine etkisi bilimsel olarak incelenmemiş Openair® plazma sistemi üzerinde çalışılmıştır. Hali hazırda farklı malzemeler için özel bir firma tarafından kullanılan cihaz, %100 polyester içerikli çözümlü kumaşlara uygulanmış ve ardından bazı testler gerçekleştirilmiştir. SEM (tarayıcı elektron mikroskopu) analizlerinde plazma işleminin lif yüzeyini aşındırabildiği, yüzeyde pürüzlülüğe neden olduğu görülmüştür.

İşlem sonrası boyanmamış kumaşta renk değişimi olduğu spektrofotometre analizleri ile tespit edilmiştir.

Boyama sonrası yapılan renk ölçümlerinde ise beklenenin aksine Openair® plazma işlemi gören numunelerin renk kuvvetinin, boya alımının işlem görmemiş numunelere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Daha önce sentetik kumaşlara uygulanan atmosferik plazma sistemleri hakkında yapılmış çalışmaların aksine elde edilen bu sonuç, çalışmada uygulanan metotlar doğrultusunda bu sistemin sentetik içerikli çözgümlü örme kumaşların boya alımı açısından uygun olmadığını göstermiştir [4,9,10,11,15,16]. Daha sonra yapılacak çalışmalarda sistem parametreleri değiştirilerek ya da farklı plazma sistemleri üzerine çalışılarak polyester içerikli çözgümlü örme kumaşların boyanmasında ekolojik olarak kimyasal atığın az olduğu plazma sistemlerinde uygun olan metot tespit edilmesi hedeflenmiştir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, FBA-2018-10325 no'lu proje kapsamında yapılmış olup Çukurova Üniversitesi Rektörlüğü BAP Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Ayrıca çalışmada bahsedilen plazma işleminin gerçekleşmesini sağlayan Plasmatrete GmbH Türkiye firmasına teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. Shah J.N., Shah S.R., 2013. Innovative Plasma Technology in Textile Processing: A Step Towards Green Environment, Research Journal of Engineering Sciences, 2(4), 34-39.
2. Sparavigna A. 2008. Plasma Treatment Advantages for Textiles, www.researchgate.net/profile/Amelia_Carolina_Sparavigna/publication/1908142_Plasma_treatment_advantages_for_textiles/links/53f2f6180cf2bc0c40ecc03b/Plasma-treatment-advantages-for-textiles.pdf
3. Deshmukh, R.R., Bhat, N.V., 2011. Textile Dyeing: Pretreatments of Textiles Priors to Dyeing: Plasma Processing, InTechOpen, 33-56.
4. Kamel, M.M., El Zawahry, M.M., Helmy, H., Eid, M.A., 2011. Improvements in the Dyeability of Polyester Fabrics by Atmospheric Pressure Oxygen Plasma Treatment, The Journal of the Textile Institute, 102(3), 220-231.
5. Ammayapan, L., Basu, G., 2012. Plasma Treatment on Textiles, Asian Dyer, 8(6), 34-40.
6. Shishoo, R., 2007. Plasma Technologies for Textiles, Woodhead Publishing, 360s.
7. Chen, J.R., Belfort, G., 1999. Surface Modification of Poly (Ether Sulfone) Ultrafiltration Membranes by Low-temperature Plasma-induced Graft Polymerization, Journal of Applied Polymer Science. 72(10), 1327-1333.
8. Dave, H., Ledwani, L., Chandwani, N., Kikani, P., Desai, B., Nema, S.K., 2013. Surface Modification of Polyester Fabric by Non-thermal Plasma Treatment and its Effect on Coloration Using Natural Dye, Journal of Polymer Materials, Sempember, 291-303s.
9. Ferrero, F., 2003. Wettability Measurements on Plasma Treated Synthetic Fabrics by Capillary Rise Method, Polymer Testing 22, 571-578.
10. Öktem, T., Ayhan, H., Seventekin, N., Pişkin, E., 1999. Modification of Polyester Fabrics by in Situ Plasma or Post-plasma Polymerisation of Acrylic Acid, Journal of the Society Dyers and Colourists, 115, 274-279.
11. Nema, S.K., Jhala, P.B., 2015. Plasma Technologies for Textile and Apparel, Woodhead Publishing India Pvt Ltd, 360s.
12. Chakraborty, T., Bucknum, M.J., Castro, A., 2013. Computational and Experimental Chemistry: Developments and Applications, Apple Academic Press, Inc., 325s.
13. Anonim, 2017. Openair® Plazma Sistemleri, Uygulama Bilgisi, Plasmatrete GmbH Türkiye.
14. Duran, K., 2001. Tekstilde Renk Ölçümü ve Reçete Çıkarma, Ege Üniversitesi Tekstil ve Konfeksiyon Araştırma-Uygulama Merkezi Yayını, Bornova, İzmir.
15. Yaman, N., Özdoğan, E., Seventekin, N., 2013. Effect of Surrounded Air Atmospheric Plasma Treatment on Polypropylene Dyeability Using

- Cationic Dyestuffs, *Fibers and Polymers*, 14, 1472-1477.
- 16.** Gotoh K., Yasukawa, A., 2010. Atmospheric Pressure Plasma Modification of Polyester Fabric for Improvement of Textile-specific Properties, *Textile Research Journal*, 81(4), 368-378.

Farklı Nemde Kurutma Havası Kullanılarak Kurutulan Yerfıstığı'nın Kuruma Kinetiklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi

Kamil Neyfel ÇERÇİ^{*1}, Ertaç HÜRDOĞAN¹

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Osmaniye

Geliş tarihi: 30.06.2020

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Ürünlerin kurutulması saklanması eski çağlardan beri yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Gıda kurutma işleminde temel amaç ürünün içerisinde bulunan suyun üründen uzaklaştırılmasıdır. Bu sayede ürün içerisindeki mikroorganizmaların gelişmesini durdurulacak ve ürünlerin raf ömrü uzatılacaktır. Bu çalışmada Osmaniye'de üretimi ve hasadı yapılan yerfıstığı ürününün kurutulması, kurutma havasının farklı mutlak nem değerleri için incelenmiştir. Yerfıstığı'nın kuruma davranışı, tasarlanarak imal edilen deney düzeneği kullanılarak deneysel olarak belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca deneysel olarak elde edilen alınabilir nem oranı değeri 22 farklı ince tabaka kurutma modeline fit edilmiştir. Çalışma sonucunda aynı sıcaklıkta kurutma havası için, kurutma havası nem değerinin düşmesi ile difüzyon katsayısının ve kuruma hızının arttığı gözlemlenmiştir. Hii ve arkadaşları tarafından geliştirilen ince tabaka kuruma modeli, deneysel olarak elde edilen alınabilir nem oranı değerine en iyi yakınsayan model olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yer fıstığı, Kurutma, Kuruma kinetikleri, Alınabilir nem oranı, Matematiksel model

Experimental Determination of Drying Kinetics of Peanut Dried by using Drying Air at Different Humidity

Abstract

Drying and storing of products is a widely used method since ancient times. The main purpose of the food drying process is to remove the water contained in the product from the product. In this way, the development of microorganisms in the product will be stopped and the shelf life of the products will be extended. In this study, the drying of the peanut product produced and harvested in Osmaniye was investigated for different absolute humidity values of the drying air. The drying behavior of peanuts was determined experimentally using the experimental setup designed and manufactured. In the study, the experimentally obtained moisture ratio value was fit to 22 different thin layer drying models. As a result of the study, it was observed that for the drying air at the same temperature, the diffusion coefficient and the drying rate increase with the decrease of the drying air humidity. The thin layer drying model developed by Hii et al. was determined as the model best converging to the experimentally obtained moisture ratio value.

Keywords: Peanut, Drying, Drying kinetics, Moisture ratio, Mathematical model

*Sorumlu Yazar: (Corresponding author): Kamil Neyfel ÇERÇİ, kcerci@osmaniye.edu.tr

1. GİRİŞ

Gıda endüstrisinde gıdalar, doğal formlarında iken (sebzeler, meyveler, tahıllar, baharatlar, süt) veya işlendikten sonra (hazır kahve, çorba karışımları, peynir altı suyu) kurutulmaktadır. Gıdalar için kurutma, içerisindeki nemin değişik metotlarla alınarak, bozulmasına neden olan etkenlerin ortadan kaldırılması olarak başka bir ifade ile gıdadaki nemin uzaklaştırılması olarak tanımlanabilmektedir. Böylece ürün, bozulmalara karşı korunmakta ve raf ömrü uzamaktadır. Ayrıca kurutma sayesinde ürünlerin nakliyede kolaylık sağlaması için hacmi ve ağırlığı da azalmaktadır [1-4]. Birçok kurutma yöntemi arasında en sık kullanılanı, tabii kurutma olarak da adlandırılan güneş ışığında kurutmadır. Bu yöntemle kurutulan ürünlerin orijinal şeklini ve dokusunu (tekstür), taze iken sahip olduğu rengini ve vitamin içeriğini kaybetme eğilimi vardır. Ayrıca kurutma hızının hava şartlarına çok bağlı olması ve hava şartlarının değişiminin kontrol edilmesinin mümkün olmaması, ürün kalitesinde bozulmalara sebep olmaktadır [5]. Kurutmanın gıda kalitesi üzerine etkisi sadece besin değerleri üzerine değişimleri değil, aynı zamanda fiziksel, dokusal ve işlevsel değişimleri de kapsamaktadır. Tüketicilerin talepleri, ürünleri orijinal karakteristiklerinde tutma yönündedir. Bu talepler doğrultusunda çalışma maliyetlerini sınırlandırırken, bir yandan da hem işlemlerin olumsuz etkilerini minimize edecek çalışmaların geliştirilmesi hem de son ürünün kalitesinin korunması gerekmektedir. Gıda kalitesi üzerine artan talepler kurutmada yenilikçi fikirlerin gelişmesine sebep olmuştur [6]. Bu yenilikçi fikirlerin temelinde kurutma hava şartlarının, kurutma kinetiğinde önemli rol oynadığı gerçeği bulunmaktadır. Kısa kurutma zamanlarında kurutulmuş kaliteli ürün eldesi ancak en iyi kurutma havası şartlarının elde edilmesi ile mümkün olmaktadır. Kurutma zamanı, kurutma havası sıcaklığının artması ile kısılmasına rağmen, özellikle sıcaklığa hassas kurutulan gıda maddelerindeki renk ve tat değişimi, vitamin içeriğindeki değişim ve kurutulan ürünlerdeki yapısal bozukluklar (ısıl gerilmelerden kaynaklanan vb.) sıcaklık arttıkça daha fazla gerçekleşmektedir. Bu

değişimler düşük sıcaklıkta kurutma yapılarak önlenmektedir. Düşük sıcaklıkta kurutma ise kurutma süresinin uzamasına neden olmaktadır. Düşük sıcaklıkta gıda kurutması uygulamalarında uzun kurutma zamanlarını kısaltmak için kurutulacak ürün üzerine mümkün olduğunca düşük nemde (kuru) hava göndermek gerekmektedir [6-8].

Yüksek sıcaklıkta kurutma işleminde zarar gören dolayısıyla düşük sıcaklıkta kurutulması gereken önemli gıda ürünlerinden biri yerfıstığı ürünüdür [9]. Fıstıkta küflenme, hasattan itibaren başlamakta ve uzun süre devam eden soldurma ve kurutma aşamalarından dolayı ürün kalitesindeki düşüş ve ürün kayıplarıyla sonuçlanabilmek ayrıca ürettikleri mikotoksinler ile sağlık sorunlarına (mutajen, kanserojen, teratojen, tremorgen vb) neden olabilmektedir [10,11]. Mikotoksinlerin en fazla üzerinde durulan grubu, toksik ve kanserojenik potansiyeli nedeniyle aflatoksinlerdir [12]. Yerfıstığı ürününde hasat, hasat sonrası, kurutma ve depo öncesi dönemlerinde ortaya çıkan aflatoksin oluşumu ve seviyeleri yerfıstığı ve ürünlerinin bütün dünyada mikotoksin; özellikle de aflatoksin kontaminasyonu açısından çok riskli bir gıda olduğu bilinmektedir. Arzu edilenin üzerinde nem içeren yerfıstıklarında, kısa sürede küflenme, aflatoksin oluşumu ve böceklenme başlayacağı ve bunun sonucunda, ürünün kalitesinde düşüş görülmektedir. Ayrıca farklı dönemlerde belirlenen aflatoksin bulaşıklığının, kurutma ve depo öncesi dönemde, hasat ve hasat sonrasına göre daha yüksek meydana gelmektedir. Bu sıkıntıların giderilmesi için, yerfıstığı alımı yapan büyük kuruluşların, merkezi alım yerlerinde, birer kurutma tesisini vakit geçirmeden kurmaları gerekmektedir [13]. Yerfıstığı kurutma sıcaklığına çok duyarlıdır. Yapılan çalışmalarda, kurutma sıcaklığı 35 °C üzerine çıktığı zaman iç fıstıkta çatlama ve tat değişimi meydana geldiği dolayısıyla dış hava sıcaklığı ne olursa olsun kurutma sıcaklığının üst limiti olarak 35 °C olması gerektiği belirlenmiştir [9]. Dış hava sıcaklığının birkaç derece üzerine çıkılarak yapılan düşük sıcaklık kurutma işlemi yavaş gerçekleşen bir kurutma şeklidir. Amerika'da güneş altında

kurutmanın neticesi olarak %25'e varan ürün kaybı olduğu rapor edilmiştir [14]. Bununla beraber güneş enerjisi ile kurutulan fıstıklarda kurutma tepsilerinin üzerinde kalan fıstıklarda iç fıstıkta gözlenen çatlak oluşumunun tepsinin altında kalan fıstıklardan %25 daha az olduğu ve kurutulan fıstık kalitesinin düzgün bir dağılıma sahip olmadığı belirtilmiştir [15].

Gıda kurutmanın temel kimyası ve fiziği oldukça karmaşıktır. Bu nedenle uygulamada kurutucu, sadece nemi uzaklaştıran bir cihazdan çok daha karmaşıktır. Dolayısıyla kurutma sistemlerinde proses tasarımı, optimizasyon, enerji entegrasyonu ve kontrol için etkili modeller gereklidir [16]. İnce tabaka kurutma denklemleri kurutmanın matematiksel modellemesinde önemli araçlardır. Bu denklemler pratiktirler ve yeterince iyi sonuçlar verirler. İnce tabaka kurutma denklemlerini kullanmak için, kurutma hızı eğrilerinin bilinmesi gerekir. Bununla birlikte, katılardaki nem taşınımının daha iyi anlaşılmasını açıklığa kavuşturmaya yönelik kayda değer iş hacmi derinlemesine ele alınmamaktadır. Uygulamada, kurutma hızı eğrileri temel ilkelerden hesaplanmak yerine deneysel olarak ölçülmelidir [17]. İnce tabaka kurutma genellikle bir örnek parçacık veya dilim tabakası olarak kurutmak anlamına gelir [18]. İnce tabaka kurutma denklemlerinin karmaşık dağıtılmış modellerden farklı olarak daha az veri gerektirdiği için kullanımlarının kolay olduğu ve bu sebeple geniş uygulamalara sahip olduğu literatürde görülmektedir [19,20]. Literatürde ince tabaka kuruma davranışlarının incelendiği farklı birçok çalışma bulunmaktadır [21–32]. John ve arkadaşları [21], yaptıkları deneysel çalışmada ince tabaka kurutma modeli ile kabuklu ve iç fıstığın kuruma davranışını mikrodalga yöntemi ile incelemişlerdir. Yazarlar mikrodalga gücünün kurutma hızına etkisini belirlemek için farklı hava debisi, sıcaklık ve bağıl nemde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonunda mikrodalga yöntemi ile kuruma oranları geleneksel vagon tipi kurutucuya göre kabuklu fıstık için 10 ile 94 kat, iç fıstıkta ise 8 ile 32 kat artmıştır. Ayrıca çalışmada kullanılan ince tabaka kuruma modeli olan iki terimli üstel eşitliğin iyi uyum gösterdiği

görülmüştür. Çerçi ve arkadaşları [24], güneş enerjisi destekli bir kurutucuda kabak dilimlerini kurutmuş ve kabak ürününün deneysel olarak elde edilen ANO değerlerini yirmi iki farklı ince tabaka kurutma modeline fit ederek en uygun modeli belirlemişlerdir. Çalışmada en iyi sonuç veren modellerin Kübik ve Modifiye Midilli-1 modelleri olduğu görülmüştür. Çalışma sonunda kabak ürünlerinin konvektif ısı transfer, kütle transfer ve difüzyon katsayıları sırasıyla $5,18124 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, $1,57129 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ve $2,335718 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak bulunmuştur. Doymaz [27], sıcak havalı bir kurutucuda üç farklı kurutma havası sıcaklığında (50, 60 ve 70 $^\circ\text{C}$) haşlanmış ve haşlanmamış Trabzon hurmasını kurutmuş, ürünlerin kurutma kinetiklerini hesaplamış ve altı farklı ince tabaka kuruma modeline göre incelemiştir. Çalışma sonunda, en kısa kurutma süresi haşlanmış Trabzon hurması ürünlerinde elde edilmiş ayrıca Midilli ve arkadaşları, Page ve Weibull modellerinin iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Dash ve ark [28], konvektif tepsili kurutucuda yıldız meyvesi dilimlerini kurutmuşlardır. Çalışmada yıldız meyvesinin kurutma kinetikleri hesaplanmış ve deneysel olarak ANO değerlerine en uygun olan ince tabaka kuruma modeli seçilmiştir. Deneylerde kurutma havası sıcaklıkları olarak 50, 60, 70 ve 80 $^\circ\text{C}$ seçilmiş ve en hızlı kuruma 80 $^\circ\text{C}$ sıcaklıkta gerçekleşmiştir. Ayrıca on bir farklı ince tabaka kuruma modeli arasından en uygun modelin iki terimli üstel model ($R^2=0,998248$ ve $\chi^2=0,000193$) olduğu saptanmıştır. Sahdev ve arkadaşları [32], güneş altında ve kapalı ortamda zorlanmış taşınımında yerfıstığı ürünlerinin ince tabaka kurutma davranışlarını incelemişlerdir. Yerfıstığı ürünleri yaş baza göre %38'den %8–10 değerleri aralığına kadar kurutulmuştur. Yerfıstığının kurutma davranışını belirlemek için dört farklı matematiksel model kullanılmıştır. Çalışma sonunda her iki kurutma yönteminde de en iyi modelin Henderson ve Pabis modeli olduğu, ikinci en iyi modelin ise Lewis modeli olduğu belirlenmiş ve bu iki modelin verilen koşullar altında yerfıstığının kuruma davranışını en iyi tanımlayan modeller olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

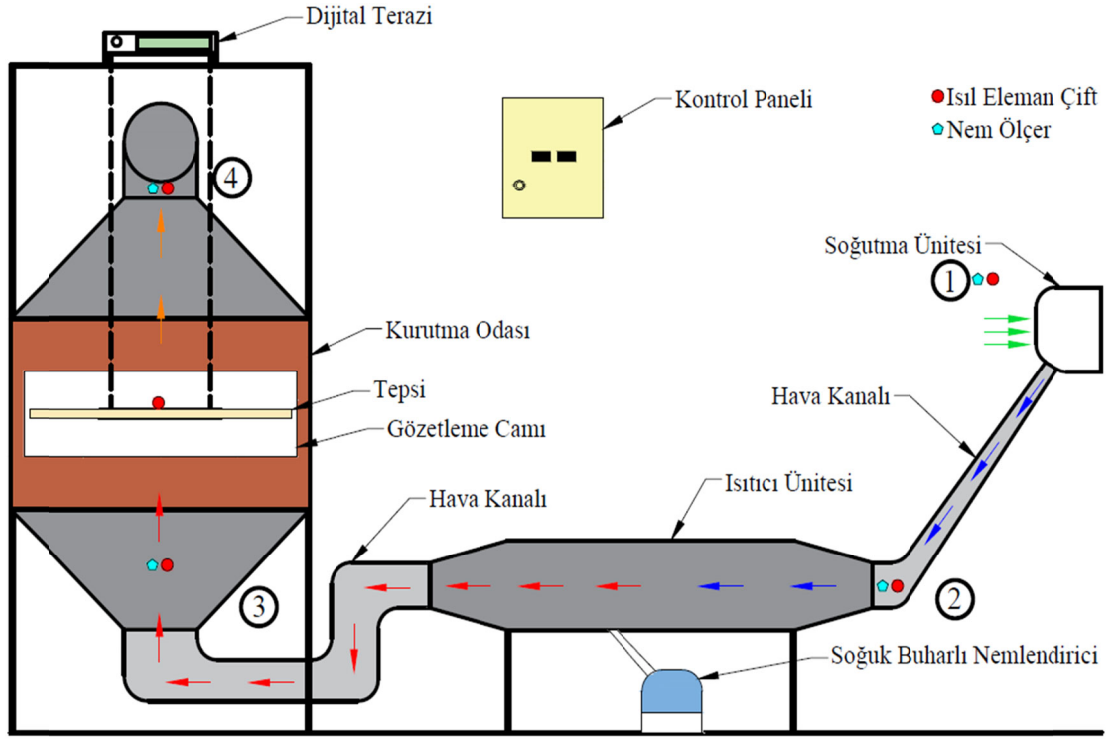
Yerfıstığı ürününü olabilecek en kısa süre içerisinde hem düşük sıcaklıkta hem de homojen bir şekilde kurutabilmek için kurutulacak ürün üzerine mümkün olduğunca düşük neme sahip kuru hava göndermek gerekmektedir. Böylece düşük sıcaklıkta düşük neme sahip kurutma havası ile üründen daha çok nem uzaklaştırılabilecektir. Aynı zamanda düşük nem de kurutma ile yukarıda belirtilen daha homojen ürün kurutma imkânı sağlanacaktır. Bu çalışmada yerfıstığı ürününün düşük sıcaklık (35 °C) ve farklı nemde kurutulması için bir kurutma sistemi tasarlanmış, imalatı yapılmış, deneyler gerçekleştirilmiş ve farklı nemde kurutulan yerfıstığı ürününün kurutma kinetikleri belirlenmiştir. Çalışmada yerfıstığı ürünü için deneysel olarak elde edilen alınabilir nem oranı 22 farklı ince tabaka kuruma modeline fit edilmiş ve en uygun model belirlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Deney Düzenegi ve Hesaplama Prosedürü

Bu çalışma kapsamında, yerfıstığı ürününün düşük sıcaklıkta kurutulması için öncelikle bir deney düzenegi tasarlanarak kurulmuştur. Şekil 1’de kurutma deneyleri için tasarlanan deney düzeneginin şematik görünümü verilmiştir. Deney düzenegi, soğutma ünitesi, ısıtıcı ünitesi, soğuk buharlı nemlendirici, kurutma odası ve kontrollerin yapıldığı panelden oluşmaktadır. Deney düzeneginin bulunduğu ortamdan (1 noktası) soğutma ünitesi buharlaştırıcısının fanı vasıtasıyla alınan proses havası, buharlaştırıcı üzerinden geçerek soğuk ve kuru halde çıkmaktadır (2 noktası). Soğutulmuş ve nemi alınmış olan proses havası, daha sonra ısıtıcı ünitesine girmekte (2→3) ve istenilen (set edilen) kurutma havası sıcaklığı elde edilmektedir. Sistemde istenilen kurutma havası nemi soğuk buharlı nemlendirici kullanılarak ayarlanmaktadır. Kurutma odasına belirli nem ve sıcaklık şartlarında giren hava, kurutulacak üründeki nemi üzerine almakta ve nemi artmış olarak kurutma odasını terk etmektedir

(4 noktası). Deney düzeneginde, literatürde yer alan benzer çalışmalar [30, 33] dikkate alınarak, homojen ve hızlı bir kuruma işlemi sağlanabilmesi için kurutma odası (test bölgesi) düşey olarak seçilmiştir. Sistemdeki tüm kontroller, kontrol paneli kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Şekil 2’de Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye Meslek Yüksekokulu Laboratuvarlarında imal edilen kurutma sisteminin resmi verilmiştir. Modelleme için gerekli kurutma eğrilerinin belirlenebilmesi ve analizlerin gerçekleştirilebilmesi için deney düzenegi üzerinde sıcaklık, rölatif nem, hava hızı ve ağırlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler boyunca ölçülen tüm parametreler bilgisayar destekli bir veri toplama sistemi kullanılarak 15 dk. aralıklarla kaydedilmiştir. Deneysel çalışmalarda ölçülen değerlerin doğruluğu ve deneyler sırasında farklı sebeplerden dolayı ortaya çıkabilecek hatalar, göz ardı edilmemesi gereken önemli faktörlerdir. Bu faktörlerin değerlendirilmesi için çalışmada belirsizlik analizi yapılmıştır. Deneysel çalışma içerisindeki belirsizlik analizi için Holman [34] tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Çizelge 1’de, farklı parametrelerin ölçülmesi için kullanılan cihazlara ait bilgiler ve belirsizlik analiz sonuçları verilmiştir. Kurutma deneylerinde kullanılan yerfıstığı ürünü Osmaniye İli’nin Toprakkale İlçe’si Sarıhüyük Köyü’ndeki bir tarladan toplanmıştır. Tazelikliğini yitirmemesi ve daha doğru kurutma eğrilerinin elde edilmesinin sağlanması için yerfıstıkları kurutulmadan bir gün önce tarladan kurutulacak ürün miktarınca yaprakları ile birlikte toplanmış ve bu şekilde hava ile temasını kesmek (nem içeriğinin değişmemesi) için paketlenerek yaklaşık 4 °C sıcaklıktaki buzdolabında bekletilmiştir. Kurutma işlemi öncesinde yapraklarından ve kabuklarından ayrıştırılan yerfıstığı ürünleri, kurutma tepsisine tek sıra halinde dizilerek kurutma kabinine yerleştirilmiştir (Şekil 3). Deneyler, farklı mutlak nem ve düşük sıcaklık (35 °C) şartlarına sahip kurutma havası kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Tasarlanan düzeneğin şematik görünümü



Farklı Nemde Kurutma Havası Kullanılarak Kurutulan Yerfıstığı'nın Kuruma Kinetiklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi



Şekil 2. Tasarlanıp kurulan kurutma sisteminin resmi ve imalat aşamalarının resimleri

Çizelge 1. Deneyselerde kullanılan ölçüm cihazları

Cihaz	Ölçüm Parametreleri	Hassasiyet
TESTO 435	Hava Hızı	0,1 m/s
COLE PARMER Isıl Eleman Çifti	Sıcaklık	0,1 °C
EPLUSE Nem Ölçer	Rölatif nem	2-3 %
IOTECH PD3001 Veri Kaydedici	Veri kayıt	16 bit
DİKOMSAN Dijital Terazi	Ağırlık	0,1 g
Hesaplanan Parametre		Belirsizlik (%)
Alınabilir Nem Oranı (ANO)		2,3
Kuruma Hızı (R)		2,6



Şekil 3. Yerfıstığı ürünlerinin kurutma işlemi için hazırlanması ve kurutma işlemi

Çalışmada, yerfıstığının kuruma davranışı, kuruma zamanına bağlı olarak değişen nem içeriği ve kuruma hızı parametreleri ile karakterize edilmiştir. Kuru baza göre nem içeriği (N_{kb} , kg_s/kg_{km}) ürün içerisindeki nem miktarının (W_s , kg_s) ürünün kuru madde miktarına (W_k , kg_{km}) oranı olarak Eşitlik 1 ile ifade edilmiştir [35]. Eşitlik 2’de ise yaş baza göre nem içeriği (N_{yb} , kg_s/kg) ifadesi ile kuru baza göre nem içeriği arasındaki bağıntı verilmiştir [36].

$$N_{kb} = \frac{W_s}{W_k} \quad (1)$$

$$N_{kb} = \frac{W_s}{W_k} \quad (2)$$

Kurutma hızı (R , $(kg_s/kg_{km})/dk$) parametresi Eşitlik 3 kullanılarak hesaplanmaktadır [35]:

$$R = \frac{N_{kb,t} - N_{kb,t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (3)$$

Burada, Δt zaman farkıdır (dk). Yerfıstığı ürünlerinin alınabilir nem oranı (ANO) değerleri aşağıdaki Eşitlik 4 kullanılarak belirlenmiştir [30].

$$ANO = \frac{N_t - N_e}{N_0 - N_e} \quad (4)$$

Burada, N_t herhangi bir t anındaki nem oranı, N_0 kurutmanın başlangıcındaki nem oranı, N_e ise denge nem oranıdır. N_e değeri gıda ürünlerinde N_t ve N_0 değerlerine kıyasla çok küçük kalmaktadır. Bu sebeple, ANO’nun hesaplanmasını kolaylaştırmak için Eşitlik 4 yerine N_t/N_0 ifadesi kullanılmaktadır [23, 24].

2.2. İnce Tabaka Kuruma Modelleri

Çizelge 2’de, bu çalışma kapsamından deneysel olarak elde edilen ANO değerinin matematiksel olarak modellenebilmesinde ele alınan ve literatürde yer alan 22 farklı ince tabaka kurutma

modelleri verilmiştir. Çizelgedeki eşitliklerde a, b, c, d, L, g, n, k, k₀ ve k₁ sabitleri, t zamanı (saniye) ifade etmektedir. En uygun modelin belirlenmesi için yapılan analizler, OriginPro programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

ANO ve difüzyon katsayısı (D_{eff}, m²/s) değeri arasındaki ilişki aşağıdaki Eşitlik 5'te verilmiştir [24, 37].

$$ANO = \frac{8}{\pi^2} \exp \left\{ -\pi^2 \frac{D_{eff} t}{r^2} \right\} \quad (5)$$

Burada r ürünün yarıçapı (m) ve t zamandır (s). ANO değerleri için kullanılan ince tabaka kurutma

modellerinin en iyisinin seçilmesi için performans kriterleri olarak korelasyon sayısı (R²) ve ki-kare (χ²) değerlerine bakılmıştır. χ² değerinin belirlenmesi için aşağıdaki Eşitlik 6'dan faydalanılmıştır.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (ANO_{den,i} - ANO_{tah,i})^2}{N-n} \quad (6)$$

Burada, ANO_{den,i} deneysel gözlemler sonucu elde edilen alınabilir nem oranı değeri, ANO_{pre,i} tahmin edilen alınabilir nem oranı değeri, N veri sayısı ve n sabit sayısıdır [24,30].

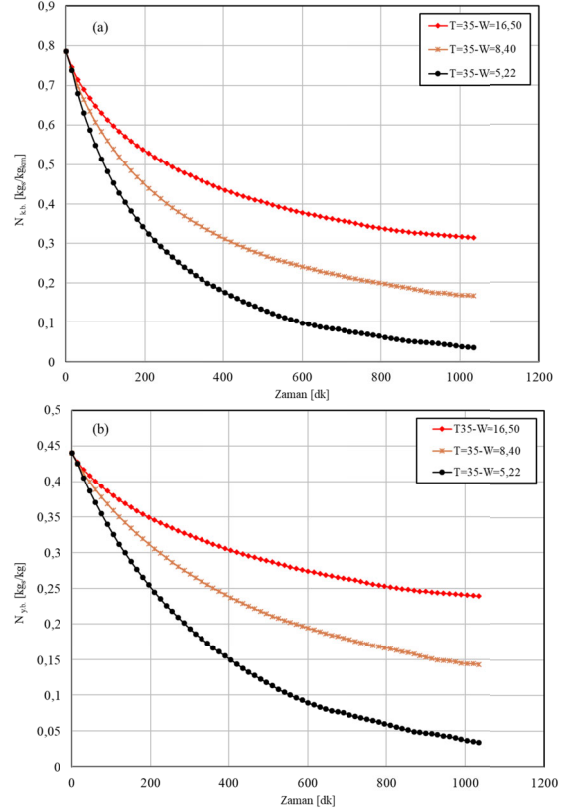
Çizelge 2. ANO'nun modellenmesinde kullanılan ince tabaka kurutma modelleri

Model No.	Model	Eşitlik	Kaynakça
1	Lewis	ANO=exp(k·t)	[38]
2	Page	ANO=exp(k·t ⁿ)	[39]
3	Modifiye Page	ANO=exp(-k·t) ⁿ	[40]
4	Henderson ve Pabis	ANO=a·exp(-k·t)	[41]
5	Hii ve arkadaşları	ANO=a·exp(-k ₀ ·t ⁿ) +b·exp(-k ₁ ·t ⁿ)	[42]
6	Logaritmik	ANO=a·exp(-k·t) +c	[43]
7	İki-terimli	ANO=a·exp(-k ₀ ·t) +b·exp(k ₁ ·t)	[44]
8	Parabolik	ANO=a+b·t+c·t ²	[45]
9	Weibull	ANO=exp(-(t/b) ^a)	[46]
10	Kübik	ANO=a+b·t+c·t ² +d·t ³	[47]
11	Sigmoid	ANO=a+b/(1+exp(k·(t-c)))	[48]
12	Vega-Lemus	ANO=(a+b·t) ²	[49]
13	Rasyonel	ANO=(a+b·t)/(1+c·t+d·t ²)	[50]
14	Vega-Galvez I	ANO=n+k·√t	[51]
15	Vega-Galvez II	ANO=exp(n+k·t)	[51]
16	Modifiye Midilli II	ANO=exp(-k·t) +b·t	[4]
17	Noomhorn ve Verma	ANO=a·exp(-k ₀ ·t) +b·exp(-k ₁ ·t) +c	[52]
18	Difüzyon Yaklaşımı	ANO=a·exp(-k·t) +(1-a)·exp(-k·b·t)	[53]
19	Verma ve arkadaşları	ANO=a·exp(-k·t) +(1-a)·exp(-g·t)	[54]
20	İki-terimli üstel	ANO=a·exp(-k·(·t))+(1-a)·exp(-k·a·t)	[55]
21	Basitleştirilmiş Fick'in difüzyon denklemi	ANO=a·exp(-c·(t/L ²))	[56]
22	Modified page equation II	ANO=exp(-k·(t/L ²) ⁿ)	[56]

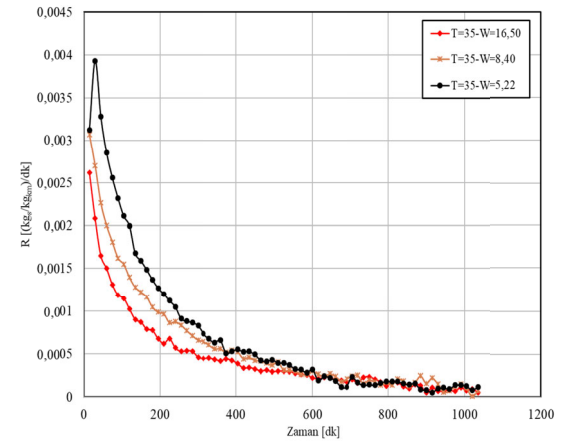
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında, yarfıstığıının düşük sıcaklık ve farklı nem değerlerine sahip kurutma havası şartlarına göre kuruma davranışları deneysel olarak incelenmiş ayrıca düşük nem değerleri için en uygun ince tabaka kurutma modeli seçilmiştir. Bu işlemler için yukarıda ayrıntıları verilen kurutma sistemi tasarlanmış ve kurulumu gerçekleştirilmiştir. Kurutulacak olan yarfıstığı ürünleri her deney için yaklaşık olarak 325 g olarak ayarlanmıştır. Kurutma deneyleri kurutma havasının farklı mutlak nem şartlarında ve fıstığın yüksek kurutma havası sıcaklıklarından zarar gördüğü göz önünde bulundurularak 35 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Deneyler yaklaşık olarak 17 saat sürmüş ve kurutma süresi boyunca yarfıstığı ürününün kuruma davranışları gözlemlenmiştir. Şekil 4'te 35 °C sıcaklık ve farklı mutlak nem değerlerinde kurutulan ürünlerin kuru baza ve yaş baza göre nem içeriklerinin deney süresince değişimleri verilmiştir. Şekillerdeki nem içeriklerinin değişimlerine bakıldığında, aynı süre içerisinde en büyük düşüş 35 °C-5,22 g_s/kg_{kh} kurutma havası şartlarında gerçekleşmiştir. 35 °C-5,22 g_s/kg_{kh} kurutma havası şartlarında kurutma işlemi boyunca, üründe yaklaşık 0,78 kg_s/kg_{km} (0,44 kg_s/kg) nem içeriğinden 0,035 kg_s/kg_{km} (0,033 kg_s/kg) nem içeriğine kadar nem düşüşü gözlemlenmiştir. 35 °C-8,40 g_s/kg_{kh} kurutma havası şartlarında ise kurutma işlemi boyunca, üründe yaklaşık olarak 0,78 kg_s/kg_{km} (0,44 kg_s/kg) nem içeriğinden 0,17 kg_s/kg_{km} (0,14 kg_s/kg) nem içeriğine kadar nem düşüşü gözlemlenmiştir.

Şekil 5'te farklı kurutma havası şartları için ürünün kuruma hızı değerlerinin zamanla değişimi verilmiştir. Şekilden kuruma hızında en yüksek değerlere 35 °C - 5,22 g_s/kg_{kh} kurutma havası şartlarında ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Kurutma işleminin 585. dakikasında üründeki nem içeriğinin iyice azalmasıyla birlikte 35 °C-5,22 g_s/kg_{kh} kurutma havası şartlarındaki kuruma hızı diğer şartlardaki kuruma hızı değerleri ile benzer aralıklarda değişim göstermiştir. Çizelge 3'de farklı kurutma havası şartları için difüzyon katsayısı ve kurutma süresince kuruma hızı değişim aralığı değerleri verilmiştir.



Şekil 4. Farklı kurutma havası şartlarına göre yarfıstığı ürününün sırasıyla kuru baza (a) ve yaş baza (b) göre nem içeriklerinin zamanla değişimi



Şekil 5. Farklı kurutma havası şartlarına göre yarfıstığı ürününün kuruma hızının zamanla değişimi

Çizelge 3. Farklı kurutma havası şartlarında yerfıstığı ürününün difüzyon katsayısı [m^2/s] ve kuruma hızı [$(kg_s/kg_{km})/dk$] değişim aralığı

Kurutma Havası Şartları	D_{eff} [m^2/s]	R [$(kg_s/kg_{km})/dk$]
T=35 °C, W=5,22 g_s/kg_{kh}	1,3256E-10	0,0039- 5,398E-05
T=35 °C, W=8,40 g_s/kg_{kh}	6,9897E-11	0,0031- 8,569E-06
T=35 °C, W=16,50 g_s/kg_{kh}	3,8564E-11	0,0026- 5,274E-05

Çalışma kapsamında, 35 °C sıcaklık ve düşük nem (5,22 ve 8,40 g_s/kg_{kh}) değerlerine sahip kurutma havası şartlarında gerçekleştirilen deneylerde elde edilen alınabilir nem oranı (ANO) değerleri 22 farklı ince tabaka kurutma modeline uyarlanmış ve en uygun model seçilmiştir. Çizelge 4 ve 5'de

sırasıyla 35 °C-5,22 g_s/kg_{kh} ve 35 °C-8,40 g_s/kg_{kh} kurutma havası için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Her iki kurutma havası giriş şartlarında da en iyi yakınsama (yüksek R^2 -düşük χ^2) Model 5 (Hii ve arkadaşları) [42] tarafından elde edilmiştir.

Çizelge 4. 35 °C-5,22 g_s/kg_{kh} kurutma havası için elde edilen sonuçlar

Model No	Model Sabitleri	R^2	χ^2
1	k=6,39859E-5	0,98411	9,03367E-4
2	k=3,38006E-4, n=0,83127	0,99894	6,10174E-5
3	k=6,32401E-4, n=0,10118	0,98411	9,16460E-4
4	a=0,92635, k=5,88344E-5	0,99055	5,45302E-4
5	a=1,07874, k₀=7,46501E-4, n=0,75821, b=-0,07874, k₁=2,05637	0,99988	6,94036E-6
6	a=0,91661, k=7,16378E-5, c=0,04971	0,99781	1,27880E-4
7	a=0,44298, k ₀ =1,38005E-4, b=0,55931, k ₁ =4,12075E-5	0,99986	8,29731E-6
8	a=0,82901, b=-3,24059E-5, c=3,34811E-10	0,96184	0,00223
9	a=0,82705, b=14961,14857	0,99895	6,03988E-5
10	a=0,9321, b=-5,27674E-5, c=1,14857E-9, d=-8,61116E-15	0,99392	3,61071E-4
11	a=0,04971, b=44066,28892, c=-131615,06987, k=7,16418E-5	0,99781	1,29819E-4
12	a=0,91703, b=-1,80557E-5	0,94327	0,00327
13	a=1, b=-59140,42269, c=-49279,5997, d=-8,89552	0,97112	0,00172
14	n=0,87606, k=-0,00373	0,92497	0,00433
15	n=-0,07677, k=-5,88012E-5	0,99055	5,45303E-4
16	k=7,00514E-5, b=8,849E-7	0,99504	2,85857E-4
17	a=0,90665, b=0,04608, k ₀ =7,01226E-5, k ₁ =0,05, c=0,04727	0,99821	1,08143E-4
18	a=0,44751, b=0,3021, k=1,35574E-4	0,99986	8,32531E-6
19	a=45557,15108, k=7,75089E-5, g=7,75092E-5	0,98049	0,00114
20	a=0,2772, k=1,76692E-4	0,99901	5,69146E-5
21	a=0,92622, c=12,24624, L=458,82019	0,99043	5,60047E-4
22	k=0,63396, L=-92,85872, n=0,8271	0,99895	6,12872E-5

Çizelge 5. 35 °C-8,40 g_s/kg_{kh} kurutma havası için elde edilen sonuçlar

Model No	Model Sabitleri	R ²	χ ²
1	k=3,438E-5	0,89945	0,00403
2	k=9,73928E-4, n=0,67512	0,99507	2,00135E-4
3	k=7,78999E-6, n=4,41433	0,89945	0,00408
4	a=0,85752, k=2,81386E-5	0,95660	0,00176
5	a=0,65945, k₀=2,5825E-4, n=0,86616, b=0,34217, k₁=4,04436E-5	0,99997	1,27832E-6
6	a=0,75449, k=5,78599E-5, c=0,204	0,99761	9,86765E-5
7	a=0,50701, k ₀ =9,40668E-5, b=0,47744, k ₁ =1,36904E-5	0,99969	1,31308E-5
8	a=0,87954, b=-2,54925E-5, c=2,49361E-10	0,97694	9,50613E-4
9	a=0,67257, b=28882,89397	0,99508	1,99846E-4
10	a=0,947, b=-3,90153E-5, c=7,97691E-10, d=-5,88653E-15	0,99649	1,46708E-4
11	a=0,20401, b=3914,51841, c=-147818,15658, k=5,78684E-5	0,99761	1,00219E-4
12	a=0,88715, b=-8,63933E-6	0,90511	0,00385
13	a=1, b=4,03066E45, c=4,0739E45, d=2,50036E41	0,99988	4,97418E-6
14	n=0,94226, k=-0,00321	0,96079	0,00159
15	n=-0,15396, k=-2,8122E-5	0,95660	0,00176
16	k=4,88547E-5, b=3,14248E-6	0,98873	4,57648E-4
17	a=-78,58638, b=0,29552, k ₀ =-1,21746E-7, k ₁ =0,2113, c=79,29085	0,86834	0,00560
18	a=0,491, b=0,14219, k=1,04181E-4	0,99947	2,16855E-5
19	a=0,83815, k=2,72887E-5, g=0,668	0,96496	0,00144
20	a=0,99836, k=3,41975E-5	0,89939	0,00409
21	a=0,85738, c=5,43767, L=439,70319	0,95660	0,00179
22	k=0,97624, L=166,93921, n=0,67261	0,99508	2,02828E-4

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, düşük sıcaklık (35 °C) ve farklı mutlak nem kurutma havası giriş şartlarında, yerfıstığı ürünü için kurutma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler yaklaşık olarak 17 saat sürmüştür. 35 °C-5,22 g_s/kg_{kh} kurutma havası şartlarında kurutma işlemi boyunca, üründe yaklaşık 0,78 kg_s/kg_{km} (0,44 kg_s/kg) nem içeriğinden 0,035 kg_s/kg_{km} (0,033 kg_s/kg) nem içeriğine kadar nem düşüşü gözlemlenmiştir. 35 °C-8,40 g_s/kg_{kh} kurutma havası şartlarında ise kurutma işlemi boyunca, üründe yaklaşık olarak 0,78 kg_s/kg_{km} (0,44 kg_s/kg) nem içeriğinden 0,17 kg_s/kg_{km} (0,14 kg_s/kg) nem içeriğine kadar nem düşüşü gözlemlenmiştir. Aynı sıcaklığa sahip kurutma havasının nem değeri düşürüldükçe, difüzyon katsayısı ve kuruma hızının arttığı tespit edilmiştir. Bu sebeple yüksek sıcaklıktan zarar gören yerfıstığı ürününde kuruma süresini azaltmak için, kurutma havasının mutlak nemini

düşürmek gerektiği görülmüştür. Ayrıca çalışma kapsamında, 35 °C sıcaklık ve düşük nem (5,22 ve 8,40 g_s/kg_{kh}) değerlerine sahip kurutma havası şartlarında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen alınabilir nem oranı (ANO) değerleri 22 farklı ince tabaka kurutma modeline uyarlanmış ve en uygun model seçilmiştir. Her iki kurutma havası giriş şartları için en iyi yakınsamanın, Hii ve arkadaşları [42] tarafından önerilen matematiksel model ile sağlandığı görülmüştür.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (OKÜBAP) tarafından OKÜBAP-2018-PT3-015 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı OKÜBAP'a teşekkür ederiz. Ayrıca deney düzeneğinin kurulumu ve deneylerin gerçekleştirilmesi aşamalarında katkıda bulunan Doğan Burak SAYDAM'a teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. Ceylan, I., Aktas, M., 2008. Hazelnut Drying in a Dryer Assisted Heat Pump, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 23(1), 215-222.
2. Keey, R., 1972. Introduction. In: *Drying Principles and Practice*, pp. 1-18, Keey, R.B. Eds., Pergamon Press, Oxford.
3. Mujumdar, A., 1997. Drying Fundamentals. In: *Industrial Drying of Foods*, pp. 7-30, Baker, C.G.J. Eds., Chapman & Hall, London.
4. Erbay, Z., Icier, F., 2010. A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling and Experimental Results, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441-464.
5. Nagaya, K., Li, Y., Jin, Z., Fukumuro, M., Ando, Y., Akaishi, A., 2006. Low-temperature Desiccant-based Food Drying System with Airflow and Temperature Control, *Journal of Food Engineering*, 75(1), 71-77.
6. Karam, M.C., Petit, J., Zimmer, D., Baudelaire Djantou, E., Scher, J., 2016. Effects of Drying and Grinding in Production of Fruit and Vegetable Powders: A Review, *Journal of Food Engineering*, 188, 32-49.
7. Misha, S., Mat, S., Ruslan, M.H., Sopian, K., 2012. Review of Solid/liquid Desiccant in the Drying Applications and its Regeneration Methods, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4686-4707.
8. Kaya, A., Aydin, O., Dincer, I., 2008. Experimental and Numerical Investigation of Heat and Mass Transfer During Drying of Hayward Kiwi Fruits (*Actinidia Deliciosa* Planch), *Journal of Food Engineering*, 88(3), 323-330.
9. Butts, C.L., Williams, E.J., Sanders, T.H., 2002. Algorithms for Automated Temperature Controls to Cure Peanuts, *Postharvest Biology and Technology*, 24(3), 309-316.
10. Gürses, M., Eroğan, A., Sert, S., 2003. Erzurum Piyasasında Satılan Yerfıstığı, Antepfıstığı ve Bademlerin Aflatoksin Yönünden İncelenmesi, *Gıda*, 28(6), 607-610.
11. Gürsoy, N., Biçici, M., 2006. Çukurova Bölgesinde Yetiştirilen Yerfıstıklarında Hasat, Kurutma ve Depolama Kademelerinde Aflatoksin Oluşumu, *Gıda*, 31(4), 209-215.
12. Kabak, B., 2007. Bazı Mikotoksinlerin Detoksifikasyonunda *Lactobacillus* ve *Bifidobacterium* Suşlarının Kullanımı, *Doktora Tezi*, 164 s., Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi.
13. Lavkor, I., Biçici, M., 2015. Aflatoxin Occurrence in Peanuts Grown in Osmaniye at Harvest, Post-harvest, Drying and Pre-storage Periods, *Tarım Bilimleri Dergisi*, 21(3), 394-405.
14. Hoque A.K.M., 1993. Application of Liquid Desiccant Drying System in Agricultural Products, Graduate Faculty of Texas Tech University, Mechanical Engineering, Master of Science in Mechanical Engineering, Texas Tech University, 167p, Austin.
15. Troeger, J., Butler, J., 1977. Solar Drying of Peanuts in Georgia, in *Solar Drying of Peanuts. Solar Crop Drying Conference Proceedings*, 32-43.
16. Marinos-Kouris, D., Maroulis, Z., 1995. Transport Properties in the Drying of Solids. In: *Handbook of Industrial Drying*, pp.113-160 (Mujumdar, A.S. Eds., 2nd Edition), Marcel Dekker Inc., New York.
17. Baker, C.G., 1997. Preface. In: *Industrial Drying of Foods*, Baker, C.G., Chapman & Hall, London.
18. Kavak, Akpınar, E., Bicer, Y., Cetinkaya, F., 2006. Modelling of Thin Layer Drying of Parsley Leaves in a Convective Dryer and Under Open Sun, *Journal of Food Engineering*, 75(3), 308-315.
19. Madamba, P.S., Driscoll, R.H., Buckle, K.A., 1996. The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices, *Journal of Food Engineering*, 29(1), 75-97.
20. Ozdemir, M., Devres, Y.O., 2000. The Thin Layer Drying Characteristics of Hazelnuts During Roasting, *Food Science and Technology Research*, 42, 225-233.
21. St. John, C., Otten, L., 1989. Thin-layer Microwave Drying of Peanuts, *Canadian Agricultural Engineering*, 31(2), 265-270.
22. Sacilik, K., Keskin, R., Elicin, A.K., 2006. Mathematical Modelling of Solar Tunnel Drying of Thin Layer Organic Tomato, *Journal*

- of Food Engineering, 73 (3), 231–238.
23. Süfer, Ö., Sezer, S., Demir, H., 2017. Thin Layer Mathematical Modeling of Convective, Vacuum and Microwave Drying of Intact and Brined Onion Slices, *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(6).
 24. Çerçi, K.N., Süfer, Ö., Söyler, M., Hürdoğan, E., Özalp, C., 2018. Thin Layer Drying of Zucchini in Solar Dryer Located in Osmaniye Region, *Tehnički Glasnik*, 12(2), 79–85.
 25. Akhondi, E., Kazemi, A., Maghsoodi, V., 2011. Determination of a Suitable Thin Layer Drying Curve Model for Saffron (*Crocus Sativus L*) Stigmas in an Infrared Dryer, *Scientia Iranica*, 18(6), 1397–1401.
 26. Ponkham, K., Meeso, N., Soponronnarit, S., Siriamornpun, S., 2012. Modeling of Combined Far-infrared Radiation and Air Drying of a Ring Shaped-pineapple with/without Shrinkage, *Food and Bioproducts Processing*, 90(2), 155–164.
 27. Doymaz, I., 2012. Evaluation of Some Thin-layer Drying Models of Persimmon Slices (*Diospyros Kaki L.*), *Energy Conversion and Management*, 56, 199–205.
 28. Dash, K.K., Gope, S., Sethi, A., Doloi, M., 2013. Star Fruit Slices, *International Journal of Agriculture and Food Science Technology*, 4(7), 679–686.
 29. Darvishi, H., Asl, A.R., Asghari, A., Azadbakht, M., Najafi, G., Khodaei, J., 2014. Study of the Drying Kinetics of Pepper, *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(2), 130–138.
 30. Akpınar, E.K., Toraman, S., 2016. Determination of Drying Kinetics and Convective Heat Transfer Coefficients of Ginger Slices, *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 52(10), 2271–2281.
 31. Darıcı, S., Şen, S., 2015. Experimental Investigation of Convective Drying Kinetics of Kiwi Under Different Conditions, *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 51 (8), 1167–1176.
 32. Sahdev, R.K., Kumar, M., Dhingra, A.K., 2017. Development of Empirical Expression for Thin Layer Groundnut Drying Under Open Sun and Forced Convection Modes, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 19(4), 152–158.
 33. Kaya, A., 2008. Kurutmada Isı ve Kütle Transferinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.
 34. Holman, J., 2001. *Experimental methods for engineers* (8th ed.), McGraw-Hill, ABD.
 35. Akpınar, E., Biçer, Y., 2003. Investigation of Drying Behaviour of Pumpkin in a Cyclone, *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 16(1), 159–169.
 36. Hanif, S., Sultan, M., Miyazaki, T., Koyama, S., 2019. Investigation of Energy-efficient Solid Desiccant System for the Drying of Wheat Grains, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(1), 221–228.
 37. Mota, C.L., Luciano, C., Dias, A., Barroca, M. J., Guiné, R.P.F., 2010. Convective Drying of Onion: Kinetics and Nutritional Evaluation, *Food and Bioproducts Processing*, 88(2–3), 115–123.
 38. Bruce, D.M., 1985. Exposed-layer Barley Drying: Three Models Fitted to New Data Up to 150 °C, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32(4), 337–348.
 39. Page, G., 1949. Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers, Purdue Üniversitesi, Amerika.
 40. White, G.M., Ross, I.J., Poneleit, C.G., 1981. Fully-Exposed Drying of Popcorn, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 24(2), 466–468.
 41. Henderson, S., Pabis, S., 1961. Grain Drying Theory I: Temperature Effect on Drying Coefficient, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6, 169–174.
 42. Hii, C.L., Law, C.L., Cloke, M., 2009. Modeling Using a New Thin Layer Drying Model and Product Quality of Cocoa, *Journal of Food Engineering*, 90(2), 191–198.
 43. Togrul, I.T., Pehlivan, D., 2002. Mathematical Modelling of Solar Drying of Apricots in Thin Layers, *Journal of Food Engineering*, 55(3), 209–216.
 44. Henderson, S.M., 1974. Progress in Developing the Thin Layer Drying Equation., *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 17(6), 1–3.
 45. Sharma, G.P., Prasad, S., 2004. Effective

- Moisture Diffusivity of Garlic Cloves Undergoing Microwave-convective Drying, *Journal of Food Engineering*, 65(4), 609–617.
46. Corzo, O., Bracho, N., Pereira, A., Vásquez, A., 2008. Weibull Distribution for Modeling Air Drying of Coroba Slices, *LWT-Food Science and Technology*, 41(10), 2023–2028.
47. Dalvand, M., Mohtasebi, S., Rafiee, S., 2012. Determining the Influence of Drying Conditions on EHD Drying Process, *Journal of Agricultural and Biological Science*, 7, 396-401.
48. Figiel, A., 2009. Drying Kinetics and Quality of Vacuum-microwave Dehydrated Garlic Cloves and Slices, *Journal of Food Engineering*, 94(1), 98–104.
49. Vega-Gálvez, A., Scala, K.D., Rodriguez, K., Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., Lopez, J., Perez-Won, M., 2009. Effect of Air-drying Temperature on Physico-chemical Properties, Antioxidant Capacity, Colour and Total Phenolic Content of Red Pepper (*Capsicum Anuum*, L. var. Hungarian), *Food Chemistry*, 117(4), 647–653.
50. Haghi, A., Angiz, F., 2007. Heat and Mass Transfer in Thermal Drying of Wool: A Theoretical Approach, in *Proceedings of the 5th Asia-Pacific Drying Conference*, 443–448.
51. Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., Andres Grau, A., Briones, V., Villalobos, R., Vega-Gálvez, A., 2009. Effect of Osmotic Pretreatment on Hot Air Drying Kinetics and Quality of Chilean Papaya (*Carica Pubescens*), *Drying Technology*, 27(10), 1105–1115.
52. Noomhorn, A., Verma, L., 1986. Generalized Single-layer Rice Drying Models, *Transactions of the ASAE*, 29, 587–591.
53. Yaldiz, O., Ertekin, C., 2001. Thin Layer Solar Drying of Some Vegetables, *Drying Technology*, 19(3–4), 583–597.
54. Verma, L., Bucklin, R., Endan, J., Wratten F.T, 1985. Effects of Drying Air Parameters on Rice Drying Models, *Transaction of the ASAE*, 28, 296–301.
55. Sharaf-Eldeen, Y., Blaisdell, J., Hamdy, M., 1980. A Model for Ear Corn Drying, *Transaction of the ASAE*, 23(5), 1261–1271.
56. Diamante, L., Munro, P., 1991. Mathematical Modelling of Hot Air Drying of Sweet Potato Slices, *International Journal of Food Science and Technology*, 26, 99–109.

Küresel İnovasyon Endeksi Verilerinin Kümeleme Analizi ile Değerlendirilmesi

Filiz GÜRTUNA, Ulviye POLAT*¹

¹Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ

Geliş tarihi: 06.11.2019

Kabul tarihi: 30.07.2020

Öz

Hızla değişen teknoloji ve küreselleşme ile rekabetin giderek artması inovasyon çalışmalarının şirketler ve ülkeler açısından önemini arttırmaktadır. İşletmelerin ve/veya ülkelerin rekabet güçlerini belirleyebilmeleri, mevcut durum analizi yapabilmeleri ve yol haritası oluşturabilmeleri için inovasyonun ölçülebilmesi önem arz etmektedir. İnovasyona etki eden pek çok faktör olduğu gibi inovasyonun ölçülmesi ile ilgili de değişik çalışmalar mevcuttur. Yılda bir yayınlanan Küresel İnovasyon Endeksi (KİE), inovasyonu etkileyen birçok göstergelyi kullanarak ülkelerin inovasyon seyirlerini ölçmektedir. Bu çalışmada, 2018 KİE Raporunda yer alan inovasyon girdi ve çıktı alt endeksi ana göstergelerinin her birine ait 3 alt başlıktaki göstergeler dikkate alınmış ve toplam 21 değişken kullanılarak, 126 ülkeye ait veriler kümeleme analizi ile incelenmiştir. Kümeleme analizi yöntemlerinden Ward's Tekniği ve K-Ortalamalar Yöntemi kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnovasyon, Küresel inovasyon endeksi, Kümeleme analizi

Evaluation of Global Innovation Index with Clustering Analysis

Abstract

Rapidly changing technology and the rapid increase in competition with globalization increases the importance of innovation efforts for companies and countries. It is important to measure innovation in order for companies and/or countries to determine their competitiveness, to analyze the current situation and to determine a road map for innovation. As there are many factors affecting innovation, there are various studies on measuring innovation. Annually published the Global Innovation Index (GII) measures the innovation of countries using many indicators that affect innovation. In this study, the three sub-headings under each of the main indicators of innovation input and output subscale in the 2018 GII report were taken into consideration and the data of 126 countries were analyzed by clustering analysis. In this study, Ward's Technique and K-Means method are used.

Keywords: Innovation, Global innovation index, Clustering analysis

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ulviye POLAT, upolat@nku.edu.tr

1. GİRİŞ

Günümüzde işletmeler teknolojinin hızla değişmesi ve küreselleşme ile artan rekabet sayesinde yenilikçi olmaya zorlanmaktadır. İnovasyon çalışmaları bu anlamda işletmeler için proaktif bir yaklaşım sağlamaktadır. İnovasyon çalışmaları 3 şekilde gruplandırılabilir: Birinci grup, üniversite ve Araştırma Geliştirme (ArGe) merkezlerinden oluşan bilimsel grup, ikincisi bioteknoloji alanı gibi yüksek teknoloji içeren inovasyon grubu ve üçüncüsü ise medya, sanat ve tasarım tabanlı yaratıcı inovasyon çalışmalarının bulunduğu gruptur [1]. Bir işletme içindeki inovasyon sürecinin yapısının, küresel rekabete ve küresel ekonomilere bağlı olarak inovasyona verilen önemle ilgili olduğu söylenebilir [2]. Bu nedenle özellikle uluslararası firmalarda inovasyon süreci ve bilgi transferi önemli bir rol oynamaktadır. Lee ve arkadaşları [3], teknolojinin ve rekabetçiliğin hızla değiştiği iş ortamında işletmelerin hayatta kalması için inovasyonun kritik bir faktör haline geldiğini belirtmişlerdir.

Xie ve arkadaşları [4] işletmelerin finansal performans sonuçlarına etki edebilecek yeşil teknoloji kullanımının inovasyonun uygulama sürecine etkisi ile ilgili öneriler sunmuşlardır. Çalışmalarında yeşil teknoloji, yeşil proses inovasyonu ve yeşil ürün inovasyonu olarak iki grupta değerlendirilmiş olup, yeşil proses ve yeşil ürün inovasyonlarının ilişkili olduğu belirtilmiştir. Yeşil proses inovasyonu kaynak kullanımının azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması, geri dönüştürülebilir malzeme ve teknoloji kullanımı, kirlilik kontrolü sağlayan ekipmanların kullanımı, kirlilik kontrolünü sağlayan projelerin uygulanması konularını; yeşil ürün inovasyonu ise zararlı maddelerin içerik olarak bulunmaması, enerji tüketimlerinin azalacak şekilde ürün modifikasyonlarının geliştirilmesi, çevre dostu paketleme sistemlerinin kullanımı konularını içermektedir.

İnovasyon özellikle küçük ölçekteki işletmelerin hayatta kalabilmesi için hayati bir öneme sahiptir [5]. Baregheh ve arkadaşları [6] küçük ölçekli

işletmelerin inovasyon kazançları ile ilgili olarak; üstün kalitede ürün üretimi, çeşitlendirilmiş ürün sınıfları, üretken süreçlerin modernize edilebilmesi, üretilebilirliğin yükseltilmesi, maliyetlerin azaltılması ve yeni pazarlara girme kolaylığı avantajları olduğundan bahsetmişlerdir.

İşletmelerde uygulanan inovasyon süreçlerinin etkinliğinin belirlenmesine yönelik çeşitli bilimsel çalışmalar mevcuttur. Örneğin, firmaların inovasyon çalışmalarının seviyesinin belirlenmesi için insan kaynakları durumu, ArGe için yapılan finansal yatırım, yatırım tipi, organizasyonun oluşumu, ArGe ile ilgili fiziksel altyapı, inovasyona bağlı organizasyon kültürü, inovasyon süreçlerinin gelişmişliği, teknoloji ve inovasyon yönetim uygulamaları, inovasyon göstergeleri olarak kullanılabilir [2]. Saraceni ve arkadaşları [2], inovasyon sonuçları ile ilgili göstergeleri inovasyon projelerinin sayısı, yeni ürün veya hizmetlerden elde edilen gelir yüzdesi, yeni ve hizmetlerle ilgili maliyetler, teknolojinin başkalarına satılması, patent sayısı ve inovasyon ödülleri olarak belirlemişlerdir. Çalışmalarında, Brezilya'da uluslararası firmalarda belirlenen göstergeler ile inovasyon endeksleri sanayi sınıfları temelinde değerlendirilmiştir. Çalışma, firmaların üst düzey yöneticilerine anket uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sanayi sınıfları ile inovasyon endeksi arasında bağlantı olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bir başka çalışmada da Türkiye'de beş teknoparkta bulunan 254 işletmenin inovasyon uygulamaları ile ilgili bir anket gerçekleştirilmiş ve sonuçlar istatistiksel olarak analiz edilmiştir. İnovasyon çalışmaları ile ilgili olarak nitelikli personel istihdamı, rakipleri gözlemleme, stratejik işbirlikleri, bilgi paylaşımı, inovasyon algısı ana kategorileri incelenmiştir [7]. Franco ve Oliveira [8] Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin ve Güney Afrika ülkelerinin (BRICS) 2008-2013 arasındaki Küresel İnovasyon Endeksi (KİE) girdi ve çıktı verilerini regresyon analizi ile incelemişlerdir. Çalışmada girdi verileri kuruluşlar, insan sermayesi, altyapı, pazar karmaşıklığı, iş karmaşıklığı gibi başlıklarda toplanmış olup bu başlıklar çok sayıda alt girdilerden oluşturulmuştur. Çıktı verileri de benzer şekilde

bilgi ve teknoloji çıktıları ve yaratıcı çıktılar alt başlıkları altında toplanmış olup çok sayıda alt çıktıyı içermektedir. Dziallas ve Blind [9], inovasyon süreçlerinin yürütülmesinde önemli rol alan inovasyon göstergelerine dair 1980-2015 yılları arasında yapılan çalışmaları kapsamlı şekilde incelemiştir.

İnovasyonla ilgili yapılan araştırmalardan önemli biri de Cornell Üniversitesi, INSEAD (Avrupa İşletme Yönetimi Enstitüsü) ve WIPO (Dünya Fikri Mülkiyetler Örgütü) tarafından yılda bir yayınlanan KİE'dir. Bu endeks inovasyonu etkileyen birçok değişkeni kullanarak ülkelerin inovasyon seviyesini ölçmekte ve ülkeleri göstergelere göre sıralamaktadır. Bu endeks ile kurumlar, insan sermayesi ve araştırma, altyapı, piyasalar vb. birçok değişken sayısal olarak ifade edilmektedir. KİE hesaplanmasında her yıl değişkenler farklılık gösterebilmekte, yeni değişkenler eklenip çıkarılabilmektedir. Hızlı bir şekilde gelişen teknoloji, endekse yeni değişkenlerin entegrasyonunu sağlamaktadır. Silva ve arkadaşları [10] Latin Amerika ve Karayip ülkelerinin WIPO tarafından sağlanan KİE verilerini, çok kriterli karar verme yöntemlerinden TOPSIS'i kullanarak incelemiştir. TOPSIS yönteminde değerlendirme kriterleri olarak kuruluşlar, insan sermayesi, araştırma, altyapı, piyasa karmaşıklığı, iş karmaşıklığı, bilgi&teknoloji çıktıları, yaratıcı çıktılar kullanılmıştır [10].

Ülkeler arasında inovasyon endeksleri kullanılarak sıralama oluşturulabilmektedir. Fakat ülkeler inovasyon göstergeleri bakımından birbiri ile benzerlik ya da farklılık gösterebilirler ve bu durum endekslere yansımayaabilir. Bu çalışma, ülkelerin inovasyon performansı kapsamında birbirlerine olan benzerlik ve farklılıklarını ve KİE endeks değerlerinin benzerlikler ve farklılıkları ne kadar yansıtılabildiğini inceleyebilmek, benzerlik ve farklılıkların hangi değişkenlerden kaynaklanabileceğini ortaya koymak, verileri benzerlik ve farklılıklarına göre gruplayabilmek için kümeleme analizi tekniklerinin kullanımını açıklayarak literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır. İlave olarak, bu tür bir analizinin

sonuçlarının geliştirilmiş bir inovasyon ölçüm endeksinin sonuçlarıyla karşılaştırılması ve endeksin tutarlılığının ölçülmesinde kullanılması da başka çalışmalar için mümkün olacaktır.

Kümeleme analizi farklı disiplinlerde uygulanabilen (biyoinformatik, pazarlama gibi), benzer öğeleri gruplandırarak filtreleme özelliği kazandıran bir veri analizi aracıdır. Özellikle gerçekçi hedeflerle kümeleme analizi yapılması sonuçları yanlılıktan uzaklaştıracaktır. Kümeleme analizi veriyi ön işleme, kümelenebilirlik değerlendirmesi, algoritma seçimi ve uygulanması ve kalite değerlendirmesi olarak dört aşamadan oluşmaktadır [11]. Çakmak ve arkadaşları [12] aşamalı ve aşamalı olmayan kümeleme tekniklerini açıklamış, Devlet İstatistik Enstitüsü 1990 ve 2000 yıllarına ait kültür istatistiklerini çalışmalarında kullanmışlardır. Araştırma kapsamına alınan iller kültürel yapılarına göre her iki dönem için ayrı ayrı kümelenecek son 10 yıl içerisinde illerin kültürel yapılarında meydana gelen değişimleri incelenmiştir. Bir başka çalışmada, klasik ve bulanık kümeleme yöntemleri ile, Denizli ili için 2004, 2005 ve 2006 yıllarına ait trafik kaza verileri kümelere ayrılmış ve ortaya çıkan sonuçlar yorumlanarak, belirlenen hususlar için çeşitli çözüm önerileri getirilmiştir [13]. Atalay ve Tortum [14], 1997-2006 yılları arasında Türkiye'deki illerde meydana gelen şehir dışı trafik kaza verilerini kullanarak her il için ölüm ve yaralanma oranlarını hesaplamış ve çıkan oranlara göre K-Ortalamlar ve bulanık C-Ortalamlar yöntemlerini kullanarak kümeleme analizi yapmıştır. Çalışmada, iki yöntemle göre yapılan kümeleme analizi ile iller beş kümeye ayrılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak bulanık C-Ortalamlar tekniğinin K-Ortalamlar tekniği kadar doğru ve tutarlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bir başka çalışmada, Türkiye'nin, Avrupa Birliği üyesi ülkeleri karşısında sürdürülebilir kalkınma düzeyi incelenerek ve bu kavramın Avrupa Birliği için önemini vurgulamak adına sürdürülebilir kalkınma değişkenleri kullanılarak, kümeleme analizi yardımıyla ülke kümeleri belirlenmiş ve Türkiye'nin hangi ülkelerle aynı kümelere yer aldığı saptanmıştır [15].

İnovasyon çalışmalarında kümeleme analizinin kullanıldığı bilimsel araştırmalar literatürde mevcuttur. Örneğin, Rai ve arkadaşları [16] elektronik tedariki inovasyonlarının etkinliğinin değerlendirilmesinde 166 firmanın verilerini kullanarak kümeleme analizi gerçekleştirmiştir. Bir başka çalışmada Türkiye'nin inovasyon açısından kalkınmış ülkeler arasındaki yerinin analizi ve tespiti adına 2010 yılı Avrupa İnovasyon Karnesi'nin 25 göstergesi arasından Türkiye'nin ve 29 ülkenin verilerinin olduğu 13 inovasyon göstergesi kullanılarak, kümeleme analizi uygulanmış ve ülkeler 4 kümeye ayrılmıştır [17]. Sonuçların doğruluğunu test etmek üzere Ayırma Analizi (Discriminant Analysis) uygulanmış ve geçerli bir ayırım olduğunu belirten değerler elde edilmiştir. Türkiye'nin bu göstergelere göre Avrupa Birliği (AB) ülkeleri arasında nerede bulunduğu, AB'yi yakalayıp, sürdürülebilir ve hızlı bir kalkınma yakalayabilmesi için inovasyona önem vermesi ve gerekli harcamaları artırması gerektiği ve bunun için ise en kritik inovasyon göstergesinin ArGe harcamaları olduğu ortaya konulmuştur. Şimşit ve arkadaşları [18] inovasyonun bilgi ve iletişim teknolojileri (BİT) çerçevesinden değerlendirmesini yapmışlardır. KİE raporunda yer alan BİT göstergeleri ve destekleyici nitelikte olan diğer göstergeler belirlenerek, bunlar üzerinde Temel Bileşenler Analizi (Principal Component Analysis) tekniği kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda raporda yer alan 142 ülke kümelmiştir. Yapılan bu çalışma, ülkelere kendi performanslarını değerlendirmeleri, küresel anlamda konumlarını görebilmeleri ve inovasyon stratejilerini belirlemeleri açısından katkı sağlamıştır [18]. Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü üyesi 34 ülkenin sosyoekonomik yapılarını gösteren makro-ekonomik ve sosyo-kültürel göstergeler gibi 30 değişkene ait veriler kullanılarak bulanık kümeleme ve K-Medoid kümeleme yöntemleri ile bu ülkeler gelişmiş ve daha az gelişmiş olmak üzere iki ayrı kümeye ayrılmıştır. Bu ülkelerin gelişmişlik bakımından hangi ülkelerle benzeştiği veya hangileriyle farklılaşma gösterdiği ortaya

konulmuştur [19]. Beklenmedik Durum Teorisi (Contingency Theory) ile ilgili Portekiz'de 500 firmada anket yolu ile yapılan bir araştırmada, araştırma sonuçları için Boolean Değişken kümeleme tekniği kullanılmıştır [20]. Araştırmada rekabetçilik, çevre, belirsizlik ve inovasyon faktörleri hedef maliyetlendirme kapsamında değerlendirilmiştir. Kore'de küçük ve orta ölçekli firmalarda araştırma ve geliştirme çalışmalarında inovasyon etkinliğini ölçmek için işbirliği sınıflarının ve iş birliği stratejilerinin incelemesinde Veri Zarflama Analizi ve kümeleme analizi teknikleri kullanılmıştır [3]. Proksch ve arkadaşları [21] ulusal sağlık sistemlerinin inovasyon seviyelerinin belirlenmesi için Ward's tekniğini kullanarak kümeleme analizi gerçekleştirmiştir. Çalışmada 30 OECD ülkesinin inovasyon çıktısı kullanılmış olup, İskandinav ülkeleri, Hollanda ve İsviçre bilgi üretimi ve bilginin ticarileştirilmesinde en yüksek inovasyon çıktısına sahip ülkeler olarak elde edilmiştir. Bir başka çalışmada 34 OECD ülkesinin 2012 yılına ait Dünya Bankası'nın eğitim, bilgi, ekonomik teşvik ve kurumsal rejim, inovasyon, bilgi ve iletişim teknolojileri endeks verileri kullanılarak hiyerarşik kümeleme analizi ile gruplandırma yapılmıştır [22]. Irac ve Lopez [23] Avrupa ülkelerini güney ülkeler grubu ve diğer ülkeler grubu olarak iki kümeye ayırmış; her kümeyi iş hareketliliği, bilgi, regülasyonlar ve kuruluşların kalitesi olmak üzere 4 ana gösterge ve 27 alt gösterge kullanarak incelemiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan inovasyon göstergeleri, KİE Raporu inovasyon girdi ve çıktı alt endekslerine ait değişkenlerdir [24]. Bu değişkenler ve onlara karşılık gelen istatistiksel veriler sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelge 2 2018 KİE verileri kullanılarak hazırlanmıştır.

Cizelge 1. Kümeleme analizinde kullanılan değişkenler

X1: Politik Çevre	X8: Genel Altyapı	X15: Bilgi İçselleştirmesi
X2: Yasal Çevre	X9: Ekolojik Sürdürülebilirlik	X16: Bilgi Üretimi
X3: İşletme Çevresi	X10: Kredi	X17: Bilginin Etkisi
X4: Eğitim	X11: Yatırım	X18: Bilginin Yayılımı
X5: Yükseköğretim	X12: Ticaret ve Rekabet	X19: Maddi Olmayan Varlıklar
X6: ArGe	X13: Bilgi Çalışanları	X20: Yaratıcı Ürün ve Hizmetler
X7: Bilgi ve İletişim Teknolojileri	X14: İnovasyon Bağlantıları	X21: Online Yaratıcılık

Cizelge 2. 2018 KİE değişkenlerinin istatistiksel değerleri

Değişken	Ülkeler genelinde ortalama değer	Ülkeler genelinde en düşük değer	Ülkeler genelinde en yüksek değer	Değişken	Ülkeler genelinde ortalama değer	Ülkeler genelinde en düşük değer	Ülkeler genelinde en yüksek değer
X1	55,78	0	100	X12	60,69	16,9	92,3
X2	66,32	15,6	98,6	X13	38,14	0	85,6
X3	70,11	40	93	X14	31,45	3	77,9
X4	46,52	0	90,5	X15	31,92	12	77,9
X5	31,60	0	96,6	X16	19,84	0,9	88,9
X6	20,4	0	88,6	X17	35,03	0,4	67
X7	56,92	9,4	93,8	X18	24,89	25	86
X8	39,35	1,6	73,4	X19	41,85	0,1	71,9
X9	39,53	18,3	81,6	X20	24,39	0	61,3
X10	39,52	0,3	89,6	X21	15,58	0	67,1
X11	43,95	23,5	77,1				

21 alt endeksin her biri şu göstergelere dayandırılır: X1 (Politik Çevre): Siyasi istikrar ve güvenlik, hükümet etkinliği, X2 (Yasal Çevre): Yasal düzenlemelerin kalitesi, yasalar, işten çıkarma maliyetleri, X3 (İşletme Çevresi): İş yeri açma kolaylığı, iflas durumundan kurtulma kolaylığı, X4 (Eğitim): Eğitim harcamaları (%GSYİH), devlet fonu/öğrenci, okulda geçen süre/yıl, fen Bilimlerinde PISA notu, ortaöğretimde öğrenci başına öğretmen ortalaması, X5 (Yükseköğretim): Yükseköğretime kayıt (%), Fen Bilimleri ve Mühendislik bölümlerinden mezun olma (%), öğrenci hareketliliği, X6 (Araştırma ve Geliştirme): Araştırmacılar, araştırma-geliştirmede brüt harcamalar (%GSYH), Küresel ArGe firmaları, QS üniversite notu, X7 (Bilgi ve İletişim Teknolojileri): BİT'e erişim, BİT kullanımı, devletin online hizmetleri, e-katılım, X8 (Genel Altyapı): Elektrik üretimi, lojistik performansı, brüt sermaye performansı, X9 (Ekolojik Sürdürülebilirlik): GSYH/enerji

kullanımı, çevresel performans, ISO 14001 çevre sertifikası, X10 (Kredi): Kredi alma kolaylığı, özel sektörün kullandığı yerli krediler, mikrofinans brüt krediler, X11 (Yatırım): Küçük yatırımcıların korunması, piyasa kapitalizasyonu, girişim sermayesi anlaşmaları, X12 (Ticaret ve Rekabet): Uygulanan tarife oranları, yerel rekabetin yoğunluğu, iç piyasa ölçeği, X13 (Bilgi Çalışanları): Bilgi sektörü çalışan yoğunluğu, formal eğitim veren firmalar, ArGe çalışmalarının GSYH'deki payı, ArGe çalışmalarını finanse eden firmalar, kadın istihdamı, X14 (İnovasyon Bağlantıları): Üniversite-Sanayi işbirliği, küme gelişimi, yurtdışı destekli ArGe çalışmaları % GSYH, stratejik işbirliği anlaşmaları, patent aileleri, X15 (Bilgi İçselleştirmesi): Fikri mülkiyet ödemeleri, yüksek teknoloji ürün ihracatı, BİT hizmetleri ihracatı, girişimcilerin işletme kabiliyeti, doğrudan yabancı yatırım girişleri, X16 (Bilgi Üretimi): Patent başvuruları, PİA (Patent İşbirliği Anlaşması) patent başvuruları, faydalı

model başvuruları, bilimsel ve teknik makaleler, atıf yapılabilir çalışmalar, X17 (Bilginin Etkisi): ÖSO (Özel Sektör Ortaklıkları) çalışanın büyüme oranı, yeni işletmeler, bilgisayar yazılımı harcamaları, ISO 9001 kalite sertifikaları, orta ve yüksek teknoloji üretim, X18 (Bilginin Yayılımı): Fikri mülkiyet makbuzları, yüksek teknoloji ürün ihracatı, BİT hizmet ihracatı, doğrudan yabancı yatırımlar, X19 (Maddi Olmayan Varlıklar): Ticari markalar, ezndüstriyel tasarım uygulamaları, BIT ve iş modeli tasarımı, BIT ve örgütsel model tasarımı, X20 (Yaratıcı Ürün ve Hizmetler): Kültürel hizmetler ihracatı, ulusal filmler, küresel medya ve eğlence pazarı, basım ve yayın, yaratıcı ürün ihracatı, X21 (Online Yaratıcılık): Toplam domain sayısı, ülke kodu, Wikipedia editi, mobil uygulama oluşturma.

Bu 21 değişken kendi içlerinde gruplara ayrılmakta ve ortalamalar alınarak aşağıdaki göstergelere ait değerler elde edilmektedir.

- Kurumlar: Politik Çevre, Yasal Çevre, İşletme Çevresi
- İnsan Sermayesi ve Araştırma: Eğitim, Yükseköğretim, Araştırma ve Geliştirme
- Altyapı: Bilgi ve İletişim Teknolojileri, Genel Altyapı, Ekolojik Sürdürülebilirlik
- Piyasaların Gelişmişliği: Kredi, Yatırım, Ticaret ve Rekabet
- İş Dünyasının Gelişmişliği: Bilgi Çalışanları, İnovasyon Bağlantıları, Bilgi İçselleştirilmesi
- Bilgi ve Teknoloji Çıktıları: Bilgi Üretimi, Bilginin Etkisi, Bilginin Yayılımı
- Yaratıcı Çıktılar: Maddi Olmayan Varlıklar, Yaratıcı Ürün ve Hizmetler, Online Yaratıcılık.

Elde edilen göstergelerden ‘Kurumlar, İnsan Sermayesi ve Araştırma, Altyapı, Piyasaların Gelişmişliği ve İş Dünyasının Gelişmişliği’ değerlerinin ortalaması ile bulunan İnovasyon Girdi Alt Endeksi ile ‘Bilgi ve Teknoloji Çıktıları ve Yaratıcı Çıktılar’ değerlerinin ortalaması ile bulunan İnovasyon Çıktı Alt Endeksi’nin ortalaması alınarak 0 ile 100 arasında değer alabilen KİE elde edilir.

Çizelge 1’de belirtilen değerleri elde etmek için toplam 80 alt değişken kullanılmaktadır. Fakat bu alt değişkenler zaman içinde artıp azalabilmektedir. Ayrıca, 80 değişken çok farklı değerler alabilmektedir. Bunlardan yola çıkarak hesaplanan 21 değişken ise 0 ile 100 arasında bir değere sahiptir. Bu nedenle bu çalışmada 80 değişken yerine onlardan elde edilerek belirlenen 21 değişken veri olarak kullanılmıştır.

Bazı ülkeler için 21 değişkenin hepsine ait veriler mevcut değildir; örneğin Kanada’ya ait yükseköğretim verisinin olmaması gibi. Çalışmada, eksik veriler için 0 değeri kullanılmıştır. Eksik verilerin yerine 0 değerinin kullanılması böyle durumlarda başvuru yöntemlerinden biridir. 0 değerinin dahil olduğu ve hariç bırakıldığı durumlar için ortalama değerlerinin kontrolü yapılarak yanlışlık oluşturmadığı ve sonuçların değiştirilmediği öngörülmüştür. Örneğin X20 değişkeni için her iki durumdaki ortalama değerler 22.39 ve 22.57 olarak elde edilmiştir. Bir diğer alternatif ise verilerin tümüyle çıkartılarak analizin tekrarlanmasıdır. Bu durumda veri kaybı sözkonusu olacağı için çalışmada tercih edilmemiştir.

Bu çalışmada kümeleme analizi gerçekleştirilirken PASW Statistics 18 paket programı kullanılmıştır.

2.2. Metot

Veri madenciliği yöntemlerinden biri olan kümeleme analizi, verilerin birbirleriyle olan benzerlikleri ya da farklılıkları göz önünde bulundurularak kümelerle ayrılması işlemidir ve kümelendirme gerektiren birçok alanda kullanılabilir. Çakmak ve arkadaşları [12]’na göre, veriler kümelerle ayrılırken kullanılacak değişik benzerlik ve farklılık fonksiyonları olsa da genellikle benzerlik veya farklılıklar bir uzaklık fonksiyonu üzerinden tanımlanır. En yaygın olarak Öklid, Manhattan ve Minkowski uzaklık fonksiyonları kullanılır. Bu çalışma kapsamında Öklid uzaklık fonksiyonu kullanılmıştır (Eşitlik 1).

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_k^i - x_k^j)^2} \quad (1)$$

Burada d_{ij} , R^n 'de yer alan iki nokta x^i ve x^j arasındaki uzaklığı belirtir.

Kümeleme analizi, bu çalışmada, iki amaçla kullanılmıştır. Birincisi; inovasyon endeksleri baz alınarak ülkelerin 3'lü (Düşük-Orta-Yüksek) ve 5'li (Düşük-Düşük Orta-Orta-Orta Yüksek-Yüksek) gruplara ayrılmasıdır. Sadece endeks değerlerine bakıp böyle bir kümeleme yapmak kolay değildir ve kümeleme analizi bu probleme analitik bir yaklaşım getirir. Bu çalışmada geliştirilen yaklaşım bir endeksin veya sıralamanın mevcut olduğu herhangi bir başka alanda da kullanılabilir. İkincisi; KİE'yi belirlerken kullanılan 21 göstergeye ait verilerin kullanılmasıyla ülkelerin 3, 4 ve 5 gruba ayrılmasıdır. Bu gruplar sadece kendi içinde benzerlik gösteren ülkelerin gruplanmasını yansıttığı için herhangi bir sıralama şeklinde yorumlanmaz. Bu sonuçlardan yola çıkılarak endeksin benzerlikler ve farklılıkları ne denli yansıttığı, analiz sonuçları ile gösterdiği tutarlılık hakkında da bir değerlendirme yapılabilir.

Kümeleme analizindeki yöntemler en genel haliyle hiyerarşik ve hiyerarşik olmayan yöntemler şeklinde ayrılır [12]. Hiyerarşik olmayan yöntemlerin aksine, hiyerarşik yöntemlerde bir kümeye aidiyet belirlendikten sonra değiştirilmez. Bu çalışmada, iki yaklaşımın sonuçlarını da değerlendirebilmek için, her iki yöntemden birer teknik kullanılmıştır. Hiyerarşik yöntemlerden Ward's tekniği ve hiyerarşik olmayan yöntemlerden K-Ortalamlar yöntemi kullanılmıştır. Ward's tekniği ve K-Ortalamlar yöntemi küme içi benzerlikleri maksimum kılmaları ve literatürde de en sık kullanılan yöntemlerden olmaları sebebiyle bu çalışmada tercih edilmiştir.

2.2.1. Ward's Tekniği

Ward's tekniği genel olarak kümeler içi varyansı minimum yapmayı amaçlar ve hata kareler toplamına ilişkin aşağıdaki Eşitlik 2'den yararlanır.

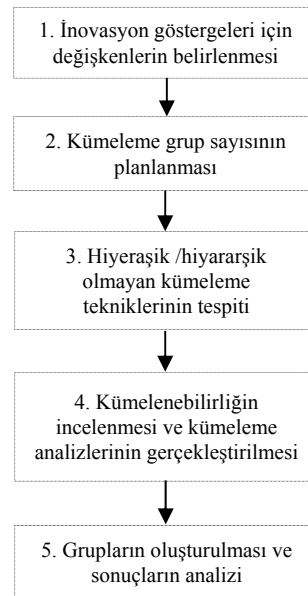
$$\sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2/n \quad (2)$$

Kümeler, küme ortasına düşen gözlemin, yine aynı kümede yer alan gözlemlerden ortalama uzaklığı esas alınarak bu toplam sapma kareleri en az arttıracak şekilde birleştirilir. Bu teknikte bir eleman bir kümeye bir kez atanır [25].

2.2.2. K-Ortalamlar Yöntemi

Özkan [25]'a göre hiyerarşik olmayan kümeleme yöntemleri arasında en yaygın biçimde kullanılan yöntemlerden biri K-Ortalamlar yöntemidir. Yöntem uygulanmadan önce k küme sayısı belirlenir ve bu kümelere mevcut gözlem değerleri isteğe bağlı olarak atanır. K-Ortalamlar yönteminde hem kümeler içi varyans, hem de kümeler arası mesafeler önemlidir ve veriler kendilerine en yakın merkezin ait olduğu kümeye atanana kadar dinamik bir şekilde kümelere çıkarılırlar veya kümelere eklenirler [25].

Kullanılan yaklaşım ile ilgili oluşturulan iş akışı Şekil 1' de gösterilmektedir.



Şekil 1. Kümeleme analizi iş akışı

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

KİE endeks değerleri kullanılarak yapılan analizdeki sonuçlar 3 ve 5 küme sayısı için

Çizelge 3’te verilmiştir. Endeks değerlerine bağlı bu kümeler ülkeleri inovasyon seviyeleri bakımından “Düşük-Orta-Yüksek” veya “Düşük-Orta Düşük-Orta-Orta Yüksek-Yüksek” şeklinde kümelemekte kullanılabilir. Böyle bir kümeleme yapılacak olduğunda sadece endeks değerlerine bakılarak hangi değerlerden kümelemenin yapılacağına karar vermek zordur. Kümeleme analizi ile bu kümeler analitik bir şekilde belirlenmiştir. Bu sonuçların KİE değerleri üzerinden daha genel bir sınıflandırma amaçlı da kullanılabilir olması da bu çalışmanın literatüre bir diğer katkısıdır.

Sonuçlar incelendiğinde 3’lü kümeleme için K-Ortalamlar tekniği KİE değerlerine göre kümeleri 31, 42 ve 53 ülke şeklinde belirlerken Ward’s tekniği kümeleri 41, 46 ve 39 ülke şeklinde belirlemiştir. Buna karşılık 5’li kümeleme için iki yöntem de İrlanda, İsrail ve Kore dışında aynı kümeleri vermiştir. K-Ortalamlar yöntemi yüksek kümeye ilk 9 ülkeyi dahil ederken, Ward’s tekniği ilk 12 ülkeyi dahil etmiş ve Orta-Düşük kümesinde geriye kalan ilk 26 ülke yer almıştır. Buradan ülkeleri KİE değerlerine göre 5’li gruplara ayırmanın daha uygun olacağı sonucuna varılabilir.

Ülkelerin mevcut durumunu bu şekilde kümelemek mümkün olsa da KİE değerlerinin 0 ile 100 arasında değer aldığı düşünüldüğünde bu kümeleme görece bir kümeleme olarak görülebilmektedir. Bunu yapmak için Çizelge 3’teki değerlerden 5 kümeli durum düşünülmüştür. 2018 verilerinde maksimum değer 68,4 olup sınır değerleri 0-100 aralığına doğrusal bir şekilde yansıtıldığında 100-84,80 83,63-73,54 71,35-59,50 56,87-42,84 ve 41,96-21,93 aralıklarına ulaşılmaktadır. Bu sınır değerlerine göre KİE değerleri üzerinden aşağıdaki genel kümeleme uygulanabilir görülmektedir.

- Yüksek (85 - 100)
- Orta Yüksek (70 - 85)
- Orta (60 - 70)
- Düşük Orta (40 - 60)
- Düşük (0 - 40)

Bu genel kümeleme çerçevesinde ülkelerin mevcut durumunda Yüksek ve Orta Yüksek kümesine dahil bir ülke görülmemektedir ve Yüksek Orta kümesine tek yakın ülke İsviçre olarak ortaya çıkmaktadır.

Çalışmanın bir sonraki aşamasında 21 değişken kullanılarak kümeleme analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4’te gösterilmiştir. Burada grup numaraları herhangi bir üstünlük belirlemek şeklinde değil ülkelerin benzerliği şeklinde yorumlanmalıdır.

Çizelge 4’te rakamların ‘*’ işareti ile birlikte gösterildiği hücreler iki yöntemin de aynı kümelemeyi verdiği durumları göstermektedir. Çizelge 4’teki kümeleme analizi sonuçları incelendiğinde ilk göze çarpan nokta, KİE değerlerine göre sıralamada 1-13 arasında olan ülkeler ve 97-126 arasında olan ülkelerin kendileri arasında, küme sayısından ve yöntemden bağımsız olarak her zaman birlikte kümelensidir. Bu ülkeler için endeks sıralaması ve kümeleme analizi sonuçları tutarlılık sergilemektedir. Bu durumda KİE endeksinin tek başına benzerlik ve farklılıkları yansıtmada etkin olduğu sonucuna varılabilir. Benzer şekilde, endekse göre sıralamada ilk 30-66 arasında yer alan ülkelere bakıldığında bu ülkelerin de KİE değerlerine paralel bir şekilde ve genellikle her iki yöntem ve farklı küme sayıları için benzer kümelendikleri görülmektedir.

Çizelge 3. KİE değerleri kullanılarak kümeleme analizi

Grup	k = 3				k = 5			
	K-Ort.	KİE	Ward’s	KİE	K-Ort.	KİE	Ward’s	KİE
1	Ü1-Ü31	68,4-46,3	Ü1-Ü41	68,4-40,7	Ü1-Ü9	68,4-58,0	Ü1-Ü12	68,4-56,6
2	Ü32-Ü73	45,7-31,6	Ü42-Ü87	38,9-29,3	Ü10-Ü26	57,2-50,3	Ü13-Ü26	54,9-50,3
3	Ü74-Ü126	31,4-15,0	Ü88-Ü126	28,7-15,0	Ü27-Ü41	48,8-40,7	Ü27-Ü41	48,8-40
4					Ü42-Ü87	38,9-29,3	Ü42-Ü87	38,9-29,3
5					Ü88-Ü126	28,7-15,0	Ü88-Ü126	28,7-15,0

Çizelge 4. 21 değişken için kümeleme analizi sonuçları

	k = 3		k = 4		k = 5	
	Ward's	K-Ort	Ward's	K-Ort	Ward's	K-Ort
Ü1-İsviçre	1*	1*	1*	1*	1*	1*
Ü2-Hollanda	1*	1*	1*	1*	1*	1*
Ü3-İsveç	1*	1*	1*	1*	1*	1*
Ü4-Birleşik Krallık	1*	1*	1*	1*	1*	1*
Ü5-Singapur	1*	1*	1*	1*	1	4
Ü6-Amerika	1*	1*	1*	1*	1*	1*
Ü7-Finlandiya	1*	1*	1*	1*	1*	1*
Ü8-Danimarka	1*	1*	1*	1*	1*	1*
Ü9-Almanya	1*	1*	1*	1*	1*	1*
Ü10-İrlanda	1*	1*	1*	1*	1	4
Ü11-İsrail	1*	1*	1*	1*	1*	1*
Ü12-Kore	1*	1*	1*	1*	1*	1*
Ü13-Japonya	1*	1*	1*	1*	1*	1*
Ü14-Hong Kong, Çin)	1*	1*	1	2	1	4
Ü15-Lüksemburg	1*	1*	1	2	1	2
Ü16-Fransa	1*	1*	1*	1*	1	4
Ü17-Çin	1*	1*	1	2	1	2
Ü18-Kanada	1*	1*	1*	1*	1*	1*
Ü19-Norveç	1*	1*	1	2	1	4
Ü20-Avustralya	1*	1*	1	2	1	4
Ü21-Avusturya	1*	1*	1	2	1	4
Ü22-Yeni Zelanda	1*	1*	1	2	1	4
Ü23-İzlanda	1*	1*	1	2	1	4
Ü24-Estonya	2	1	2*	2*	2*	2*
Ü25-Belçika	1*	1*	1	2	1	4
Ü26-Malta	2*	2*	2*	2*	2*	2*
Ü27-Çek Cumhuriyeti	2*	2*	2*	2*	2*	2*
Ü28-İspanya	2	1	2*	2*	2*	2*
Ü29-Kıbrıs	1	2	1	2	1	2
Ü30-Slovenya	2*	2*	2*	2*	2*	2*
Ü31-İtalya	2*	2*	2*	2*	2*	2*
Ü32-Portekiz	2*	2*	2*	2*	2*	2*
Ü33-Macaristan	2*	2*	2*	2*	2*	2*
Ü34-Letonya	2*	2*	2*	2*	2*	2*
Ü35-Malezya	2*	2*	2*	2*	2*	2*
Ü36-Slovakya	2*	2*	2*	2*	2*	2*
Ü37-Bulgaristan	2*	2*	2	3	2*	2*
Ü38-Birleşik Arap Emir.	2*	2*	2*	2*	2*	2*
Ü39-Polonya	2*	2*	2*	2*	2*	2*
Ü40-Litvanya	2*	2*	2*	2*	2*	2*
Ü41-Hırvatistan	2*	2*	2	3	2*	2*
Ü42-Yunanistan	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü43-Ukrayna	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü44-Tayland	2*	2*	3*	3*	3*	3*

Küresel İnovasyon Endeksi Verilerinin Kümeleme Analizi ile Değerlendirilmesi

Ü45-Vietnam	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü46-Rusya	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü47-Şili	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü48-Romanya	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü49-Türkiye	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü50-Moldova	2*	2*	3*	3*	4	3
Ü51-Katar	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü52-Karadağ	2*	2*	3*	3*	4	3
Ü53-Moğolistan	2*	2*	3*	3*	4	3
Ü54-Kosta Rika	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü55-Sırbistan	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü56-Meksika	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü57-Hindistan	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü58-Güney Afrika	2*	2*	3*	3*	4	3
Ü59-Gürcistan	2*	2*	3*	3*	4	3
Ü60-Kuveyt	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü61- Suudi Arabistan	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü62-Uruguay	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü63-Kolombiya	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü64-Brezilya	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü65-İran İslam Cumh.	2	3	3*	3*	3*	3*
Ü66-Tunus	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü67-Brunei Sultanlığı	2*	2*	3*	3*	4	3
Ü68-Ermenistan	2	3	3*	3*	4	3
Ü69-Umman	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü70-Panama	2	3	3*	3*	4	3
Ü71-Peru	2	3	3*	3*	3*	3*
Ü72-Bahreyn	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü73-Filipinler	2	3	3*	3*	3*	3*
Ü74-Kazakistan	2*	2*	3*	3*	4	3
Ü75-Mauritius	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü76-Fas	2	3	3*	3*	3*	3*
Ü77-Bosna Hersek	2	2	3*	3*	4	3
Ü78-Kenya	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü79-Ürdün	2	3	3*	3*	3*	3*
Ü80-Arjantin	2*	2*	3*	3*	3*	3*
Ü81-Jamaika	2	3	3	4	4	3
Ü82-Azerbaycan	2	3	3*	3*	4	3
Ü83-Arnautluk	2	3	3*	3*	4	3
Ü84-Yugoslavya	2*	2*	3*	3*	4	3
Ü85-Endonezya	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü86-Belarus	2*	2*	3*	3*	4	3
Ü87-Dominik Cumh.	3*	3*	4*	4*	5	3
Ü88-Sri Lanka	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü89-Paraguay	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü90-Lübnan	2	3	3*	3*	4	3
Ü91-Botsvana	2	3	3	4	4	3

Ü92-Tanzanya	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü93-Namibya	2	3	3	4	4	3
Ü94-Kırgızistan	2	3	3	4	4	5
Ü95-Mısır	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü96-Trinidad ve Tobago	2	3	3	4	4	5
Ü97-Ekvador	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü98-Kamboçya	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü99-Ruanda	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü100-Senegal	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü101-Tacikistan	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü102-Guatemala	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü103-Uganda	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü104-El Salvador	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü105-Honduras	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü106-Madagaskar	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü107-Gana	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü108-Nepal	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü109-Pakistan	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü110-Cezayir	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü111-Kamerun	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü112-Mali	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü113-Zimbabve	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü114-Malawi	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü115-Mozambik	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü116-Bangladeş	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü117-Bolivya	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü118-Nijerya	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü119-Gine	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü120-Zambiya	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü121-Benin	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü122-Nijer	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü123-Fildişi Sahili	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü124-Burkina Faso	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü125-Togo	3*	3*	4*	4*	5*	5*
Ü126-Yemen	3*	3*	4*	4*	5*	5*

* İki yöntem için aynı kümelemeyi verdiği durumları göstermektedir.

Endekse bağlı sıralamada 67-96 arasında yer alan ülkeler incelendiğinde iki yöntemin farklı sonuçlar verebildiği görülmektedir. Örneğin, bu aralıktaki ülkeler arasından, 5 kümeli durumda K-Ortalamalar tekniği kullanıldığında Brunei Sultanlığı, Ermenistan, Panama, Kazakistan, Bosna Hersek, Jamaica, Azerbaycan, Arnavutluk, Yugoslavya ve Belarus arasında Ward's tekniğinde görülmeyen benzerlik ortaya çıkarmıştır. Bundan dolayı farklı bir kümede yer almaları

gerekmektedir. Endeks sıralamasında 84, 86 ve 90. olan, sırasıyla, Yugoslavya, Belarus ve Lübnan'ın sıralamadaki 30-64 aralığındaki ülkelere benzerlik gösterip genelde aynı kümelere atanırken, sıralamada 78. sırada, daha yukarıda, yer alan Kenya sıralamada 97'den sonraki ülkelerle kümelendiği görülmüştür. Bu durum, analiz sonuçları ile KİE değerlerinin paralel olmayıp, bazı durumlarda endekse yansımamış benzerliklerin kümeleme analizi ile ortaya konulabileceğini göstermektedir.

Ward's tekniği sonuçlarına göre endeks sıralamasındaki ilk 23 ülke her zaman aynı kümeye atanırken, K-Ortalamlar yöntemi sonuçlarına göre, 4 ve 5 küme sayıları için, endeks sıralamasında 14-23 aralığındaki ülkeler, Kanada ve Fransa hariç, sıralamadaki ilk 13'ten ayrı kümeye atanmıştır. Kanada tüm yöntemlerde ve tüm küme sayıları için ilk 13'teki ülkelerle aynı kümeye atanırken, Fransa K-Ortalamların 5'li küme sonucu hariç ilk 13'teki ülkelerle aynı kümeye atanmıştır. Bu durum, bu ülkeler için kümeleme analizinin endeks değerine yansımamış benzerlikler ortaya koyabildiği şeklinde yorumlanabilir. Buna benzer ilginç bir durum endeks sıralamasında 25 ve 29. olan Belçika ve Kıbrıs için de söz konusudur. Ward's tekniği her iki ülkeyi ilk 13'teki ülkelerle aynı kümeye atarken, K-Ortalamlar bu iki ülkeyi ilk 13'teki ülkelerden farklı bir kümeye atamıştır. Bu bağlamda KİE değerleri ile K-Ortalamlar benzer davranırken, Ward's tekniği farklı sonuçlar vermektedir.

KİE değerlerinin 21 değişken üzerinden incelenmesine ek olarak, kümeleme analizi kümelerin oluşturulmasında hangi faktörlerin etkili olduğunu da ortaya koyabilmektedir. Bu bilgi ANOVA (Tek Yönlü Varyans Analizi) ile elde edilebilmektedir. En fazla ortalama hata karesine sahip değişken, kümelerin ayrılmasında en az etkisi olan değişken anlamına gelmektedir. Bu çalışmada sadece K-Ortalamlar yöntemine ait ve küme sayısı 3 için ANOVA sonuçları Çizelge 5'te gösterilmektedir. Çizelge 5'te tüm değişkenler 0,05'ten küçük anlam düzeyine sahip olduğu için anlamlıdır. En fazla ortalama hata karesine ve en düşük F değerlerinden birine sahip olan X10 (Kredi) değişkeninin, kümelemede en az etkiye sahip olduğu görülmektedir. Ortalama hata kareleri çok düşük olmasa da en yüksek F değerine sahip X6 (Bilgi ve İletişim Teknolojileri) ve X7 (ArGe) değişkenlerinin kümelemede en fazla etkiye sahip oldukları görülmektedir. Buradan ülkelerin inovasyon seyirlerini iyileştirmeleri için en çok Bilgi ve İletişim Teknolojileri ile ArGe alanında ilerleme kaydetmeleri gerektiği sonucu çıkarılabilir.

4. SONUÇ

Çalışmada KİE 2018 Raporundaki veriler kullanılarak kümeleme analizi yapılmıştır. Bu bağlamda ülkelerin birbirlerine benzerlikleri dikkate alınarak endeks değerleri ile bu benzerliklerin uyumu incelenmiştir. Bu aynı zamanda KİE endeksinin benzerlikleri ve farklılıkları ne kadar etkin biçimde yansıttığını anlamak amacıyla kullanılmıştır ve endeksin bunu etkin bir şekilde yapabildiği gözlenmiştir. Benzer bir analiz geliştirilmiş herhangi bir endeks için de ileriki çalışmalarda kullanılabilir. Kümeleme analizi KİE değerleri üzerinden kümeleme ve 21 değişken üzerinden kümeleme olmak üzere iki amaçla kullanılmıştır.

Birinci amaç ülkelerin KİE değerleri dikkate alınarak 3 ve 5 kümeye ayrılmasıdır. Sadece KİE değerleri üzerinden bir sıralama yapmak mümkün olsa da kümelerin nasıl belirleneceği konusu belirsizdir ve kümeleme analizi ülkelerin bu endeks üzerinden Düşük - Orta - Yüksek veya Düşük - Düşük Orta - Orta - Orta Yüksek - Yüksek şeklinde kümelemesini mümkün kılmıştır. Yapılan araştırmalarda bu tür bir analiz kullanılarak böyle bir kümeleme yapan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu kümeleme ülkelerin mevcut durumları için görece şekilde yapıldığı için yeterli olmayabileceğinden genel bir kümeleme yapmak da önem arz etmektedir. Bu da yine ülkelerin mevcut durumlarının kümeleme analizi sonuçlarının KİE'nin alabileceği tüm değerlere yansıtılması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem farklı ölçümler için geliştirilmiş başka herhangi bir endeks ile ilgili kümeler yaratmak amacıyla da kullanılabilir. Analizin ikinci amacı ise endeks oluşturulurken kullanılan 21 değişken kullanılarak inovasyon anlamında birbirlerine benzerlik gösteren ülkelerin belirlenmesidir. Bu amaç 3, 4 ve 5 gibi değişik küme sayıları kullanılarak ve Ward's tekniği ve K-Ortalamlar yöntemi gibi iki farklı yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kümeleme analizi sonuçları ile KİE değerlerine göre sıralamanın birbirleriyle tutarlılık gösterdiği durumlar olsa da farklı davrandıkları noktalar da gözlenmiştir.

Çizelge 5. 3 Kümeli K-ortalamlar için ANOVA çizelgesi

	Küme		Hata		F	Önem
	Ort. Kare	sd	Ort. Kare	sd		
X1	17064,58	2	145,877	123	116,979	0
X2	10101,1	2	136,461	123	74,022	0
X3	4853,295	2	68,253	123	71,107	0
X4	5821,46	2	130,336	123	44,665	0
X5	8218,386	2	181,449	123	45,293	0
X6	30721,97	2	120,792	123	254,339	0
X7	21225,58	2	111,842	123	189,783	0
X8	3814,178	2	108,262	123	35,231	0
X9	2734,807	2	109,249	123	25,033	0
X10	6291,638	2	189,207	123	33,253	0
X11	2259,042	2	120,126	123	18,806	0
X12	4561,458	2	100,914	123	45,201	0
X13	15465,28	2	115,053	123	134,419	0
X14	4101,498	2	112,772	123	36,37	0
X15	4479,036	2	77,894	123	57,502	0
X16	16251,64	2	126,819	123	128,148	0
X17	5222,595	2	124,86	123	41,827	0
X18	6733,945	2	137,205	123	49,079	0
X19	5089,373	2	115,146	123	44,199	0
X20	6454,463	2	117,495	123	54,934	0
X21	13822,8	2	113,883	123	121,377	0

Yüksek ve düşük KİE değerlerine sahip ülkeler için benzerlikler ve endeks sıralaması paralellik arz etmiş olsa da endeks sıralamasında ara değerlerde yer alan ülkeler için endekse paralel olmayacak şekilde benzerliklerin ortaya çıkarıldığı gözlenmiştir. Örneğin, Kanada endeks sıralamasında 18. sırada yer almasına rağmen kümeleme analizindeki her iki yöntem ve 3, 4 ve 5 küme sayıları için endeks sıralamasındaki ilk 13 ülke ile beraber kümelendiği görülmüştür.

Kümeleme analizi, verilerin tümü üzerinden bir değerlendirme yapması dolayısıyla, tek bir sayısal değer ifade eden endekslerin ortaya koyamayacağı bazı benzerlikleri ortaya koyma şansına sahiptir. Bu tür bir analiz, endekslere dayalı sıralamalarda hem endeksin veriyi yansıtmaya gücünü ortaya koymak, hem de kümeleme yapmak amaçlı kullanılabilir. Benzer şekilde kümeleme analizi ANOVA gibi değerlendirmelerle kümelerin oluşturulmasında etkili olan değişkenlerin belirlenmesine olanak sağlar. Gelecek çalışmalarda

farklı küme sayıları ve farklı yöntemler için bu tür sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilir. Yöntem veya küme sayısı seçimi ile ilgili bir çalışma yapılarak benzer analiz yöntemi başka endekslerde kullanılabilir.

5. KAYNAKLAR

1. Brocker, J., Dohse, D., Soltwedel, R., 2012. Innovation Clusters and Interregional Competition. Springer, Berlin.
2. Saraceni, A.V., Martind de Resende, L.M., Serpe, L.F., Junior, PPA., 2015. A Comparative Analysis Between Clustered and Non-Clustered Companies Using Innovation Indicators. IFAC-PapersOnLine, 48(3), 155-160.
3. Lee, J., Kim, C., Choi, G., 2018. Exploring Data Envelopment Analysis for Measuring Collaborated Innovation Efficiency of Small and Medium-Sized Enterprises in Korea.

- European Journal of Operational Research, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.044>.
4. Xie, X., Huo, J., Zou, H., 2019. Green Process Innovation, Green Product Innovation, and Corporate Financial Performance: A Content Analysis Method. *Journal of Business Research*, <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.01.010>.
 5. Baregheh, A., Rowley, J., Sambrook, S. and Davies, D., 2012. Innovation In Food Sector SMEs. *Journal of Small Business and Enterprise Development*, 19(2), 300-321, <https://doi.org/10.1108/14626001211223919>.
 6. Rani, K.M., 2013. Innovation In Indian Women Micro-Enterprises. *IPE Journal of Management*, 3(2), 76-94.
 7. Yıldız, T., Aykanat, T., 2015. Clustering and Innovation Concepts and Innovative Clusters: An Application on Technoparks in Turkey. *Procedia*, 195, 1196-1205.
 8. Franco, C., Oliveira, R.H., 2017. Inputs and Outputs of Innovation: Analysis of the BRICS: Theme 6-Innovation Technology and Competitiveness. *RAI Revista de Administração e Inovação*, 14(1), 79-89.
 9. Dziallas, M., Blind, K., 2018. Innovation Indicators Throughout The Innovation Process: An Extensive Literature Analysis. *Technovation*, <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2018.05.005>.
 10. Silva, C.M., Gavião, L.O., Gomez, C.F.S., Lima, G.B.A., 2017. A Proposal for the Application of Multicriteria Analysis to Rank Countries According to Innovation Using the Indicators Provided by the World Intellectual Property Organization. *RAI Revista de Administração e Inovação*, 14(3), 188-198.
 11. Adolfsson, A., Ackerman, M., Brownstein, N.C., 2019. To Cluster, or Not to Cluster: An Analysis of Clusterability Methods, Pattern Recognition. 88, 13-26.
 12. Çakmak, Z., Uzgören, N., Keçek G., 2005. Kümeleme Analizi Teknikleri ile İllerin Kültürel Yapılarına Göre Sınıflandırılması ve Değişimlerinin İncelenmesi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 12, 187-205.
 13. Şekerler, A., 2008. Trafik Kaza Verilerinin Kümeleme Analizi Yöntemi ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 131s, Denizli.
 14. Atalay, A., Tortum, A., 2010. Türkiye'deki İllerin 1997-2006 Yılları Arası Trafik Kazalarına Göre Kümeleme Analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(3), 335-343.
 15. Altun Ada, A., 2011. Kümeleme Analizi ile AB Ülkeleri ve Türkiye'nin Sürdürülebilir Kalkınma Açısından Değerlendirilmesi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 29, 319-332.
 16. Rai, A., Tang, X., Brown, P., Keil, M., 2006. Assimilation Patterns in the Use of Electronic Procurement Innovations: A Cluster Analysis. *Information and Management*, 43, 336-349.
 17. Özbek, H., Atik, H., 2013. İnovasyon Göstergeleri Bakımından Türkiye'nin Avrupa Birliği Ülkeleri Arasındaki Yeri: İstatistiksel Bir Analiz. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 42, 193-210.
 18. Şimşit, Z.T., Fırat, S.Ü.O., Es, H.A., Erdem, M., Topgül, M., Günay, N.S., 2014. Bilgi ve İletişim Teknolojileri Çerçevesinden Küresel İnovasyon Endeksinin Analizi ve Veri Madenciliği Kullanılarak Ülkelerin Kümelmesi. 1. Yönetim Bilişim Sistemleri Kongresi, İstanbul.
 19. Atal, S., 2015. Bulanık Kümeleme Analizi ve OECD Ülkelerinin Gelişmişlik Bakımından Kümelendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstatistik Anabilim Dalı, 88s, Eskişehir.
 20. Goncalves, T., Gaio, C., Silva, M., 2018. Target Costing and Innovation-Exploratory Configurations: A Comparison of fsQCA, Multivariate Regression, and Variable Cluster Analysis. *Journal of Business Research*, 89, 378-384.
 21. Proksch, D., Busch-Casler, J., Haberstroh, M. M., Pinkwart, A., 2019. National Health Innovation Systems: Clustering the OECD Countries By Innovative Output in Healthcare Using a Multi Indicator Approach. *Research Policy*, 48, 169-179.

22. Engin, M., 2018. Hiyerarşik Kümeleme Analizi ile OECD Ülkelerinin Bilgi Ekonomi İndekslerine Göre Sınıflandırılması. *Paradoks Ekonomi Sosyoloji ve Politika Dergisi*, 14(1), 73-86.
23. Irac, D., Lopez, J., 2015. Euro Area Structural Convergence? A Multi-Criterion Cluster Analysis. *International Economics*, 143, 1-22.
24. Lanvin, B., Dutta, S., Wunsch, S., 2018. The Global Innovation Index 2018. www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_gii_2018.pdf (erişim tarihi 22.10.2018).
25. Özkan, Y., 2008. *Veri Madenciliği Yöntemleri*. Papatya Bilim Yayıncılık, İstanbul.

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 yayınlanmasın 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 ortamdan alınmış ise: Bildiri sadece CD/DVD'de yayınlanmış 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

