



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
DERGİSİ

CUKUROVA UNIVERSITY
JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING

Cilt/Vol: 39

Sayı/Issue: 4

Aralık/December 2024

ISSN 2757-9255



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ DERGİSİ
Cukurova University,
Journal of the Faculty of Engineering



Sahibi (Owner)

Ali KESKİN
Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dekanı

Editör (Editor)

Serin MEZARCIÖZ

EDİTÖR KURULU (Editorial Board)

Ali KESKİN (Çukurova Üniversitesi)
Umut ORHAN (Çukurova Üniversitesi)
Mutlu AVCI (Çukurova Üniversitesi)
Mustafa GÖK (Çukurova Üniversitesi)
Hüseyin VAPUR (Çukurova Üniversitesi)
Hüseyin AKILLI (Çukurova Üniversitesi)
Ulus ÇEVİK (Çukurova Üniversitesi)
Ali KOKANGÜL (Çukurova Üniversitesi)
Mesut BAŞIBÜYÜK (Çukurova Üniversitesi)
Hacı Murat ARSLAN (Çukurova Üniversitesi)
Oğuz DEMİRYÜREK (Erciyes Üniversitesi)
Hüsamettin BULUT (Harran Üniversitesi)
Metin GÜRÜ (Gazi Üniversitesi)
Mehmet Emin AYDIN (University of the
West of England, İngiltere)
Azra BİLGİN (University of Colorado Boulder,
ABD)

Serin MEZARCIÖZ (Çukurova Üniversitesi)
Hasan ÇETİN (Çukurova Üniversitesi)
Özen KILIÇ (Çukurova Üniversitesi)
Hüseyin ERTEN (Çukurova Üniversitesi)
Belgin BAYAT (Çukurova Üniversitesi)
Mustafa ÖZCANLI (Çukurova Üniversitesi)
R. Tuğrul OĞULATA (Çukurova Üniversitesi)
Onur ERMAN (Çukurova Üniversitesi)
Yusuf KUVVETLİ (Çukurova Üniversitesi)
Hüseyin R. YERLİ (Çukurova Üniversitesi)
Ergun ERÇELEBİ (Gaziantep Üniversitesi)
Nihan ÇETİN DEMİREL (Yıldız Teknik Üniversitesi)
Serter ATABAY (American University of Sharjah,
United Arab Emirates)
Muammer KOÇ (Hamad Bin Khalifa University,
Qatar)
Tamio ENDO (Mie University-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

Derginin eski adı: Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi
(ISSN: 1019-1011)

YAZIŞMA ADRESİ/CONTACT

Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dergi ve Yayın Kurulu Başkanlığı Balcalı 01330 Sarıçam/ADANA
Tel : (322) 338 63 57 – (322) 338 70 50 E-posta: cu.mmfdergi@gmail.com



AMAÇ ve KAPSAM

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, yılda dört sayı olarak yayımlanan hakemli bilimsel bir dergidir. Mühendislik alanındaki gelişmeleri takip etmek, meslek kuruluşları ve bireylerin ulusal ve uluslararası gelişmelerine katkıda bulunmak ve bu alanlarda Türkçe bir kaynak oluşturmak amacıyla yayımlanmaktadır. Derginin yazım dili Türkçe/İngilizcedir. Daha önce başka bir yerde yayımlanmamış tüm özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları kapsayan makaleler kabul edilmektedir. Tüm mühendislik alanları ile ilgili teorik/deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar Dergi'nin ilgi alanındadır. Çeviri ve derleme makaleler kabul edilmemektedir. “**Araştırma ve uygulama içeren makaleleri**” yayınlamaktadır.

AIM and SCOPE

Journal of the Engineering Faculty of Cukurova University is a peer-reviewed scientific journal which is currently published quarterly. The journal is published to follow the developments in the field of engineering, to contribute to the national and international development of professional organizations and individuals, and to create a Turkish resource in these areas. The language of the journal is Turkish/ English. All original and up to date scientific research and applications articles that have not been published elsewhere are accepted. Theoretical/experimental and practical studies related to all engineering fields are in the scope of the Journal. Translation and compilation articles are not accepted. The journal publishes “**articles of research and practice**”.



İÇİNDEKİLER

- Performance Comparison of Deep Learning Lane Detection Models for Autonomous Vehicles..... 861**
Otonom Araçlar İçin Derin Öğrenme Şerit Tespiti Modellerinin Performans Karşılaştırması
Muhammed Said ATAŞ, Yahya DOĞAN, Cüneyt ÖZDEMİR
- Bir Tekstil Boyasının Çevre Dostu Bir Oksidant Olan CaO₂ ile Sulu Fazdan Giderimi 873**
Removal of a Textile Dye from Aqueous Phase Using CaO₂ as an Environmentally Friendly Oxidant
Behzat BALCI
- Kenevir İçeren Denim Giysilerin Terbiyesinde Çevre Dostu Bir Yöntem: Ozon ile Yıkama 881**
An Environmentally Friendly Method of Finishing Denim Clothes Containing Hemp: Ozone Washing
İrem PALABIYIK, Ayşegül KÖRLÜ, Gonca ÖZÇELİK
- Farklı İlave Metallerin AW 6061 Kaynaklı Bağlantıların Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi..... 897**
The Effect of Different Filler Metals on Mechanical and Microstructure Properties of AW 6061 Welded Joints
Aybars BAĞLAN, Mustafa TÜMER
- The Impact of Conjugate Heat Transfer in Flow Over a Vertical Plate and Application of Artificial Neural Network 907**
Düşey Bir Plaka Üzerinde Olan Akışa Bileşik Isı Transferinin Etkisi ve Yapay Sinir Ağları Uygulaması
Pınar YAĞLICA, Özdeş ÇERMİK
- 45° Eğimli İkincil Jetlere Sahip Sınırlandırılmamış ve Sınırlandırılmış Çarpan Jet Dizilerinde Isı Transferi Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi..... 923**
Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics in Unconfined and Confined Impinging Jet Arrays with 45° Inclined Secondary Jets
Haluk KELEŞ, Yücel ÖZMEN
- Torsiyonel Rijit Fan Kaplinlerinin Tasarlanması ve Optimizasyonu 939**
Design and Optimization of Torsional Rigid Fan Couplings
Abdulkadir YAŞAR, Yasin AYGÜL, Kerimcan ÇELEBİ
- Experimental Investigation of the Effect of Different Parameters on Plate and Frame Heat Exchanger Effectiveness 951**
Plakalı ve Çerçevesiz Isı Değiştiricisi Etkinliğine Farklı Parametrelerin Etkisinin Deneysel İncelemesi
Merve ALA, Mahir ŞAHİN, Mustafa KILIÇ

Design and Realization of a Novel Programmable Tobacco Smoking Simulator	961
<i>Özgün Programlanabilir Bir Sigara İçme Similatörünün Tasarımı ve Gerçeklemesi</i>	
Mustafa İSTANBULLU, A. Özgür POLAT, Koray SOYGUN, Deniz YUVA	
Investigation of Dyestuff Recycled from Wastewater Containing Indigo/Sulfur Dyes	969
<i>İndigo/Kükürt Boyaları İçeren Atık Sulardan Geri Dönüştürülen Boyar Maddelerin Araştırılması</i>	
Aslı ULUÇAY, Gökhan CEYHAN, Onur BALCI, Ceren IŞIK, Sıddık YAVUZ	
Üç Farklı Metasezgisel Algoritma Kullanılarak Petek Kirişlerin Yer Değiştirme Optimizasyonu.....	979
<i>Deflection Optimization of Castellated Beams Using Three Different Meta-heuristic Algorithms</i>	
Marwan Abdulkareem Shakir ALBAYATI, Ahmad Reshad NOORI	
Comparison of Feature Extraction Methods in High Dimensional Time Series	991
<i>Yüksek Boyutlu Zaman Serilerinde Özellik Çıkarma Yöntemlerinin Karşılaştırılması</i>	
Emre KILINÇ	
The Utilization of Single-Counter Systems Featuring Final Terminals with Non-Zero Counter Values.....	999
<i>Sıfırdan Farklı Sayaç Değerlerine Sahip Final Terminalleri İçeren Tek Sayaçlı Sistemlerin Kullanımı</i>	
Mehmet KURUCAN, Dominik WOJTCZAK	
İzmit Körfezindeki Limanlarda Deprem Yakın Saha Etkilerinin Araştırılması	1015
<i>Investigation of the Effects of Near-Field Earthquakes on Marine Ports in the Gulf of Izmit</i>	
Aydın MERT	
Elektroçirgeme Yöntemi ile Üretilen Antimikrobiyal Nanolif Membranlarda Lycopodium Özü Etkisinin İncelenmesi.....	1027
<i>Investigation of the Effect of Lycopodium Extract on Antimicrobial Nanofibrous Membranes Fabricated by Electrospinning Method</i>	
Ayşe YÜKSEKDAĞ	
Multi-Model Predictive Maintenance: Overview and A Linear System Perspective	1039
<i>Çok Modelli Kestirimci Bakım: Genel Bakış ve Doğrusal Sistem Perspektifi</i>	
Uğur YILDIRIM, Shahin MAMMADOV, Hüseyin AFŞER	
Zaman Serisinin Kestirimi İçin Uzun-Kısa Süreli Bellek Ağı Yaklaşımı	1053
<i>Long-Short Term Memory Network Approach for Time Series Prediction</i>	
Cem KORKMAZ, İlyas KACAR	
Crime Prediction with DistilBERT-based Feature Extraction and Machine Learning.....	1067
<i>DistilBERT Tabanlı Özellik Çıkarma ve Makine Öğrenimi ile Suç Tahmini</i>	
Emel ÇOLAKOĞLU, Serhat HIZLISOY, Recep Sinan ARSLAN	

Şeker Pancarı Atığı Katkılı Kil Zeminin Serbest Basınç ve Konsolidasyon Verilerinin İrdelenmesi.....	1081
<i>Analysis of Unconfined Compression Test and Consolidation Data of Clay Soil Added with Sugar Beet Waste</i>	
İlkim ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ, Baki BAĞRIACIK	
Çamaş (Ordu) Bölgesi Cu-Pb-Zn Cevherleşmelerinin Petrografik Özellikleri.....	1093
<i>Petrographic Characteristics of Cu-Pb-Zn Mineralization in Çamaş (Ordu) Region</i>	
Burcu KARATAŞ	
Nanosilika/ Sansevieria Trifasciata (Paşa Kılıcı) Doğal Fiber Katkılı Hibrid Epoksi Kompozitlerin Eğilme Performansının İncelenmesi.....	1103
<i>Investigation of the Flexural Performance of Hybrid Epoxy Composites Reinforced with Nanosilica/Sansevieria Trifasciata (Snake Plant) Natural Fiber</i>	
Bertan BEYLERGİL, Cihat Kerem ERGİN, Sefa YILDIRIM	
Afşin-Elbistan Termik Santrali (Kahramanmaraş) Çevresinin Yüzeysel Sularının Hidrojeokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi.....	1113
<i>Investigation of Hydrogeochemical Characteristics of Surface Waters Around Afşin-Elbistan Thermal Power Plant (Kahramanmaraş)</i>	
Veli KESKİN, Sedat TÜRKMEN, Ahmet ÖZBEK	
Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Şarj Uygulamaları için Genetik Algoritma ile Geliştirilmiş Bir Rezonans Dönüştürücü Tasarımı.....	1129
<i>Genetic Algorithm Enhanced Resonant Converter Design for Battery Charging Applications in Electric Vehicles</i>	
Birand ERDOĞAN, Adnan TAN, Mehmet TÜMAY	
Grafit-Kalsiyum Aljinat Modifiyeli Fungal Biyokompozitlerin Tepki Yüzeyi Metodolojisi ile Cr(VI) Giderim Optimizasyonu	1143
<i>Optimization of Cr(VI) Removal Using Response Surface Methodology with Graphite-Calcium Alginate Modified Fungal Biocomposites</i>	
Özgecan MADENLİ, Ceyhan AKARSU, Ece Ümmü DEVECİ	
Krank Milinde Kullanılan Ana Yatağın Nümerik Hasar Analizi.....	1151
<i>Numerical Damage Analysis of Main Bearing used in Crankshaft</i>	
Mehmet Şah GÜLTEKİN, Mehmet Said BAYRAKLILAR, Hamit ADİN	

Performance Comparison of Deep Learning Lane Detection Models for Autonomous Vehicles

Muhammed Said ATAŞ^{1,a}, Yahya DOĞAN^{1,b}, Cüneyt ÖZDEMİR^{1,c}

¹Siirt University, Engineering Faculty, Department of Computer Engineering, Siirt, Türkiye

^aORCID: 0009-0007-6572-9010; ^bORCID: 0000-0003-1529-6118; ^cORCID: 0000-0002-9252-5888

Article Info

Received : 19.02.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605865

Corresponding Author

Muhammed Said ATAŞ

msaid.atas@siirt.edu.tr

Keywords

Deep learning

Lane detection

TuSimple

U-Net

SCNN

How to cite: ATAŞ, M.S., DOĞAN, Y., ÖZDEMİR, C., (2024). Performance Comparison of Deep Learning Lane Detection Models for Autonomous Vehicles. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 861-871.

ABSTRACT

Recent advancements in the field of deep learning have significantly improved the driving capabilities of autonomous vehicles. This study focuses on the lane detection abilities of autonomous vehicles and examines the use of deep learning-based approaches in this context. The research compares the lane detection performance of various deep learning models, including U-Net, SCNN, ENet, and ENet-SAD, utilizing the TuSimple dataset. The models were evaluated using various quantitative metrics such as accuracy, precision, sensitivity, F1 score, and IoU. Extensive experiments have determined that the U-Net model exhibited the highest performance with an accuracy rate of 98.3%. The SCNN model, on the other hand, stood out in terms of precision, sensitivity, F1 score, and IoU metrics. In terms of inference time, the U-Net model was identified as the fastest lane detection model with a time of 20.12 ms. These results indicate that the U-Net model is particularly suitable for real-time systems requiring low computational power. Additionally, a qualitative assessment of lane detection success revealed that the SCNN and U-Net models more accurately detected pixels where lanes are present, whereas the ENet and ENet-SAD models were more prone to false-negative errors.

Otonom Araçlar İçin Derin Öğrenme Şerit Tespiti Modellerinin Performans Karşılaştırması

Makale Bilgileri

Geliş : 19.02.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605865

Sorumlu Yazar

Muhammed Said ATAŞ

msaid.atas@siirt.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Derin öğrenme

Şerit takibi

TuSimple

U-Net

SCNN

Atf şekli: ATAŞ, M.S., DOĞAN, Y., ÖZDEMİR, C., (2024). Performance Comparison of Deep Learning Lane Detection Models for Autonomous Vehicles. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 861-871.

ÖZ

Son yıllarda derin öğrenme alanlarında meydana gelen ilerlemeler, otonom araçların sürüş yeteneklerini önemli ölçüde geliştirmiştir. Bu çalışma, otonom araçların şerit tespit yeteneklerine odaklanmaktadır ve derin öğrenme tabanlı yaklaşımların bu bağlamdaki kullanımını incelemektedir. Araştırma kapsamında, TuSimple veri seti kullanılarak U-Net, SCNN, ENet ve ENet-SAD gibi çeşitli derin öğrenme modellerinin şerit tespiti performansları karşılaştırılmıştır. Modeller, doğruluk, hassasiyet, duyarlılık, F1 skoru ve IoU gibi çeşitli nicel metrikler kullanılarak değerlendirilmiştir. Yapılan kapsamlı deneyler sonucunda, U-Net modelinin %98.3 doğruluk oranı ile en yüksek performansı sergilediği tespit edilmiştir. SCNN modeli ise hassasiyet, duyarlılık, F1 skoru ve IoU metrikleri açısından öne çıkmıştır. Çıkarım süresi açısından değerlendirildiğinde, 20.12 milisaniye ile U-Net modelinin en hızlı şerit tespitini gerçekleştiren model olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, özellikle gerçek zamanlı ve düşük işlem gücü gerektiren sistemler için U-Net modelinin tercih edilebileceğini göstermektedir. Ayrıca, şerit tespit başarısının nitel değerlendirilmesi sonucunda, SCNN ve U-Net modellerinin şeritlerin bulunduğu pikselleri daha doğru bir şekilde tespit ettiği, buna karşın ENet ve ENet-SAD modellerinin false-negative (yanlış negatif) hata yapmaya daha meyilli olduğu gözlemlenmiştir.

1. INTRODUCTION

Recently, research on autonomous vehicles has been advancing rapidly, and it is anticipated that these vehicles will find widespread use soon, in harmony with the concept of smart cities [1,2]. Autonomous vehicles excel in complex and unpredictable traffic conditions. Their ability to safely and efficiently transport passengers in these situations is one of their most significant advantages. In this context, the ability of an autonomous vehicle to perceive its surroundings, as shown in Figure 1, is of vital importance. The perception system continuously collects, processes, and analyzes environmental data obtained through radar, lidar, cameras, and other advanced sensors. This enables the vehicle to instantly monitor its position, the objects around it, the movements of other vehicles, and the condition of the road and lanes. The processing of multi-modal data facilitates the vehicle's ability to make instantaneous decisions, adjust its route, and adapt to changing traffic conditions. The perception system plays a critical role in ensuring the vehicle makes optimal decisions regarding safety, efficiency, and comfort, thereby transporting passengers to their destinations via the safest and most suitable routes. Among these sensors, camera systems, which are also found in leading autonomous vehicles like Tesla and Google Waymo, are particularly effective for environmental perception [3,4]. Cameras process high-resolution images to identify environmental objects, read traffic signs, and assess road conditions, playing a significant role in these areas. Through cameras, lanes can be identified, and this lane tracking enables the driverless vehicle to proceed safely. This capability allows the vehicle to stay in its lane and, when necessary, automatically change lanes [5,6].

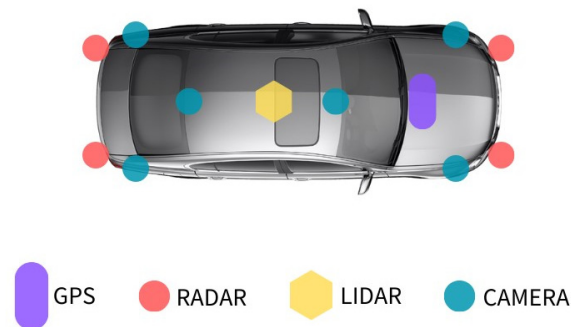


Figure 1. Overview of Environmental Sensing Technologies Used in Autonomous Vehicles for Road and Traffic Perception

Autonomous vehicles and Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) aim to enhance safety levels, reduce fuel and energy consumption, and lower road traffic emissions. ADAS offers drivers numerous support features such as advanced collision warnings and safe lane-changing aids [7,8]. According to the World Health Organization, approximately 1.3 million people lose their lives in traffic accidents each year [9]. Research indicates that most accidents are due to driver errors [10,11]. The widespread adoption of ADAS could significantly reduce the number of such traffic accidents by taking necessary measures in the event of a potential accident to prevent it [12]. Lane Departure Warning (LDW), a fundamental feature of ADAS, similarly relies on lane detection and tracking algorithms. LDW alerts the driver when the vehicle unintentionally crosses lane markings and then redirects the vehicle to the desired safe route. Studies have reported a series of challenges and issues associated with the implementation of ADAS and LDW systems, among which distortions in road and lane images due to varying lighting conditions play a significant role [13]. The existing literature generally presents three main approaches for lane detection: feature-based, model-based, and learning-based approaches. The feature-based approach processes attributes such as edges, colors, brightness, and textures. These attributes are usually unaffected by road shapes but are more sensitive to the amount of ambient light [12,13]. Model-based approaches use global road models to accommodate low-level features (pixel values, edges, colors, etc.). These models are resistant to lighting effects but are more sensitive to changes in road shapes. Geometric parameters in the model-based approach are employed in lane detection [14,15]. On the other hand, the learning-based approach consists of two stages: training and inference. During the training phase, a model is created using previously determined features (statistical and image processing-based features extracted from images in classical machine learning or automatically extracted features from images in deep learning). In the classification phase, road images are fed into the model as inputs, and the trained model is expected to detect lanes [16,17].

2. MATERIALS AND METHODS

This section provides details regarding the dataset that forms the basis of this study, the model architecture, and the training process.

2.1. Dataset

In this study, the TuSimple dataset [18], frequently preferred in the literature for comparing the performances of deep learning models, was utilized. It consists of 1-second long video clips recorded on U.S. highways under various weather conditions, at different times, and in different traffic conditions. The video clips were divided into images using specialized video processing software, producing 20 images per second. This process ensured high-quality output and precise frame rate control, enabling consistent and reliable preparation of our dataset. It is commonly seen in the literature that the last frame of the video sequence is used. The image resolution is 1280×720 pixels. The dataset, approximately 25 GB in size, employs a standard splitting method consisting of training (3,626), validation (358), and testing (2,782) images to ensure the general validity and comparability of the results. Upon examining the images in the dataset, it is observed that the images are taken from highways with 2, 3, 4, and 5 lanes. When preparing the masks, labeling was done considering that there could be up to 4 lanes. In the preparation of the masks, all backgrounds other than the lanes were assigned a “0” value. A gray pixel value of “2” for the first lane, “3” for the second lane, “4” for the third lane, and “5” for the fourth lane was assigned. Figure 2 presents an example frame from the dataset and its corresponding mask.



Figure 2. The 20th frame of a video clip from the TuSimple training dataset and its corresponding mask image where lane values are adjusted to 255 for clarity.

2.2. Models

The models utilized in this study were selected based on their widespread use in lane detection, the comparability of their diverse architectures, and their potential for real-time applications. The selection of these models was influenced by several factors: U-Net's success in medical image segmentation, SCNN's effectiveness in understanding traffic scenes, and the lightweight structures and fast operational characteristics of ENet and ENet-SAD. These considerations ensured a comprehensive evaluation of different approaches to lane detection, balancing performance with computational efficiency.

In this study, ResNet-based models were deliberately excluded from the scope. The primary reason for this decision was the study's focus on comparing lightweight and fast models specifically suitable for real-time

applications. ResNet-based models typically require higher computational power and memory due to their deeper and more complex structures [19]. While these models often offer high accuracy, their computational demands can be prohibitive for real-time processing on devices with limited resources. However, the inclusion of ResNet-based models in future studies would allow for a more comprehensive evaluation of lane detection performance across a broader spectrum of model architectures, potentially offering insights into the trade-offs between model complexity and detection accuracy in various application scenarios. In this section, details of the most commonly used deep learning models in lane detection problems, i.e. U-Net, SCNN, ENet, and ENet-SAD, are discussed.

U-Net: U-Net is a deep learning model designed for use in applications such as medical imaging and image segmentation. It derives its name from the U-shaped structure between the input and output, as can be seen in Figure 3. In the U-Net model, while the input and output dimensions are preserved, there is a bottleneck structure in the lower layers. U-Net includes parallel connections for each vertical layer between the input and output. These connections allow for the restoration of localization information and details lost during the encoder phase due to pooling in the decoder phase. Skip connections enhance the model's ability to preserve spatial localization and details. In a traditional convolutional deep learning model, as the number of filters in the image increases towards the lower layers, spatial information gradually weakens due to the reduction in image size resulting from pooling. The skip connections in the U-Net architecture play a key role in addressing this issue. U-Net typically consists of two main sections: the encoder and the decoder. The encoder section uses convolutional layers to extract feature maps from the input image. The decoder uses transposed convolutional layers and skip connections to convert these feature maps into a higher-resolution output [20].

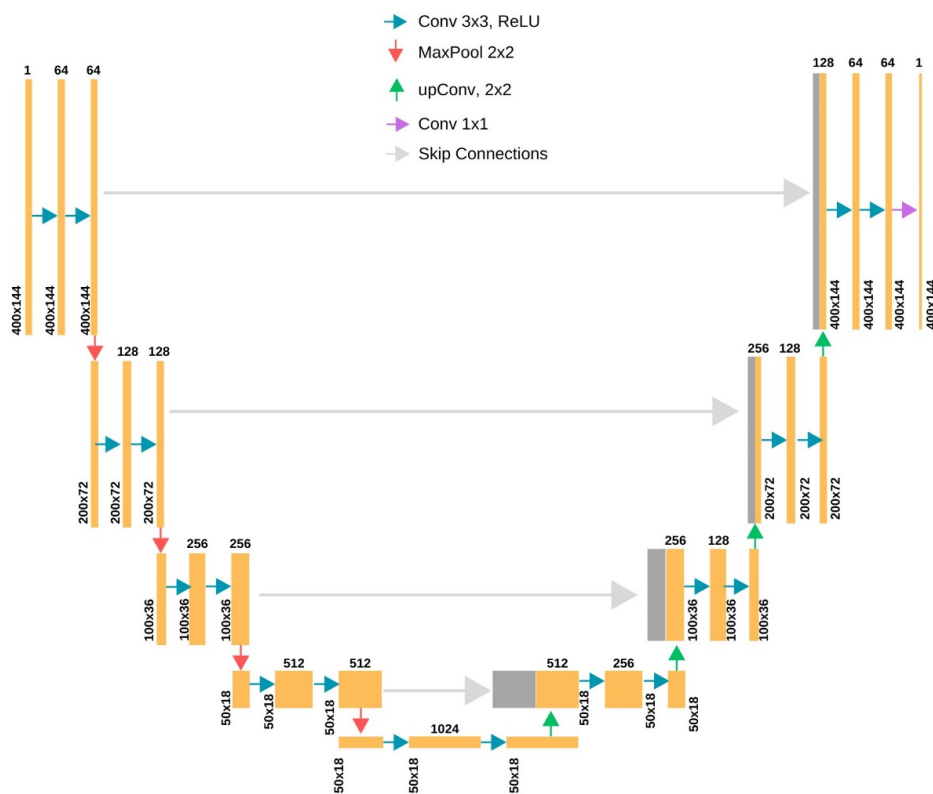


Figure 3. U-Net architecture [20]

SCNN: The Spatial Convolutional Neural Network (SCNN) is effectively utilized in scenarios where traditional Deep Neural Networks (DNNs) fall short, for instance, in highly complex traffic scenes, featuring multiple objects of different shapes and sizes [21]. Capable of delivering successful performance even in high-resolution images, the SCNN model also possesses the ability to accurately identify complex road structures. Fundamentally, DNNs use regional features to extract the meaning of visual content. However, these features can fail in objects that are common in traffic scenes, which may be strong in terms of shape but lack shape consistency. For example, traffic lane objects may not always be visible despite

their distinct geometric structure, or their continuity and consistency of shape may diminish over time due to various degradations. In such cases, the prediction performance of DNNs tends to be low. To overcome this issue, the SCNN model has been developed to analyze the entire image globally and spatially [21]. SCNN employs a local spatial filter that includes a region around each pixel, representing the relationship of each pixel with its neighbors. SCNN then uses these spatial relationships to classify objects. Figure 4 illustrates the architecture of the SCNN model.

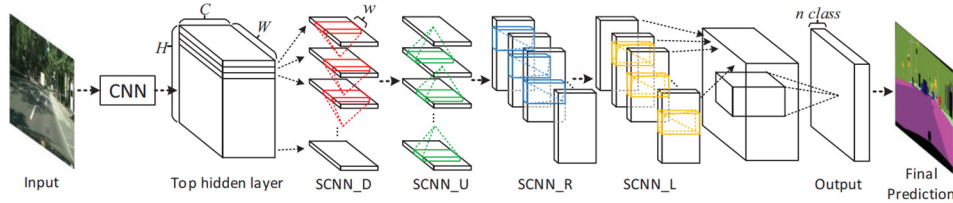


Figure 4. SCNN model architecture [22]

ENet: ENet is a CNN architecture originally designed for real-time semantic segmentation. This model is particularly known for being lightweight and fast, which enhances its usability in real-time applications. ENet employs a unique sequential block design along with asymmetric connections in the bottleneck area, thereby achieving an effective model with lower computational cost and fewer parameters. The model utilizes a starting layer before processing the input data, which transforms the input data into smaller-sized feature maps, accelerating the convolutional processes. ENet uses a structure called bottleneck blocks, as shown in Figure 5. These blocks perform deeper operations on smaller-sized feature maps. This approach reduces computational cost while increasing feature strength. It has been reported that the total number of trainable parameters is lower compared to SCNN [22]. ENet is designed to be lightweight and fast, primarily for real-time applications such as autonomous vehicles, drones, and similar tasks, necessitating the adaptation of the model according to the specific application or dataset [23].

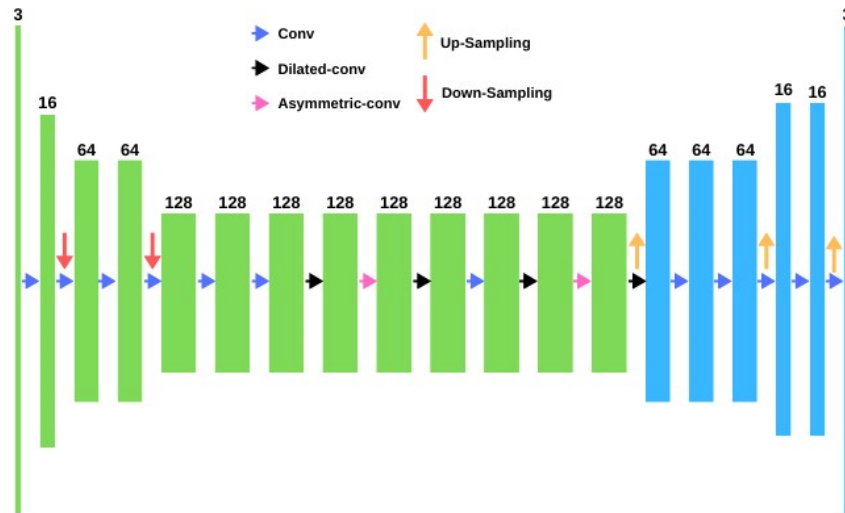


Figure 5. ENet block architecture [24]

ENet-SAD: ENet-SAD introduces a new approach that enhances the self-deep learning capabilities of lane detection networks. Hou et al. [25] developed a method for information distillation across different networks. They also expanded the function of information distillation to attention distillation in their works [26,27]. Zagoruyko et al. [27] proposed an activation and gradient-based attention distillation mechanism. The most notable difference of ENet-SAD from the method proposed by [27] is the transmission of attention information across layers through top-down distillation without the need for a teacher network. Therefore, the mentioned SAD method follows a different path from previous visual attention approaches that focused on feature weights. This method contributes to accelerating the inference time of the base model without external labeling or supervision. SAD allows the use of attention maps derived from the network's layers as distillation targets. This attention distillation mechanism is typically used to complement segmentation-based supervised learning. The strength of the SAD model stems from its ability to refine the contextual

information of attention maps coming from different layers of the lane detection network. Without SAD, attention maps from different layers might only capture the scene's location and outlines, but with the addition of SAD, attention maps from lower layers are refined, achieving better representational power for deeper layers. The efficacy of SAD has been successfully demonstrated on popular lightweight models.

Training Details: Within the scope of this study, the image sizes were resized to 800x288 for the training of the SCNN, ENet, ENet-SAD, and U-Net models. The models were trained over a total of 10 epochs with a batch size of 8. The training duration of 10 epochs was chosen to mitigate the risk of overfitting that could occur with higher epoch values. For the loss function, a combined loss function consisting of cross-entropy, binary cross-entropy, and IOU (Intersection Over Union) loss was utilized for the SCNN, ENet, and ENet-SAD models. Conversely, the BinaryFocalCrossEntropy loss function was selected for the U-Net model. As for the optimization algorithm, Stochastic Gradient Descent (SGD) was used for the SCNN, ENet, and ENet-SAD models, while the Adam (adaptive moment estimation) algorithm was chosen for the U-Net model. The learning rate for the models during the training phase was fixed at 0.01. All deep learning models were trained and tested on a laptop with an RTX 3060 graphics card, 16 GB RAM, and an AMD Ryzen 5 5800H processor, running the Windows 10 operating system.

Metrics: In this section, the metrics used to evaluate the performance of the models in lane detection tasks are discussed. In this context, fundamental metrics such as accuracy, precision, recall, F1 score, and IoU have been utilized. These metrics will provide a comprehensive assessment and comparative analysis of each model's reliability and effectiveness in lane detection tasks. The formulas for these performance metrics involve metrics like True Positive (TP), True Negative (TN), False Positive (FP), and False Negative (FN). Understanding what these metrics represent in the context of lane detection is crucial because, as can be inferred from Figure 7, the lane detection problem is more complex than classic classification problems.

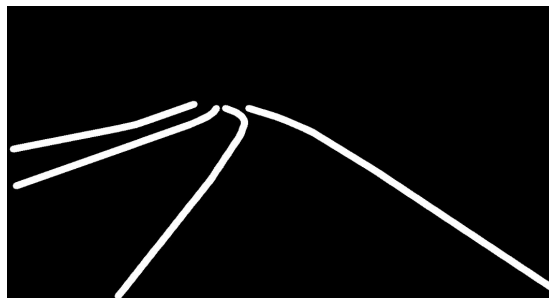


Figure 6. A ground-truth lane mask taken from the TuSimple dataset

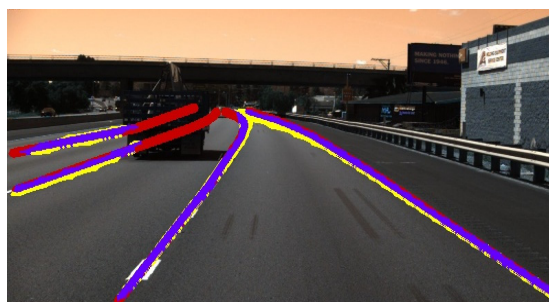


Figure 7. Visualization of SCNN Model Output on a Test Image from the TuSimple Dataset, Highlighting True Positives, False Positives, and False Negatives

In Figure 6, the lane masks shown in white are the ground-truth lane masks that we used in the model's training and expect the model to detect. The red lines in Figure 7 indicate lanes that the model was supposed to find but failed to detect. In this case, the pixels in the red lines are interpreted as false-negative. The yellow lane lines represent the lines that the model detected as lanes but do not have a counterpart in the basic truth. That is, the deep learning model has generated a false alarm, indicating a false-positive situation. The purple lines are where the model's predictions overlap or intersect with the basic truth, meaning the pixels in purple are considered true-positive. Theoretically, the success of a model is directly related to the

density of the purple pixels. The remaining original pixels in the image, not artificially colored, are considered true-negative. This situation represents pixels that overlap with the black areas in Figure 6.

Accuracy: A metric that shows how accurately (TP+TN) a model classifies the total number of samples (TP+TN+FP+FN). It is also used to measure the overall performance of the model. However, if the dataset is imbalanced, accuracy may not properly reflect the model's performance. Equation (1) demonstrates how to calculate the accuracy formula. Essentially, this metric calculates the extent to which the pixels predicted by the model as lanes resemble/overlap with the ground-truth-masked pixels. This involves dividing the total number of similar/overlapping pixels by the total number of pixels in the image matrix.

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

Precision: A measure of the model's level of generating false alarms. For instance, in the lane detection problem, having fewer yellow areas as indicated in Figure 7 is considered a measure of the model's higher precision. Thus, the precision value indicates how many of the pixels predicted as positive by the model are actually positive.

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

Recall: An indicator of the model's rate of making fatal errors, namely false-negative predictions. In the lane detection problem, the goal is to minimize the density of the red pixels seen in Figure 7. In this case, the model's recall is considered to be increased. Typically, a high recall value is expected for the model in situations where the cost of false negatives is high.

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

F1 Score: The F1 score is used as a metric that combines the precision and recall performance of a classification model. This score helps evaluate the overall classification performance of the model by balancing these two metrics.

$$F1 = \frac{2 \times (\text{Precision} \times \text{Recall})}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (4)$$

Intersection over Union(IoU): As illustrated in Figure 8, IoU represents the ratio of the intersection to the union in set theory. Similarly, the IoU metric calculates the ratio of the area overlapped/intersected by the pixels predicted by the model with the ground-truth pixels (purple pixels) to the total area shown in all colors (purple + yellow + red) in Figure 7. Accordingly, a higher TP value indicates that the model has predicted lanes with higher accuracy.

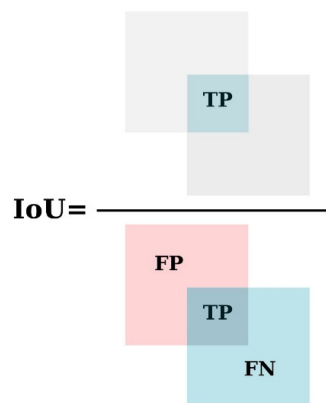


Figure 8. Depicts the IoU metric as a set

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

3. EXPERIMENTAL RESULTS

This study involves training and comparing four distinct lane detection models using the TuSimple dataset to evaluate their performance in detecting lanes. The evaluation of these models encompasses both objective measures, including standard success metrics and real-time inference speeds, and subjective assessments as depicted in Figure 10. Table 1 presents a comparative analysis of the lane detection capabilities of the U-Net, SCNN, ENet, and ENet-SAD models, utilizing metrics such as accuracy, precision, recall, F1-score, and IoU for performance evaluation. The models, after being trained over 10 epochs, were subjected to tests using a total of 2,782 images from the test directory of the TuSimple dataset. The findings are systematically displayed in Table 1, with the highest achieving scores in each model's context being prominently marked in bold across the appropriate rows and columns.

Table 1. Comparative analysis of lane detection model performances on the TuSimple dataset using accuracy, precision, recall, F1-score, and IoU metrics

Models	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score	IoU
U-Net	0.983	0.805	0.734	0.767	0.623
SCNN	0.938	0.946	0.900	0.919	0.879
ENet	0.782	0.426	0.479	0.445	0.321
ENet-SAD	0.756	0.473	0.465	0.466	0.330

According to Table 1, the U-Net model achieves the highest accuracy score, followed by the SCNN model with an accuracy value of 0.938. In terms of precision, SCNN leads with a value of 0.946, followed by U-Net at 0.805 precision. ENet and ENet-SAD models exhibit weaker precision performance, with ENet-SAD being slightly more precise than the ENet model. Regarding the recall criterion, SCNN and U-Net secure the top two positions with values of 0.900 and 0.734, respectively. ENet-SAD falls behind ENet in terms of recall. In the context of F1-Score, SCNN again takes the lead with a value of 0.919, and U-Net follows with a score of 0.767. ENet-SAD outperforms the ENet model in this metric as well. For the Intersection over Union (IoU) criterion, SCNN ranks first with a score of 0.879, with U-Net in second place at 0.623. ENet-SAD and ENet models occupy the third and fourth positions, respectively. In summary, SCNN, with the highest scores, emerges as the best-performing model according to Table 1. The inclusion of the VGG-16 [28] model contributes to SCNN outperforming the other models. However, it's essential to note that the VGG-16 model's substantial size could potentially increase the inference time. Figure 9 provides insight into the average inference speed per image in milliseconds for the models. Notably, despite its high accuracy performance, SCNN exhibits a slower inference speed at 61.11 ms. ENet-SAD and ENet models follow with average inference times of 50.32 ms and 48.52 ms, respectively. U-Net stands out as the fastest model with an inference speed of 20.12 ms.

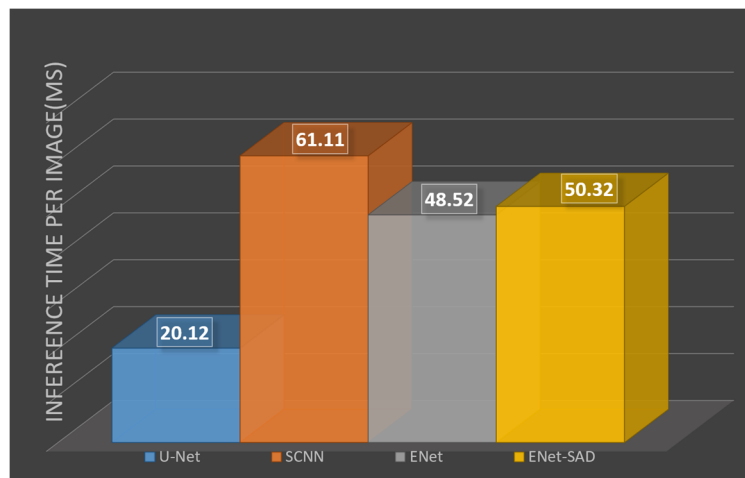


Figure 8. Average inference time comparison of lane detection models (U-Net, SCNN, ENet, ENet-SAD) on the TuSimple dataset

Figure 10 illustrates the lane detection performances of the SCNN, U-Net, ENet, and ENet-SAD models in the context of ground truth for four randomly selected test images from the TuSimple dataset. Purple-colored pixels indicate the success of lane detection as measured by IoU. As evident from Figure 10, the purple lanes are more prominent, especially in the SCNN and U-Net models. In the ENet and ENet-SAD models, red lanes predominate, indicating relatively weaker lane detection capabilities for these models. It is observed that these findings align with the objective results presented in Table 1.

Qualitative analysis reveals significant insights into each model's performance. SCNN and U-Net demonstrated superior lane pixel detection accuracy, while ENet and ENet-SAD showed higher false-negative rates. This difference stems from the models' architectural characteristics. SCNN's spatial design and VGG-16 backbone enable effective capture of long-range spatial relationships, crucial for continuous lane detection. U-Net's skip connections preserve fine-grained spatial information, contributing to its high accuracy. In contrast, ENet and ENet-SAD, designed for efficiency, struggle with false-negatives, likely due to their compact architectures limiting full context capture. These results highlight the trade-off between model size, detection accuracy, and real-time performance in lane detection applications.

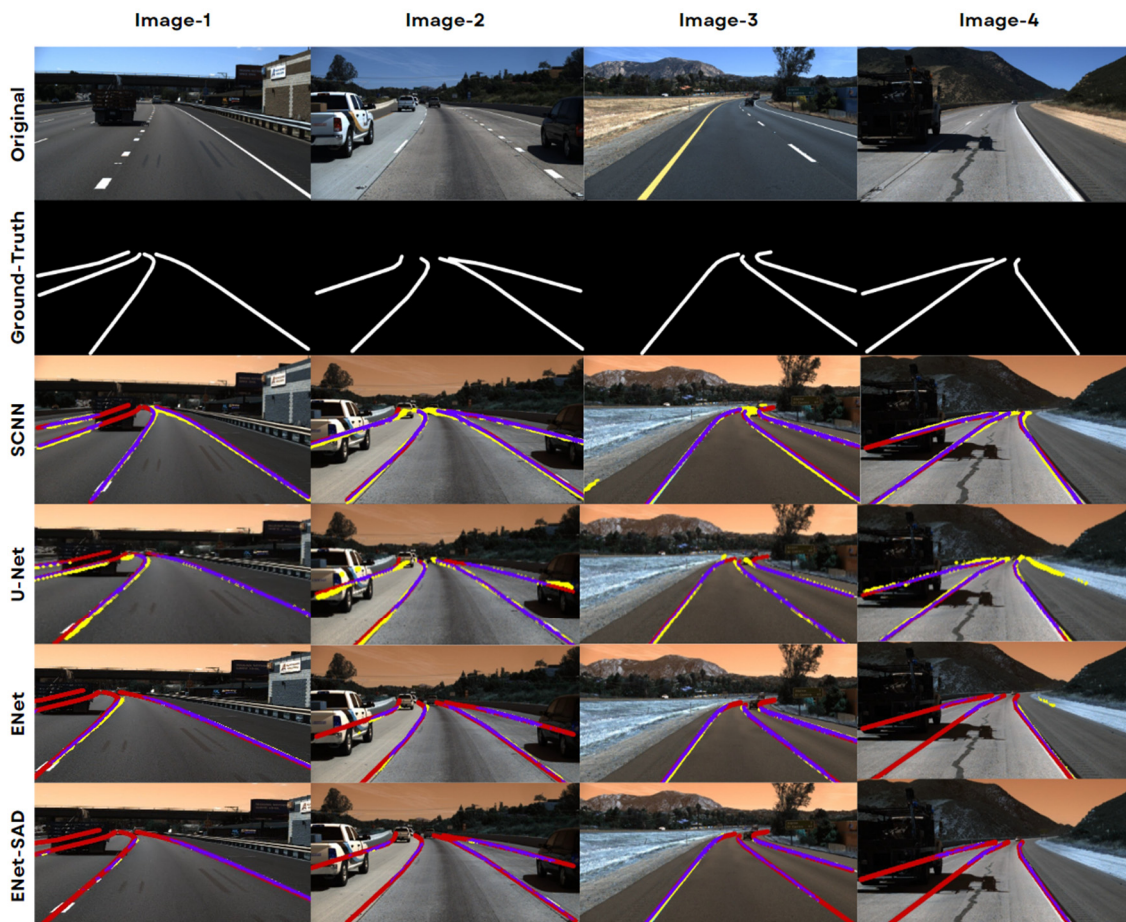


Figure 10. Visual comparison of lane detection results for U-Net, SCNN, ENet, and ENet-SAD models on sample images from the TuSimple dataset

4. CONCLUSIONS

In this study, four different lane detection models (U-Net, SCNN, ENet, and ENet-SAD) were trained on the TuSimple dataset, and their lane detection performances were compared. The models' performances were evaluated using success metrics such as accuracy, precision, recall, F1-score, IoU, and real-time inference time. As a result, it can be concluded that the SCNN model is the best-performing model, particularly due to its highest accuracy and strong performance in other metrics. However, considering the significance of inference time, especially for systems with limited processing power, the U-Net model may

be preferred for real-time inference. Furthermore, as shown in Figure 10, both the SCNN and U-Net models demonstrate more significant lane detection than the ENet and ENet-SAD models, which is consistent with the objective results reported in Table 1. Our next work will include evaluating the models on a variety of datasets, building novel and faster lane recognition models, and implementing real-world lane detection applications.

5. REFERENCES

1. Sevim, M.A., Kircova, İ., Çuhadar, E., 2019. Yerel yönetimlerde akıllı şehir vizyonu: şehir yönetim araçları ve trendleri. *Strategic Public Management Journal*, 5(9), 109-126.
2. Richter, M.A., Hagenmaier, M., Bandte, O., Parida, V., Wincent, J., 2022. Smart cities, urban mobility and autonomous vehicles: How different cities needs different sustainable investment strategies. *Technological Forecasting and Social Change*, 184, 121857.
3. De-Las-Heras, G., Sanchez-Soriano, J., Puertas, E., 2021. Advanced driver assistance systems (ADAS) based on machine learning techniques for the detection and transcription of variable message signs on roads. *Sensors*, 21(17), 5866.
4. Marti, E., De Miguel, M.A., Garcia, F., Perez, J., 2019. A review of sensor technologies for perception in automated driving. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 11(4), 94-108.
5. Zakaria, N.J., Shapiai, M.I., Ghani, R.A., Yasin, M.N.M., Ibrahim, M.Z., Wahid, N., 2023. Lane detection in autonomous vehicles: A systematic review. *IEEE Access*.
6. Dillmann, J., den Hartigh, R.J.R., Kurpiers, C.M., Pelzer, J., Raisch, F.K., Cox, R.F.A., de Waard, D., 2021. Keeping the driver in the loop through semi-automated or manual lane changes in conditionally automated driving. *Accident Analysis & Prevention*, 162, 106397.
7. Haas, R.E., Bhattacharjee, S., Möller, D.P., 2020. Advanced driver assistance systems. *Smart Technologies: Scope and Applications*, 345-371.
8. Kukkala, V.K., Tunnell, J., Pasricha, S., Bradley, T., 2018. Advanced driver-assistance systems: A path toward autonomous vehicles. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 7(5), 18-25.
9. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>, Erişim tarihi: 08.11.2023.
10. Kuyumcu, Z.Ç., Aslan, H., Yose, M.A., Ahadi, S., 2020. Türkiye’de trafik kazaları ve sürücülerin kazalardaki payı. *Academic Perspective Procedia*, 3(1), 694-702.
11. Novikov, A., Shevtsova, A., Vasilieva, V., 2020. Development of approach to reduce number of accidents caused by drivers. *Transportation Research Procedia*, 50, 491-498.
12. Mukhopadhyay, A., Murthy, L.R.D., Mukherjee, I., Biswas, P., 2022. A hybrid lane detection model for wild road conditions. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*.
13. Ying, Z., Li, G., Zang, X., Wang, R., Wang, W., 2016. A novel shadow-free feature extractor for real-time road detection. In *Proceedings of the 24th ACM international conference on Multimedia*, 611-615.
14. Khan, H.U., Ali, A.R., Hassan, A., Ali, A., Kazmi, W., Zaheer, A., 2020. Lane detection using lane boundary marker network with road geometry constraints. In *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision*, 1834-1843.
15. Li, C., Shi, J., Wang, Y., Cheng, G., 2022. Reconstruct from top view: A 3d lane detection approach based on geometry structure prior. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 4370-4379.
16. Giesemann, F., Payá-Vayá, G., Blume, H., Limmer, M., Ritter, W.R., 2017. Deep learning for advanced driver assistance systems. In *Towards a Common Software/Hardware Methodology for Future Advanced Driver Assistance Systems*, 105. River Publishers.
17. De-Las-Heras, G., Sanchez-Soriano, J., Puertas, E., 2021. Advanced driver assistance systems (ADAS) based on machine learning techniques for the detection and transcription of variable message signs on roads. *Sensors*, 21(17), 5866.
18. TuSimple, 2024. Tusimple dataset. <https://github.com/TuSimple/tusimple-benchmark/wiki/>
19. Zhang, X., Zhou, X., Lin, M., Sun, J., 2018. Shufflenet: An extremely efficient convolutional neural network for mobile devices. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 6848-6856.
20. Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T., 2015. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, Proceedings, Part III* 18, 234-241. Springer International Publishing.
21. Pan, X., Shi, J., Luo, P., Wang, X., Tang, X., 2018. Spatial as deep: Spatial cnn for traffic scene understanding. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 32, 1.

22. Hou, Y., Ma, Z., Liu, C., Loy, C.C. 2019. Learning lightweight lane detection cnns by self attention distillation. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 1013-1021.
23. Paszke, A., Chaurasia, A., Kim, S., Culurciello, E., 2016. Enet: A deep neural network architecture for real-time semantic segmentation. arXiv Preprint arXiv: 1606.02147.
24. Khoshdeli, M., Winkelmaier, G., Parvin, B., 2018. Fusion of encoder-decoder deep networks improves delineation of multiple nuclear phenotypes. BMC Bioinformatics, 19(1), 1-11.
25. Hou, Y., Ma, Z., Liu, C., Loy, C.C., 2019. Learning to steer by mimicking features from heterogeneous auxiliary networks. In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 33(1), 8433-8440.
26. Wang, F., Jiang, M., Qian, C., Yang, S., Li, C., Zhang, H., Tang, X., 2017. Residual attention network for image classification. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 3156-3164.
27. Zagoruyko, S., Komodakis, N., 2016. Paying more attention to attention: Improving the performance of convolutional neural networks via attention transfer. arXiv Preprint arXiv: 1612.03928.
28. Yang, W.J., Cheng, Y.T., Chung, P.C., 2019. Improved lane detection with multilevel features in branch convolutional neural networks. IEEE Access, 7, 173148-173156.



Bir Tekstil Boyasının Çevre Dostu Bir Oksidant Olan CaO₂ ile Sulu Fazdan Giderimi

Behzat BALCI^{1,a}

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

^aORCID: 0000-0002-4636-4235

Makale Bilgileri

Geliş : 09.09.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605873

Sorumlu Yazar

Behzat BALCI

behzatbalci@gmail.com

Anahtar Kelimeler

İleri oksidasyon

Boyar madde

Auksu

Kalsiyum peroksit

Atf şekli: BALCI, B., (2024). Bir Tekstil Boyasının Çevre Dostu Bir Oksidant Olan CaO₂ ile Sulu Fazdan Giderimi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 873-880.

ÖZ

Tekstil boyar maddelerini içeren atıksuların alıcı ortamlarda varlığı, çevre sağlığı için önemli sakıncalar oluşturmaktadır. Boyar maddelerin etkili bir şekilde giderimini sağlayan yöntemler arasında ileri oksidasyon prosesleri yer almaktadır. Yaygın kullanılan yöntemler arasında Fenton prosesleri bulunsa da, bu yöntem metal içerikli çok miktarda çamur oluşturmaması nedeniyle önemli bir dezavantaj teşkil etmektedir. CaO₂, çevre dostu ve güçlü oksidasyon potansiyeline sahip bir kimyasaldır. Bu çalışmada, değişken deneysel koşullar altında CaO₂ ile Crystal Violet boyar maddesinin sulu fazda oksidasyonu araştırılmıştır. CaO₂, demir gibi aktivatör olmadan yüksek oksidasyon verimleri göstermiştir. Süreç sonunda çamur oluşumunun önüne geçilmiştir. CV oksidasyonu için optimum pH değerinin 10 olduğu tespit edilmiştir. Oksidasyon çalışmaları, düşük CaO₂ dozlarıyla kısa reaksiyon sürelerinde yüksek oksidasyon verimlerinin elde edilebileceğini ortaya koymuştur. 200 mg/L CV'nin %99,9 oranında giderimi için 0,1 gram CaO₂ kullanılarak 25 dakikalık bir reaksiyon süresinin yeterli olduğu belirlenmiştir.

Removal of a Textile Dye from Aqueous Phase Using CaO₂ as an Environmentally Friendly Oxidant

Article Info

Received : 09.09.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605873

Corresponding Author

Behzat BALCI

behzatbalci@gmail.com

Keywords

Advance oxidation

Dye

Wastewater

Calcium peroxide

How to cite: BALCI, B., (2024). Bir Tekstil Boyasının Çevre Dostu Bir Oksidant Olan CaO₂ ile Sulu Fazdan Giderimi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 873-880.

ABSTRACT

The presence of wastewater containing textile dyes in receiving environments poses significant risks to environmental health. Advanced oxidation processes are among the methods that effectively remove dye substances. Although Fenton processes are commonly used, they present a significant disadvantage due to the generation of large amounts of sludge containing metals. CaO₂ is a chemical with an environmentally friendly and strong oxidation potential. In this study, the oxidation of Crystal Violet dye in aqueous phase using CaO₂ under varying experimental conditions was investigated. CaO₂ exhibited high oxidation efficiencies without the need for activators like iron. The process successfully prevented sludge formation at the end. The optimum pH value for the oxidation of CV was found to be 10. The oxidation studies indicated that high oxidation efficiencies could be achieved with low doses of CaO₂ and short reaction times. It was determined that a reaction time of 25 minutes with 0.1 grams of CaO₂ was sufficient for the removal of 99.9% of 200 mg/L CV.

1. GİRİŞ

Tekstil atıksularındaki boyar madde içeriğini arıtmak amacıyla fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçleri ya da bunların kombinasyonlarını kapsayan çeşitli teknikler kullanılmaktadır [1,2]. Bu arıtma teknolojileri umut verici giderim verimliliği gösterse de, yüksek işletim maliyetleri, büyük miktarda çamur oluşumu, uzun işletme süreleri ve nitelikli iş gücü gereksinimi gibi çeşitli dezavantajları beraberinde getirmektedir [3]. Adsorpsiyon sürecinin temel dezavantajları arasında adsorbanın geri kazanım ihtiyacı, pahalı adsorbanların kullanımı ve boyar maddelerin mineralizasyon yerine katı fazda birikimi yer almaktadır. Koagülasyon yöntemi ile boyar madde giderimi sağlanabilse de, bu yöntem büyük miktarda kimyasal tüketimi ve boya içeren çamurun oluşumu gibi ciddi zorluklarla karşı karşıyadır ve bu çamurun özel bertaraf işlemleri gerektirmektedir. Membran ayırma tekniği, boya içeren atıksuların arıtılmasında yüksek kalitede arıtılmış su sağlasa da, membran tıkanıklığı, yüksek işletim maliyetleri ve boyar maddelerin mineralizasyonunun ya çok az ya da hiç olmaması gibi sorunlarla karşılaşmaktadır [3-5]. Tekstil boyaları genellikle aerobik biyolojik ayrışmaya karşı direnç göstermektedir [6]. Öte yandan, anaerobik/anoksik biyolojik süreçte, azo bağlarının NADH'den bu bağlara elektron transferi sonucunda kopması gerçekleşir [7]. Ancak, anaerobik/anoksik süreçte azo bağlarının ayrışması, renksiz aromatik aminlerin oluşumuna yol açmaktadır. Aromatik aminlerin, azo boyalarının orijinal hallerine kıyasla daha yüksek sitotoksikite ve genotoksikite gösterebileceği önemli bir husustur [8]. Bu aromatik aminlerin belirli oranlarda giderimi için aerobik bir süreç gereklidir. Bu giderim süreci biyodegradasyon ve biyosorpsiyon mekanizmalarını içerebilir; ancak aromatik aminlerle yüklü biyokütle birikimi potansiyel bir sorun teşkil etmektedir [9]. Öte yandan, ileri oksidasyon süreçleri (İOP'ler), sentetik boyaları zararsız maddelere mineralize edebilir. Son yıllarda, tekstil atık sularının arıtımında yüksek kaliteli çıkış suyu sağladıkları için çeşitli İOP'lere olan ilgi artmıştır. Hidrojen peroksit (H₂O₂) temelli kimyasal oksidasyon, sentetik boyalar gibi dirençli organik bileşikler içeren atıksuların arıtımında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [10]. H₂O₂, hidroksil radikalini (•OH) üretmesi nedeniyle güçlü bir oksitleyici ajandır [11]. •OH radikali, organik kirleticileri CO₂ ve H₂O'ya mineralize edebilen, seçici olmayan, son derece reaktif bir oksidandır (E° = 2.8 V) [12]. Ancak, H₂O₂'nin doğrudan kullanımı, hızlı bozunması nedeniyle sınırlıdır. Fenton prosesi, demir iyonları ile H₂O₂ reaksiyonundan •OH radikali üretir. Ancak, Fenton prosesi dar bir asidik pH aralığında etkili olup, büyük miktarlarda demir çamuru üretir ve su sistemlerinde metal kirliliğine neden olabilir [13]. H₂O₂ ile ozonun (O₃/H₂O₂) birlikte kullanılması, organik bileşiklerin oksidasyonu için serbest radikal üretimini artırır. Ancak, ozonun düşük çözünme hızı ve bromat gibi zararlı yan ürünlerin oluşumu, O₃/H₂O₂ prosesinin başlıca dezavantajlarıdır. UV destekli H₂O₂ (UV/H₂O₂) oksidasyon süreci, dirençli organik bileşikler içeren atık suların arıtımında kullanılabilir. Ancak, yüksek enerji maliyetleri, UV/H₂O₂ teknolojisinin sınırlayıcı faktörüdür [14,15]. Kalsiyum peroksit (CaO₂), organik kirleticilerin arıtımında 2.01 V redoks potansiyeli ile güçlü bir oksitleyici ajan olarak kullanılabilen yenilikçi bir oksidandır. Geleneksel oksitleyici ajanlarla karşılaştırıldığında, CaO₂ uzun ömür, kolay taşıma, yüksek stabilite ve saflık, kolay üretim ve düşük maliyet gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. CaO₂, yüksek enerji seviyesine sahip bir peroksit kovalent bağına sahiptir ve aynı zamanda katı formda H₂O₂ olarak bilinir. Stokiyometrik denkleme (Eşitlik 1) göre, CaO₂, maksimum 0,47 g H₂O₂/g CaO₂ açığa çıkarır [16]. CaO₂, sulu ortamda yavaşça oksijen ve H₂O₂ serbest bırakır; H₂O₂ ise O₂ ve •OH, •HO₂ ve •O₂ gibi oksitleyici radikal türlerini üretir (Eşitlik 1-5).



CaO₂ su içerisinde neredeyse çözünmez olduğu için doğrudan kirli suya enjekte edilebilir. Ayrıca, CaO₂ mikroorganizmalara oksijen sağlayarak sulu ortamlarda biyolojik bozunmayı teşvik eder. Yapılan çalışmalar, CaO₂'nin çözünmüş oksijen konsantrasyonunu ve su kütlelerindeki oksidasyon-redüksiyon potansiyeli (ORP) seviyesini artırabileceğini göstermiştir [17]. CaO₂, serbest radikallerin kontrollü salınımı nedeniyle organik kirleticilerin oksidasyonunda H₂O₂'nin doğrudan kullanımına göre daha uygundur. Kalsiyum, biyolojik yaşam için gerekli bir metaldir ve CaO₂, diğer metal oksitlere kıyasla suda daha güvenli bir şekilde kullanılabilir [18]. CaO₂, tek başına kullanılabilir gibi Fe⁺², Fe⁺³ ve UV gibi aktifleştiricilerle birleştirilerek oksitleyici radikallerin hızlı üretimi sağlanabilir [19]. Ancak, ferroz iyonlarının kullanımı durumunda demir çamuru oluşumu ve UV aktifleştiricisinin yüksek maliyeti, CaO₂'nin aktifleştiricilerle kullanılmasının dezavantajları arasındadır. Yukarıda belirtildiği gibi, demir iyonlarının aktifleştirici olarak kullanımı, çevre dostu uygulama açısından sınırlıdır; çünkü ağır metal kirliliğine ve çamur oluşumuna yol açabilir.

Bu çalışmanın amacı, bir tekstil boyası olan Crystal Violet (CV) gideriminde, herhangi bir aktifleştirici kullanmaksızın CaO₂'nin oksidasyon potansiyelini araştırmaktır. Demir aktivatörünün kullanılmaması oksidasyon süreci sonunda bertaraf edilmesi gereken bir demir çamuru oluşumunu engellemektedir. Bu anlamda süreç çevre dostu bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların, tekstil atıklarından renk gideriminde çevre dostu yöntemlerin benimsenmesi üzerine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. YÖNTEM

2.1. CaO₂'nin Karakterizasyonu

CaO₂'nin morfolojisi Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. CaO₂'nin kristal fazlarının belirlenmesi için 10–90° arasındaki 2θ tarama aralığında X-ışını Difraksiyon (XRD) analizi yapılmıştır (PANalytical EMPYREAN XRD). CaO₂'nin parçacık boyutu dağılımı düşük açılı lazer ışığı tekniği ile belirlenmiştir (Malvern Panalytical, Mastersizer 3000). CaO₂'ye ait fonksiyonel grupların araştırılması ise Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ile gerçekleştirilmiştir (Jasco, FT/IR-6700).

2.2. CaO₂ Sentezi

CaO₂, çöktürme yöntemi ile alkali koşullarda ve fazla miktarda H₂O₂ kullanılarak sentezlenmiştir. 8 gram kalsiyum klorür (CaCl₂·2H₂O) belirli bir miktar saf suda çözülüp ve karışıma 1 ml/dk hızla 25 mL %35'lik H₂O₂ eklenmiştir. Ardından çözeltiye 60 mL (1 N) KOH eklenmiştir. Çözeltinin son hacmi saf su ile 200 mL'ye ayarlanmıştır. Karışım, sarımsı bir çözelti elde etmek amacıyla 20°C'de 2 saat boyunca karıştırılmıştır. Çözeltinin katı fazı santrifüj ile ayrılmıştır. Santrifüjden sonra katı faz, KOH kalıntılarını gidermek amacıyla birkaç kez saf su ile yıkanmış ve 80°C'de 24 saat boyunca kurutulmuştur.

2.3. Renk Giderim Çalışmaları

Renk giderim deneyleri kesikli deneyler şeklinde yürütülmüştür. 250 mL'lik Erlenmeyer şişeleri kullanılmış, her biri farklı CV konsantrasyonlarına sahip 200 mL distile suda belirli miktarlarda CaO₂ içermektedir. Şişeler, 20°C sabit sıcaklıkta 300 rpm hızında bir orbital çalkalayıcıda karıştırılmıştır. Renk giderimine pH (5-11), CaO₂ dozu (0,05-0,20) ve başlangıç CV konsantrasyonunun (100-500 mg/L) etkileri araştırılmıştır. Kontrol grupları, aynı koşullar altında CaO₂ olmaksızın yürütülmüştür.

2.4. Analitik Yöntemler

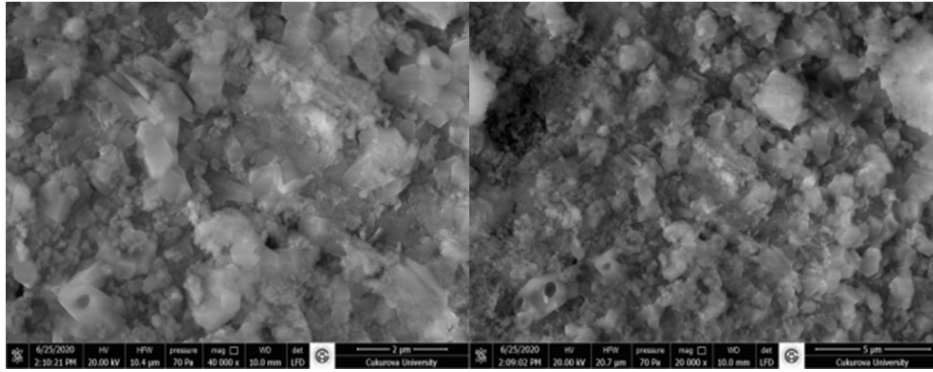
CV konsantrasyonları, 592 nm dalga boyunda hazırlanan kalibrasyon eğrisi kullanılarak hesaplanmıştır (Perkin Elmer Lambda 35 UV/VIS spektrofotometresi).

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

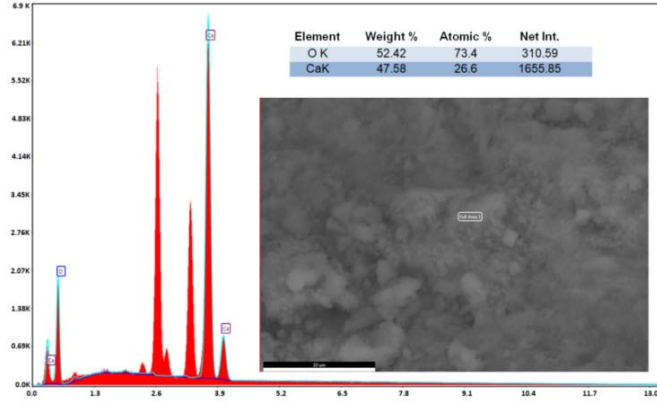
3.1. CaO₂'nin Karakterizasyonu

CaO₂'nin morfolojisi SEM ile incelenmiştir (Şekil 1). CaO₂ partiküllerinin genellikle düzensiz şekillere ve farklı küme yapılarında olduğu belirlenmiştir. CaO₂'nin elementel analizi EDX ile yapılmıştır. EDX analizi

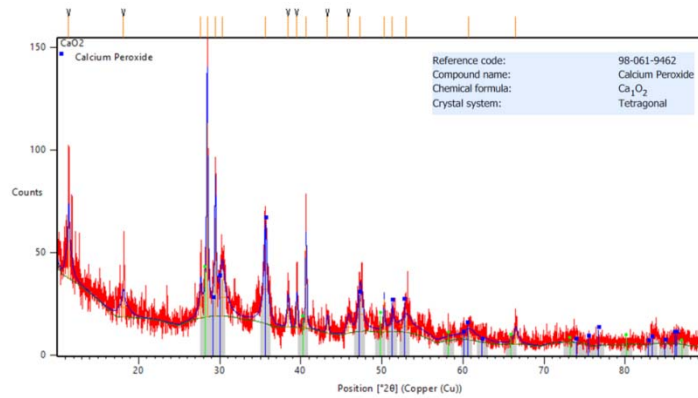
sonucunda üründe kalsiyum ve oksijene ait ana pikler elde edilmiştir (Şekil 2). Sentezlenen CaO₂'nin oksijen ve kalsiyum içeriği sırasıyla %52,42 ve %47,58 olarak belirlenmiştir. Şekil 2'deki isimlendirilmeyen iki keskin pik, analiz öncesinde örneğin iletkenliğini ayarlamak amacıyla kaplama malzemesi olarak kullanılan Au elementine aittir. CaO₂ partiküllerinin kristal yapısı XRD analizi ile incelenmiştir. Keskin pikler ($2\theta=29.2, 30.0, 35.6, 47.2, 51.2, 52.7, 60.6, 76.6^\circ$) tetragonal kristal yapıya ait olup, CaO₂'nin XRD sonuçları ile (Referans kodu: 98-061-9462) güçlü bir uyum göstermektedir (Şekil 3). Tetragonal kristal yapının daha önceki çalışmalar tarafından da CaO₂ için raporlandığı belirtilmiştir [20]. XRD analiz sonuçları, bu çalışmada uygulanan üretim prosedürü ile CaO₂'nin başarıyla elde edildiğini ortaya koymuştur. CaO₂'nin fonksiyonel gruplarının incelenmesi FTIR ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). CaO₂'nin FTIR spektrumunda (Şekil 4), 3000-3600 cm⁻¹ aralığında ortaya çıkan geniş tepe, üretim sırasında CaO₂ üzerine su moleküllerinin adsorpsiyonu sonucu oluşan -OH bağının gerilmesine atfedilmiştir. 1200 ile 1600 cm⁻¹ arasında görülen geniş sinyal ise O—Ca—O'nun bükülme titreşimine karşılık gelmektedir. 873 ve 680 cm⁻¹'de belirlenen keskin sinyaller, peroksidin O—O gerilme titreşimini ifade etmektedir. 556 cm⁻¹'de görülen tepe ise kullanılmamış CaO₂'nin O—Ca—O gerilme titreşimine atfedilmiştir [21].



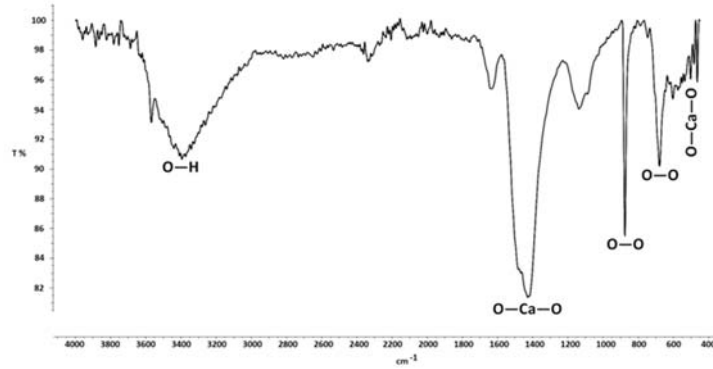
Şekil 1. CaO₂ için SEM Analizi



Şekil 2. CaO₂ Elementel Analiz



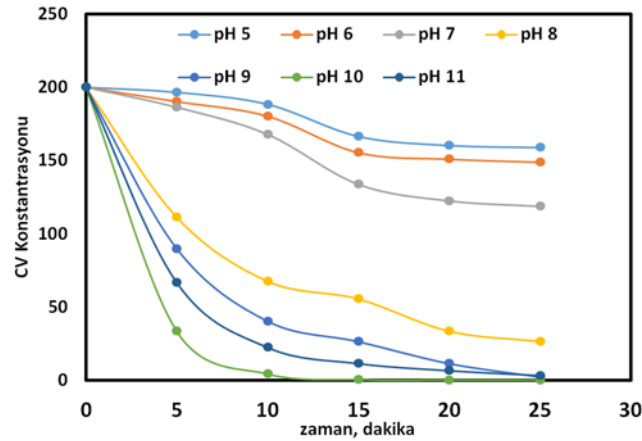
Şekil 3. CaO₂ XRD Analizi

Şekil 4. CaO₂ FTIR Analizi

3.2. Renk Giderim Çalışmaları

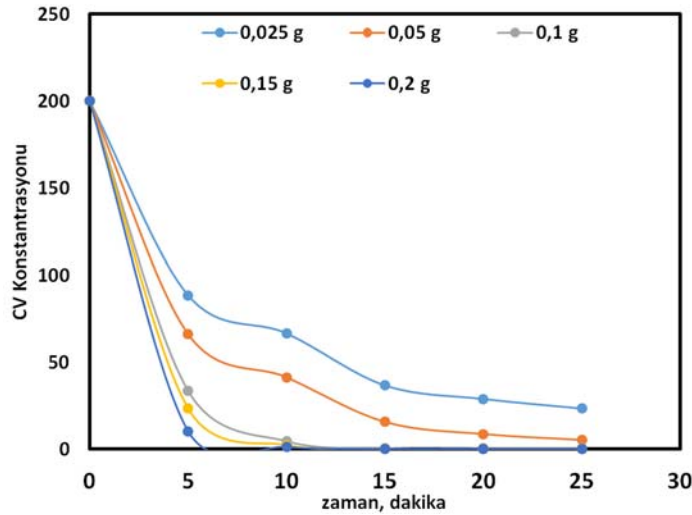
3.2.1. Renk Giderimine pH'nin Etkisi

CaO₂ ile CV oksidasyonu üzerine farklı pH değerlerinin (5-11) etkisi 0,25 g CaO₂ sabit dozu, 200 mg/L CV konsantrasyonu ile 20 °C'de araştırılmıştır. CV oksidasyonunda denge zamanının, 25 dakika içinde sağlandığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, pH seviyesinin artmasıyla birlikte CV'nin giderim verimliliğinde bir artış olduğunu ve bu artışın pH 10'da zirve yaptığını göstermiştir (Şekil 5). CaO₂, bir aktivatör olmadan bağımsız olarak kullanıldığında, asidik çevresel koşulların boya oksidasyonunu olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Giderim verimlilikleri pH 5 için %25,55 ve pH 10 için %99,8 olarak ölçülmüştür. pH 10'un üzerinde, boya oksidasyon verimliliğinde belirli ölçüde düşüş gözlemlenmiştir. Asidik pH değerlerinde azalan giderim verimlilikleri, CaO₂'nin çözünürlüğünün artmasına bağlanabilir. Öte yandan, güçlü alkali koşullar altında giderim verimliliklerindeki azalmanın, CaO₂'nin oksidant radikaller yerine oksijen üretme eğilimindeki artışla ilişkilendirildiği açıklanmıştır [22]. Sonuç olarak, CaO₂ ile CV'nin oksidasyonu için optimum pH değeri 10 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4. CV'nin CaO₂ ile Oksidasyonu Üzerine pH Etkisi

3.2.2. CV Oksidasyonu Üzerine CaO₂ Dozunun Etkisi

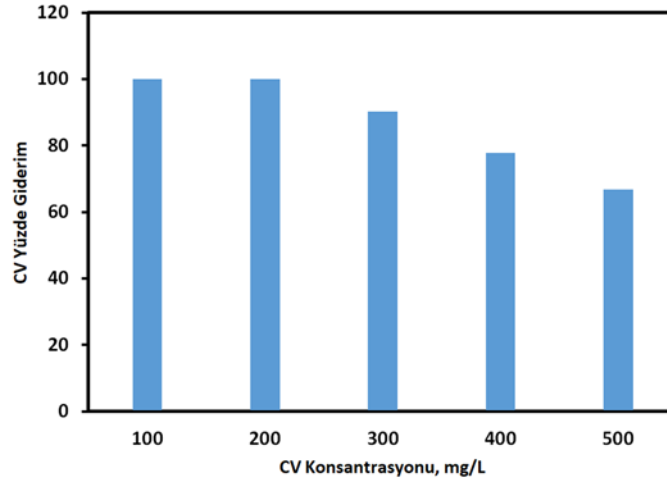
CaO₂ dozajının (0,025-0,20g) 200 mg/L CV ile dekolorizasyon üzerindeki etkisi sabit pH 10 değerinde ve oda sıcaklığında incelenmiştir. Şekil 6'dan görüldüğü üzere, CV'nin giderimi, CaO₂ miktarının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. 0,025 g ve 0,05 g CaO₂ için CV giderim verimliliği 25 dakika sonunda sırasıyla, %87,35 ve %97,38 olarak bulunurken, bu dozların üzerindeki her doz için giderim verimleri %99,5'un üzerinde tespit edilmiştir. Deneyle sonuçları, CaO₂ dozajının artışıyla giderim verimliliğinin büyük ölçüde arttığını göstermektedir. Yüksek CaO₂ miktarlarında yüksek boya giderim verimlilikleri, artan CaO₂ dozajı ile birlikte artan oksidant radikalleri ile açıklanabilir. CaO₂ düşük dozlarda kullanılmasına rağmen kısa sürelerde yüksek renk giderim verimleri sağlamıştır. Bu, gerçek ölçekli tesislerde önemli bir ekonomik avantaj sağlayabileceğini göstermektedir.



Şekil 6. CV'nin Oksidasyonunda CaO₂ Dozunun Etkisi

3.2.3. CV Konsantrasyonunun Oksidasyon Üzerindeki Etkisi

CV konsantrasyonunun (100-500 mg/L) etkisi 0,5 g CaO₂ dozajı ile incelenmiştir (Şekil 7). CV giderim verimliliğinin, başlangıç CV konsantrasyonunun azalmasıyla arttığı belirlenmiştir. Başlangıç CV konsantrasyonu 100 mg/L'den 500 mg/L'ye yükseldiğinde, CV giderim veriminin 25 dakika içinde %99,9'dan %66,8'e düşmüştür. Yüksek boya konsantrasyonlarında daha düşük renk oksidasyon verimliliği, oksidant ile boya oranındaki azalma ile açıklanabilir.



Şekil 7. CaO₂ ile Renk Oksidasyonunda CV Konsantrasyonunun Etkisi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada çevre dostu bir oksidant olan CaO₂ ile CV boyar maddesinin oksidasyon yoluyla giderimi araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar, oksidasyon üzerine pH parametresinin önemli derecede etki ettiğini göstermiştir. Oksidasyon sürecinde optimum pH değerinin 10 olduğu tespit edilmiştir. Oksidasyon çalışmaları, düşük CaO₂ dozları ile kısa reaksiyon sürelerinden yüksek oksidasyon verimleri elde edilebildiğini göstermiştir. 200 mg/L CV'nin %99,9 ile giderimi için 0,1 gram CaO₂ ile 25 dakikalık bir reaksiyon süresinin yeterli olduğu ortaya konmuştur. CaO₂'nin Fenton süreçlerinden farklı olarak demir aktivatörü olmaksızın oksidasyon süreçlerinde kullanılması, önemli bir sorun olan çamur oluşumunu da engellemektedir. Böylece, hem artıma maliyetleri açısından önemli avantajlar sağlanmakta hem de demir içerikli çamur oluşumuna bağlı potansiyel metal kirliliği risklerinin önüne geçilmektedir. CaO₂'nin tekstil atıksularında renk gideriminde çevre dostu bir oksidant olma potansiyelini taşıdığı düşünülmektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Sağlam, S., Türk, F.N., Arslanoğlu, H., 2023. Use and applications of metal-organic frameworks (MOF) in dye adsorption. *J. Environ. Chem. Eng.*, 110568.
2. Hadadi, A., Imessaoudene, A., Bollinger, J.C., Bouzaza, A., Amrane, A., Tahraoui, H., Mouni, L., 2023. Aleppo pine seeds (*Pinus halepensis* Mill.) as a promising novel green coagulant for the removal of Congo red dye: Optimization via machine learning algorithm. *J. Environ. Manage.*, 331, 117286.
3. Raj, S., Singh, H., Bhattacharya, J., 2023. Treatment of textile industry wastewater based on coagulation-flocculation aided sedimentation followed by adsorption: Process studies in an industrial ecology concept. *Sci. Total. Environ.*, 857, 159464.
4. Rosli, N.A., Ahmad, M.A., Noh, T.U., 2023. Unleashing the potential of pineapple peel-based activated carbon: Response surface methodology optimization and regeneration for methylene blue and methyl red dyes adsorption. *Inorg. Chem. Commun.*, 155, 111041.
5. He, Y., Huang, Y., Wang, Q., Pan, X., 2023. Controlling waste by waste: a modified landfill leachate coagulation sludge activated peroxydisulfate process achieves complete BPA degradation. *Environ. Technol.*, 44(7), 1027-1034.
6. Nachiyar, C.V., Rakshi, A.D., Sandhya, S., Jebasta, N.B.D., Nellore, J., 2023. Developments in treatment technologies of dye-containing effluent: A review. *CSCEE*, 100339.
7. Tian, F., Wang, Y., Guo, G., Ding, K., Yang, F., Wang, C., Wang, H., Yan, M., 2023. Meta-genome analysis of a newly enriched azo dyes detoxification halo-thermophilic bacterial consortium. *Environ. Res.*, 237, 116828.
8. Lawal, I.M., Soja, U.B., Hussaini, A., Saleh, D., Aliyu, M., Noor, A., Birniwa, A.H., Jagaba, A.H., 2023. Sequential batch reactors for aerobic and anaerobic dye removal: a mini-review. *CSCEE*, 100547.
9. Albahnasawi, A., Yüksel, E., Gürbulak, E., Duyum, F., 2020. Fate of aromatic amines through decolorization of real textile wastewater under anoxic-aerobic membrane bioreactor. *J. Environ. Chem. Eng.*, 8(5), 104226.
10. Iqbal, A., Yusaf, A., Usman, M., Hussain, B.T., Mansha, A., 2023. Insight into the degradation of different classes of dyes by advanced oxidation processes; a detailed review. *Int. J. Environ. An. Ch.*, 857(2), 159172.
11. Eduardo, M.C.C., María, F.A.F., Carmen, F.G., 2020. Advanced oxidation processes for the removal of antibiotics from water. *An Overview Water*, 12, 102.
12. Wang, X., Jing, J., Zhou, M., Dewil, R., 2023. Recent advances in H₂O₂-based advanced oxidation processes for removal of antibiotics from wastewater. *Chinese Chem. Lett.*, 34(3), 107621.
13. Shuguang, L., Xiang, Z., Yunfei, X., 2017. Application of calcium peroxide in water and soil treatment: A review. *J. Haz. Mater.*, 337, 163-177.
14. Monica, B., Ioannis, A.K., 2017. Sulfate radical technologies as tertiary treatment for the removal of emerging contaminants from wastewater. *Sustainability*, 9, 1604.
15. Xulei, Z., Yueyue, L., Junhe, L., Lei, Z., Jean-Marc, C., Quansuo, Z., Yuefei, J., 2021. UV/H₂O₂ oxidation of chloronitrobenzenes in waters revisited: Hydroxyl radical induced self-nitration. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry Available*, 113162.
16. Hou, Z., Wang, W., Dong, N., Chen, P., Ge, L., Tan, F., Wang, X., Qia, X., Wong, P.K., 2023. A dual-oxidant advanced oxidation process system containing CaO₂ and peroxydisulfate for organic pollutant degradation: High adaptability and synergistic effect. *Sep. Purif. Technol.*, 308, 122909.
17. Wang, Y., Wang, W., Yan, F., Ding, Z., Feng, L., Zhao, J., 2019. Effects and mechanisms of calcium peroxide on purification of severely eutrophic water. *The Science of the Total Environment*, 650, 2, 2796.
18. Qiuxiang, X., Qi-Su, H., We, W., Jin, S., Xiaoh, D., Bing-Ji, N., 2020. Improving the treatment of waste activated sludge using calcium peroxide. *Wat. Res.*, 187, 116440.
19. Yong, S., Muhammad D., Meesam A., Ali, S., Ming, L., Yanchen, L., Zhaofu, S., Qian, Z. Xueke, Shuguang, L., 2020. Trichloroethene degradation by nanoscale CaO₂ activated with Fe(II)/FeS: The role of FeS and the synergistic activation mechanism of Fe(II)/FeS. *Chem. Eng. J.*, 394(15), 124830.
20. Meesam, A., Usman, F., Shuguang, L., Yong, S., Ming, L., Ayyaz, A., Ali, S., Zain, A., 2020. Synthesis of controlled release calcium peroxide nanoparticles (CR-nCPs): Characterizations, H₂O₂ liberate performances and pollutant degradation efficiency. *Sep. Pur. Technol.*, 241(15), 116729.

21. Sajedeh, K., Akbar, K., Shahin, B., 2020. Fabrication of amine-decorated nonspherical microparticles with calcium peroxide cargo for controlled release of oxygen. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 108, 136-147.
22. Erkurt, F.E., Mert, A., 2023. Eco-friendly oxidation of a reactive textile dye by CaO₂: Effects of specific independent parameters. *Environ. Technol.*, 44(21), 3294-3315.

Kenevir İçeren Denim Giysilerin Terbiyesinde Çevre Dostu Bir Yöntem: Ozon ile Yıkama

İrem PALABIYIK^{1,a}, Ayşegül KÖRLÜ^{2,b}, Gonca ÖZÇELİK^{3,c}

¹FG Tekstil Konfeksiyon San. Tic. A.Ş., Ar-Ge Merkezi, İzmir

²Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, İzmir

³Ege Üniversitesi, Emel Akın Meslek Yüksekokulu, İzmir

^aORCID: 0000-0003-4707-2362; ^bORCID: 0000-0002-8113-5681; ^cORCID: 0000-0001-6775-8295

Makale Bilgileri

Geliş : 03.05.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605888

Sorumlu Yazar

İrem PALABIYIK

irempalabyk@gmail.com

Anahtar Kelimeler

Kenevir lifi

Denim kumaş

Ozon ağartma

Denim yıkama

Atf şekli: PALABIYIK, İ., KÖRLÜ, A., ÖZÇELİK, G., (2024). Kenevir İçeren Denim Giysilerin Terbiyesinde Çevre Dostu Bir Yöntem: Ozon ile Yıkama. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 881-895.

ÖZ

Bu çalışmada kenevir lifinin denim kumaşlarda kullanımı ve ozon ağartma yöntemiyle yıkanması incelenmiştir. Ön yıkama ve ard yıkama işlemi görmüş kumaşlar AF oranı %60 olacak şekilde sert ve yumuşak su ile ıslatılıp, %25, %50, %75 ozon kapasitesinde 5, 10, 15 dakika süreyle ozonlanmıştır. Ardından yapısal özelliklerin tespiti için gramaj ve kalınlık, geçirgenlik özellikleri için hava geçirgenliği, mekanik özellikleri için yırtılma mukavemeti, estetik ve duyuşal özellikleri için dairesel eğilme dayanımı ölçeri ile sertlik tayini, renk özellikleri ve sarılık indeksi tespiti için renk ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ham denim kumaşa kıyasla yıkama işlemlerinden sonra gramaj, hava geçirgenliği ve dairesel eğilme dayanımı değerleri azalma göstermiştir. Kumaş yapısı ve pamuk oranının yüksek olması nedeniyle rinse yıkamanın 5 dakikalık işlem süresinde bile liflerin şişerek kumaş yapısını sıklaştırması nedeniyle gramaj testinde rinse yıkama uygulanmış kumaşlarda ağırlık kaybı en azdır. Ham denim kumaşa kıyasla yıkama işlemlerinden sonra denim kumaşların kalınlık, yırtılma mukavemeti, renk farkı ve sarılık değerleri artış göstermiştir.

An Environmentally Friendly Method of Finishing Denim Clothes Containing Hemp: Ozone Washing

Article Info

Received : 03.05.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605888

Corresponding Author

İrem PALABIYIK

irempalabyk@gmail.com

Keywords

Hemp fiber

Denim fabric

Ozone bleaching

Denim washing

How to cite: PALABIYIK, İ., KÖRLÜ, A., ÖZÇELİK, G., (2024). Kenevir İçeren Denim Giysilerin Terbiyesinde Çevre Dostu Bir Yöntem: Ozon ile Yıkama. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 881-895.

ABSTRACT

This study examined the use of hemp fiber in denim and examined the effects of ozone bleaching during the denim washing process. Pre-washed and post-washed denim soaked with hard water and soft water for 60% pick-up value was subjected to ozone bleaching for 5, 10, and 15 minutes at an ozone capacity of 25%, 50%, and 75%. After that, weight and thickness, air permeability, tear, bending rigidity, color values, and yellowness index were measured on the fabric samples. Weight per unit area, air permeability, and circular bending strength values decreased after washing compared to raw denim fabric. Due to the fabric structure and high cotton content, the weight loss is the least in the rinsed fabrics in the weight loss test due to the swelling of the fibers and densification of the fabric structure, even in the 5-minute process time of rinse washing. Compared to raw and treated fabrics, the thickness, tear strength, colour difference, and yellowness values of denim fabrics were increased after the washing process.

1. GİRİŞ

Denim kumaş esas olarak %100 pamuk lifi içeren, çözgü ipliği indigo boyarmaddesiyle boyalı, atkı ipliği ise boyasız, genellikle dimi örgü yapıları kullanılarak dokunan bir kumaş türünü temsil etmektedir. Başlangıçta dayanıklılığı nedeniyle iş kıyafeti olarak kullanılan denim kumaşlar günümüzde konfeksiyon alanında katma değeri yüksek her kesimden insanın yüksek moda ürünü olarak algıladığı tekstil ve konfeksiyon ürünleri haline gelmiştir. Günümüzde denim kumaşlara, farklı lif, konstrüksiyon ve boyarmaddeler kullanılarak, farklı yıkama reçetesi ve mekanik işlemlerle çeşitli etkiler kazandırılmaktadır [1-4].

Denim yıkama işlemleri kumaş üzerinde bulunan indigo boyarmaddesini uzaklaştırarak denim ürünlerede değişik görünüm kazandırmak ve rengini açmak amacıyla uygulanmaktadır. Denim yıkama, kuru ve yaş işlemler olarak da adlandırılan mekaniksel ve kimyasal işlemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Kuru işlemler denim ürünlere istenilen kullanılmış görüntüyü vermek için mekanik olarak uygulanırken; yaş işlemler denim ürün üzerine aktarılan çeşitli kimyasal maddeler ile gerçekleştirilmektedir. Denim ürünlerde farklı özellikler sağlama ve moda uygun görünümünün elde edilebilmesi için kullanılan kuru ve yaş işlem tekniklerinin birçok çeşidi bulunmaktadır. Yaş işlemlerden bazıları; ön yıkama (haşıl sökme), enzim yıkama, taş yıkama, enzim-taş yıkama, rinse yıkama, perlit yıkama, ağartma, yumuşatma, reçine sprey, permanganat sprey, pigment sprey ve tint olarak sıralanabilmektedir. Kuru işlemler ise; bıyık, kılçık, yıpratma, zımpara ve lazerle işlemdir [5-7].

Tekstil sektörünün faaliyet alanlarından biri olan denim endüstrisinin çevreyi en fazla kirleten sektörler arasında yer aldığı bilinmektedir. Tekstil ve moda sektöründeki hızlı tüketim nedeniyle çevresel sorunların artmasının bir sonucu olarak denim üretiminde çevre dostu hammadde ve üretim yöntemlerine yönelmek büyük önem taşımaktadır [8]. Denim üretiminde, daha çevre dostu hammaddeler olarak kenevir [9], kapok, ısırgan otu [10], rejenere selüloz [11], keten, jüt, nane [8] lifleri kullanılabilir. Denim yıkamada ise ozon ile ağartma, CO₂ gaz lazer teknolojisi, ultrason ile ozon ve enzimin kombine kullanımı, biyolojik yıkama, elektrokimyasal, plazma ve ileri oksidasyon süreçleri daha sürdürülebilir yöntemler olarak yaygınlaşmaktadır [7].

Kenevir lifleri biyolojik olarak parçalanabilirliği, düşük karbon ve su ayak izi, hasat bolluğu, dönüm başına yüksek lif üretimi, yetişmesi sırasında CO₂'yi bünyesine alarak havayı temizlemesi, hızlı büyüme oranı, yüksek mukavemeti, boncuklanma dayanımı, antibakteriyellik ve yüksek hava geçirgenliği nedeniyle denim ürünlerde çevre dostu bir hammadde olarak kullanıma uygundur [12,13]. Yağış alan bölgelerde kendiliğinden yetişen kenevir bitkisinin büyümesinde yağmur suyu yeterli olup ilave sulama, gübre ve tarım ilacına ihtiyaç duyulmamaktadır. Ürün rotasyonuna uygun olan kenevir bitkisi bir sonraki ürün için zengin bir toprak yapısı bırakmaktadır. Pamuk liflerine kıyasla daha dayanıklı olan kenevirin aynı miktarda pamuk bitkisi yetiştirilmesiyle kıyaslandığında daha az toprak ve daha az su gerektirdiği bilinmektedir [13,14].

Ozon ile ağartma işlemi su ve enerji tasarrufu sağlamanın yanı sıra kimyasal madde kullanımı olmaması, proseste atık çıkartmaması ve suyun tekrar kullanımına olanak sunması nedeniyle denim yıkama süreçlerinde çevre dostu üretim yöntemi olarak kullanıma uygundur. Denim sektörü, tekstil ve konfeksiyon endüstrisinde ozon gazını ilk kullanan sektördür. Ozon güçlü bir oksitleyici olup indigo boyarmaddesinin olefinik gruplarını parçalamaktadır. Ozon oksitleyici özelliği sayesinde ponza taşı ve potasyum permanganat ile sodyum hipoklorit gibi zararlı ağartıcı kimyasal kullanımı olmaksızın denim giysilerin ağartılmasında kullanılmaktadır [15].

Kenevir liflerinin denim kumaşlarda kullanımı dışında farklı tekstil malzemelerinde kullanımı bulunmakta olup kenevir içeren kumaşlara ozon ağartma dışında farklı yaş işlemler de uygulanabilmektedir. Kenevir lifleri; termal yalıtım malzemesi olarak [16] ve kompozit yapımında kullanılan liflerin mekanik, termal, balistik özelliklerinin geliştirilmesi [17-19] amacıyla kullanılmaktadır. Kenevir içeren dokuma kumaşlar; biyobazlı kumaş takviyeli nanokompozit ve kompozitler için kullanılmaktadır [20-22]. Kenevir lifi içeren örme kumaşlar ise; konfor özellikleri geliştirilmiş yazlık ve spor giysilerinde [23], termal özelliklerin geliştirilmesi amacıyla [24], nano malzeme katkılı konfor özellikleri gelişmiş medikal tekstil ürünlerinde [25] kullanılabilir. Kenevir içeren kumaşlar; perasetik asit ve hidrojen peroksitle ile çektirme ve

emdirme yöntemine göre ağartılabilmektedir [26], sodyum hidroksit ile yıkama ve hidrojen peroksit ile ağartmayla kombine ön terbiye işlemleri uygulanabilmektedir [27]. Kenevir liflerine hidrojen peroksitle ön ağartma işlemi uygulanabilmektedir [28].

Yapılan literatür araştırmasında [29-33] kenevir içeren denim ürünlerin yumuşak su ve sert su ile işleminin ozon ağartma ve denim yıkamaya etkisine rastlanamamıştır. Kenevir içeren kumaşların ozon ile ağartma işlemi sonucunda fiziksel özelliklerinin incelenmesi konusunda daha fazla bilimsel çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmalar incelendiğinde genellikle kenevir içeren iplik ve kumaş üretiminin literatürde yer aldığı, ozonun ise ağartma yerine antibakteriyellik özelliğinin geliştirilmesi amacıyla uygulandığı görülmüştür. Bu nedenle çevre dostu hammadde ve üretim yöntemlerine katkı sağlaması amaçlanarak kenevir ve pamuk karışımı denim kumaşlar ozon ağartma yöntemi kullanılarak denim yıkama işlemine tabi tutulmuştur. Su sertliği, ozon kapasitesi ve ozon süresinin kenevir içeren denim kumaşların; gramaj, kalınlık, hava geçirgenliği, yırtılma mukavemeti, sertlik ve renk özelliklerine etkisi istatistiksel yöntemlerle açıklanmaya çalışılmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Materyal

Çalışmada kullanılan denim kumaşların kesim, dikim ve yıkama işlemleri FG Tekstil Konfeksiyon San. Tic. A.Ş.'de gerçekleştirilmiştir. Denim yıkama işlemlerinde dispergatör, kırık önleyici, yumuşatıcı ve deterjan kullanılmıştır. Çizelge 1'de denim kumaşın fiziksel özellikleri verilmiştir. Çizelge 2'de denim kumaşlara uygulanan yıkama işlemlerinde kullanılan kimyasal maddeler ve yapıları verilmiştir.

Çizelge 1. Denim kumaşın fiziksel özellikleri

Kumaşın lif içeriği	%78 pamuk-%22 kenevir	
Doku tipi	2/1 dimi	
Gramaj	353,05 g/m ²	
Boyarmadde türü	İndigo	
İplik numarası	Çözümlü ipliği	Ne 7/1, %100 pamuk
	Atkı ipliği	Ne 15/1, %100 kenevir
Sıklık	Çözümlü sıklığı (tel/cm)	39
	Atkı sıklığı (tel/cm)	38

Çizelge 2. Kullanılan kimyasal maddeler

Kimyasal maddenin adı	Kimyasal maddenin yapısı
Dispergatör	Katyonik poliester polimerizasyon ürünü
Kırık önleyici	Non iyonik polimerik amidler
Yumuşatıcı	Non iyonik/ hafif katyonik, hidrofil silikon emülsiyonu
Deterjan	Yüzey aktif, enzim ve optik beyazlatıcılar karışımı

2.2. Metot

Çalışma kapsamında %78 pamuk-%22 kenevir içeren denim kumaş, sertliği 36 °F'de olan işletme suyu ile işletme şartlarında WEX (Wiser Washing Experience) tamburlu yıkama makinesinde pH 6'da ön yıkama işleminden geçirilmiştir. Ardından ön yıkama yapılmış denim kumaşlar Tolkar Kurutma makinesinde 70°C'de 30 dakika kurutulup, pH 6'da AF %60 olacak şekilde 55 °F'de sert ve 0.1 °F'de yumuşak su ile ıslatılarak WOX (Wiser Ozone X-Perience) ozon makinesinde 25, 50, 75 g/Nm³ ¹ kapasitede 5,10,15 dakikalık sürelerde ozon gazı ile ağartılmıştır. Ozonla ağartılmış kumaşlar, sararmayı önlemek için deterjan ve yumuşatıcı ile işlem görüp, 70 °C'de 30 dakika kurutulmuştur. Ön yıkama, ozon ağartma ve ozonla sararmayı önlemek amacıyla yapılan yıkama işlemine ait reçete ve işlem koşulları Çizelge 3'te verilmiştir.

¹ Nominal şartlar altında 1 atm bar 273 K ve 0 °C'de 1 m³'te bulunan ozon gramı

Çizelge 3. Reçete ve işlem koşulları

Ön yıkama	Ozon ağartma			Ozonla sararmayı önleme için ard yıkama	
	Kumaş içeriği	Su tipi	Ozon kapasitesi (g/Nm ³)		Ozon süresi (dk)
1 g/l dispergator 1 g/l kırık önleyici Çektirme yöntemi, Flotte oranı: 1/5, pH 6'da, 45°C'de 5 dakika, Durulama, 25 °C'de 5 dk, 2 kez	%78 Pamuk-%22 Kenevir	Sert su	25	5	1 g/l deterjan 3 g/l yumuşatıcı Çektirme yöntemi, Flotte oranı: 1/5, pH 6'da, 45°C'de 5 dakika, Durulama, 25 °C'de 5 dakika 2 kez Yumuşatma 25 °C'de 5 dakika
			10	10	
			15	15	
			5	5	
			10	10	
			15	15	
	Yumuşak su	25	5		
		10	10		
		15	15		
		5	5		
		10	10		
		15	15		
		75	10		
			15		

2.3. Testler

Farklı ozonla ağartma koşullarında yıkanmış %22 kenevir lifi içeren denim kumaşlar standart atmosfer koşullarında (20±2 °C sıcaklık, %65±4 bağıl nem) kondüsyonlandıktan sonra gramaj, kalınlık, hava geçirgenliği, yırtılma mukavemeti, sertlik, sarılık indeksi ve renk değerleri ölçülmüştür. Kumaşların gramajları James Heal marka gramaj şablonu ve Sartorius marka terazi kullanılarak TS 251 standardına göre, kalınlık değerleri SDL marka kalınlık ölçer ile 200 g yük altında 20 cm² ölçüm alanında TS 7128 EN ISO 5084 standardına göre ölçülmüştür. Kumaşların hava geçirgenliği değerleri 5 cm²'lik ölçüm alanında 100 Pa basınç farklılığında Textest marka FX3300 hava geçirgenliği cihazı ile TS 391 EN ISO 9237 standardına göre belirlenmiştir. Kumaşların mekanik özelliklerinden yırtılma mukavemeti testi James Heal Elmatear Digital Tear Tester cihazı ile TS EN ISO 13937-1 standardı balistik sarkaç metoduna göre ölçülmüştür. Kumaşların tutum özelliğini objektif olarak belirlemek amacıyla eğilme rijitliği ölçümleri SDL ATLAS firmasına ait dairesel eğilme dayanımı ölçeri ile ASTM 1388 standardına göre ölçüm yapılmıştır. CIELab renk değerleri ve sarılık indeksi (YI E 313) Hunterlab Ultra Scan PRO marka spektrofotometre renk cihazında D65 ışık kaynağı altında 10° bakış açısıyla belirlenmiştir.

2.4. İstatiksel Değerlendirme

Ölçüm sonuçlarının istatistik değerlendirilmesi amacıyla verilerin normal dağılıma uygun olup olmadığı Kolmogorov-Smirnov normallik testine göre belirlenmiştir. Bu testte kullanılan hipotezler H₀: veriler normal dağılışa uygundur, H_a: veriler normal dağılışa uygun değildir şeklindedir. Önem derecesi p<0.05 olması durumunda H₀ hipotezi reddedilmekte, p>0.05 olması durumunda H₀ hipotezi kabul edilmektedir [34]. Gramaj, kalınlık, hava geçirgenliği, yırtılma mukavemeti, dairesel eğilme dayanımı, renk farklılığı ve sarılık indeksi test sonuçlarının normallik testi sonuçlarına göre verilerin normal dağılışa uygun olmadığı tespit edilmiştir. Verilerin normal dağılışa uygun olmaması nedeniyle non-parametrik analiz yöntemi olan Kruskal Wallis tek yönlü varyans analizi SPSS 25.0 istatistik paket programı kullanılarak analiz edilip yorumlanmıştır. Kruskal-Wallis testi ile ortalamalar arasındaki farkın birbirine eşit olup olmadığı hipotezi test edilmektedir (H₀: $\mu_1=\mu_2=\mu_3$, H_a: En az bir ortalama farklı). Kruskal Wallis tek yönlü varyans analizi "İkiden fazla bağımsız örneğin aynı ana kütlelerden çekilmiş olduğunu" iddia eden sıfır hipotezinin testinde kullanılmaktadır. Alternatif hipotez ise "En az bir ana kitlenin medyanı diğer ana kütlelerinkinden farklıdır" biçiminde olur. p<0.05 olması durumunda incelenen bağımsız gruplar arasında en az bir ana kitlenin medyanının diğer kitlelere göre %95 güvenle önemli olduğu sonucuna ulaşılmaktadır [34]. İki düzeyli olan parametrelerin incelenmesi amacıyla non-parametrik testlerden Mann-Whitney U testi kullanılmıştır.

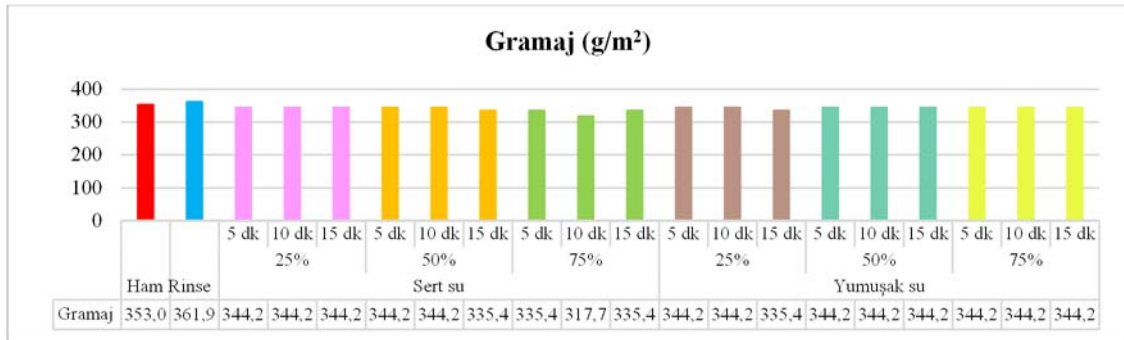
Çalışmada ozon kapasitesi ve ozon süresinin 3 alt düzeyi olması nedeniyle işlem etkileri Kruskal Wallis testiyle, su sertliğinin 2 düzeyi olması nedeniyle Mann-Whitney U testiyle istatistiksel analizler yapılmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışmada kenevir içeren denim kumaşların yıkanmasında incelenen ozon kapasitesi, ozon süresi ve su sertliği parametrelerinin her birinin farklı bir etkisinin olduğu düşünülerek işlem koşullarının her bir test sonucuna olan etkisi ayrı ayrı incelenmiştir.

3.1. Gramaj Testi Sonuçları

Ham, ön yıkama, ozon ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemi uygulanmış %78 pamuk-%22 kenevir içeren denim kumaşa ait gramaj testi sonuçları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Gramaj testi sonuçları

Ham kumaşın gramaj değeri 353,0 g/m²'dir. Rinse yıkama sonucu denim kumaş 361,9 g/m² değer ile en yüksek gramaja sahiptir. Kumaş yapısı ve pamuk oranının yüksek olması nedeniyle 5 dakikalık işlem süresinde bile liflerin şişerek kumaş yapısını sıkılaştırdığı düşünülmektedir. Uygulanan ozon ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemlerinden sonra sert su ile ıslatılmış %75 ozon kapasitesinde 10 dakika işlem görmüş olan denimler en düşük 317,7 g/m²'lik gramaj değerine sahiptir. Ozon kapasitesinin artmasının lif kaybına sebep olarak gramaj sonuçlarını düşürdüğü tahmin edilmektedir.

Ozon kapasitesi, ozon süresi ve su sertliğinin Kruskal-Wallis çoklu karşılaştırma ve Mann-Whitney-U ikili kıyaslama testlerine göre gramaj testi sonuçlarına istatistiksel olarak önemli bir etki yaratıp yaratmadığı değerlendirilmiştir. Çizelge 4'te ozon kapasitesi ve süresinin %78 pamuk-%22 kenevir içeren denim kumaşta gramaj test sonucu üzerine etkisinin incelendiği Kruskal-Wallis test sonuçları verilmektedir. İncelenen parametrelerin denim kumaşların gramaj değerleri üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Çizelge 4. Ozon kapasitesi ve ozon süresine göre gramaj testi sonuçlarına ait Kruskal-Wallis testi tablosu

Ozon kapasitesi	Numune sayısı	Sıra ortalaması	Kruskal Wallis-H	Önemlilik durumu
25	18	30.25		
50	18	28.31	1.520	0.468
75	18	23.94		
Ozon süresi	Numune sayısı	Sıra ortalaması	Kruskal Wallis-H	Önemlilik durumu
5	18	29.00		
10	18	29.42	1.283	0.526
15	18	24.08		

* $\alpha=0.05$ 'e göre istatistiksel olarak önemlidir.

Su sertliğinin etkisini incelenmesinde sert su ve yumuşak su kullanımının etkisinin kıyaslanması amacıyla uygulanan Mann-Whitney U testi sonucu Çizelge 5'te verilmektedir. Su sertliğinin %78 pamuk-%22 kenevir içeren denim kumaşta gramaj test sonucu üzerine etkisinin istatistiksel olarak önemli olmadığı belirlenmiştir.

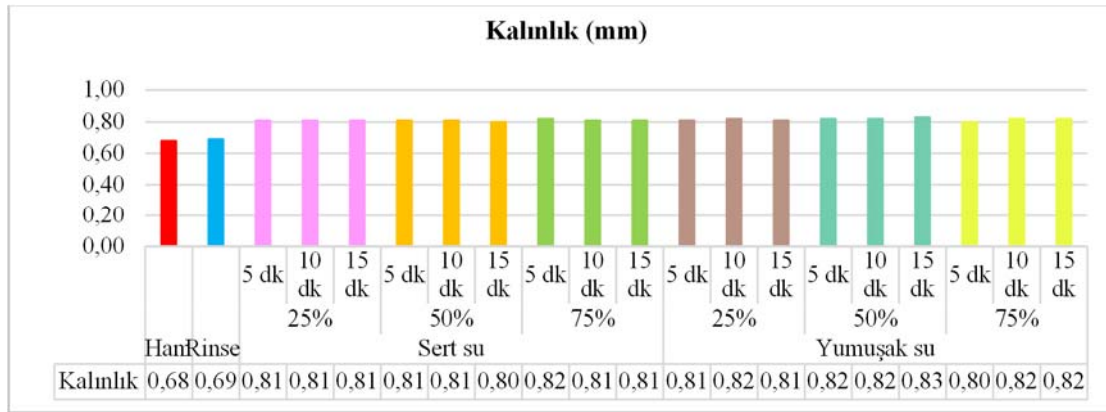
Çizelge 5. Su sertliğine göre gramaj testi sonuçlarına ait Mann-Whitney U testi tablosu

Su sertliği	Numune sayısı	Sıra ortalaması	Sıraların toplamı	Mann-Whitney U	Önemlilik durumu
Sert su	27	26.67	720.00	342.000	0.697
Yumuşak su	27	28.33	765.00		

* $\alpha=0.05$ 'e göre istatistiksel olarak önemlidir.

3.2. Kalınlık Testi Sonuçları

Ham, ön yıkama, ozon ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemi uygulanmış denim kumaşa ait kalınlık testi sonuçları Şekil 2'de verilmiştir. %78 pamuk-%22 kenevir içeren kumaşın ham değeri 0,68 mm olup sıklık değerinin düşük olması nedeniyle kalınlığın düşük olduğu tahmin edilmektedir. Rinse yıkama sonrası kalınlık değeri 0,69 mm olup işlem sırasında liflerin şişerek kumaş yapısını sıkılaştırdığı ve kalınlığı arttırdığı düşünülmektedir. Uygulanan ozon ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemlerinden sonra yumuşak su ile ıslatılmış %50 ozon kapasitesinde 15 dakika işlem görmüş olan denimler en yüksek 0,83 mm'lik kalınlık değerine sahiptir. Yumuşak su ile işlem görmüş denim kumaşların daha yüksek kalınlık değerlerine sahip olmasının sert suda bulunan iyonların ozon verimini düşürmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 2. Kalınlık testi sonuçları

Ozon kapasitesi, ozon süresi ve su sertliğinin Kruskal-Wallis çoklu karşılaştırma ve Mann Whitney-U ikili kıyaslama testlerine göre kalınlık testi sonuçlarına istatistiksel olarak önemli bir etki yaratıp yaratmadığı değerlendirilmiştir. Ozon kapasitesi ve ozon süresinin Kruskal-Wallis testine göre kalınlık testi sonuçlarına istatistiksel olarak önemli bir etki yaratıp yaratmadığı Çizelge 6'da verilmiştir. İncelenen parametrelerin denim kumaşların kalınlık değerleri üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Çizelge 6. Ozon kapasitesi ve ozon süresine göre kalınlık testi sonuçlarına ait Kruskal-Wallis testi tablosu

Ozon kapasitesi	Numune sayısı	Sıra ortalaması	Kruskal Wallis-H	Önemlilik durumu
25	72	104.12	.539	0.764
50	72	110.23		
75	72	111.15		
Ozon süresi	Numune sayısı	Sıra ortalaması	Kruskal Wallis-H	Önemlilik durumu
5	72	100.81	1.684	0.431
10	72	113.47		
15	72	111.23		

* $\alpha=0.05$ 'e göre istatistiksel olarak önemlidir.

Yumuşak su ile işlem görmüş denim kumaşların kalınlık değerleri daha yüksektir ancak yumuşak ve sert su kullanımının denim kumaşların kalınlık değerleri üzerine etkisi Çizelge 7'de verilen Mann Whitney-U testi ile değerlendirilmiş ve fark istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

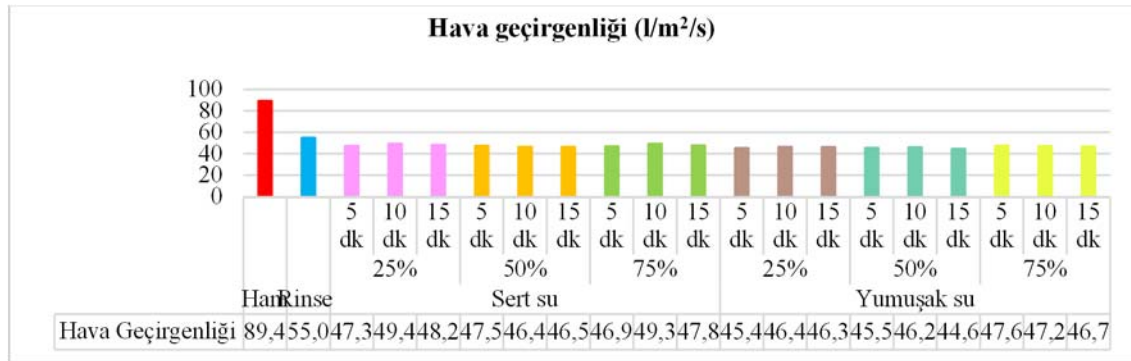
Çizelge 7. Su sertliğine göre kalınlık testi sonuçlarına ait Mann-Whitney U testi tablosu

Su sertliği	Numune sayısı	Sıra ortalaması	Sıraların toplamı	Mann-Whitney U	Önemlilik durumu
Sert su	108	97.58	10539.00	4653.000	0.010
Yumuşak su	108	119.42	12897.00		

* $\alpha=0.05$ 'e göre istatistiksel olarak önemlidir.

3.3. Hava Geçirgenliği Testi Sonuçları

Ham, ön yıkama, ozon ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemi uygulanmış %78 pamuk-%22 kenevir içeren denim kumaşa ait hava geçirgenliği testi sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Denim kumaşın ham değeri 89,4 l/m²/s ile yüksek bir hava geçirgenliğine sahiptir. Rinse yıkama sonrası hava geçirgenliği azalma göstermiş olup 55,0 l/m²/s değerine sahiptir. Uygulanan ozon ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemlerinden sonra yumuşak su ile ıslatılmış %50 ozon kapasitesinde 15 dakika işlem görmüş olan denim kumaşlar en düşük 44,6 l/m²/s'lik hava geçirgenliği değerine sahiptir. Çoğunlukla 5. dakika'dan 10. dakika'ya kadar hava geçirgenliğinde artış görülürken 15. dakika sonrasında azalma görüldüğü için ozonun kumaş yapısına zarar verdiği düşünülmektedir. Yumuşak suda sert suda bulunan iyonların bulunmaması nedeniyle ozon verimi olumsuz etkilenmemiş, kumaş çekmesi daha fazla görülmüş, sıklık değerleri artış göstererek hava geçirgenliği değerini azaltmıştır.



Şekil 3. Hava geçirgenliği testi sonuçları

Ozon kapasitesi, ozon süresi ve su sertliğinin Kruskal-Wallis çoklu karşılaştırma ve Mann Whitney-U ikili kıyaslama testlerine göre hava geçirgenliği testi sonuçlarına istatistiksel olarak önemli bir etki yaratıp yaratmadığı değerlendirilmiştir. Ozon kapasitesi ve süresinin Kruskal-Wallis testine göre hava geçirgenliği testi sonuçlarına istatistiksel olarak önemli bir etki yaratıp yaratmadığı Çizelge 8'de verilmiştir.

Çizelge 8. Ozon kapasitesi ve ozon süresine göre hava geçirgenliği testi sonuçlarına ait Kruskal-Wallis testi tablosu

Ozon kapasitesi	Numune sayısı	Sıra ortalaması	Kruskal Wallis-H	Önemlilik durumu
25	54	80.18		
50	54	67.81	10.171	0.001*
75	54	96.51		
Ozon Süresi	Numune sayısı	Sıra ortalaması	Kruskal Wallis-H	Önemlilik durumu
5	54	77.64		
10	54	89.49	2.352	0.308
15	54	77.37		

* $\alpha=0.05$ 'e göre istatistiksel olarak önemlidir.

Ozon süresinin etkisi ise istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Ozon kapasitesinin %78 pamuk-%22 kenevir içeren denim kumaşta hava geçirgenliği test sonucu Kruskal-Wallis testine göre istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. 5. dakika ile 10. dakika arasında hava geçirgenliği değerleri artış gösterirken 15. dakika sonrası azalma göstermesi nedeniyle ozonun kumaş yapısına zarar vererek yüzeyde boşluk oluşumunu sağladığı tahmin edilmektedir.

Su sertliğinin Mann Whitney U testine göre hava geçirgenliği testi sonuçlarına istatistiksel olarak önemli bir etki yaratıp yaratmadığı Çizelge 9'da verilmiştir ve istatistiksel olarak önemli bulunmuştur.

Çizelge 9. Su sertliğine göre hava geçirgenliği testi sonuçlarına ait Mann-Whitney U testi tablosu

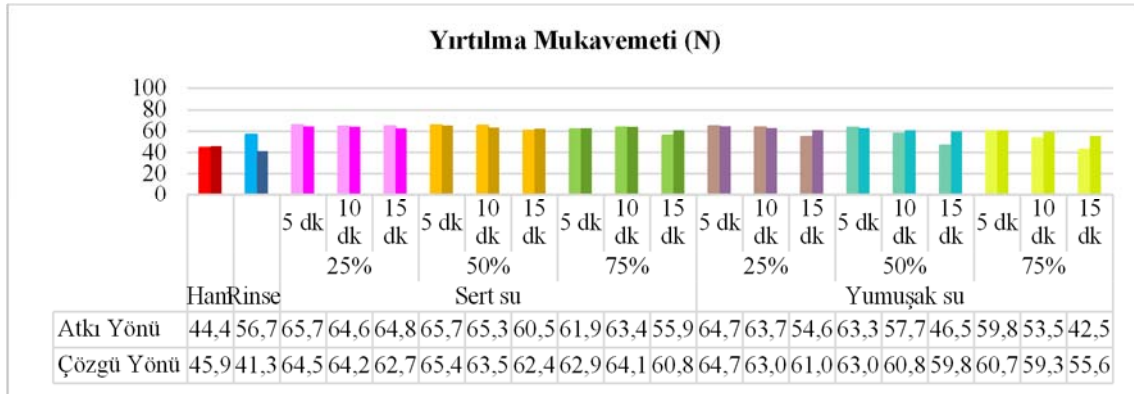
Su Sertliği	Numune sayısı	Sıra ortalaması	Sıraların toplamı	Mann-Whitney U	Önemlilik durumu
Sert su	81	92.91	7526.00	2356.000	0.002*
Yumuşak su	81	70.09	5677.00		

* $\alpha=0.05$ 'e göre istatistiksel olarak önemlidir.

Sert su ile işlem görmüş denim kumaşların hava geçirgenliği değeri daha yüksektir. Yumuşak suyun kullanımı sert suya kıyasla hava geçirgenliği testi sonuçlarında düşüşe neden olmuştur. Sert suyun ozon verimini düşürmesi nedeniyle kumaş çekmesi az olup sıklık artışı görülmemiş ve hava geçirgenliği değerleri yumuşak suya nazaran daha yüksek sonuçlar vermiştir.

3.4. Yırtılma Mukavemeti Testi Sonuçları

Ham kumaş, ön yıkama, ozon ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemi uygulanmış %78 pamuk-%22 kenevir içeren denim kumaşlara ait atkı ve çözgü yönüne ait yırtılma mukavemeti testi sonuçları Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Atkı ve çözgü yönü yırtılma mukavemeti testi sonuçları

Ham denim kumaşın atkı yönü mukavemet değeri 44,4 N olup rinse yıkama sonucu artış göstererek 56,7 N'a ulaşmıştır. Uygulanan ozon ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemlerinden sonra sert su ile ıslatılmış %25 ozon kapasitesinde 5 dakika işlem görmüş olan denimler ve %50 ozon kapasitesinde 5 dk işlem görmüş denimler en yüksek 65,7 N'luk atkı yönü yırtılma mukavemeti değerine sahiptir. Sert suda bulunan iyonların ozon verimini olumsuz etkilemesi nedeniyle sert su ile işlem görmüş denim kumaşların atkı yönü yırtılma mukavemeti değerleri artış göstermiştir. Atkı yönünde yırtılma mukavemeti ozonla ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemlerinden sonra artış göstermiştir. Denim kumaşın ham çözgü yönü mukavemet değeri 45,9 N'dur. Rinse yıkama sonucu 41,3 N değerine düşüş gözlenmiştir. Uygulanan ozon ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemlerinden sonra sert su ile ıslatılmış %50 ozon kapasitesinde 5 dakika işlem görmüş olan denimler en yüksek 65,4 N'luk çözgü yönü yırtılma mukavemeti değerine sahiptir. Sert suda bulunan iyonların ozon verimini olumsuz etkilemesi nedeniyle sert su ile işlem görmüş denim kumaşların çözgü yönü yırtılma mukavemeti değerleri artış göstermiştir. Ozon kapasite ve süresinin yüksek olmasının yırtılma mukavemeti üzerinde olumsuz etkileri olabileceği düşünülmektedir. Çözgü yönünde yırtılma mukavemeti ozonla ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemlerinden sonra denim kumaşın yumuşak tuşeye sahip olması nedeniyle artış göstermiştir.

Ozon kapasitesi, ozon süresi ve su sertliğinin Kruskal-Wallis çoklu karşılaştırma ve Mann Whitney-U ikili kıyaslama testlerine göre atkı ve çözgü yönü yırtılma mukavemeti testi sonuçlarına istatistiksel olarak önemli bir etki yaratıp yaratmadığı değerlendirilmiştir. Ozon kapasitesi ve süresinin Kruskal-Wallis testine göre atkı ve çözgü yönünde yırtılma mukavemeti testi sonuçlarına istatistiksel olarak önemli bir etki yaratıp yaratmadığı Çizelge 10'da verilmiştir.

Çizelge 10. Ozon kapasitesi ve süresinin yırtılma mukavemeti testi sonuçlarına ait Kruskal-Wallis testi tablosu

Atkı yönü yırtılma mukavemeti				
Ozon kapasitesi	Numune Sayısı	Sıra ortalaması	Kruskal Wallis-H	Önemlilik durumu
25	18	34.42	7.255	0.027*
50	18	27.78		
75	18	20.31		
Ozon kapasitesi	Numune Sayısı	Sıra ortalaması	Kruskal Wallis-H	Önemlilik durumu
5	18	37.92	18.507	0.000*
10	18	29.06		
15	18	15.53		
Çözü yönü yırtılma mukavemeti				
Ozon kapasitesi	Numune Sayısı	Sıra ortalaması	Kruskal Wallis-H	Önemlilik durumu
25	18	34.94	9.405	0.009*
50	18	28.58		
75	18	18.97		
Ozon kapasitesi	Numune Sayısı	Sıra ortalaması	Kruskal Wallis-H	Önemlilik durumu
5	18	36.97	15.445	0.000*
10	18	29.00		
15	18	16.53		

* $\alpha=0.05$ 'e göre istatistiksel olarak önemlidir.

Ozon kapasitesi ve süresinin denim kumaşın atkı ve çözgü yönü yırtılma mukavemeti test sonucu üzerine etkisi incelenmiş ve atkı ve çözgü yönü yırtılma mukavemeti test sonuçları Kruskal-Wallis testine göre istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. Ozon kapasitesi ve süresi arttıkça atkı ve çözgü yönü yırtılma mukavemeti sonucu azalma göstermiştir. Ozon kapasitesi ve kumaşın ozon ile temas süresi arttıkça lifler zarar görerek mukavemet kaybına neden olmuştur.

Su sertliğinin Mann Whitney-U testine göre atkı ve çözgü yönü yırtılma mukavemeti testi sonuçlarına istatistiksel olarak önemli bir etki yaratıp yaratmadığı Çizelge 11'de verilmiştir.

Çizelge 11. Su sertliğine göre yırtılma mukavemeti testi sonuçlarına ait Mann Whitney-U testi tablosu

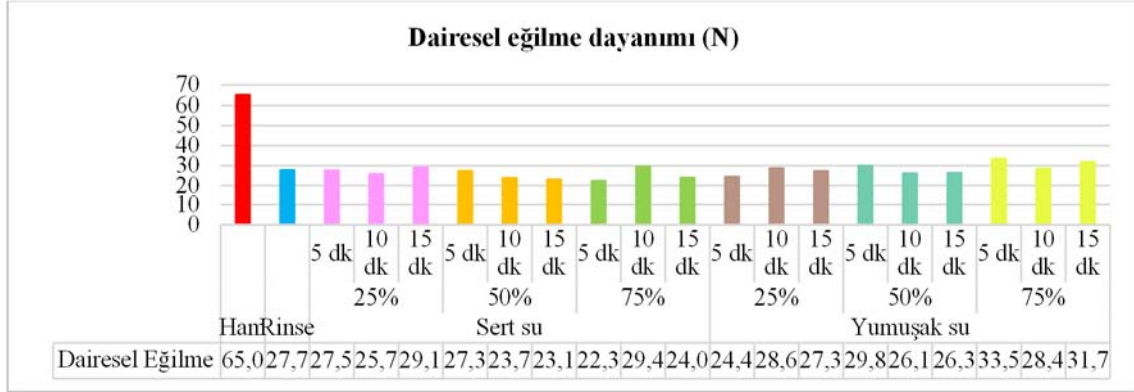
Atkı yönü yırtılma mukavemeti					
Su Sertliği	Numune sayısı	Sıra ortalaması	Sıraların toplamı	Mann-Whitney U	Önemlilik durumu
Sert su	27	34.96	944.00	163.000	0.000*
Yumuşak su	27	20.04	541.00		
Çözgü yönü yırtılma mukavemeti					
Su Sertliği	Numune sayısı	Sıra ortalaması	Sıraların toplamı	Mann-Whitney U	Önemlilik durumu
Sert su	27	35.07	947.00	160.000	0.000*
Yumuşak su	27	19.93	538.00		

* $\alpha=0.05$ 'e göre istatistiksel olarak önemlidir.

Su sertliğinin atkı ve çözgü yönü yırtılma mukavemeti test sonucu üzerine etkisi incelenmiştir ve atkı ve çözgü yönü yırtılma mukavemeti test sonucu istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. Sert su ile işlem görmüş denim kumaşların atkı ve çözgü yönü yırtılma mukavemeti değeri daha yüksektir. Sert suda bulunan iyonların ozon verimini düşürmesi nedeniyle, yumuşak su sert suya kıyasla atkı ve çözgü yönü yırtılma mukavemeti testi sonuçlarında daha düşük değerler göstermiştir.

3.5. Dairesel Eğilme Dayanımı Testi Sonuçları

Ham, ön yıkama, ozon ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemi uygulanmış denim kumaşa ait dairesel eğilme dayanımı testi sonuçları Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Dairesel eğilme dayanımı testi sonuçları

Ham kumaşın dairesel eğilme dayanımı 65,0 N'dur. Yıkama işlemlerinin henüz uygulanmaması nedeniyle kumaş rijitliğinin fazla olmasından kaynaklı olarak ham kumaşın en yüksek değeri verdiği tahmin edilmektedir. Rinse yıkamanın 5 dakikalık kısa işlem süresinde dahi denim kumaş rijitliği azalarak dairesel eğilme dayanımı azalmış ve 27,7 N değerine düşmüştür. Uygulanan ozon ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemlerinden sonra sert su ile ıslatılmış %75 ozon kapasitesinde 5 dakika işlem görmüş olan denimler en düşük 22,3 N'luk dairesel eğilme dayanım değerine sahiptir. Sert suda bulunan iyonların ozon verimi düşürmesi nedeniyle kumaşın daha yumuşak bir tuşeye sahip olduğu düşünülmektedir. Dairesel eğilme dayanımı ozonla ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemlerinden sonra kumaş rijitliğinin azalması nedeniyle düşüş göstermiştir.

Ozon kapasitesi, ozon süresi ve su sertliğinin Kruskal-Wallis çoklu karşılaştırma ve Mann Whitney-U ikili kıyaslama testlerine göre dairesel eğilme dayanımı testi sonuçlarına istatistiksel olarak önemli bir etki yaratıp yaratmadığı değerlendirilmiştir. Ozon kapasitesi ve süresinin Kruskal-Wallis testine göre dairesel eğilme dayanımı testi sonuçlarına istatistiksel olarak önemli bir etki yaratıp yaratmadığı Çizelge 12'de verilmiştir. Her iki parametre açısından da etki istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Çizelge 12. Ozon kapasitesi ve süresine göre dairesel eğilme dayanımı testi sonuçlarına ait Kruskal-Wallis testi tablosu

Ozon kapasitesi	Numune Sayısı	Sıra ortalaması	Kruskal Wallis-H	Önemlilik durumu
25	18	27.50	1.461	0.482
50	18	24.33		
75	18	30.67		
Ozon kapasitesi	Numune Sayısı	Sıra ortalaması	Kruskal Wallis-H	Önemlilik durumu
5	18	28.78	0.192	0.198
10	18	27.17		
15	18	26.56		

* $\alpha=0.05$ 'e göre istatistiksel olarak önemlidir.

Yumuşak ve sert su kullanımının denim kumaşların dairesel eğilme dayanımı testi sonuçlarına etkisi ikili kıyaslama Mann Whitney U testi ile incelenmiş ve Çizelge 13'te verilmiştir. Su sertliğinin denim kumaşlara etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmuştur.

Çizelge 13. Su sertliğine göre dairesel eğilme dayanımı testi sonuçlarına ait Mann Whitney U testi tablosu

Su Sertliği	Numune sayısı	Sıra ortalaması	Sıraların toplamı	Mann-Whitney U	Önemlilik durumu
Sert su	27	22.83	616.50	238.500	0.029*
Yumuşak su	27	32.17	868.50		

* $\alpha=0.05$ 'e göre istatistiksel olarak önemlidir.

Sert su ile ıslatılmış denim kumaşların dairesel eğilme dayanımı daha düşük olup yumuşak su ile ıslatılmış denim kumaşların ise dairesel eğilme dayanımı daha yüksek değeri vermiştir. Sert suda bulunan iyonların ozon verimini düşürmesi nedeniyle yumuşak suya kıyasla sert su ile ıslatılan denim kumaşların daha yumuşak tutuma sahip olduğu düşünülmektedir.

3.5. Dairesel Eğilme Dayanımı Testi Sonuçları

Renk farkı ve sarılık indeksi istatistiksel olarak incelenmeden önce denim kumaşa ait (CIE), L* a* b* ve C*H* renk değeri sonuçları Çizelge 14'te verilmiştir.

Çizelge 14. (CIE), L* a* b* ve C*H* renk değerleri

Kumaş Tipi	Su Sertliği	Ozon Kapasitesi	Ozon Süresi	L*	a*	b*	C*	h	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	Δh	ΔE	YI	
Ham	-	-	-	21,51	0,55	-3,95	16,85	265,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-56,44	
Rinse	-	-	-	15,02	0,92	-8,05	8,10	276,52	-6,49	0,37	-4,10	4,11	-1,44	5,43	-98,48	
Ozon ile ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama sonrası	Sert su	25	5	31,89	-1,23	-16,80	16,85	265,80	11,31	-2,56	-7,95	7,90	-12,72	14,07	-93,95	
			10	40,57	-2,28	-16,22	16,39	262,01	19,99	-3,61	-7,37	7,44	-16,51	21,63	-75,91	
			15	46,85	-3,12	-15,76	16,07	258,77	26,27	-4,45	-6,91	7,12	-19,75	27,55	-66,48	
		50	5	36,48	-1,84	-16,70	16,80	263,72	15,90	-3,17	-7,85	7,85	-14,80	18,03	-84,75	
			10	47,58	-3,21	-15,65	15,98	258,40	27,00	-4,54	-6,80	7,03	-20,12	28,22	-65,13	
			15	53,51	-3,81	-14,57	15,07	255,28	32,93	-5,14	-5,72	6,12	-23,24	33,84	-55,59	
		75	5	47,73	-3,07	-14,81	15,19	257,70	27,15	-4,40	-5,96	6,24	-20,82	28,37	-63,69	
			10	58,28	-3,88	-11,92	12,53	251,97	37,70	-5,21	-3,07	3,58	-26,55	38,19	-42,22	
			15	62,74	-4,28	-11,24	12,04	248,95	42,16	-5,61	-2,39	3,09	-29,57	43,57	-38,15	
		Yumuşak su	25	5	34,24	-1,47	-16,35	16,42	264,88	13,66	-2,80	-7,51	7,47	-13,64	15,84	-86,42
				10	43,22	-2,71	-16,42	16,65	260,61	22,64	-4,04	-7,57	7,70	-17,91	24,22	-73,67
			50	15	49,44	-3,51	-15,45	15,84	257,15	28,86	-4,84	-6,60	6,89	-21,37	30,02	-62,67
				5	40,76	-2,29	-16,35	16,51	262,03	20,18	-3,62	-7,50	7,56	-16,49	21,84	-76,32
			75	10	51,15	-3,59	-14,96	15,39	256,50	30,57	-4,92	-6,11	6,44	-22,02	31,57	-58,94
				15	58,82	-4,25	-12,98	13,66	251,81	38,24	-5,58	-4,13	4,71	-26,71	38,87	-46,07
		5	46,04	-2,92	-15,77	16,04	259,49	25,46	-4,25	-6,92	7,09	-19,03	26,74	-67,09		
			10	59,60	-4,02	-11,94	12,60	251,37	39,02	-5,35	-3,09	3,65	-27,15	39,52	-41,68	
			15	62,19	-4,63	-11,93	12,82	248,34	41,61	-5,96	-3,08	3,87	-30,18	42,18	-41,33	

Ozon kapasite ve süresi arttıkça L* değerlerinin artış göstermesi nedeniyle açıklık değeri artmıştır. a* değeri incelendiğinde ozonla ağartma sonrası tüm örneklerin renginin yeşile kaydığı görülmüştür. b* değeri incelendiğinde ozonla ağartma sonrası genel olarak örneklerin daha mavileştiği görülmüştür. Ozon kapasite ve süresinin artmasıyla birlikte a* değerinde yeşil, b* değerinde mavi renk artış göstermiştir. Ozon ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemlerinden sonra ozon kapasite ve süresi arttıkça genel olarak C* değerleri azalma göstererek doygunluğun azaldığı görülmüştür. Denim kumaşın ham hali referans kabul edilmiş olup ΔE^* değeri 0'dır. Rinse yıkama sonucu ΔE^* değeri 5,4 ile ham kumaşa göre en düşük bir renk farklılığı göstermiştir. Rinse yıkama işlem adımında boyarmaddeyi etkili bir şekilde söken bir kimyasalın bulunmaması nedeniyle renk farkı en az görülmüştür. Uygulanan ozon ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemlerinden sonra sert su ile ıslatılmış %75 ozon kapasitesinde 15 dakika işlem görmüş olan denim kumaşlar 43,5 ΔE^* değeriyle en yüksek renk farkını göstermektedir. Ozon süresi ve kapasitesi arttıkça boyarmadde daha etkili bir şekilde sökülüş ve renk farkı artış göstermiştir. Ham kumaşın YI değeri -56,4'dır. Sarılık indeksi rinse yıkama sonucu -98,4'tür. Rinse yıkama işlem adımında boyarmaddeyi sökecek etkili bir kimyasalın bulunmaması nedeniyle en düşük sarılık indeksi değerleri görülmüştür. Uygulanan ozon ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemlerinden sonra sert su ile ıslatılmış %75 ozon kapasitesinde 15 dakika işlem görmüş olan denimler -38,1 YI değeriyle en yüksek sarılığı göstermiştir. Ozon süresi ve kapasitesi arttıkça boyarmadde kumaş üzerinden uzaklaşmış ve sarılık indeksi artış göstererek sarılık artmıştır. İndigo boyarmaddezinin ozon ile ağartma işlemi sonucunda indigo, indigo karmin'e parçalanmakta olup indigo karmin'in ozonla girdiği tepkime sonucunda ise isatin sülfonik asit açığa çıkmaktadır. Ozonla ağartma sonucu ortaya çıkan bu isatin sülfonik asit denim ürünleri sarartmaktadır. İndigo boyalı kumaşların ozon işleminden sonra sararması, ozonun indigo boyarmaddezinin parçaladığının bir göstergesidir. Bu noktada indigo, isatin ve tepkime sonrası ortaya çıkan yan ürünlerin

denim ürünlerin üzerinden uzaklaştırılması ile sarılığın giderilmesi için deterjanla ozonla sararmayı önleme için ard yıkama işlemi gerçekleştirilmektedir [7,35]. Ozon kapasitesi, ozon süresi ve su sertliğinin Kruskal-Wallis çoklu karşılaştırma ve Mann Whitney-U ikili kıyaslama testlerine göre renk farkı ve sarılık indeksi testi sonuçlarına istatistiksel olarak önemli bir etki yaratıp yaratmadığı değerlendirilmiştir. Ozon kapasitesi ve süresinin Kruskal-Wallis testine göre renk farkı ve sarılık indeksi testi sonuçlarına istatistiksel olarak önemli bir etki yaratıp yaratmadığı izelge 15'te verilmiştir.

Çizelge 15. Ozon kapasitesi ve süresine göre renk farkı ve sarılık indeksi testi sonuçlarına ait Kruskal-Wallis testi tablosu

Renk farkı – ΔE^* değeri				
Ozon kapasitesi	Numune Sayısı	Sıra ortalaması	Kruskal Wallis-H	Önemlilik durumu
25	54	46.98		
50	54	80.39	60.423	0.000*
75	54	117.13		
Ozon kapasitesi	Numune Sayısı	Sıra ortalaması	Kruskal Wallis-H	Önemlilik durumu
5	54	37.61		
10	54	89.93	79.874	0.000*
15	54	116.96		
Sarılık indeksi – YI değeri				
Ozon kapasitesi	Numune Sayısı	Sıra ortalaması	Kruskal Wallis-H	Önemlilik durumu
25	54	46.22		
50	54	79.22	65.279	0.000*
75	54	119.06		
Ozon kapasitesi	Numune Sayısı	Sıra ortalaması	Kruskal Wallis-H	Önemlilik durumu
5	54	39.15		
10	54	91.50	72.155	0.000*
15	54	113.85		

* $\alpha=0.05$ 'e göre istatistiksel olarak önemlidir.

Ozon kapasitesi ve süresinin renk farkı ve sarılık indeksi test sonucu üzerine etkisi incelenmiş olup renk farkı ve sarılık indeksi test sonucu Kruskal-Wallis testine göre istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. Ozon kapasitesi ve süresi arttıkça boyarmadde kumaştan uzaklaşarak kumaş üzerindeki ağarma davranışı artış gösterdiği için denim kumaştaki renk farkı ve sarılık değeri artış göstermiştir.

Su sertliğinin Mann Whitney U testine göre renk farkı ve sarılık indeksi testi sonuçlarına istatistiksel olarak önemli bir etki yaratıp yaratmadığı izelge 16'da verilmiştir. Renk farkı ve sarılık indeksi test sonucu Mann-Whitney U testine göre istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Çizelge 16. Su sertliğine göre renk farkı ve sarılık indeksi testi sonuçlarına ait Mann Whitney U testi tablosu

Renk farkı – ΔE^* değeri					
Su Sertliği	Numune sayısı	Sıra ortalaması	Sıraların toplamı	Mann-Whitney U	Önemlilik durumu
Sert su	81	75.73	6134.50	2813.500	0.118
Yumuşak su	81	87.27	7068.50		
Sarılık indeksi – YI değeri					
Su Sertliği	Numune sayısı	Sıra ortalaması	Sıraların toplamı	Mann-Whitney U	Önemlilik durumu
Sert su	81	77.22	6255.00		
Yumuşak su	81	85.78	6948.00	2934.000	0.246

* $\alpha=0.05$ 'e göre istatistiksel olarak önemlidir.

4. SONUÇLAR

Genel sonuçların değerlendirilmesi için bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki önemli ya da önemli olmama ilişkisi izelge 17'de verilmiştir.

Çizelge 17. Çalışmada incelenen değişkenlerin kumaşlara uygulanan test sonuçları üzerine istatistiksel olarak önemlilik durumları

Test adı	Ozon kapasitesi	Ozon süresi	Su sertliği
Gramaj testi	-	-	-
Kalınlık testi	-	-	Önemlidir.
Hava geçirgenliği testi	Önemlidir.	-	Önemlidir.
Dairesel eğilme dayanımı testi	-	-	Önemlidir.
Atkı yönü yırtılma mukavemeti testi	Önemlidir.	Önemlidir.	Önemlidir.
Çözümlü yönü yırtılma mukavemeti testi	Önemlidir.	Önemlidir.	Önemlidir.
Renk farkı	Önemlidir.	Önemlidir.	-
Sarılık İndeksi	Önemlidir.	Önemlidir.	-

Bu çalışmada farklı sertlikteki suyla ıslatılmış kenevir lifi içeren denim kumaşların ozonla ağartılabilirliği incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Yıkama işlemlerinden sonra ham değerine kıyasla gramaj değerleri azalma göstermiştir. Ozon kapasitesi ve süresi arttıkça lif kaybı nedeniyle gramaj azalmıştır.

Ozon kapasitesinin artışıyla lif kaybı gözlemlenerek kalınlık değerleri azalma göstermiştir. %50 ozon kapasitesinde 15 dakikalık ozon ağartma ile kumaş kalınlığı optimum değere ulaşmıştır.

Yıkama işlemlerinden sonra hava geçirgenliği azalmıştır. Sert su ile ıslatılmış denim kumaşlar daha yüksek hava geçirgenliğine sahiptir. Sert suda bulunan iyonlar ozon verimini olumsuz etkilemiştir. Bu sebeple boyutsal çekme daha az gerçekleşerek sıklık artışına neden olmamıştır.

Her iki su sertliğinde de ozon ağartma %50 kapasiteye kadar 5 dakika işlem süresinde uygulandığında yırtılma mukavemeti olumsuz etkilenmemiştir. Kumaş, yıkama işlemlerinden önce sert tutumu nedeniyle daha kolay yırtılmıştır. Yıkama işlemlerinden sonra yumuşatıcı etkisiyle kumaş tuşesindeki rijitlik azalarak yırtılma mukavemeti artmıştır.

Dairesel eğilme dayanımı ozonla ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yapılan yıkama işlemlerinden sonra kumaş rijitliğinin azalması nedeniyle düşüş göstermiştir.

Denim kumaşın ham hali referans kabul edilerek kumaşların renk farkı değerlendirildiğinde ozon süresi ve kapasitesi arttıkça boyarmadde daha etkili bir şekilde sökülmüş ve renk farkı artış göstermiştir.

Ozon süresi ve kapasitesi arttıkça ozonun indigo karmin ile tepkimesi sonucu daha çok miktarda isatin sülfonik asit oluşarak kumaşın sarılık indeksi artmıştır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Ege Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Anabilim dalına ait bir yüksek lisans tezinin çıktısı olup Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne, çalışmanın yürütülmesinde deneylerin ve testlerin yapılması için destek veren FG Tekstil Konfeksiyon San. Tic. A.Ş./İzmir işletmesine ve Ar-Ge merkezi ekibine teşekkürlerimizi sunarız.

6. KAYNAKLAR

1. Kara, G., 2019. Farklı lif içeriklerine sahip denim kumaşların yapısal parametrelerle bazı yüzey özellikleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi. Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, 70.
2. Sabır, E.C., Sırlıbaş, S., Uzun, İ., Yiğit, D., 2023. Yenilikçi soya lifi içeren mamul denim ve spor giyim kumaşların yaşam döngüsü analizi (LCA). Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(4), 887-898.
3. Miyauchi, R., Zhou, X., Inoue, Y., 2023. Design elements that increase the willingness to pay for denim fabric products. Textiles, 3(1), 11-25.
4. Gürsoy, N., Eroğlu, N., 2024. Denim modasında sürdürülebilirlik ve ileri dönüşüm uygulamaları. Turkish Journal of Fashion Design and Management, 6(1), 1-22.

5. Öztürk, D., 2010. Pamuk ve poliester terbiyesinde ozon kullanımının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, 131.
6. Khalil, E., 2015. Sustainable and ecological finishing technology for denim jeans. AASCIT Communication, 2(5), 159-163.
7. Palabıyık, İ., 2023. Kenevir içeren denim ürünlerin ozon ile yıkanması üzerine bir çalışma. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, 164.
8. Kadıncık, N., Seyrek, M., Yıldırım, Z.N., Sobacı, Y., Uzun, M., 2023. Denim endüstrisinde sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi. ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi, 5(2), 72-99.
9. Palabıyık, İ., Körlü, A., Kayseri, G., 2022. The environmentally friendly denim washing containing hemp fiber. 4th International Congress on Engineering Sciences and Multidisciplinary Approaches, Istanbul, 1206.
10. Palabıyık, İ., Körlü, A., Kayseri, G., Sakan, E., Özcan, U., 2024. Special fiber usage opportunities in denim fabric production. Ases II. International Bandırma Scientific Studies Congress, Balıkesir, 375-376.
11. Sakan, E., Palabıyık, İ., 2023. Rejenere selüloz içeren denim ürünlerin ağartma davranışlarının incelenmesi. 12. Uluslararası Avrasya Bilimsel Araştırmalar ve Güncel Gelişmeler Kongresi, Ankara, 319-320.
12. Jasti, A., Biswas, S., 2023. Characterization of elementary industrial hemp (Cannabis Sativa L.) fiber and its fabric. Journal of Natural Fibers, 20(1), 1-14.
13. Kertmen, N., Yıldırım, N., 2022. Farklı karışım oranlarında kenevir lifi kullanımının ve iplik numarasının iplik ve kumaş özelliklerine etkisi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 24(72), 763-772.
14. Yüksek, A., Havuz, S., Karaduman, N., Şimşek, H., Honca, M., 2022. An investigation on the antimicrobial activity of hemp fiber and fabrics against common nasocomial infection agents. Çukurova Anestezi ve Cerrahi Bilimler Dergisi, 5(2), 137-144.
15. Fraj, A., Jaouachi, B., 2021. Effects of ozone treatment on denim garment properties. Coloration Technology, 137(6), 678-688.
16. Gaujena, B., Agapovs, V., Borodinets, A., Strelets, K., 2020. Analysis of thermal parameters of hemp fiber insulation, Energies, 13(23), 6385, 1-14.
17. Panaitescu, D.M., Fierascu, R.C., Gabor, A.R., Nicolae, C.A., 2020. Effect of hemp fiber length on the mechanical and thermal properties of polypropylene/SEBS/hemp fiber composites. Journal of Materials Research and Technology, 9(5), 10768-10781.
18. Neves, A.C.C., Rohen, L.A., Mantovani, D.P., Carvalho, J.P., Vieira, C.M.F., Lopes, F.P., Monteiro, S.N., 2020. Comparative mechanical properties between biocomposites of epoxy and polyester matrices reinforced by hemp fiber. Journal of Materials Research and Technology, 9(2), 1296-1304.
19. Ribeiro, M.P., Neuba, L., da Silveira, P., Luz, F.S., Figueiredo, A.B.H., Monteiro, S.N., Moreira, M.O., 2021. Mechanical, thermal and ballistic performance of epoxy composites reinforced with Cannabis sativa hemp fabric. Journal of Materials Research and Technology, 12, 221-233.
20. Corbin, A.C., Soulat, D., Ferreira, M., Labanieh, A.R., Gabrion, X., Malécot, P., Placet, V., 2020. Towards hemp fabrics for high-performance composites: Influence of weave pattern and features. Composites Part B: Engineering, 181, 1-25.
21. Hakamy, A., Shaikh, A., Low, M., 2013. Microstructures and mechanical properties of hemp fabric reinforced organoclay-cement nonocomposites. Construction and Building Materials, 49, 298-307.
22. Misnon, I.M., Islam, M.M., Epaarachchi, J.A., Lau, K.T., Wang, H., 2016. Fabric parameter effect on the mechanical properties of woven hemp fabric reinforced composites as an alternative to wood products. Advance Research in Textile Engineering, 1(1), 1-11.
23. Liu, Y., Xu, R.C., Zhang, Y.P., 2011. Development of fabric knitted by hemp/cotton yarn. Advanced Materials Research, 332, 667-671.
24. Stanković, S.B., Pavlović, S., Bizjak, M., Popović, D.M., Poparić, G.B., 2022. Thermal design method for optimization of dry heat transfer through hemp-based knitted fabrics. Journal of Natural Fibers, 19(15), 12155-12167.
25. Liu, Z., Chen, K., Fernando, A., Gao, Y., Li, G., Jin, L., Zheng, Z., 2021. Permeable graphited hemp fabrics-based, wearing-comfortable pressure sensors for monitoring human activities. Chemical Engineering Journal, 403, 126191. 1-8.
26. Gedik, G., Avinc, O., 2018. Bleaching of hemp (Cannabis sativa L.) fibers with peracetic acid for textiles industry purposes. Fibers and Polymers, 19, 82-93.

27. Kushwaha, R., Kesarwani, P., Kushwaha, A., 2024. Effect of scouring and bleaching on the physico-mechanical properties of the hemp fabric. *Fibers and Polymers*, 25, 1-8.
28. Sonmez, S., Marcello, C., Salam, A., 2023. Chemical modification for resistance to photo-oxidative degradation and improved bleaching and color fastness properties of hemp fiber. *Cellulose Chemistry & Technology*, 57, 551-556.
29. Hussien, M., Elnega, H., 2022. The effect of blending industrial hemp as an eco-friendly material with cotton to produce jeans clothes. *Journal of Architecture, Arts and Humanistic Sciences*, 7(34), 510-535.
30. Avcı, M., Demiryürek, O., 2022. Development of sustainable and ecological hybrid yarns: hemp fiber in denim fabric production. *Cellulose Chemistry and Technology*, 56(9-10), 1089-1100.
31. Okur, N., 2022. Thermo-physiological and handle-related comfort properties of hemp and flax blended denim fabrics. *Journal of Natural Fibers*, 19(15), 10179-10192.
32. Sarıçam, C., 2022. The comfort properties of hemp and flax blended denim fabrics with common industrial washing treatments. *Textile Research Journal*, 92(17-18), 3164-3178.
33. Zhang, L., Guo, F., Zuo, D.Y., Liao, S., Wang, Q., Liu, L., Ma, D., Liu, H., Yi, C., 2022. Effect of ozone washing on the antibacterial property of hemp yarn. *The Journal of The Textile Institute*, 113(12), 2569-2574.
34. Karagöz, Y., 2010. Nonparametrik tekniklerin güç ve etkinlikleri. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 9(33), 18-40.
35. Öztürk, D., Eren, H.A., 2010. Tekstil terbiyesinde ozon kullanımı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 15(2), 37-51.



Farklı İlave Metallerin AW 6061 Kaynaklı Bağlantıların Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi

Aybars BAĞLAN^{1,a}, Mustafa TÜMER^{1,b}

¹Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı, Kocaeli

^aORCID: 0009-0001-9765-8874; ^bORCID: 0000-0002-1931-4750

Makale Bilgileri

Geliş : 05.06.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605960

Sorumlu Yazar

Aybars BAĞLAN

aybarsbaglan@gmail.com

Anahtar Kelimeler

Alüminyum alaşımları

Mikroyapı

Sertlik

Mekanik özellikler

TIG

Atf şekli: BAĞLAN, A., TÜMER, M., ÖZÇELİK, G., (2024). Farklı İlave Metallerin AW 6061 Kaynaklı Bağlantıların Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 897-905.

ÖZ

Havacılık endüstrisi, malzeme alanında meydana gelen değişimlere paralel olarak ağırlık azaltımı, mukavemet ve maliyet açısından alüminyum alaşımlarını giderek artan bir kullanım alanında tercih etmektedir. Ancak benzersiz özelliklerine rağmen alüminyum malzemelerin birleştirilmesinin kendine has zorlukları vardır. Kaynak yöntemi, kaynak parametreleri, doğru ilave metal seçimi ve ana malzemenin kapsamlı temizliği için belirli tekniklerin belirlenmesi gerekir. Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlarından AW 6061, uygun işlemler neticesinde sergiledikleri mekanik özellikler ve korozyon dayanımları ile uçak gövde ve yapı elemanlarında tercih edilirler. Havacılık tamir-bakım kaynak işlemlerinde alüminyum alaşımlarında meydana gelen hasarların kaynak prosesleri ile giderilmesi yaygın bir uygulamadır. Bu çalışmada AW 6061'in Tungsten Inert Gas (TIG) kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve elde edilen kaynak metallerinde ilave metalin yapısal performans etkisini belirlemek amacı ile mekanik ve mikroyapısal karakterizasyon gerçekleştirilmiştir. Birleştirme performansı açısından ER 4190 ilave metal ile elde edilen kaynak metal ER5356'ya göre daha iyi mekanik özellikler elde edilmiştir. Kaynaklı numunelere uygulanan çekme testi sonrasında tüm kopmalar ana malzemede meydana gelmiştir. ER 5356'nın çekme testi ile uyumsuz olarak sertlik açısından daha yüksek değerler elde edilmesinin nedeni geniş bir alanda oluşan kaynak havuzunun ısı etkisi altındaki bölgede intermetalik fazlarda meydana getirdiği çözünmeden kaynaklanmaktadır.

The Effect of Different Filler Metals on Mechanical and Microstructure Properties of AW 6061 Welded Joints

Article Info

Received : 05.06.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605960

Corresponding Author

Aybars BAĞLAN

aybarsbaglan@gmail.com

Keywords

Aluminium alloys,

Microstructure,

Hardness,

Mechanical Properties,

TIG

How to cite: BAĞLAN, A., TÜMER, M., ÖZÇELİK, G., (2024). Farklı İlave Metallerin AW 6061 Kaynaklı Bağlantıların Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 897-905.

ABSTRACT

The aviation industry increasingly prefers aluminum alloys due to their weight reduction, strength, and cost benefits, which are parallel with changes in material science. Despite their unique properties, joining aluminum materials presents its own set of challenges. Specific techniques must be determined for welding methods, welding parameters, proper filler metal selection, and thorough cleaning of the base material. Among aluminum alloys that can be heat treated, AW 6061 is preferred in aircraft fuselage and structural components due to its mechanical properties and corrosion resistance achieved through appropriate processes. In aviation repair and maintenance welding operations, it is common practice to address damage to aluminum alloys through welding processes. This study aimed to characterize the mechanical and microstructural performance of AW 6061 when welded utilizing TIG welding method and to evaluate the impact of filler metal on the structural performance. The welding metal obtained with ER 4190 filler metal demonstrated better mechanical properties than ER 5356. In the tensile test of the welded samples, all fractures occurred in the base material. In contrast to its tensile test performance, the higher hardness values observed with ER 5356 are due to dissolution in intermetallic phases in the heat-affected zone of the wide weld pool.

1. GİRİŞ

Kaynaklı birleştirmeler, hem maliyeti hem de yapısal bütünlüğü artırmak için hem askeri hem de ticari uçaklardaki [1] çeşitli bileşenlerde perçinlerin yerini almaya başlamıştır. Hava araçlarında gerçekleştiren birleştirmeler, uçak bakım maliyetini kontrol etmeye ve uzun arıza sürelerini önlemeye yardımcı olur. Hava araçlarında kullanılan kaynak uygulamaları, parça üretimi yanında bakım faaliyetlerini de içerir. Değiştirilmesi mümkün olmayan uçak bileşenlerinin onarılması bu yöntemle mümkündür. Bu nedenle hava araçlarının yapısal parçalarında çoğunlukla tercih edilmeyen ergitmeli kaynak yöntemleri, tamir-bakım faaliyetlerinde geniş kullanım alanı bulmaktadır.

Alüminyum alaşımlarının kaynak işlemlerinde, parametrelerinin yanı sıra malzemenin ve ilave metallerin kimyasal bileşimi, ısı girdisi, koruyucu gaz ve oksit tabakasının temizliği, birleştirmelerin mukavemeti üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [2]. TIG kaynak yöntemi, alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi için kullanılan en yaygın kaynak tekniklerinden biridir. İşlem sırasında, oksidasyon ve kirlenmenin oluşmasını önleyen ve ergimeyen tungsten elektrot kullanır. Bu işlem diğer ark kaynak yöntemlerine göre dar alanda daha yoğun bir ısı kaynağına sahiptir; dolayısıyla benzer maliyetle daha az distorsiyona sahip bağlantılar üretebilir. Fakat alüminyum malzemelerin birleştirilmesinde en önemli sorunlardan biri üretim şartları ile elde edilen mukavemet özelliklerinin birleştirme işlemi esnasında uygulanan ısı girdisi ile kaybedilmesidir. Kaynak metalinin özelliklerini iyileştirmek için yapılabilecek çok az şey vardır. Katı çözültü güçlendirmesi yararlı olabilir ve uygun dolgu metalinin seçimi, kaynak metali dayanımına önemli ölçüde katkıda bulunabilir [3]. AW 6061'in ergitme kaynağında iki yaygın problemin, ısıdan etkilenen bölge ve kaynak metalinde yumuşama veya sertleşmeye ilave olarak kaynakların özelliklerini bozabilecek gözeneklilik olduğu iyi bilinmektedir [4].

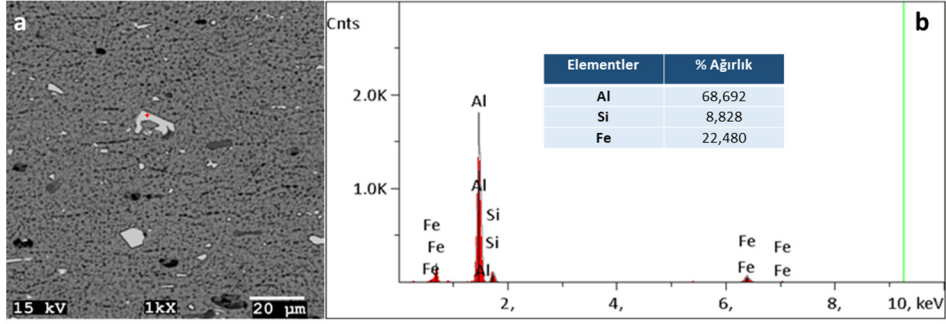
Aracı ve arkadaşları [5] kalın kesitli AW 6061 malzemeyi magnezyumlu ER5356 ve silisyumlu ER4043 ilave metalleri ile 7 pasoda birleştirmiş ve uygulanan çekme testlerinde kopma ana malzemede meydana gelmiştir [5]. Yılmaz ve Fındık [6] yaptıkları çalışmada aynı malzemede koruyucu gazı etkilerini araştırmıştır. Yazarlar çalışmanın sonuçlarında, He gazının yüksek ısı iletkenliği ve iyonlaşma enerjisi nedeniyle koruyucu gaz bileşimindeki He içeriğinin artmasıyla kaynak bağlantısındaki gözeneklilik oranı azaldığını fakat ısı etkisi altındaki bölgenin genişlediğini belirtmişlerdir. CheLah ve Hussin [7] TIG kaynak yöntemi ile birleştirdikleri AA6061 alüminyum alaşımında ilave metallerin etkisini araştırmıştır. Yazarlar, ER 4043 kullanılarak üretilen birleştirmeleri, ER 5356 ile üretilen kaynak metalleri ile karşılaştırdığında birleştirmenin mukavemet değerinde yaklaşık %12 oranında iyileşme elde edildiğini rapor etmiştir. Lakshminarayanan ve arkadaşları [8] AW 6061 alaşımının metal inert gaz (MIG), TIG ve sürtünme karıştırma (FSW) kaynak yöntemleri ile elde edilen birleştirmelerin mekanik özellikleri incelemiştir. Kaynak metali mikroyapısında ince, eş eksenli tanelerin oluşumu ve homojen dağılmış, çok ince mukavemet artırıcı çökeltilerin varlığı tespit edilmiştir. FSW ile elde edilen birleştirmenin TIG ve MIG birleştirmelerine göre daha yüksek çekme özelliklerine sahip olduğu ortaya konmuştur.

Alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde ilave metal seçimi istenilen mukavemet değerlerinin elde edilmesi açısından önemlidir [1]. Bu çalışmada uçağın kanat kaplamalarında, gövde panellerinde ve motorun fan bacası ve thrust reverser bölgelerinde kullanılan AW 6061 alüminyum alaşımı malzeme TIG kaynak yöntemi ile ER 4190 ve ER 5356 ilave metalleri kullanarak birleştirilmiştir. Bu sayede farklı kimyasal kompozisyona sahip ilave metallerin sunduğu mikroyapısal farklılıklar incelenmiş, mikroyapıya bağlı olarak mekanik özelliklerde meydana gelen farklılıklar değerlendirilmiştir.

2. YÖNTEM

2.1. Ana Malzeme

Havacılık malzemesi olarak kullanılan AW 6061 çökelme sertleşmeli alüminyum alaşımı bu çalışmanın ana malzemesidir. Şekil 1'de ana metalin optik ve taramalı elektro mikroskopu ile elde edilmiş mikroyapılarını göstermektedir. $Mn_{12}Si_7Al_5$ veya $(Fe,Mn)_3SiAl_{12}$ ve Mg_2Si gibi ikinci faz parçacıkları alüminyum katı çözültisinde bulunmaktadır[9]. SEM (scanning electron microscope) görüntüsünde görülen beyaz çubuk şeklindeki parçacıklar Şekil 1b'deki EDS (Energy Dispersive Spectrometry) analizi ile metaller arası AlFeSi bileşiklerinin karmaşık formları olarak tanımlanabilir.



Şekil 1. Ana metalin mikroyapısı (a) SEM ve (b) EDS analizi

2.2. Birleştirme İşlemi

AW 6061 alüminyum alaşımının birleştirilmesinde ER5356 (AlMg5Cr) ve ER4190 (AlSi5) ilave metalleri kullanılmıştır. Malzeme kalınlığı 1,3 mm'dir. Bu alaşım AW 6082'ye eşdeğerdir, ancak daha yüksek Cu içeriği nedeniyle korozyon direnci biraz daha düşüktür. Kullanılan ana malzeme ve ilave metallerin kimyasal içerikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Verilen kimyasal değerler Faundry Oxford optik emisyon spektrometre kullanılarak elde edilmiştir. Birleştirme işleminde Miller Syncrowave 350LX TIG kaynak makinası kullanılmıştır. Kaynak ve kök gazı olarak Argon kullanılmıştır. Kaynak esnasında gaz debisi 5 L/dak olarak kullanılırken, kök gazı işleminde bu değer 10 L/dak olarak kullanılmıştır. Kök gazı ile birleştirme işlemi, özel hazırlanmış bir fikstür üzerinde yapılmıştır (Şekil 2). Birleştirme işlemi esnasında kullanılan parametrelerin birbirine yakın olması nedeni ile ısı girdileri hemen hemen birbirine eşittir ve kullanılan parametre değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. 125*80*1.3 mm³ boyutundaki parçaların birleştirilmesi sonucu elde edilen bağlantıların görüntüleri Şekil 3'de verilmiştir.



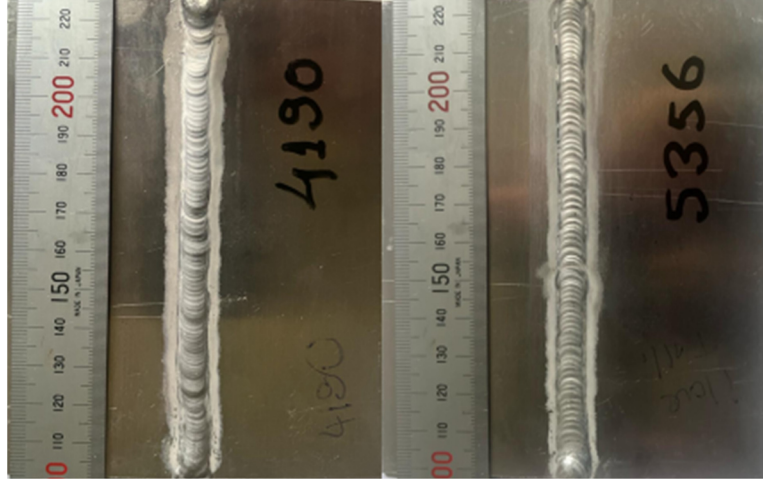
Şekil 2. Kök gazı kullanarak TIG kaynak yöntemi ile AW 6061 malzemenin birleştirme işlemi

Çizelge 1. Ana malzeme ve ilave metallerin elementel içerikleri (% ağırlık), mekanik özellikleri

Element (% ağırlık)	AW 6061	ER 5356	ER4190
Al	96,95	95,77	95,11
Si	0,67	-	4,69
Cu	0,35	-	0,02
Mg	1	4,02	-
Cr	0,12	0,06	-
Mn	0,12	0,15	0,02
Fe	0,470	-	0,16
Akma dayanımı (MPa)	279	120	124
Çekme dayanımı (MPa)	338	270	186
% Uzama	14,6	28	8

Çizelge 2. Birleştirme esnasında kullanılan kaynak parametreleri

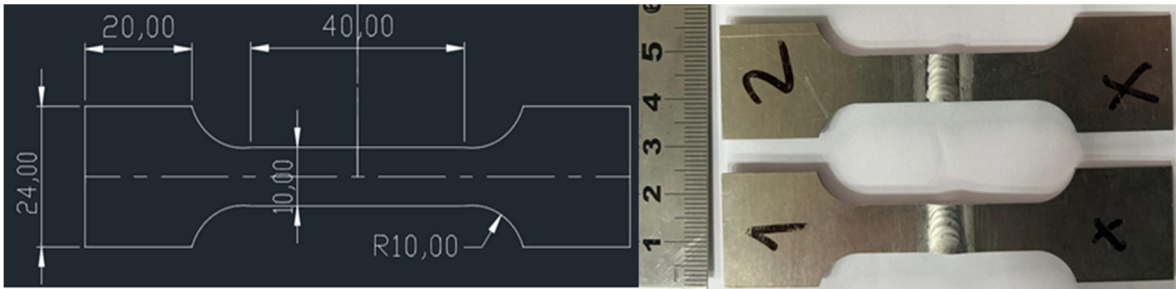
Parametreler	ER 4190	ER5356
Akım (A)	70	70
Gerilim (V)	11,8	11,8
Kutuplama	Alternatif Akım	
Kaynak hızı (mm/s)	1,37	1,33
Isı girdisi (kJ/mm)	0,36	0,37



Şekil 3. Farklı ilave metaller ile birleştirilen AW6061 malzemeler

2.3. Mikroyapısal ve Mekanik Karakterizasyon

Farklı ilave metalleri ile birleştirilen AW 6061 malzemenin kaynak bölgesinin mikroyapı görüntülemeleri, hem Olympus optik mikroskop (Olympus BX41M-LED) hem de taramalı elektron mikroskobu (Jeol JSM – 6060 – IXRF) kullanılarak gerçekleştirildi. Metalografik işlem sürecinde tüm yüzeyler sırasıyla 320, 600, 1000, 2500, 4000 mesh'lik SiC esaslı zımpara kağıtları kullanılarak zımparalanmış, nihai parlatma 3 ve 1 μm 'lik çuha ile elmas solüsyon kullanılarak yapılmıştır. Parlatılmış konumdaki numune Modified Poulton's (30 ml HCl, 40 ml HNO₃, 2,5 ml HF, 12 g Cr₂O₃, 42,5ml H₂O) dağlayıcısı ile 3 saniye boyunca kimyasal olarak dağlanmıştır. Kaynak bölgesinin sertlik dağılımını belirlemek için ana malzeme, ısı etkisi altındaki bölge ve kaynak bölgesini kapsayan vickers mikrosertlik taraması yapıldı. Sertlik ölçümünde 0,5 kgf yük kullanıldı. Birleştirilmiş parçalara çekme testi TS EN ISO 4136 göre iki adet uygulandı. Çekme testi numune ölçüleri ve hazırlanan numunelerin görüntüsü Şekil 4'de gösterilmiştir. Çekme hızı 2 mm/dk olarak seçildi.



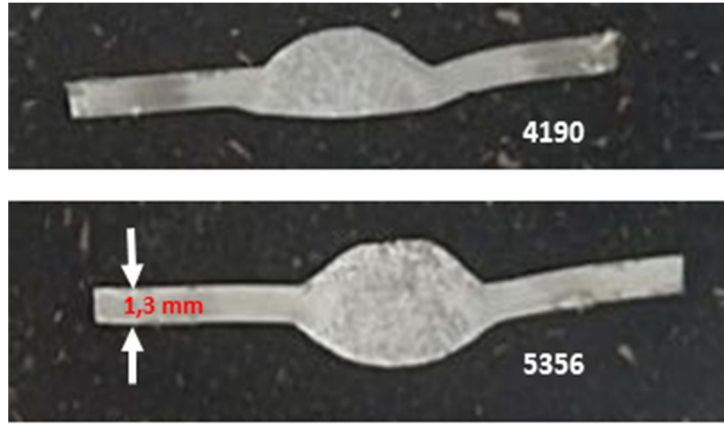
Şekil 4. Çekme test numuneleri

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Gramaj Testi Sonuçları

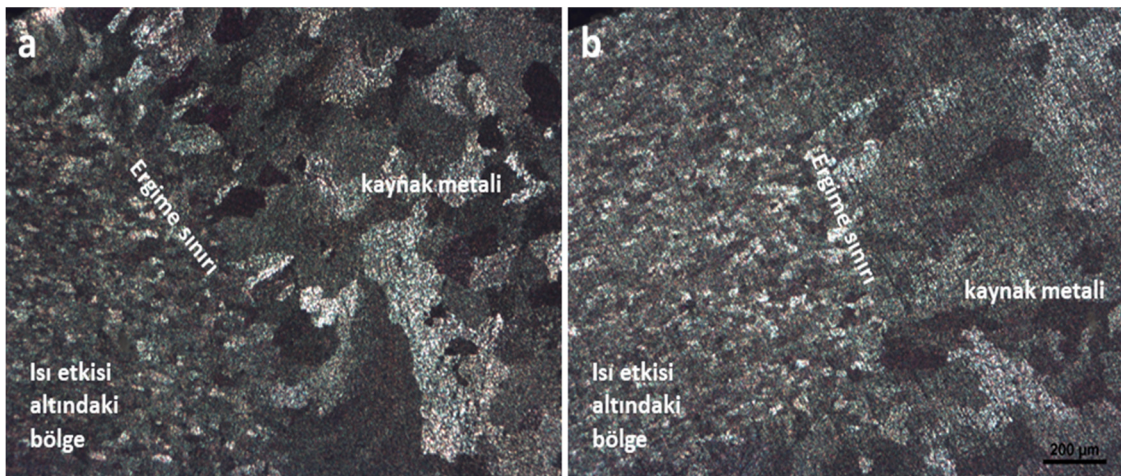
Düşük kalınlıktaki alüminyum alaşımları geleneksel olarak TIG kaynak yöntemi ile alternatif akım kullanılarak birleştirilir. Alüminyum alaşımlarının yüzeyinde oluşan oksit tabakası iyi temizlenmediği

zaman ergime güçlüğü ve kaynak metali içerisinde hacimsel hataların gelişmesine neden olabilir. Bu durum, ergime noksanlığı ve dolayısı ile birleştirme mukavemetinde düşüşe neden olmaktadır[10]. Çökeltme sertleştirilmesi ile mukavemeti artırılan AW 6061 alüminyum alaşımlarında ısı etkisi altındaki bölgede önemli bir güç kaybı olabilir. Si elementi tek başına matris içinde mukavemeti ve sünekliliği arttırırken, magnezyum ile birlikte çökeltme sertleşmesi sağlar. Şekil 5’de elde edilen birleştirmelere ait makrograflar gösterilmiştir. Birleştirmelerin herhangi bir hacimsel kusur veya ergime noksanlığı meydana gelmemiştir. Fakat ER 5356’nın kaynak bölgesinin daha geniş olmasının nedeni, dolgu metallerinin alaşım elementlerinin farklılığından kaynaklanan ısı dağılımı ve akışkanlık oranı etkisinden dolayı kaynaklanmaktadır [11].

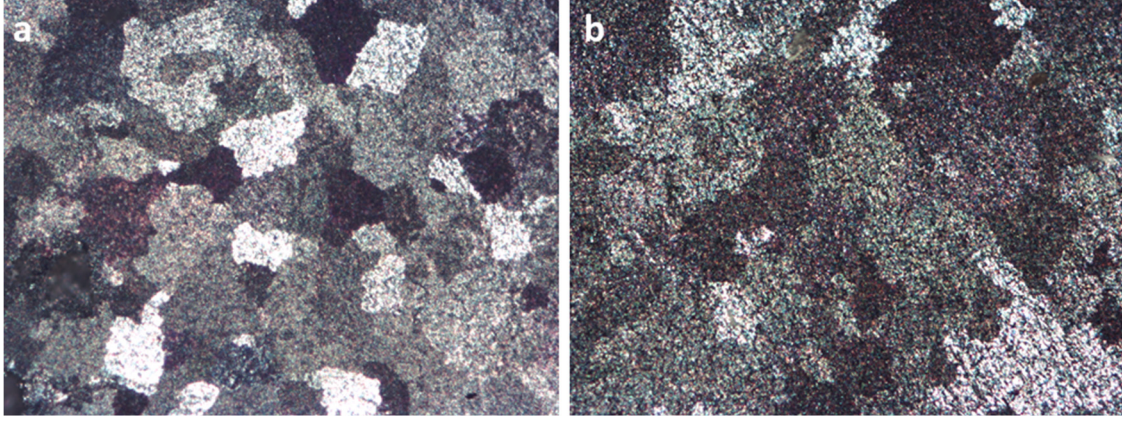


Şekil 5. Kaynak metallerinin makroyapısı a) ER 4190 b)ER 5356

AW 6061 alaşımının mukavemeti α fazında Mg_2Si çökeltilerinin oluşması sonucu oluşur. Bu çökeltiler kaynak sırasında ergime nedeniyle kaynak metalinde tamamen çözünür ve bu da birleştirme yerindeki kaynak metalinde yumuşama etkisine neden olur [12]. ER 4190 ve ER 5356 numunelerini kaynaklı bölge ve ısıdan etkilenen bölgeleri Şekil 6 ve 7’de incelenmiştir. Mikroyapı görüntüleri, kaynak metali ve kaynak metali/ısıdan etkilenmiş bölge arayüzünde belirgin bir katılma çatlağı olmadığını göstermektedir (Şekil 6). Makroyapılarda belirgin bir gözenekliliğin olmadığı mikroyapılarla da desteklenmektedir. Silisyumun hidrojen emilimi magnezyum kadar az olmasa bile gözeneklilik oluşmamıştır. Burada TIG kaynak yönteminin sağladığı sakin ark oluşumunun etkisi vardır [3]. Kaynak metalleri mikroyapısı eş eksenli bir tane dizilimine sahiptir. Silisyumun sağladığı düşük ergime sıcaklığı hızlı katılaşmaya neden olur ve bu durum tanelerin büyümesinde en önemli engellerden biridir [13]. ER 4190 telinin yüksek silisyum içeriği kaynak havuzunun akışkanlığını artırır ve katılma sıcaklığını düşürür. Bu, daha düzgün bir mikroyapı sağlar. ER 5356 numunesindeki dar ve eş eksenli olmayan ER 4190’dan daha kaba tane yapısına sahip olması, katılma hızıyla ilişkilidir ve artan katılma süresi [7] tanelerin büyümesine neden olmuştur (Şekil 7).

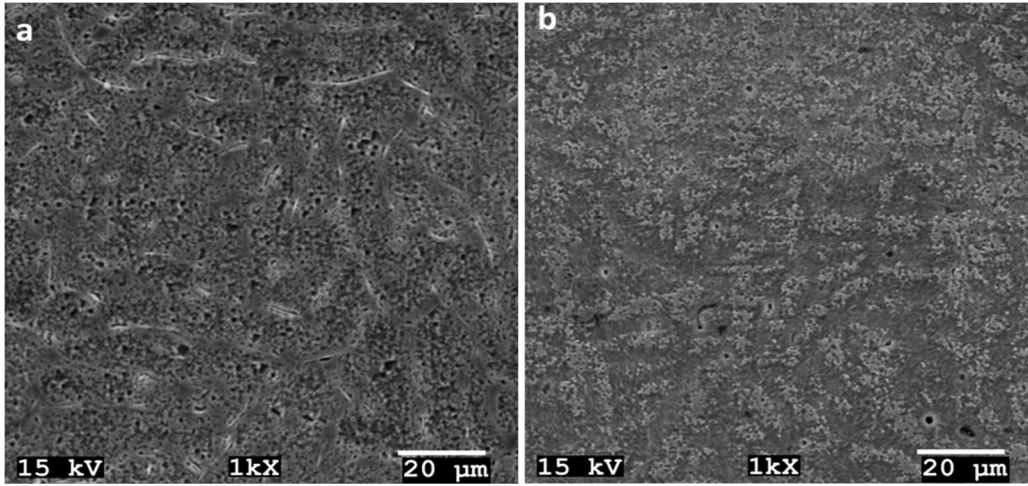


Şekil 6. Ergime sınırı bölgesi mikroyapısı a) ER 4190 b) ER 5356



Şekil 7. Kaynak metali mikroyapısı a) ER 4190 b) ER 5356 (LOM)

Katı çözelti içerisinde dağılmış uzun beyaz parçacıklar, ER4190 ilave metali ile oluşturulan kaynak metalinin tane sınırları boyunca dağılmıştır (Şekil 8a). Silisyumun kimyasal içerikte fazla bulunması, kaynak bölgesinde silisyum elementi bakımından zengin çökeltilerin oluşumuna neden olur. Bu nedenle mikroyapı genel olarak, α -Al, ötektik Si, Mg_2Si , α -Al(FeMn)Si ve β -AlFeSi intermetaliklerinden oluştuğu daha önceki çalışmalarda da ortaya konmuştur [14]. Mg_3Al_2 intermetalik bileşikler, Şekil 8b'de gösterildiği gibi, ER 5356 ilave metali ile oluşturulan kaynak metalinin katı çözeltilisinde uniform bir şekilde dağılım göstermektedir.



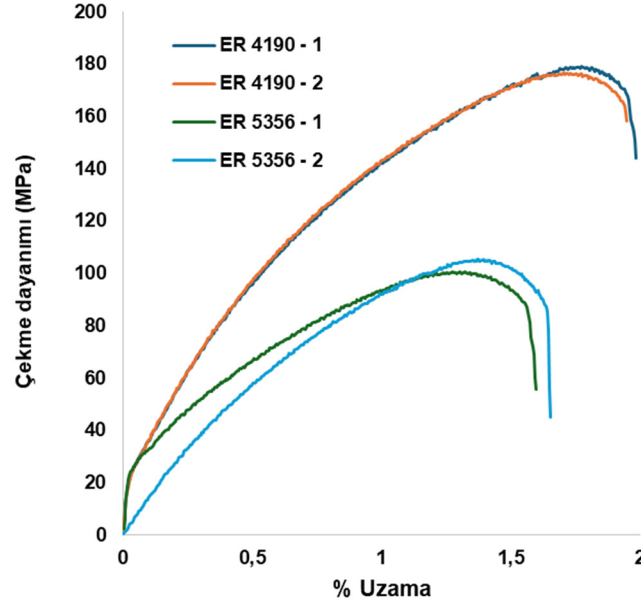
Şekil 8. Kaynak metali mikroyapısı (SEM) a) ER 4190 b) ER 5356

3.2. Mekanik Özellikler

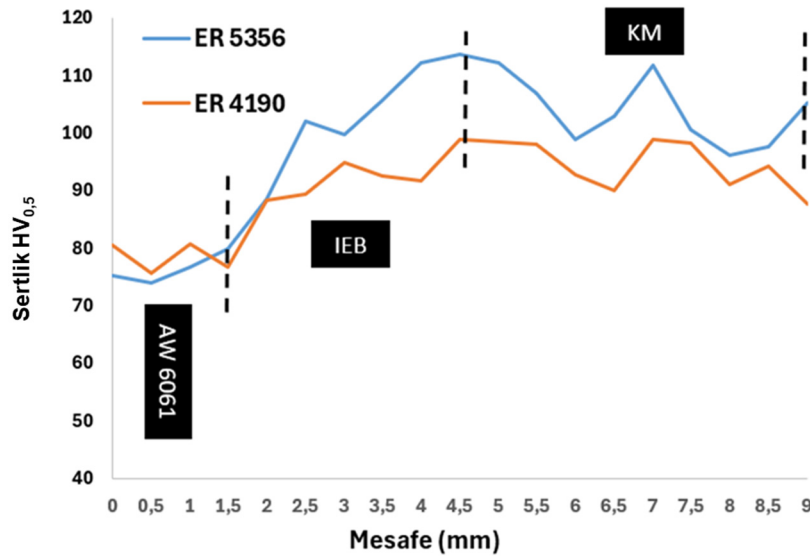
Kullanılan ilave metaller ile elde edilen birleştirmelerden elde edilen numunelere uygulanan enine çekme deneyi sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir. Elde edilen % uzama, çekme ve akma dayanımı ise değer olarak Çizelge 3'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ER 4190 ile elde edilen birleştirmenin mukavemetinin ER 5356'ya göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca ER 4190, ER 5356'ya kıyasla kısmen daha iyi sünekliğe sahiptir. Dolgu metalinin kimyasal bileşimi ile ana malzemede meydana gelen seyrelme etkisi, yeni kaynak metalinin kimyasal kompozisyonunu etkiler. Ayrıca, mikroyapıda çökelen intermetalik bileşiklerin mekanik özellikler üzerindeki etkisi de yadsınamaz. Yelamasetti ve arkadaşlarının yaptığı iki çalışmada [15,16] bu çalışma ile aynı ilave metaller kullanılarak, TIG ve MIG yöntemlerinin birleştirme üzerindeki etkisini araştırmışlardır. MIG yönteminde, ER4043 dolgu metali ile elde edilen birleştirmeler ER 5356 dolgu metali ile meydana getirilenden daha yüksek çekme mukavemeti sunarken bu durum TIG birleştirme yönteminde tam tersi olduğunu rapor etmiştir. Çekme testi sonucunda kırılmaların hepsi ana malzemede meydana gelmiştir. Fakat düşük et kalınlığı ile ısı girdisinin geniş bir bölgede maruz bıraktığı etki Mg_2Si intermetaliklerinin çözünmesine ve ana malzeme ve kaynak metali arasında düşük mukavemete sahip bir alanın oluşmasına neden olmuştur. Bu durum ana malzemedan daha düşük mukavemet değerlerinin elde edilmesi ile sonuçlanmıştır.

Çizelge 3. ER 4190 ve ER 5356 dolgu metalleri ile birleştirilmiş AW 6061 alaşımının çekme testi sonuçları

	ER 4190	ER5356
Çekme dayanımı R_m (MPa)	$177,9 \pm 0,14$	$102,95 \pm 3,46$
Akma dayanımı $R_{0,2}$ (MPa)	$141,5 \pm 1,69$	$92,2 \pm 4,94$
Uzama %	$1,97 \pm 0,03$	$1,63 \pm 0,03$

**Şekil 9.** ER 4190 ve ER5356 dolgu metalleri kullanılarak elde edilen birleştirimin gerilim-gerinim eğrisi

Kaynak bölgelerinin sertlik grafiği Şekil 10'da gösterilmiştir. Kaynak metalleri (KM) ana malzeme ve ısı etkisi altındaki bölgeden (IEB) daha yüksek sertliğe sahiptir. Sonuçlar, ilave metallerin farklı kimyasal kompozisyonu ile sağladığı katı çözültü ve çökelme sertleşmesi mekanizmalarının birleştirme performansını arttırdığını göstermektedir. Sertlik profilleri incelendiğinde, ER 5356 (105 ± 6 HV_{0,5}), ER 4190 (95 ± 5 HV_{0,5}) kullanılan birleştirmeye kıyasla daha yüksek bir değer göstermiştir. Muhtemelen sertlikteki artış, yüksek sıcaklıklarda ergime işlemi sırasında intermetalik faz oluşumunu teşvik eden dolgu metalindeki (%4,02) Mg elementlerinin miktarı ile ilişkilidir. Metallerarası fazlar iyi bir sertliğe sahiptir ancak bu fazlar metalin sünekliliğine ve mukavemetine zarar vermiştir.

**Şekil 10.** Mikrosertlik sonuçları

4. SONUÇLAR

ER4190 ve ER 5356 ilave metalleri ile TIG yöntemi kullanılarak AW 6061-T6 alüminyum alaşımı malzeme hatasız olarak birleştirilerek mekanik ve mikroyapı karakterizasyonu yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre;

- ER4190 kaynak metali mikroyapısı ER5356 ilave metalinin mikroyapısına göre daha düzenli eşeksizli tanelerden oluşmaktadır.
- Birleştirme bölgesinde meydana gelen yeni intermetalik oluşumlar, mukavemet artışına neden olmuştur. Bu nedenle, çekme testi numunelerinin hepsi çözünen çökeltilerin etkisiyle ana malzemeden kopmuştur
- İki kaynaklı bağlantıdan ER 4190 ilave metali kullanılarak elde edilen birleştirme, ER 5356'ya kıyasla çok daha yüksek mukavemet değerleri elde edilmiştir. Fakat süneklik her iki birleştirmede ciddi oranda düşmüştür.
- ER 5356 ilave metalinin sağlandığı daha yüksek sertliğe rağmen, geniş bir bölgede gerçekleşen ergime bölgesi sonucu meydana gelen dönüşümler nedeni ile istenilen mukavemeti sağlamamıştır.

5. KAYNAKLAR

1. Verma, R.P., Pandey, K.N., Sharma, Y., 2015. Effect of ER4043 and ER5356 filler wire on mechanical properties and microstructure of dissimilar aluminium alloys, 5083-O and 6061-T6 joint, welded by the metal inert gas welding. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 229, 1021-1028.
2. VettumPerumal, S., Suyamburajan, V.A., Chidambaranathan, V.S., Nelson, L., 2023. Characterization of microstructure and mechanical behaviour in activated tungsten inert gas welded dissimilar AA joint of AA 5083 and AA 6061 alloys. Journal of the Institution of Engineers (India): Series D, 105, 1867-1873.
3. Mathers, G., 2000. Welding of aluminum and its alloys. Published in North America by CRC Press LLC, 242.
4. Yadav, A.K., Agrawal, M.K., Saxena, K.K., Yelamasetti, B., 2023. Effect of GTAW process parameters on weld characteristics and microstructural studies of dissimilar welded joints of AA5083 and AA6082: optimization technique. International Journal of Interactive Design and Manufacturing, 18, 1151-1160.
5. Arıcı, R., Köksal, N.S., Ömeroğlu, E., 2015. AA6061 alaşımının iki farklı dolgu teli kullanılarak TIG kaynağında özelliklerin incelenmesi. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11(2), 233-239.
6. Yılmaz, E., Fındık, F., 2022. Effect of shielding gas on microstructure and mechanical properties in AA6061-T6 alloy MIG welding. Periodical of Engineering and Natural Sciences, 10, 268-277.
7. Che Lah, N.A., Hussin, M.H., 2020. Influence of alloying element in filler metal on mechanical properties of A6061 Al alloy welded joints. International Journal of Engineering and Advanced Technology, 9, 661-666.
8. Lakshminarayanan, A.K., Balasubramanian, V., Elangovan, K., 2009. Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminium alloy joints. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 40, 286-296.
9. Naing, T.H., Muangjunburee, P., 2022. Metallurgical and mechanical characterization of MIG welded repair joints for 6082-T6 aluminum alloy with ER 4043 and ER 5356. Transactions of the Indian Institute of Metals, 75, 1583-1593.
10. Dewangan, S., Reddy, A.P., Sunder, S.S.S., 2023. Mechanical property analysis into the welded plates of Al-6061 joined by TIG and FSW techniques. Journal of the Institution of Engineers (India): Series D. 105, 1703-1713.
11. Othman, N.K., Bakar, S.R.S., Jalar, A., Syarif, J., Ahmad, M.Y., 2011. The effect of filler metals on mechanical properties of 6 mm AA 6061-T6 welded joints. Advanced Materials Research, 154-155, 873-876.
12. Gündoğdu İş, E., Atapek, Ş.H., Yılmaz, M., 2023. Effect of welding speed and shielding gas composition on the properties of laser welded EN AW 6061-T6 Al alloy using 5356 filler metal. Journal of Laser Applications, 35(3), 032006, 1-13.

13. Anderson, T., 2010. American welding aluminum: Questions and answers: A practical guide for troubleshooting aluminum welding-related problems. Welding Society, Product Development Committee.
14. Ahmed, M., Javidani, M., Maltais, A., Chen, X.G., 2024. Microstructure and mechanical properties of high-strength AA6011 aluminum alloy welding with novel 4xxx filler metals. *Materials (Basel)*, 17(2), 380.
15. Venkat Ramana, G., Yelamasetti, B., Vishnu Vardhan, T., 2021. Study on weldability and effect of post heat treatment on mechanical and metallurgical properties of dissimilar AA 2025, AA 5083, and AA7075 GTAW weld joints. *Materials Today: Proceedings*, 46, 878-882.
16. Yelamasetti, B., Venkat Ramana, G., Vishnu Vardhan, T., 2021. Weldability and mechanical properties of AA5052 and AA7075 dissimilar joints developed by GTAW process. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4162-4166.



The Impact of Conjugate Heat Transfer in Flow Over a Vertical Plate and Application of Artificial Neural Network

Pınar YAĞLICA^{1,a}, Özdeş ÇERMİK^{1,b}

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Faculty of Engineering-Architecture, Department of Mechanical Engineering, Kahramanmaraş, Türkiye

^aORCID0000-0001-5736-4911; ^bORCID: 0000-0001-9308-4589

Article Info

Received : 08.07.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605967

Corresponding Author

Pınar YAĞLICA

pyaglica@gmail.com

Keywords

Conjugate heat transfer

Magnetic field

Keller box technique

Viscous dissipation

Artificial neural network

How to cite: YAĞLICA, P., ÇERMİK, Ö., (2024). The Impact of Conjugate Heat Transfer in Flow Over a Vertical Plate and Application of Artificial Neural Network. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 907-922.

ABSTRACT

Heat conduction properties are important in the flow area for the simulation of engineering applications where heat transfer is needed between both liquid and solid. Conjugate Heat Transfer (CHT) refers to thermal problems involving both conduction within the wall and convection within the fluid. CHT is crucial for heat exchangers, gas turbine blades, nuclear reactor cooling pipes, aircraft engines, and spacecraft. Additionally, the influence of the magnetic field is significant in fields such as electrostatic precipitation, MHD power generators and pumps, aeroheating, and polymer science. The motivation for this study is to understand the combined effects of CHT, mixed convection, magnetic fields, and viscous dissipation on velocity, temperature profiles, local skin friction, and heat transfer parameters over a vertical plate. The boundary layer equations have been derived from the Navier-Stokes and energy equations using similarity methods and solved numerically with the Keller Box technique. A new correlation for local skin friction and heat transfer parameters has been developed. Moreover, Artificial Neural Network (ANN) models have been applied to forecast desired numerical values. The optimal ANN model for local heat transfer has one hidden layer and nine neurons, achieving an R^2 value of 0.9077607 and an MSE of 0.0003101. For local skin friction, the best-performing model has one hidden layer and fifteen neurons, with an R^2 value of 0.9470261 and an MSE of 0.0250369.

Düşey Bir Plaka Üzerinde Olan Akışa Bileşik Isı Transferinin Etkisi ve Yapay Sinir Ağları Uygulaması

Makale Bilgileri

Geliş : 08.07.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605967

Sorumlu Yazar

Pınar YAĞLICA

pyaglica@gmail.com

Anahtar Kelimeler

Birleşik ısı transferi

Manyetik alan

Keller box tekniği

Viskoz yayılım

Yapay sinir ağları

Atf şekli: YAĞLICA, P., ÇERMİK, Ö., (2024). The Impact of Conjugate Heat Transfer in Flow Over a Vertical Plate and Application of Artificial Neural Network. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 907-922.

ÖZ

Isı iletim özellikleri, hem sıvı hem de katı arasında ısı transferinin gerektiği mühendislik uygulamalarının simülasyonu için akış alanında önemlidir. Birleşik Isı Transferi (CHT), duvar içinde iletim ve sıvı içinde taşınım içeren termal problemleri ifade eder. CHT, ısı değiştiricileri, gaz türbini kanatları, nükleer reaktör soğutma boruları, uçak motorları ve uzay araçları için büyük öneme sahiptir. Ayrıca, manyetik alanın etkisi elektrostatik çökeltme, MHD güç jeneratörleri ve pompaları, aerosolizasyon ve polimer bilimi gibi alanlarda önemlidir. Bu çalışmanın amacı, birleşik ısı transferi (CHT), karışık taşınım, manyetik alan ve viskoz yayılımın, düşey bir plaka üzerindeki hız, sıcaklık profilleri, yerel yüzey sürtünmesi ve ısı transferi parametreleri üzerindeki etkilerini anlamaktır. Sınır tabakası denklemleri, Navier-Stokes ve enerji denklemlerinden benzerlik yöntemleri kullanılarak elde edilmiş ve Keller Box tekniği ile sayısal olarak çözülmüştür. Yerel yüzey sürtünmesi ve ısı transferi parametreleri için yeni bir korelasyon geliştirilmiştir. Ayrıca, istenen sayısal değerleri tahmin etmek için Yapay Sinir Ağı (YSA) uygulanmıştır. Yerel ısı transferi için en uygun YSA modeli, bir gizli katman ve dokuz nörona sahip olup, R^2 değeri 0.9077607 ve MSE değeri 0.0003101 olarak elde edilmiştir. Yerel yüzey sürtünmesi için en iyi model ise bir gizli katman ve on beş nöron ile R^2 değeri 0.9470261 ve MSE değeri 0.0250369 olarak belirlenmiştir.

1. INTRODUCTION

Conjugate Heat Transfer (CHT) is a complex phenomenon that addresses the simultaneous interaction of heat transfer mechanisms within a solid and fluid. This complex process plays a pivotal role in numerous engineering applications, such as heat exchangers, fin structures, microelectronic chip cooling systems, furnaces, arc welding processes, and nuclear air pipes. A comprehensive understanding of CHT is essential for effectively designing and optimizing various thermal systems and components [1]. CHT problems have been investigated by several researchers. In non-porous normal flow conditions, Miyamoto et al. [2] imposed constant temperature and heat flux on the outer surface of the vertically oriented plate, examining the phenomenon of natural convection heat transfer. Char et al. [3] made a numerical analysis to investigate CHT effect on a moving plate with a specified velocity. Chang [4] numerically conducted a study for the natural convection and heat transfer characteristics within a vertically oriented, thin, conductive, and hollow circular cylinder transporting micropolar fluid. The equations were transformed into nonlinear form, and the resulting equations were solved using the finite difference method. Mamun et al. [5] studied the impact of heat generation on vertical flat plate. The Nonlinear equations were solved using the Keller Box technique and the results were obtained for various values of the heat conduction and conjugate heat transfer parameters, and Prandtl number.

Magnetohydrodynamics (MHD) has emerged as a prominent research area owing to its significance in numerous technological and industrial applications. These applications encompass areas such as MHD power generators and pumps, aeroheating, plasma analysis, and cooling of nuclear reactors. Various studies have been conducted on the flow of electrically conductive viscous fluids under the influence of a magnetic field, exploring different geometries. Afify [6] investigated the impacts of several parameters on a non-Darcy MHD problem. Das [7] examined thermal radiation, partial slip, and fluid properties that change with temperature on MHD flow and heat transfer over a flat plate. Mamun and Chowdhury [8] studied the impact of the magnetic field, viscous energy distribution, and heat generation on the incompressible, viscous, and electrically conductive liquid flow over a vertical flat surface considering the influence of conduction (conductive electricity). Chamka and Ben-Nakhi [9] investigated heat and mass transfer via MHD mixed convection in a non-Darcian porous medium taking into account the presence of a magnetic field, thermal radiation, and Soret and Dufour effects.

Artificial Neural Network (ANN) is a field of artificial intelligence that aims to simulate the learning and problem-solving abilities of computer systems. ANN provides computer systems with the ability to learn by using mathematical and statistical approaches that model the neural networks of the human brain. These networks are used to recognize and learn patterns in datasets. ANN has been used in many applications, such as image and language processing, game strategy development, and automated driving technologies. Due to their ability to work with large amounts of data and recognize complex patterns, ANN has the potential to provide effective solutions in various industries and problem domains [10]. ANN has been used by many researchers in heat transfer problems. Abad et al. [11] employed ANN and particle swarm optimization to forecast a heat and mass transfer problem. The use of ANN modeling in the context of heat transfer applications, including thermal issues, heat exchangers, and gas-solid fluidized beds was explored by Kamble et al. [12]. Using ANN in the studies, the prediction of parameters is enhanced, providing more accurate and reliable results compared to conventional numerical methods.

In this study, the effects of conjugate heat transfer, mixed convection, magnetic field, and viscous dissipation on velocity and temperature profiles, local skin friction, and heat transfer parameters have been evaluated for a vertical plate. A new correlation has been developed for local skin friction and heat transfer parameters. Furthermore, artificial neural networks have been employed to predict the required numerical values.

2. ANALYSIS

In this study, it is assumed that there is a two-dimensional, steady laminar flow over a thin vertical plate with a finite thickness (b) and length (L), (where $L \gg b$). The schematic of the problem is shown in Figure 1. At a certain distance from the right surface of the plate, the free stream velocity and temperature are denoted as u_∞ and T_∞ , respectively. The left surface of the plate is kept at a constant temperature T , (where $T_0 > T$). The study investigates the flow over the plate considering the effects of a magnetic field and

viscous dissipation. The properties of the fluid including thermal conductivity, viscosity, permeability, and specific heat are constant for the analysis.

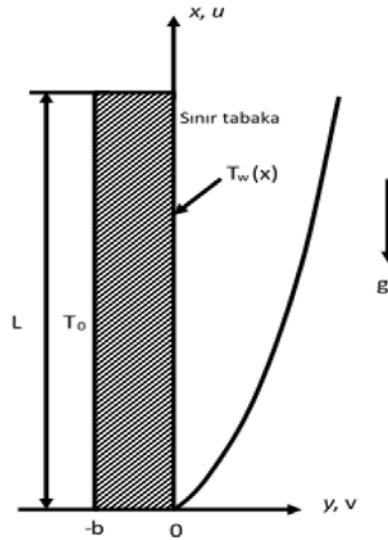


Figure 1. The schematic of the problem

The equations of the general boundary layer under these assumptions are modified to include the magnetic field effect while considering laminar and steady states. The Navier-Stokes equations in laminar and steady regimes are written using the Boussinesq and Non-Darcy approaches as follows [13].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + g\beta(T - T_\infty) - \frac{\sigma B_0^2}{\rho}(u - u_\infty) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\sigma B_0^2}{\rho C_p}(u - u_\infty)^2 + \frac{\nu}{C_p} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (3)$$

The given equations are referred to as the extended Brinkman–Forchheimer-Darcy equations [14]. ν donates the kinematic viscosity, g represents gravitational acceleration, B_0 is the magnetic flux density, ρ is the fluid density, β stands for the thermal expansion coefficient, and T indicates the fluid temperature within the thermal boundary layer.

Boundary conditions for external flow are given below;

$$\begin{aligned} x = 0, \quad y > 0 &\rightarrow T = T_\infty, \quad u = u_\infty \\ x > 0, \quad y = 0 &\rightarrow T = T_w(x), \quad u = 0, \quad v = 0 \\ y \rightarrow \infty &\rightarrow T \rightarrow T_\infty, \quad u \rightarrow u_\infty \end{aligned} \quad (4)$$

w is wall and ∞ is the boundary layer edge. $T_w(x)$ that varies with x is the temperature of the plate surface.

Boundary conditions for the temperature distribution are given below;

$$\left. \frac{d^2 T}{dy^2} \right| = 0 \quad 0 \leq x \leq L; \quad -b < y < 0. \quad (5)$$

The plate boundary conditions are as follows;

$$y = -b \rightarrow T_s = T_0$$

$$T_s = T(x, r_0) ; \quad -k_s \frac{dT}{dy} \Big|_{y=0,s} = -k_f \frac{\partial T(x,0)}{\partial y} \Big|_{y=0,f} \quad (6)$$

Here, k_s is the thermal conductivity coefficient for the plate while k_f is the fluid. The dimensionless expressions to solve the problem are given in Equation as follows [15]

$$\xi = \frac{x}{L}, \eta = y \left(\frac{u_\infty}{\nu x} \right)^{1/2}, \quad \psi(x, y) = (\nu u_\infty x)^{1/2} f(\xi, \eta), \quad \theta = \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} \quad (7)$$

$\psi(x, y)$ is free flow function. When these dimensionless expressions are used, the following velocity expressions are formed.

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} = u_\infty f' \quad (8)$$

$$v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = -\left(\frac{u_\infty \nu}{x} \right)^{1/2} \left\{ \frac{1}{2} f + \xi \frac{\partial f}{\partial \xi} - \frac{\eta}{2} f' \right\} \quad (9)$$

The obtained velocity components are substituted into the expressions in Equations (2) and (3), resulting in the following equations.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = u_\infty f' \frac{\partial u_\infty f'}{\partial x} = u_\infty^2 f' \left[\frac{\partial f'}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial f'}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \right] = u_\infty^2 f' \left[\frac{1}{L} \frac{\partial f'}{\partial \xi} - \frac{\eta}{2x} f'' \right] \quad (10)$$

When Equation (10) is utilized and rearranged, Equation (11) is obtained.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_\infty^2}{x} \left[\xi f' \frac{\partial f'}{\partial \xi} - \frac{\eta}{2} f' f'' \right] \quad (11)$$

$$v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{u_\infty^2}{x} \left\{ \frac{1}{2} f f'' + \xi f'' \frac{\partial f}{\partial \xi} - \frac{\eta}{2} f' f'' \right\} \quad (12)$$

$$\frac{v}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\nu}{r} \left(\frac{u_\infty}{2x} \frac{u_\infty}{2x} \right)^{1/2} u_\infty \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{r^2 - r_0^2}{r_0} \right) \frac{r}{r_0} f'' = \frac{u_\infty^2}{x} \{ (1 + \lambda \eta) f'' \}' \quad (13)$$

$$\frac{\nu \partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{u_\infty^2 f'''}{x} \quad (14)$$

$$g\beta(T - T_\infty) = g\beta\theta (T_0 - T_\infty) \quad (15)$$

$$\frac{\sigma B_0^2}{\rho} (u - u_\infty) = \frac{\sigma B_0^2}{\rho} u_\infty [f' - 1] \quad (16)$$

When the expressions in Equations (11-12-13-14-15-16) are substituted into Equation (2), the following momentum equation is obtained.

$$f''' + \frac{1}{2} f f'' - \frac{\sigma B_0^2 x}{\rho u_\infty} (f' - 1) + g\beta\theta \frac{(T_0 - T_\infty)x}{u_\infty^2} = \xi \left\{ f' \frac{\partial f''}{\partial \xi} - f'' \frac{\partial f''}{\partial \xi} \right\} \quad (17)$$

If the above equation is rearranged using the dimensionless expressions, $Ha = \frac{\sigma B_0^2 r_0^2}{\mu}$, $Re = \frac{u_\infty r}{\nu}$, $Mn = \frac{Ha}{Re}$, $Ri = \frac{Gr}{Re^2}$, $Gr = \frac{g\beta(T_0 - T_\infty)L^3}{\nu^2}$, $x = L\xi$ the final form of the momentum equation (Equation 18) is obtained.

$$f''' + \frac{1}{2}ff'' - Mn\xi(f' - 1) + Ri\theta\xi = \xi \left\{ f' \frac{\partial f'}{\partial \xi} - f'' \frac{\partial f}{\partial \xi} \right\} \quad (18)$$

In the momentum equation; Ri is the Richardson number, indicating the extent to which natural and forced convection occur. $Ri \rightarrow 0$ implies that forced heat transfer dominates completely, while $Ri \rightarrow \infty$ implies that natural convection is entirely effective. The Richardson number does not vary as a function of x . Grashof (Gr), Reynolds (Re) and Prandtl (Pr) numbers are used in the equations [16].

If adjustments are made to the Energy Equation (Equation 3), where utilizing the dimensionless expression $\theta = \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty}$ from Equation (7), the following expressions are first written one by one;

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{u_\infty(T_0 - T_\infty)}{x} \left[\xi f' \frac{\partial \theta}{\partial \xi} - \frac{\eta}{2} \theta f' \right] \quad (19)$$

$$v \frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{u_\infty(T_0 - T_\infty)}{x} \left[\frac{1}{2} f \theta' + \xi \theta' \frac{\partial f}{\partial \xi} - \frac{\eta}{2} \theta f' \right] \quad (20)$$

$$\frac{v}{Pr} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{u_\infty(T_0 - T_\infty)}{x} \frac{1}{Pr} \theta'' \quad (21)$$

$$\frac{\sigma B_0^2}{\rho C_p} (u - u_\infty)^2 = \frac{\sigma B_0^2}{\rho C_p} u_\infty^2 (f' - 1)^2 \quad (22)$$

$$\frac{v}{C_p} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 = \frac{v}{C_p} \left(\frac{\partial u_\infty f'}{\partial \eta} \right)^2 \left(\frac{\partial \eta}{\partial r} \right)^2 = \frac{u_\infty^2}{C_p} (f'')^2 \left(\frac{u_\infty}{x} \right) \quad (23)$$

Equations (18-19-20-21-22) are substituted into the Energy Equation (Equation 3), and Equation (24) is obtained as follows;

$$\frac{1}{Pr} \theta'' + \frac{1}{2} f \theta' + \frac{\sigma B_0^2 x u_\infty}{\rho C_p (T_0 - T_\infty)} (f'^2 - 1) + \frac{u_\infty^2}{C_p (T_0 - T_\infty)} (f'')^2 = \xi \left\{ f' \frac{\partial \theta}{\partial \xi} - \theta' \frac{\partial f}{\partial \xi} \right\} \quad (24)$$

In addition to the dimensionless expressions used for the Momentum Equation, when the expression for $Ec = \frac{u_\infty^2}{C_p(T_0 - T_\infty)}$ is also used in Equation (24), the final form of the Energy Equation is obtained.

$$\frac{1}{Pr} \theta'' + \frac{1}{2} f \theta' + Mn Ec \xi (f'^2 - 1) + Ec (f'')^2 = \xi \left\{ f' \frac{\partial \theta}{\partial \xi} - \theta' \frac{\partial f}{\partial \xi} \right\} \quad (25)$$

3. NUMERICAL SOLUTION

The momentum and energy equations, represented by Equations (18) and (25), have been numerically resolved using the Keller Box technique. The impact of various parameters on local skin friction and heat transfer has been analyzed. Correlations have been developed for local skin friction and heat transfer. Both parameters have been optimized using ANN modeling based on the obtained data, determining the most

suitable model. The Keller Box technique is defined as an alternative closed (implicit) method. This method possesses several favorable characteristics for solving all parabolic partial differential equations. The principal characteristics of this method and the path to follow for the solution have been defined by Cebeci. The Keller-Box technique involves slightly more arithmetic compared to the Crank-Nicolson method for solving equations. It provides second-order accuracy in irregular x and y intervals and allows for very rapid variations in x. It facilitates the easy programming of the solution for numerous coupled equations. The Keller Box technique is implemented by following the steps. Firstly, the equation or equations are reduced to first order. Secondly, central difference methods are employed to formulate finite difference equations. Thirdly, if not linear, algebraic result equations are linearized and expressed in matrix form. Finally, the linear system is with block-tridiagonal elimination method [17].

Firstly, the equations are expressed in the form of a system of secondary equations.

$$f' = u, u' = v, g = \theta, g' = p \tag{26}$$

Using Equation (26), the momentum and energy equations are rearranged and written in finite difference form as follows;

$$h_j^{-1} [v_j^n - v_{j-1}^n] + \left(\frac{1}{2} + \alpha_n\right) (fv)_{j-1/2}^n + Ri \xi (g)_{j-1/2}^n - Mn \xi (u)_{j-1/2}^n - \alpha_n \left[(u^2)_{j-1/2}^n - (v)_{j-1/2}^{n-1} (f)_{j-1/2}^n + (v)_{j-1/2}^n (f)_{j-1/2}^{n-1} \right] = R_{j-1/2}^{n-1} \tag{27}$$

$$\frac{1}{Pr} h_j^{-1} [p_j^n - p_{j-1}^n] + \left(\frac{1}{2} + \alpha_n\right) (fp)_{j-1/2}^n + Mn Ec \xi (u^2)_{j-1/2}^n + Ec (v^2)_{j-1/2}^n - \alpha_n \left[(ug)_{j-1/2}^n - u_{j-1/2}^{n-1} g_{j-1/2}^{n-1} + u_{j-1/2}^{n-1} g_{j-1/2}^n \right] + f_{j-1/2}^{n-1} p_{j-1/2}^n - f_{j-1/2}^n p_{j-1/2}^{n-1} = T_{j-1/2}^{n-1} \tag{28}$$

Equation (27) $R_{j-1/2}^{n-1}$ and Equation (28) $T_{j-1/2}^{n-1}$ are expressed as follows;

$$R_{j-1/2}^{n-1} = -L_{j-1/2}^{n-1} - \alpha_n \left[(fv)_{j-1/2}^{n-1} - (u^2)_{j-1/2}^{n-1} \right] \tag{29}$$

$$T_{j-1/2}^{n-1} = -M_{j-1/2}^{n-1} + \alpha_n \left[(fp)_{j-1/2}^{n-1} - (ug)_{j-1/2}^{n-1} \right] \tag{30}$$

If Equations (27) and (28) are rearranged in the form of Equation (31) (Newton linearization), Equations (32) and (33) are written as follows;

$$f_j^n = f_j^i + \mathcal{F}_j^i \tag{31}$$

$$h_j^{-1} [\delta v_j^i - \delta v_{j-1}^i] + \left(\frac{1}{2} + \alpha_n\right) (\delta v)_{j-1/2}^i + Ri \xi (\delta g)_{j-1/2}^i - Mn \xi (\delta u)_{j-1/2}^i - \alpha_n \left[(\delta u^2)_{j-1/2}^i - (v)_{j-1/2}^{i-1} (\delta f)_{j-1/2}^i + (\delta v)_{j-1/2}^i (f)_{j-1/2}^{i-1} \right] = (r_2)_j \tag{32}$$

$$\frac{1}{Pr} h_j^{-1} [\delta p_j^i - \delta p_{j-1}^i] + \left(\frac{1}{2} + \alpha_n\right) (\delta p)_{j-1/2}^i + Mn Ec \xi (\delta u^2)_{j-1/2}^i + Ec (\delta v^2)_{j-1/2}^i - \alpha_n \left[(\delta u g)_{j-1/2}^i - \delta u_{j-1/2}^{i-1} g_{j-1/2}^{i-1} + u_{j-1/2}^{i-1} \delta g_{j-1/2}^i \right] + f_{j-1/2}^{i-1} \delta p_{j-1/2}^i - \delta f_{j-1/2}^i p_{j-1/2}^{i-1} = (r_3)_j \tag{33}$$

The Keller Box technique is then used to solve Equations (32) and (33) after linearization.

Table 1. Comparison of local heat transfer parameters with Pr=10, Ri=7.9, p=Mn=Ec = 0.0

ξ	Lloyd and sparrow	Chang	Present study
0.00000	0.7281	0.7280	0.7278
0.00125	0.7313	0.7291	0.7318
0.00500	0.7404	0.7373	0.7403
0.01250	0.7574	0.7566	0.7574
0.05000	0.8259	0.8351	0.8289
0.12500	0.9212	0.9412	0.9397
0.50000	1.0290	1.0603	1.0601

The works of Lloyd and Sparrow [18] and Chang [19] have been compared with the current technique to confirm the accuracy, and the results show a good agreement as illustrated in Table 1.

4. RESULTS AND DISCUSSION

In this research, the combined effects of heat transfer and magnetic field on the flow over a flat plate have been investigated. The equations and parameters obtained through the numerical method are written in a Fortran program. The influence of parameters on local friction and heat transfer is determined for the mixed heat transfer parameter (Ri) = 0.01, 0.1, 1.0, 5.0, 10.0, the combined heat transfer parameter (p) = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, the magnetic field parameter (Mn) = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, the Eckert number (Ec) = -0.1, -0.05, 0, 0.05, 0.1, $Re = 250$, and $Pr = 1$. The conjugated heat transfer parameter $p=0$ corresponds to the limit case of an isothermal wall, and the value of p indicates the extent of the wall's heat conduction effect [4].

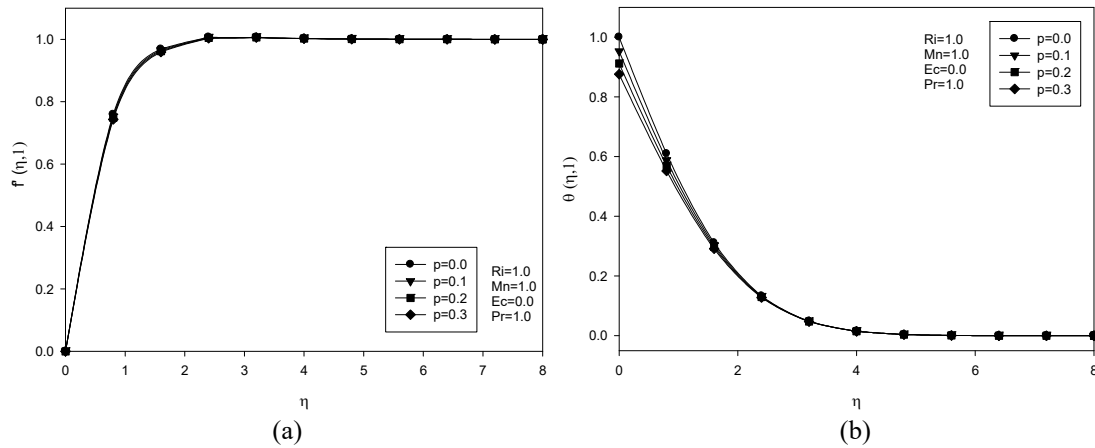


Figure 2. Velocity (a) and temperature (b) for various p

Figure 2 depicts the influence of the parameter p on the velocity and temperature profiles within the thermal boundary layer. The values are obtained for the case of $Ri=Mn=Pr=1.0$ and $Ec=0.0$. As the conjugated heat transfer p increases, the velocity and temperature gradients on the wall decrease. A decrease in plate conductivity (ks) or an increase in fluid conductivity (kf) along with the parameter p increases the temperature difference between the inner and outer surfaces. Solid-fluid temperature decreases due to the constant temperature of the outer surface [19].

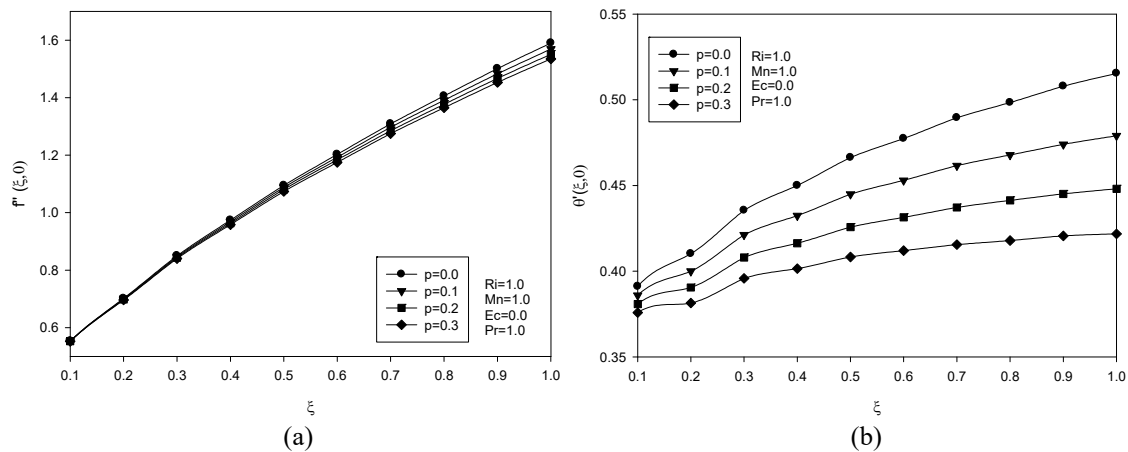


Figure 3. Effects of p on the local skin friction (a) and the local heat transfer (b) parameters

Figure 3 depicts the variations of local skin friction coefficient and heat transfer parameters with p and ξ . An increase in parameter p results in a decrease in the values of local friction coefficient and local heat transfer parameters. Additionally, the increase in fluid temperature on the plate with ξ results in an increase in local friction and heat transfer parameters with ξ . This is attributed to the increased lift force effect due to the rising interface temperature along the flow direction, consequently increasing the surface friction factor [4].

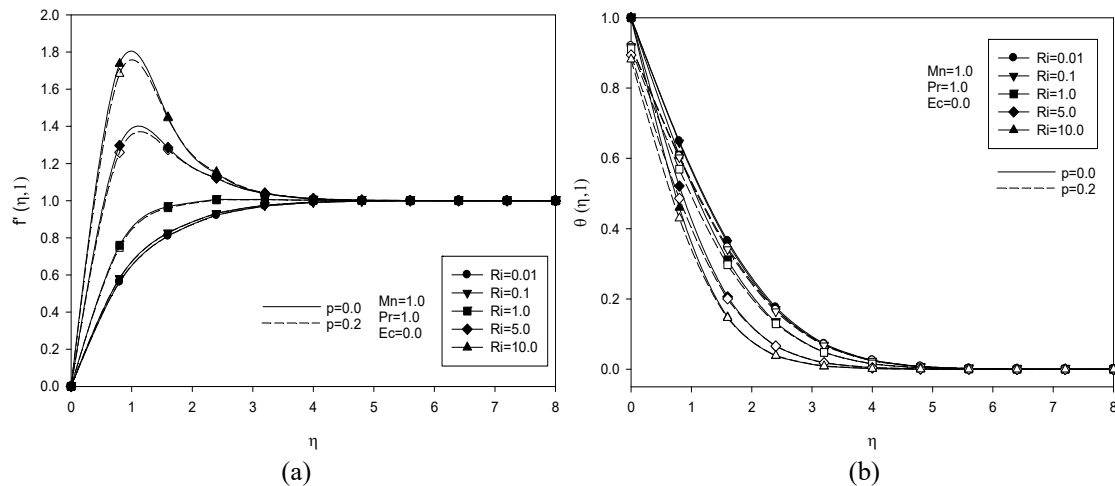


Figure 4. Velocity (a) and temperature (b) profiles for various Ri

Figure 4 represents the effect of different Ri values on velocity and temperature profiles. The values are obtained for $Mn=1.0$, $Ec=0.0$, and $Pr=1.0$. It is investigated for different Ri values for both the isothermal plate ($p=0.0$) and the non-isothermal plate ($p=0.2 > 0$). As Ri increases, lift forces become more effective, enhancing the velocity profile within the boundary layer. However, the temperature profile decreases with an increase in the parameter Ri . This observation holds true for both isothermal and non-isothermal conditions, as depicted in the graphs.

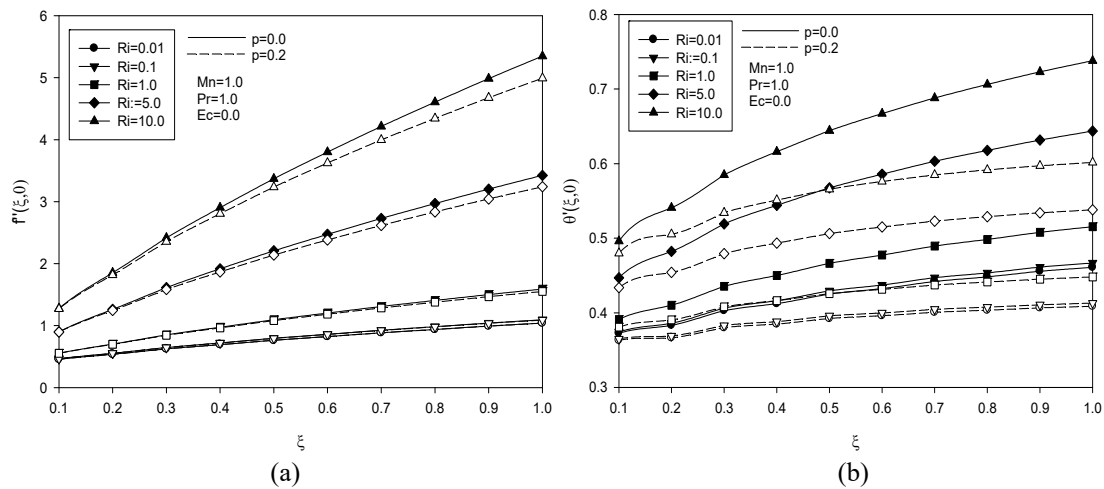


Figure 5. Effects of Ri on the local skin friction (a) and the local heat transfer (b) parameters

In Figure 5, the variations of local friction and local heat transfer parameters along the plate are given for both the isothermal and non-isothermal cases. In Figure 5a, the change in the local friction coefficient with the mixed heat transfer parameter Ri is shown. In both cases, the local friction coefficient for the plate increases with Ri . This is attributed to the increase in lift force effects in mixed heat transfer, leading to accelerated fluid flow and an increase in local friction coefficient. Figure 5b presents the change in the local heat transfer parameter with the mixed heat transfer parameter Ri . An increase in Ri has elevated the local heat transfer parameter for both the isothermal ($p=0.0$) and non-isothermal ($p=0.2$) plates. This is due to the increased lift forces, accelerating fluid velocity, and consequently enhancing the local heat transfer effect [4].

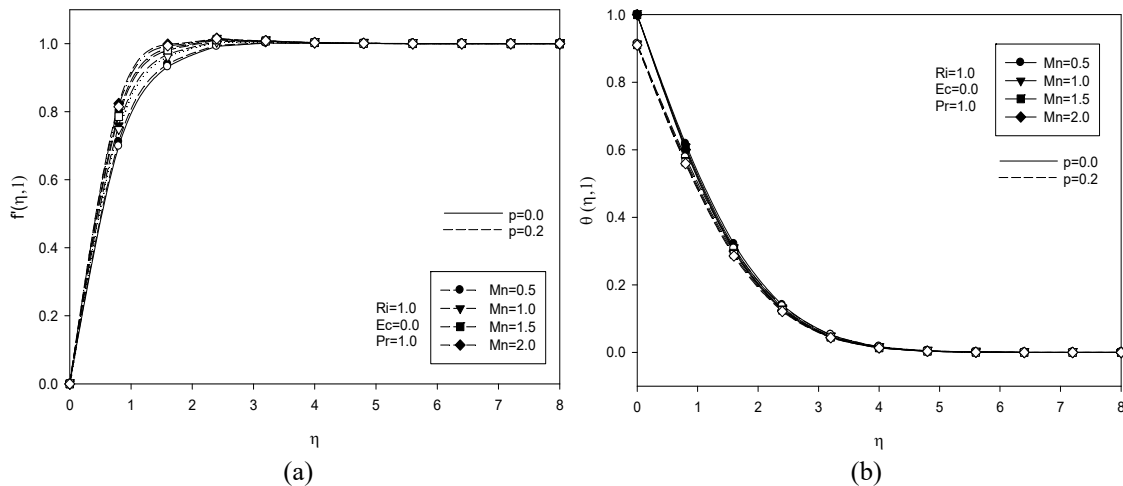


Figure 6. Velocity (a) and temperature (b) profiles for various Mn

Figure 6 illustrates the impact of Mn on the velocity (a) and temperature (b) profiles. The values are obtained for $Ri=Pr=1.0$ and $Ec=0.0$. It is investigated for different Mn values for isothermal and non-isothermal plates.

An increment in Mn enhances the velocity and temperature profiles. The increase in the magnetic field intensifies the flow concentration, and thus, the magnetic force of the medium and the flow resistance caused by the delaying effect of the opposite direction, resisting the flow [9]. As seen in Figure 6 shows that increasing the magnetic field parameter Mn enhances both the velocity and temperature gradients at the wall.

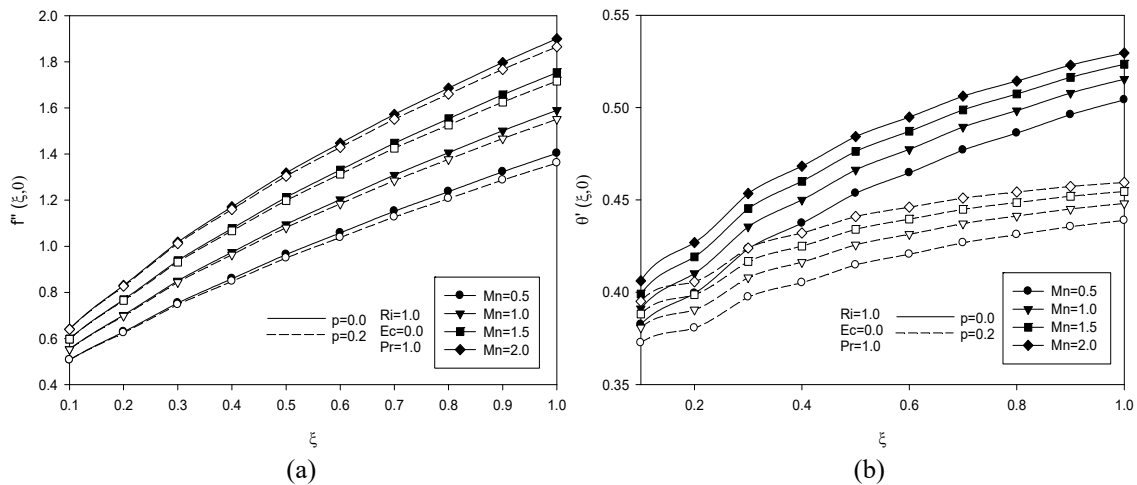


Figure 7. Effects of Mn and p on the local skin friction (a) and the local heat transfer (b) parameters

In Figure 7, the variations of local friction and heat transfer parameters along the interior of the plate are given for both isothermal and non-isothermal plate conditions. An increase in the magnetic field parameter enhances local friction and local heat transfer parameters. The magnetic force is against the flow and reduces the wall shear stress. Increasing the Mn value also reduces the interface temperature [8] and the heat transfer reduces with the decrease of Mn as shown in Figure 7b.

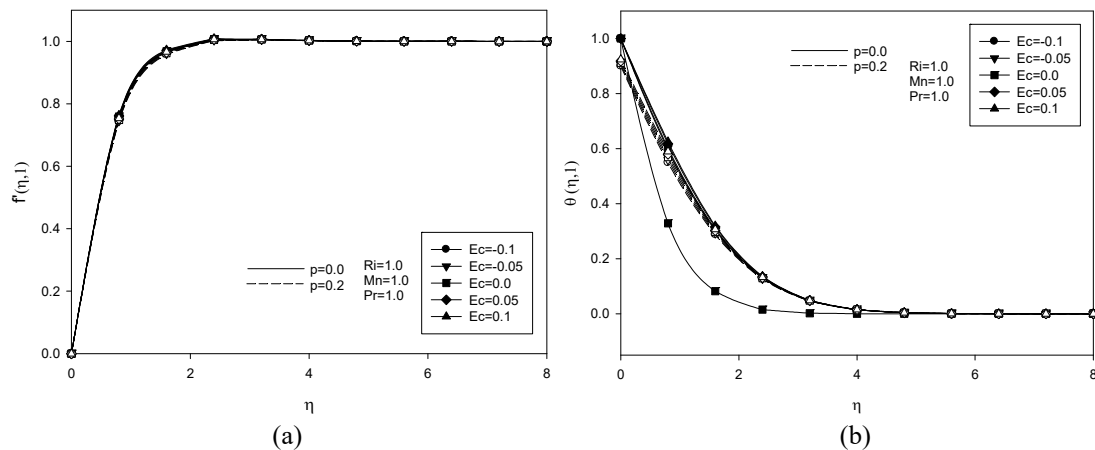


Figure 8. Velocity (a) and temperature (b) for various Ec

The effect of the Eckert number (Ec) on the dimensionless velocity (a) and temperature (b) profiles within the boundary layer is shown in Figure 8. The values are obtained for $Ri=1.0$, $Mn=1.0$, and $Pr = 1.0$. It is investigated for different Ec values for both the isothermal and non-isothermal plates.

An increment in the Eckert number enhances the velocity profile. For a positive value of Ec , there is heat transfer from the plate to the fluid since the plate's temperature exceeds that of the free stream. Viscous dissipation results in heat generation within the fluid, leading to an increased temperature distribution in the flow region. This occurs because heat energy is retained in the liquid due to viscous heating. As the liquid temperature rises, the temperature gradient decreases. As seen in Figure 8b, the impact of Ec on temperature is in the opposite direction.

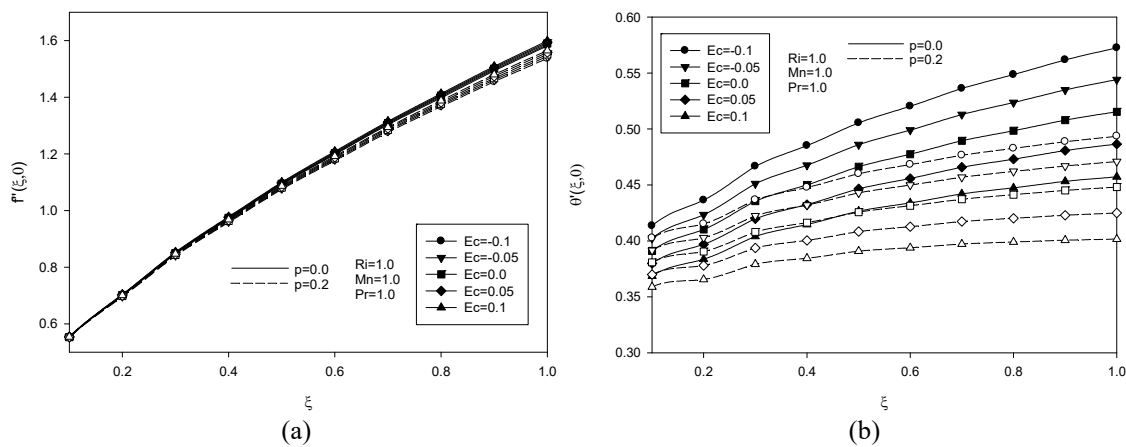


Figure 9. Impact of Ec and p on the local skin friction (a) and the local heat transfer (b) parameters

In Figure 9, the variations of local skin friction and heat transfer parameters along the plate are presented for isothermal and non-isothermal plate conditions.

Viscous dissipation acts as a heat generation source within the fluid. The Eckert number represents an assisting effect for negative values and creates a counter effect on heat transfer for positive values [21]. With the increase in the Eckert number (Ec), local friction increases, while local heat transfer decreases.

5. CORRELATION

Correlations were established by conducting regression analysis using SPSS based on the obtained data. Regression analysis enables modeling the relationship between dependent and independent variables, measuring the magnitude of the relationship between these variables [22].

Regression analysis for heat transfer values was conducted using the SPSS program based on the obtained data. The results of the regression analysis, conducted without squaring the parameters affecting local heat transfer, are presented in Figure 10, and Equation (34) is derived.

$$\theta'(\xi, 0) = 0.349 + 0.137 \xi - 0.199 p + 0.017 Ri + 0.017 Mn - 0.359 Ec \tag{34}$$

In Equation (34), $R^2 = 0.848$ and the standard error = 0.02762 are obtained.

Model Summary						
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics	
					R Square Change	F Change
1	.921 ^a	.848	.846	.02762	.848	386,040

Coefficients ^a						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	.349	.006		55,705	.000
	VAR00001	.137	.005	.616	29,397	.000
	VAR00002	-.199	.014	-.292	-13,940	.000
	VAR00003	.017	.001	.579	27,584	.000
	VAR00004	.017	.005	.071	3,361	.001
	VAR00005	-.359	.037	-.202	-9,632	.000

Figure 10. The SPSS analysis for the local heat transfer parameter

The regression analysis including the squares of parameters influencing local heat transfer is conducted, and Figure 11 presents the result. Equation (35) is obtained through regression analysis using the SPSS program. The correlation coefficients and determination coefficients for local heat transfer are found to be the same program.

$$\theta'(\xi, 0) = 0.314 + 0.301\xi - 0.164\xi^2 - 0.248p + 0.223p^2 + 0.028Ri - 0.001Ri^2 + 0.019Mn - 0.001Mn^2 - 0.359Ec + 0.161Ec^2 - 0.012Ec^3 \tag{35}$$

In Equation (35), an R^2 value of 0.899 and a standard error of 0.02273 are obtained.

Model Summary						
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	F Change
1	.948 ^a	.899	.896	.02273	.899	274,518

a. Predictors: (Constant), VAR00011, VAR00010, VAR00002, VAR00003, VAR00007, VAR00005, VAR00006, VAR00008

Coefficients ^a								
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95,0% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	.314	.013		23,606	.000	.288	.340
	VAR00001	.301	.014	1,354	21,117	.000	.273	.329
	VAR00002	-.164	.014	-.766	-11,951	.000	-.191	-.137
	VAR00003	-.248	.052	-.364	-4,817	.000	-.350	-.147
	VAR00004	.223	.231	.073	.965	.335	-.232	.678
	VAR00005	.028	.002	.967	12,532	.000	.024	.033
	VAR00006	-.001	.000	-.396	-5,122	.000	-.002	-.001
	VAR00007	.019	.021	.080	.909	.364	-.022	.059
	VAR00008	-.001	.008	-.011	-.121	.904	-.016	.014
	VAR00009	-.359	.092	-.202	-3,894	.000	-.540	-.177
	VAR00010	.161	.382	.008	.420	.674	-.591	.912
	VAR00011	-.012	10,217	.000	-.001	.999	-20,109	20,085

Figure 11. The SPSS analysis for the local heat transfer parameter with square values

Using the obtained data, regression analysis for local friction values was also conducted in the SPSS program. The regression analysis without squaring the parameters affecting local friction yielded the results presented in Figure 12, and equation (36) was derived.

$$f''(\xi, 0) = -0.140 + 1.465 \xi - 0.124 p + 0.237 Ri + 0.214 Mn + 0.056 Ec \tag{36}$$

In equation (36), the coefficient of determination (R^2) is 0.851, and the standard error is 0.30888.

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	F Change
1	,922 ^a	,851	,848	,30888	,851	394,024

a. Predictors: (Constant), VAR00005, VAR00004, VAR00001, VAR00002, VAR00003

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations	
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial
1	(Constant)	-.140	,070		-2,004	,046		
	VAR00001	1,465	,052	,585	28,131	<,001	,585	,834
	VAR00002	-.124	,160	-.016	-.775	,439	-.030	-.042
	VAR00003	,237	,007	,713	34,256	<,001	,709	,879
	VAR00004	,214	,055	,081	3,885	<,001	,038	,204
	VAR00005	,056	,416	,003	,135	,893	,003	,007

a. Dependent Variable: VAR00006

Figure 12. SPSS analysis for the local skin friction parameter

The result of the regression analysis, based on the obtained data, with square terms affecting the local friction parameter, is presented in Figure 13, and equation (37) is derived.

$$f''(\xi, 0) = -0.307 + 2.130\xi - 0.666\xi^2 - 0.225p + 0.456p^2 + 0.291Ri - 0.005Ri^2 + 0.250Mn - 0.014Mn^2 + 0.057Ec + 0.641Ec^2 - 0.036Ec^3 \tag{37}$$

In equation (37), $R^2=0.858$ and the Standard Error=0.30425 were obtained.

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,926 ^a	,858	,853	,30425

a. Predictors: (Constant), VAR00011, VAR00010, VAR00002, VAR00003, VAR00007, VAR00005, VAR00009, VAR00001, VAR00004, VAR00006, VAR00008

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-.307	,178		-1,724	,086
	VAR00001	2,130	,191	,850	11,173	<,001
	VAR00002	-.666	,184	-.276	-3,625	<,001
	VAR00003	-.225	,690	-.029	-.327	,744
	VAR00004	,456	3,093	,013	,148	,883
	VAR00005	,291	,030	,878	9,587	<,001
	VAR00006	-.005	,003	-.168	-1,835	,067
	VAR00007	,250	,276	,094	,905	,366
	VAR00008	-.014	,103	-.014	-.138	,890
	VAR00009	,057	1,233	,003	,046	,963
	VAR00010	,641	5,111	,003	,126	,900
	VAR00011	-.036	136,749	,000	,000	1,000

a. Dependent Variable: VAR00012

Figure 13. SPSS analysis for the local skin friction parameter with square values

6. ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

In this study, based on the results of numerical analysis, an effective model has been developed for local heat transfer and friction values. Determination coefficient (R^2) and Mean Squared Error (MSE) have been determined for the desired output values. The heat transfer parameter is the output, and p , R_i , M_n , and E_c are the inputs for the ANN application. All data has been appropriately divided into training, testing, and validation sets. Using the same testing, validation, and training data, an ANN model has been developed for different hidden layers and neurons. These models include one hidden layer with 3, 6, 9, 12, and 15 neurons and two hidden layers with 3, 6, 9, 12, and 15 neurons. Table 2 presents the R^2 and MSE values for different numbers of neurons and hidden layers. The performance of ANN models has been compared. As shown in the table, the highest R^2 and the lowest MSE values are achieved with one hidden layer and nine neurons. This model has been selected as the best-performing one, with an R^2 value of 0.9077607 and an MSE value of 0.0003101. Moreover, the determination coefficient R^2 is expected to be very close to 1.

Table 2. Different hidden layers and neuron numbers for R^2 and MSE values (Local heat transfer)

Hidden layer	Neurons	R^2	MSE
1	3	0.8169551	0.0006153
1	6	0.8559505	0.0004843
1	9	0.9077607	0.0003101
1	12	0.8537413	0.0004917
1	15	0.8412335	0.0005337
2	3	0.8108080	0.0006360
2	6	0.8215294	0.0006000
2	9	0.8275015	0.0005799
2	12	0.8272322	0.0005808
2	15	0.8216942	0.0005994

The values obtained from the ANN analyses provide very accurate results in numerical terms. The best ANN models for heat transfer are shown in Figure. As the iteration number increases, the loss and MSE values decrease. Figures 14 and 15 show the graphs of the best ANN model for heat transfer. The selected test data and predicted values from the dataset are very close to each other.

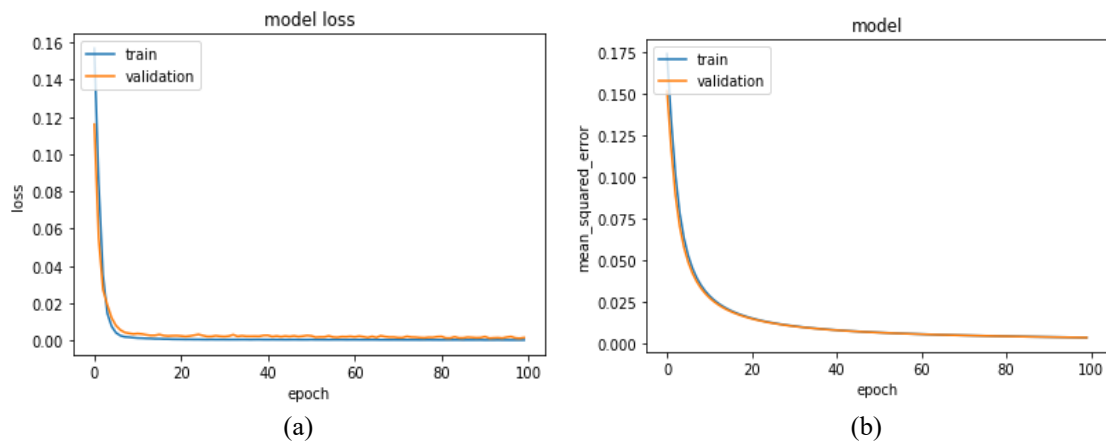


Figure 14. Artificial neural network model (Local heat transfer)

Artificial Neural Network (ANN) is utilized to establish an effective model for the local skin friction parameter based on the results of numerical analyses. The determination coefficient (R^2) and mean square error values have been determined for the desired output parameters.

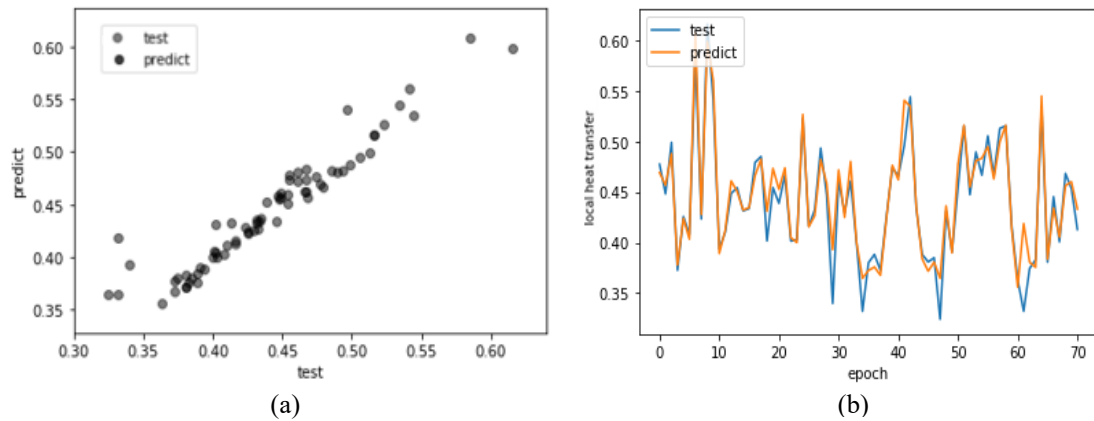


Figure 15. Test and predicted values for local heat transfer in ANN

The input parameters for the ANN application are the local friction parameter, p , R_i , M_n , and E_c . All data were appropriately divided into training, validation, and test sets. A single hidden layer was created using different neuron numbers based on the same test, validation, and training data. These models encompassed one hidden layer with 3, 6, 9, 12, 15, 18, 24, and 27 neurons. Table 3 presents R^2 and MSE values for various neuron numbers. The performance of the ANN models is compared and the best model is selected based on the highest R^2 and lowest MSE values, which were achieved with one hidden layer and fifteen neurons. The R^2 value is 0.9470261, and the MSE value is 0.0250369.

Table 3. Different neuron numbers for R^2 and MSE values (Local skin friction coefficient)

Hidden layer	Neurons	R^2	MSE
1	3	0.8372382	0.0769258
1	6	0.8486468	0.0715337
1	9	0.9206943	0.0374821
1	12	0.9323556	0.0319706
1	15	0.9470261	0.0250369
1	18	0.9386864	0.0289785
1	24	0.9241009	0.0358720
1	27	0.9243456	0.0357564

In Figures 16 and 17, the graphical representations of the optimal ANN model for local friction are presented. The test data selected from the dataset and the corresponding predicted values exhibit a remarkable alignment, affirming the excellent concordance between the ANN model and the numerical results.

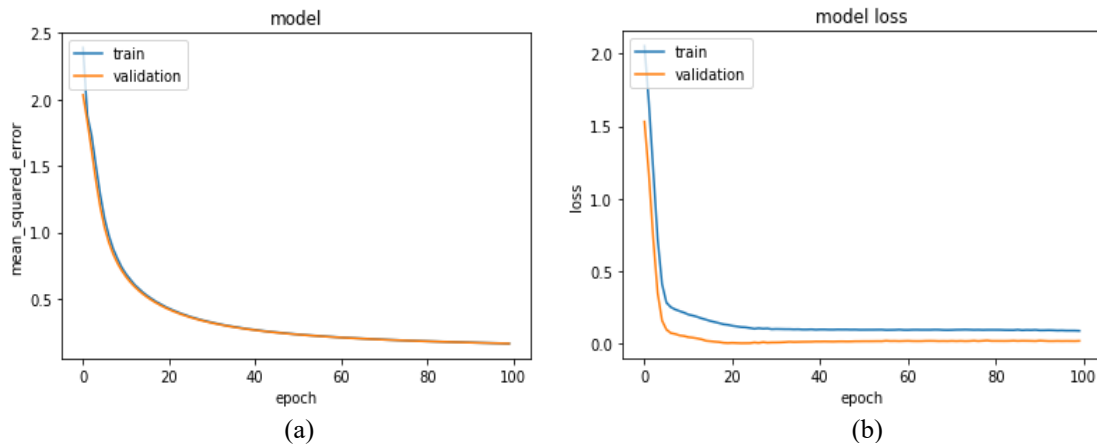


Figure 16. Artificial neural network model (Local skin friction)

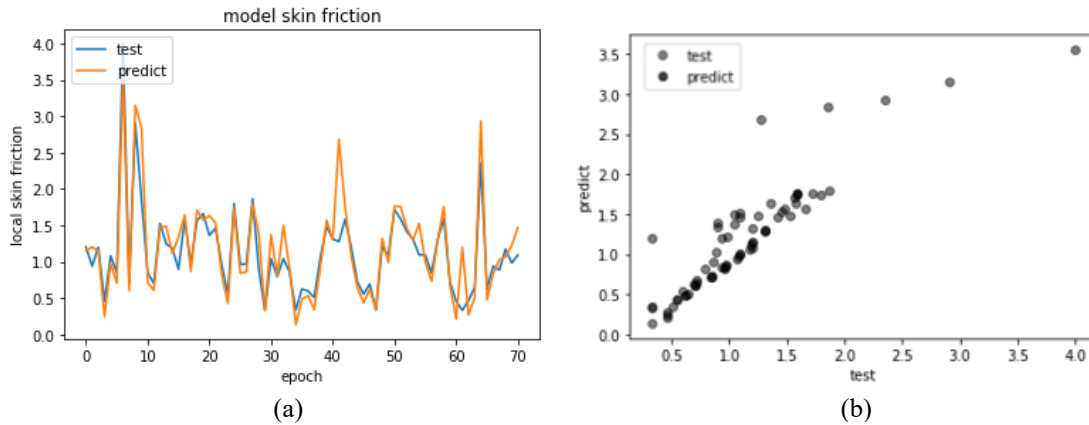


Figure 17. Test and predicted values for local skin friction in ANN

The differences in MSE values between the ANN models and the figures may be due to differences in data sets, where training or validation data show lower MSE compared to test data. Additionally, variations in data distribution or evaluation conditions might explain the differences observed.

7. CONCLUSION

This investigation focuses on the flow over a vertical plate. The equations (Navier-Stoke and energy) have been converted into boundary layer equations through the utilization of the similarity method. These boundary layer equations have been solved numerically by employing the Keller Box technique. Ri , p , Mn parameters, and Ec number have been investigated for their effects on the velocity and temperature distributions in the boundary layer and local skin friction and heat transfer parameters. The findings revealed that an increase in the parameter p led to a reduction in both local skin friction and local heat transfer. Meanwhile, an escalation in the parameters Ri and Mn resulted in an augmentation of the effects on local friction and local heat transfer. Moreover, as the Ec increased, it intensified the influence on local friction while diminishing its effect on local heat transfer. Furthermore, Using the output data of the numerical method, a Neural Network (ANN) model compatible with the data was developed and optimized for both local skin friction and heat transfer. R^2 and MSE values were calculated to evaluate the performance of the model. The models with the highest R^2 and lowest MSE were chosen for local heat transfer and skin friction. After the parameter optimization, it was shown that the most appropriate model for local heat transfer has one hidden layer and nine neurons with 0.9077607 R^2 and 0.0003101 MSE values. For local skin friction, the most suitable model has one hidden layer and fifteen neurons with R^2 value of 0.9470261 and an MSE value of 0.0250369.

For future research, we plan to extend this study to different geometries and flow conditions to validate the robustness of the ANN models further. Additionally, the impact of varying magnetic fields, fluid properties, and more complex boundary conditions will be considered to enhance the applicability of the proposed models in real-world engineering problems. The integration of advanced machine learning techniques beyond ANN could also be explored to improve prediction accuracy and computational efficiency.

8. REFERENCES

1. Baytas, A.C., 2006. Transport in porous media. *ITU Journal Science*, 4(1), 3-13.
2. Miyamoto, M., Sumikawa, J., Akiyohi, T., Nakamura, T., 1980. Effects of axial heat conduction in a vertical flat plate on free convection heat transfer. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 23, 1545-1553.
3. Char, M.I., Chen, C.K., Cleaver, J.W., 1990. Conjugate forced convection heat transfer from a continuous, moving flat sheet. *Int. J. Heat Fluid Fl.*, 11, 257-261.
4. Chang, C.L., 2008. Numerical simulation for natural convection of micropolar fluids flow along slender hollow circular cylinder with wall conduction effect. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 13(3), 624-636.

5. Mamun, A.A., Chowdhury, Z.R., Azim, M.A., Maleque, M.A., 2008. Conjugate heat transfer for a vertical flat plate with heat generation effect. *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 13(2), 213-223.
6. Afify, A.A., 2007. Effects of temperature-dependent viscosity with sores and dufournumbers on non-darcymhd free convective heat and mass transfer pasta vertical surface embedded in a porous medium. *Transport in Porous Media*, 66(3), 391-401.
7. Das, K., 2012. Impact of thermal radiation on mhd slipflow over a flat plate withvariable fluid properties. *Heat and Mass Transfer*, 48(5), 767-778.
8. Mamun, A.A., Chowdhury, Z.R., Azim, M.A., Molla, M.M., 2008. MHD-conjugate heat transfer analysis for a vertical flat plate in presence of viscous dissipation and heat generation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(10), 1275-1280.
9. Chamkha, A.J., Ben-Nakhi, A., 2008. Mhd mixedconvection-radiation interactionalong a permeable surface immersed in a porous medium in the presence ofsores and dufour's effects. *Heat and Mass Transfer*, 44(7), 845.
10. Oztemel, E., 2020. Yapay sinir ağları. Papatya Yayıncılık, İstanbul, 232.
11. Abad, J., Mohebbi, N., Alizadeh, R., Fattahi, A., Doranehgard, M.H., Alhajri, E., Karimi, N., 2020. Analysis of transport processes in a reacting flow of hybrid nanofluid around a bluff-bodyembedded in porous media using artificial neural network and particle swarm optimization. *Journal of Molecular Liquids*, 313.
12. Kamble, L.V., Pangavhane, D.R., Singh, T.P., 2014. Heat transfer studies using artificial neural network-a review. *International Energy Journal*, 14(1), 25-42.
13. Chamkha, A.J., Issa, C., Khanafer, K., 2002. Natural convection from an inclined plate embedded in a variable porosity porous medium due to solar radiation. *International Journal of Thermal Sciences*, 41(1), 73-81.
14. Lauriat, G., Ghafir, R., 2000. Forced convective heat transfer in porous media. *Handbook of Porous Media*, New York, 201-204.
15. Kaya, A., Aydın, O., 2009. The effect of radiation on forced convection flow around a wedge. *Turkish Soc Thermal Sciences Technology*, 29(1), 1-6.
16. Kaya, A., Aydın, O., 2014. Effects of buoyancy and conjugate heat transfer flowover on a vertical plate embedded in a porous media. *Journal of Thermal Scienceand Technology*, 34(1), 35-41.
17. Cebeci, T., 2002. Convective heat transfer. Springer, 357.
18. Lloyd, J.R., Sparrow, M., 1970. Combined force and free convection flow on vertical surfaces. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 13, 434-438.
19. Chang, C.L., 2006. Numerical simulation of micropolar fluid flow along a flat plate with wall conduction and buoyancy effects, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 39, 1132-1140.
20. El-Kabeir, S.M.M., El-Hakiem, M.A., Rashad, A.M., 2008. Group method analysis of combined heat and mass transfer by MHD non-Darcy non-Newtonian natural convection adjacent to horizontal cylinder in a saturated porous medium. *Applied Mathematical Modelling*, 32(11), 2378-2395.
21. Aydın, O., Kaya, A., 2008. Non-Darcian forced convection flow of viscous dissipating fluid over a flat plate embedded in a porous medium. *Transport in Porous Media*, 73(2), 173-186.
22. Kilic, S., 2013. Linear regression analysis. *Journal of Mood Disorders*, 3(2), 90-92.

45° Eğimli İkincil Jetlere Sahip Sınırlandırılmamış ve Sınırlandırılmış Çarpan Jet Dizilerinde Isı Transferi Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi

Haluk KELEŞ^{1,a}, Yücel ÖZMEN^{2,b}

¹Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Artvin

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon

^aORCID: 0000-0002-6562-8902; ^bORCID: 0000-0003-1127-1060

Makale Bilgileri

Geliş : 10.05.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605970

Sorumlu Yazar

Haluk KELEŞ

hkeles@artvin.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Çarpan dizi jet

Eğimli ikincil jet

Sınırlandırılmamış jet

Sınırlandırılmış jet

Nusselt sayısı dağılımı

Atf şekli: KELEŞ, H., ÖZMEN, Y., (2024). 45° Eğimli İkincil Jetlere Sahip Sınırlandırılmamış ve Sınırlandırılmış Çarpan Jet Dizilerinde Isı Transferi Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 923-937.

ÖZ

Bu çalışmada, 45° eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış çarpan dizi jet akışlarında çarpma yüzeyindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış jet akış alanlarında, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerleri ve lüle-levha/levhalar arası açıklığın 0,5, 1, 3 ve 6 değerleri için çarpma levhasının orta eksenini boyunca termal kamera ile sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılımlarından, Reynolds sayısının, lüle-levha/levhalar arası açıklığın ve sınırlayıcı levha varlığının çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisi araştırılmıştır. Hem sınırlandırılmamış hem de sınırlandırılmış durumda, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri artan Reynolds sayısı ile artmakta, artan lüle-levha/levhalar arası açıklıkla azalmaktadır. Çarpma levhası üzerinde birincil lüle eksenini doğrultusundaki durma noktasında ve ikincil jetlerin eksenleri doğrultusundaki çarpma levhası konumlarında yerel Nusselt sayısı pik değerler almaktadır. Çarpma levhası üzerinde oluşan pikler, Reynolds sayısı arttıkça daha keskin hale gelmektedir. İkincil jetlerin çarpma levhası üzerinde oluşturdukları piklerin konumları artan lüle-levha/levhalar arası açıklık ile daha büyük $\pm r/D$ değerlerine kaymaktadır. Akış alanlarında sınırlayıcı levhanın varlığı, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerini azaltmaktadır.

Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics in Unconfined and Confined Impinging Jet Arrays with 45° Inclined Secondary Jets

Article Info

Received : 10.05.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605970

Corresponding Author

Haluk KELEŞ

hkeles@artvin.edu.tr

Keywords

Impinging jet array

Inclined secondary jet

Unconfined jet

Confined jet

Nusselt number distribution

How to cite: KELEŞ, H., ÖZMEN, Y., (2024). 45° Eğimli İkincil Jetlere Sahip Sınırlandırılmamış ve Sınırlandırılmış Çarpan Jet Dizilerinde Isı Transferi Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 923-937.

ABSTRACT

In this study, the heat transfer effects at the impingement surface in unconfined and confined impinging array jet flows with 45° inclined secondary jets are experimentally investigated. In the unconfined and confined jet flow fields, temperature distributions were obtained with a thermal camera along the center axis of the impingement plate for 20000 and 30000 values of the Reynolds number and 0,5, 1, 3 and 6 values of the nozzle-to-plate/inter-plate spacing. From the obtained temperature distributions, the effect of Reynolds number, nozzle-to-plate/inter-plate spacing and the presence of a confinement plate on the Nusselt distributions on the impingement plate were investigated. In both unconfined and confined cases, the Nusselt values on the impingement plate increase with increasing Reynolds number and decrease with increasing nozzle-to-plate/inter-plate spacing. At the stagnation point on the impingement plate in the direction of the axis of the primary nozzle and at the position of the impingement plate in the direction of the axes of the secondary jets, the local Nusselt number takes peak values. The peaks on the impingement plate become sharper as the Reynolds number increases. The positions of the peaks formed by the secondary jets on the impingement plate shift to larger $\pm r/D$ values with increasing nozzle-to-plate/inter-plate spacing. The presence of a confinement plate in the flow fields reduces the Nusselt values on the impingement plate.

1. GİRİŞ

Çarpan jet akışları, ısıtma ve soğutma uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektronik devrelerde bulunan transistörler ve çipler gibi yoğun ısı üretimi olan parçaların ve gaz türbinlerinin soğutulması, uçak gibi çeşitli hava araçlarının yüzeylerinde oluşan buzlanmanın giderilmesi ve tekstil, kağıt ve gıda endüstrisine yönelik uygulamalar gibi birçok alanda jet akışlarından yararlanılmaktadır. Literatürde çarpan tekli jetler konusunda çok sayıda çalışma mevcuttur. Çarpan tekli jet akışı ile bir yüzeyin soğutması uygulamalarında, yüzeyden transfer edilen ısı miktarının yüzey boyunca azalarak farklı sıcaklık bölgelerinin oluşması nedeniyle homojen bir yüzey soğutması yapılamamaktadır. Transistör, çip ve benzeri elektronik elemanların çalışma karakteristikleri, yüzeylerindeki sıcaklık değişimlerinden ciddi oranda etkilenmektedir. Elektronik elemanların, istenen performansta görevlerini yerine getirmeleri, yüzeylerindeki sıcaklık artışı önleyecek etkin ve yüzeylerin tamamına yansiyacak homojen bir soğutma ile mümkün olmaktadır. Bu nedenle çarpan çoklu jetler konusunda yapılan yeni çalışmalarla çarpma yüzeyinde homojen bir soğutma etkisi oluşturmak amaçlanmaktadır. Son yıllarda, çarpma yüzeyi üzerinde homojen bir soğutma sağlamak ve yüzey boyunca ısıl kararlılık elde etmek amacıyla birden çok jetin bir yüzeye çarptırıldığı çalışmalar artmaktadır. Literatürde çarpan çoklu jetlere yönelik çalışmaların büyük bir kısmında akış laminer özelliindedir. Türbülanslı çarpan çoklu jetlerle ilgili çalışmalar oldukça az sayıdadır. Bu konudaki çalışmalar daha çok sayısal incelemeler şeklindedir. Tanaka [1], iki boyutlu türbülanslı çarpan ikili jet akışında jetler arasında bir ortam altı basınç bölgesinin oluştuğunu belirtmiştir. Siclari ve arkadaşları [2], çarpan ikili jetleri deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında çarpma bölgelerine odaklanmışlardır. Jetler arası mesafedeki azalmanın ikili jetlerdeki ortalama Nusselt sayılarını artırdığı Mikhail ve arkadaşları [3], tarafından açıklanmıştır. Saad ve arkadaşları [4], sınırlanmış tekli ve çoklu çarpan slot jet akışlarında, akış yapısı ve ısı transferi karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Lüleler arası açıklık oranının 1,5 ve üzerindeki değerlerinde çoklu jetlerin tekli jet karakteristiği sergilediğini belirtmişlerdir. Barata [5], düz bir yüzeye çarpan ikili jette oluşan akış alanını lazer doppler ölçümleri ile incelediği çalışmada, jetlerin etrafında karmaşık girdapların oluştuğunu belirtmiştir. Rady ve Arquis [6], sınırlanmış çarpan çoklu slot jetlerde sınırları levha üzerine yerleştirdikleri kanatçıkların çarpma levhası boyunca ısı transferi performansı üzerine etkisini farklı lüle-levha arası açıklık, jet lüleleri arasındaki uzaklık ve Reynolds sayıları için, deneysel bir çalışma gerçekleştirerek incelemişlerdir. Kanatçıkların karşılık geldiği bölgelerde ısı transferinde iyileşmeler olduğunu belirtmişlerdir. Dong ve arkadaşları [7], yatay bir yüzeye çarpan ikili laminer hava alevi jetinde ısı transferi karakteristiklerini ve yüzey basınç dağılımlarını deneysel olarak incelemiştir. Abdel-Fattah [8], çarpan ikiz dairesel jet akışında, çarpma yüzeyinde bir subatmosferik basınç bölgesinin meydana geldiğini ve lüle ile levha arası açıklığın artmasıyla subatmosferik basınç bölgesinin etkisinin azaldığını belirtmiştir. Özmen [9], düzgün bir yüzeye dik bir şekilde çarpan sınırlanmış ikiz hava jetinde akış alanlarının yapılarını deneysel olarak inceleyerek, çarpma ve sınırlayıcı yüzeylerde oluşan subatmosferik bölgelerini belirlemiş ve bu yüzeyler üzerindeki basınç dağılımlarının lüle ve levha arası açıklık değerleri ve lüleler arası mesafe değerlerinden ciddi oranda etkilendiğini saptamıştır. Koched ve arkadaşları [10], çarpan çoklu slot jet akışında duvar jeti bölgesindeki girdap yapılarını incelemişlerdir. Bir jet dizisinin eğimli yüzeylere çarptığı bir akış düzeninde, hedef çarpma yüzeyi üzerindeki ısı transferi karakter ve performansını gerçekleştirdikleri deneysel bir çalışma ile inceleyen Al Mubarek ve arkadaşları [11], ortalama yerel Nusselt sayısı dağılımlarının Reynolds sayısındaki artış ile birlikte doğru orantılı bir şekilde artış profili sergilediğini belirtmişlerdir. Buchlin [12], çarpan dizi jet akışını incelediği çalışmada, lüle-levha arası ve lüleler arası açıklıkların jet karakteristikleri üzerinde doğrudan etkisi olduğunu belirtmiştir. Attalla ve Specht [13], düz bir yüzeye çarpan çoklu jet sisteminde çarpma yüzeyindeki taşınım ile ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Çoklu jet uygulamasının, tekli jete göre yerel ve ortalama ısı transferini iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Maddox ve arkadaşları [14], eğimli levhalarla sınırlanmış çarpan çoklu su jetinde ısı transferi etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı sınırlayıcı levha eğim açılarının incelendiği çalışmada en etkili soğutma performansının 5° eğimli sınırlayıcı levha durumunda olduğunu belirtmişlerdir. Polat ve arkadaşları [15], çarpan jet akışlarındaki ısı transferi üzerine hem deneysel hem de sayısal çalışmalardan oluşan kapsamlı bir literatür araştırması gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çalışmalarda kullanılan türbülans modellerinden düşük Reynolds sayılı k-ε türbülans modellerinin Standard k-ε türbülans modeline göre durma noktasındaki ısı transferini daha doğru tahmin ettiğini vurgulamışlardır. Özmen ve İpek [16], çoklu slot jetlerin düz bir yüzeye çarpması ile oluşan jet akışında akış karakteristikleri ve ısı transferi performansını hem deneysel hem de sayısal olarak araştırmışlardır. Hedef çarpma levhası yüzeyi boyunca oluşan ortam altı basınç bölgeleri ile Nusselt sayısı dağılımlarındaki ikincil pikler arasında önemli

bir korelasyon olduğunu belirtmişlerdir. Çalışkan ve arkadaşları [17], jet geometrisinin akış ve ısı aktarım özellikleri üzerindeki etkisini, eliptik ve dikdörtgen çarpan jet dizileri için deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Eliptik jetlerin, dikdörtgen jetlerden daha yüksek ısı transfer katsayısına ulaştığını ifade etmişlerdir. Tepe [18], sınırlandırılmış çarpan dairesel çoklu jet akışında, lüle çıkış konumlarının sınırlandırıcı levhadan uzaklaştırılarak akış doğrultusunda ilerletilmesi ile sağlanan akış alanlarında çarpma levhası üzerindeki akış ve ısı transferi karakteristiklerini deneysel ve sayısal bir çalışma da gerçekleştirerek incelemiştir. Sıvı kristal tekniği ve ticari bir yazılım kullanılarak gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalarda, jet çıkış konumunun çarpma levhasına yaklaşmasının ısı transfer oranını artırdığı belirtilmiştir.

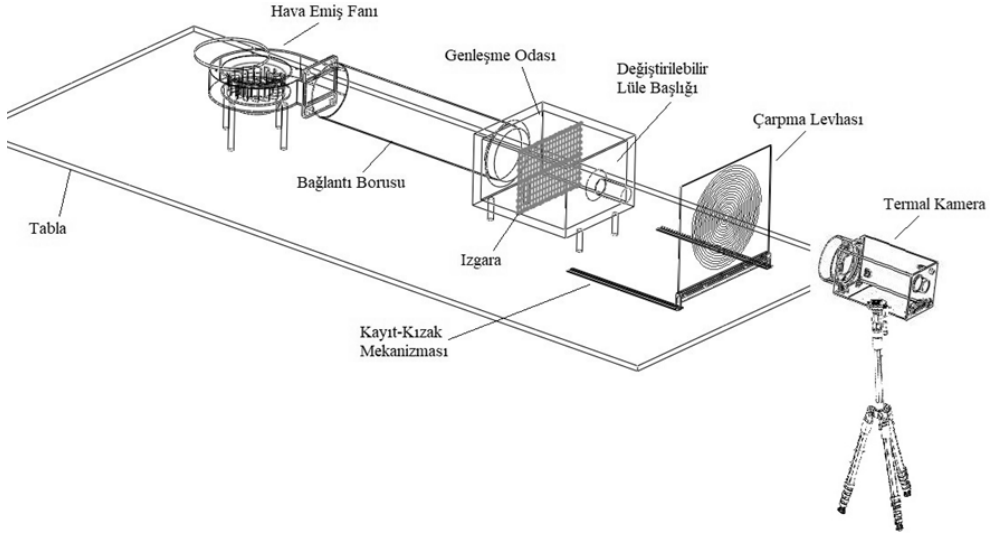
San ve Chen [19] ısıtılmış bir yüzeye çarpan ve beş dairesel hava jetinden oluşan bir dizi jet akışını incelemişlerdir. Reynolds sayısının 20000 değeri için, jetler arası açıklık, jet çapı ve lüle-levha arası açıklığın ısı transferi karakteristikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte jetler arası etkileşimin azaldığını belirtmişlerdir. Guoneng ve arkadaşları [20], düz bir plakaya çarpan dizi jet akışını deneysel olarak inceledikleri çalışmalarında, jetler ile plaka arasındaki açıklık arttığında, ısı transferi performansında keskin bir düşüş olduğunu belirtmişlerdir. Godi ve arkadaşları [21] düz bir plakaya çarpan dizi jet akışını sayısal olarak inceledikleri çalışmalarında, jetler arasındaki açıklık arttıkça, jetlerin birbirleri üzerindeki etkilerinin azaldığını belirtmişlerdir.

Talapati ve arkadaşları [22] jet eğim açısının yerel ısı transferi üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Jet eğim açısının azalmasıyla birlikte Nusselt dağılımındaki asimetrinin arttığını ifade etmişlerdir. Yalçinkaya ve arkadaşları [23], kanatçık kullanarak pürüzlendirilmiş kavisli bir yüzeye çarpan dizi jet akışında, farklı kanatçık düzenlemelerinin konvektif ısı transferi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kanatçık kullanımının yerel ve alan ortalamalı Nusselt sayılarında önemli artışlara yol açtığını ortaya koymuşlardır. Baz ve arkadaşları [24], dikdörtgen bir kanala monte edilmiş ayrı çıkıntılı ısı kaynaklarının farklı eğim açılara sahip ikili hava jetleri kullanılarak soğutulmasına yönelik gerçekleştirdikleri çalışmalarında, en yüksek ortalama Nusselt değerinin jet eğim açısının 10° olduğu durumda oluştuğunu belirtmişlerdir.

Elektronik elemanların, istenen performansta görevlerini yerine getirmeleri, yüzeylerindeki sıcaklık artışını önleyecek etkin ve yüzeylerin tamamına yansıyacak homojen bir soğutma ile mümkün olmaktadır. Bu durum, çarpan jetlerle çarpma yüzeyi üzerinde homojen bir soğutmayı amaçlayan yeni çalışmalara olan ihtiyacı göstermektedir. Bu nedenle mevcut çalışmada; çarpma yüzeyi üzerinde homojen bir soğutmayı gerçekleştirmek için, sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış açılı dizi jet uygulamalarıyla ısı transferinin iyileştirilmesi ve yüzey boyunca homojen bir ısı transferinin sağlanması amaçlanmaktadır. Bu amaç için, 45° eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış çarpan dizi jet akışlarında çarpma yüzeyindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış jet akış alanlarında, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerleri ve lüle-levha/levhalar arası açıklığın 0,5, 1, 3 ve 6 değerleri için çarpma levhasının orta eksenli boyunca termal kamera ile sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılımlarından, Reynolds sayısının, lüle-levha/levhalar arası açıklığın ve sınırlayıcı levha varlığının çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisi araştırılmıştır. Çalışmada eğimli ikincil jetlerin kullanılması çalışmanın yenilikçi yönünü ve özgünlüğünü oluşturmaktadır.

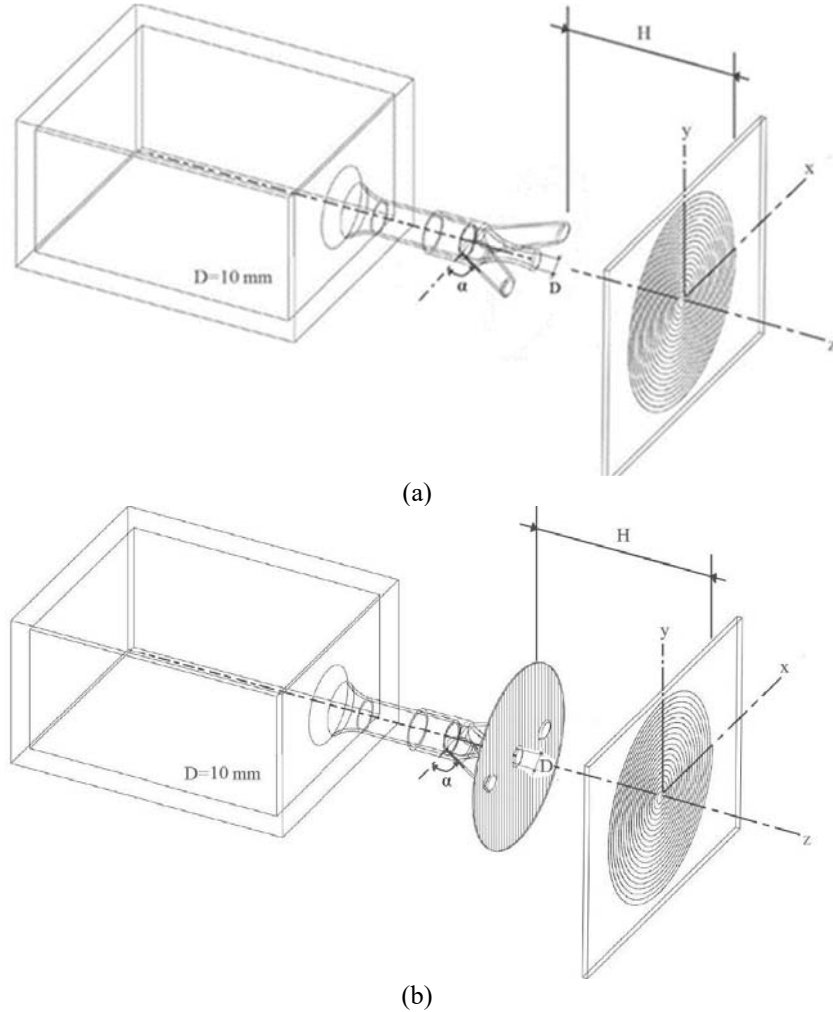
2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmış çarpan dizi jet akışında çarpma levhası üzeri boyunca ısı transferi etkilerinin incelenmesi gayesiyle yatay eksenli çarpan jet akış düzeneği tasarlanmıştır. Şekil 1'de şematik olarak gösterilen deneysel düzenekte, bir emiş fanı tarafından çekilen çevre ortamın havası yatay bir bağlantı borusu aracılığıyla genişleme odasına yönlendirilmektedir. Genişleme odası çıkışına yerleştirilmiş değiştirilebilir lüle başlığına takılan eklenti ile elde edilen eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmış çarpan dizi jet akış alanında, lülelerden çıkan yatay hava jetleri, Joule etkisi ile önceden ısıtılan hedef çarpma levhasına çarptırılmaktadır. Düşey konumda bulunan ısıtıcı çarpma levhası, kayıt-kızak mekanizması ile yatay doğrultuda hareket kabiliyetini kazanmıştır. Bu mekanizma ile lüle ve levha arası mesafe istenilen değerde ayarlanabilmektedir. Fan girişindeki kapak açıklığı ile farklı akış debileri ayarlanabilmektedir. Yüzey sıcaklık dağılımlarının ölçümü, PCB levhanın arka tarafında, levha yüzeyine dik doğrultuda konumlandırılmış bir tripod üzerine kurulu termal kamera ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Çarpan jet dizisi akış düzeneğinin şematik görüntüsü

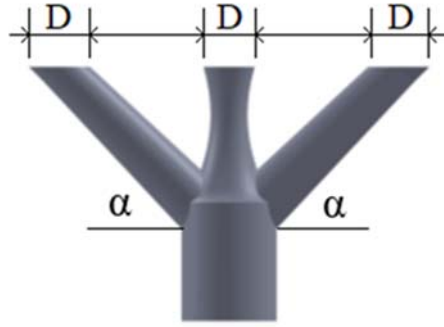
Yatay eksenli çarpan jet akış düzeneğindeki değiştirilebilir lüle başlığına takılan eklentilerle ile oluşturulmuş eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış çarpan dizi jet akış sistemleri Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. Eğimli ikincil jetlere sahip çarpan dizi jet akış sistemleri
(a) Sınırlandırılmamış jet (b) Sınırlandırılmış jet

$\alpha=45^\circ$ eğim açısına sahip ikincil jetlerle birlikte özdeş üç lüleden oluşan çarpan dizi jet akışlarında lüle çapları $D=10$ mm olarak gerçekleştirilmiştir. Lülelerden çıkan hava jetleri, sınırlandırıcı levha uçlarından belirli bir H değeri kadar açıklıkta konumlandırılan ve birincil jet eksenine dik doğrultuda yerleştirilmiş önceden Joule etkisi ile ısıtılmış düz levhalara çarpmaktadır. Kalınlığı 1,5 mm olan hedef çarpma levhasının dairesel ısıtıcı yüzeyinde, tekdüze sıcaklık dağılımının sağlanması maksadıyla baskılı devre kartı (PCB) tekniği ile 1 mm genişliğinde ve 40 μm kalınlığında bakır şeritlerle dairesel bir elektrik devresi oluşturulmuştur. $300 \times 400 \text{mm}^2$ dikdörtgen yüzey alanına sahip levhada, dairesel jet akışı ile uyumluluk dikkate alınarak 180mm'lik çapta dairesel form ısıtıcı yüzeyi oluşturulmuştur. Bu ısıtıcı çarpma levhasının arka yüzeyi mat siyah renge spreyci boya ile boyanmıştır. Yatay eksenli jet düzeneğindeki hedef PCB çarpma levhası üzerine ayarlanabilir varyak kullanılarak 20,3 volt ve 2,01 amper elektrik akımı uygulanmış ve $1603,5 \text{ W/m}^2$ düzeyinde sabit ısı akışı oluşturulmuştur.

Deney düzeneğinde bulunan $D=20$ mm çapındaki değiştirilebilir lüle başlığına takılan ve eğimli ikincil jetlere sahip çarpan sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış dizi jet akış alanlarını oluşturan eklenti Şekil 3'te görülmektedir. Üç boyutlu yazıcıda üretilen dizi jet eklentisi, $\alpha = 45^\circ$ eğimli ikincil lülelerle birlikte çapları birbirine eşit ve $D=10$ mm olan üç dairesel kesitli lüleden oluşmaktadır. Pitot tüpü ile ölçülen ve özdeş üç lüle için aynı olan çıkış hızları Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerleri için sırasıyla 31 m/s ve 46,5 m/s olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Dizi jet eklentisinin şematik görünümü

Çarpan dizi jet akışı durumlarında, hedef levhaya çarpan ortam hava sıcaklığındaki jetin, levhadan gerçekleşen ısı transferi, önceden ısıtılan levhanın arka yüzeyine dik doğrultuda konumlandırılmış olan termal kamera ile sıcaklık dağılımı ölçümleri şeklinde yapılarak incelenmiştir. -40°C ila $+500^\circ\text{C}$ aralığında ölçüm yapabilen, $0,08^\circ\text{C}$ sıcaklık hassasiyetine ve QVGA (320×240) çözünürlüğe sahip FLIR A20 marka termal kamera ile yüzey sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık değerleri, ThermoCAM yazılımı kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Çarpma levhasının her iki yüzeyine yerleştirilen T tipi termoelemanlar ile termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerlerinin doğrulaması yapılmıştır. Termoelemanla ölçülen levhanın gerçek sıcaklığı ve bilgisayarda okunan levha sıcaklığı arasındaki karşılaştırmayla, termal kameranın kalibrasyon eğrisi çıkarılmış, ölçüm sonuçları doğrulanmıştır. Bu yöntem ile çarpma yüzeyindeki sıcaklığın arka yüzeye eşit olduğu kabulü yapılmıştır. Çarpma yüzeyine yerleştirilen termoeleman tarafından ölçülen sıcaklık değeri, aynı nokta için termal kamera tarafından ölçülen sıcaklık değeri ile karşılaştırılarak yüzeyin emisivite değeri (ϵ) 0,98 olarak belirlenmiştir. Çarpma levhası yüzeyindeki sıcaklık değerleri, yerel sıcaklıkların zaman içinde değişmediği ve akışın sürekli bir duruma ulaştığı süre boyunca kaydedilmiştir.

Çarpan jet akışlarında Reynolds sayısı, lüle çıkışındaki akış hızına ve lüle çapına göre belirlenmektedir. U_o , özdeş lüleler çıkışındaki hava jeti hızını ifade etmekte olup, bununla ilişkilendirilen Reynolds sayısı aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır (Eşitlik 1 ve Eşitlik 2).

$$U_o = \sqrt{2\Delta P/\rho} \quad (1)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho U_o D}{\mu} \quad (2)$$

Denklemlerde, basınç farkı ΔP , akışkan yoğunluğu ρ , dinamik viskozite μ ile gösterilmekte olup, lüle çapı ise D , ile ifade edilmiştir.

Isı transferi etkileri, çarpma jet akışlarında çarpma levhaları üzerindeki ısı taşınım katsayısı (h) ve boyutsuz Nusselt sayısı (Nu) denklemleri ile araştırılır (Eşitlik 3 ve Eşitlik 4).

$$h = Q_{\text{taşınım}}/A_w(T_w - T_j) \quad (3)$$

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (4)$$

Burada taşınım ile ısı miktarı $Q_{\text{taşınım}}$, levhanın ısıtıcı yüzey alanı A_w , levhanın jete maruz kalan tarafındaki yüzey sıcaklığı T_w , ve jet çıkış sıcaklığı ise T_j ile ifade edilmektedir. Nusselt denkleminde, havanın ısı iletim katsayısı k ile tanımlanmıştır. Joule etkisi ile üretilen toplam ısı akısı q''_{toplam} 'dan ısı kayıplarının çıkarılması ile $q''_{\text{taşınım}}$ hesaplanmıştır. Enerji dengesi ile çarpma levhası yüzeyinden olan ısı transferi (Eşitlik 5),

$$q''_{\text{taşınım}} = q''_{\text{toplam}} - q''_{\text{iletim}} - q''_{\text{ışınım}} - q''_{\text{doğaltaşınım}} \quad (5)$$

ifadesi ile hesaplanabilmektedir. İfadeye göre, burada q''_{toplam} , toplam ısı akısı miktarını, q''_{iletim} , $q''_{\text{ışınım}}$ ve $q''_{\text{doğaltaşınım}}$ ise sırası ile çarpma yüzeyinden iletimle, ışımla ve doğal taşınım ile kaybedilen ısıyı temsil eder. Epoksi levhaya uygulanan toplam güç, ayarlı varyak tarafından sağlanan gerilim ve levha direnç değerleri kullanılarak hesaplanır ve aşağıdaki Eşitlik 6 ile ifade edilir.

$$Q_{\text{toplam}} = IV = V^2/R \quad (6)$$

Isıl kayıplar, levhanın jet tarafından etkilenmeyen yüzeyi boyunca ışımla, iletim ve doğal taşınım etkilerine bağlıdır. Çarpma levhası üzerindeki radyal yönde iletim ile oluşan ısı transferi, radyal yönde mesafenin fazla olması ve sıcaklık gradyanının az olması sebebiyle dikkate alınmamıştır. Levhanın jete maruz kalan tarafındaki ışımla kayıpları ise bakırın düşük emisivite değeri sebebiyle ihmal edilmiştir. Işımla, iletim ve doğal taşınım nedeniyle oluşan toplam kayıplar ısı akısının %2-8'i düzeyinde olmaktadır [25]. Çarpma levhasının arka yüzeyi ile çevre ortamı arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan ışımla yoluyla ısı transferi, aşağıda verilen Stefan-Boltzmann denklemi [26] kullanılarak hesabı gerçekleştirilmiştir (Eşitlik 7).

$$q''_{\text{ışınım}} = \varepsilon A_w \sigma (T_w^4 - T_{\text{çev}}^4) \quad (7)$$

Çarpma levhasının emisivite değeri ε ile gösterilmektedir. Stefan-Boltzmann sabiti ise $\sigma=5,67 \times 10^{-8}$ [W/(m²K⁴)] değerindedir.

Düşey olarak konumlandırılmış çarpma levhası üzerinden doğal taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı, Churchill ve Chu [27] tarafından sunulan Eşitlik 8'deki ampirik bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,670 \cdot Ra^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad Ra \leq 10^9 \quad (8)$$

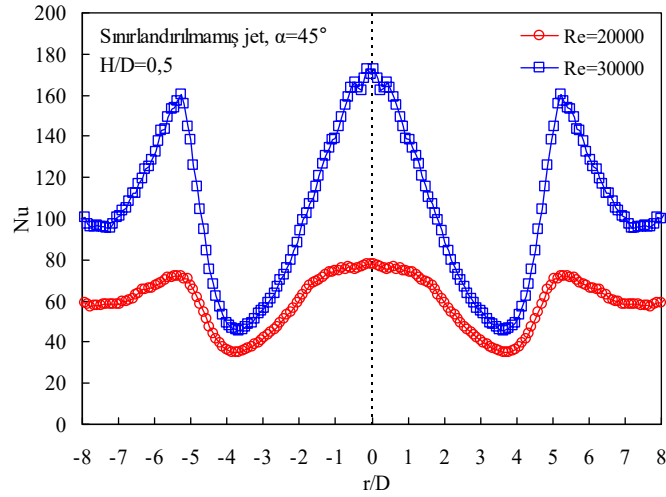
Bu denklemlerde, Rayleigh sayısını Ra ve Prandtl sayısı ise Pr ile ifade edilmiştir. Verilen bu denklemleri kullanarak, dizi jet düzeneğinde gerçekleşen ısı kayıplarından doğal taşınım ve ışımla kayıpları, toplam ısı miktarının sırasıyla % 3'ü ve % 4'ü olarak hesaplanmıştır. Toplam kayıplar ise, toplam ısı akısının % 7'si değerinde olmaktadır.

Ölçümler, Kline ve McClintock [28] tarafından tavsiye edilen denklem ve hesap yöntemleri kullanılarak belirsizlik analizine tabi tutulmuştur. İncelenen Reynolds sayısı için hesaplanan belirsizlik oranı \pm % 2,61 iken, Nusselt sayısı için \pm % 2,87 seviyesindedir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

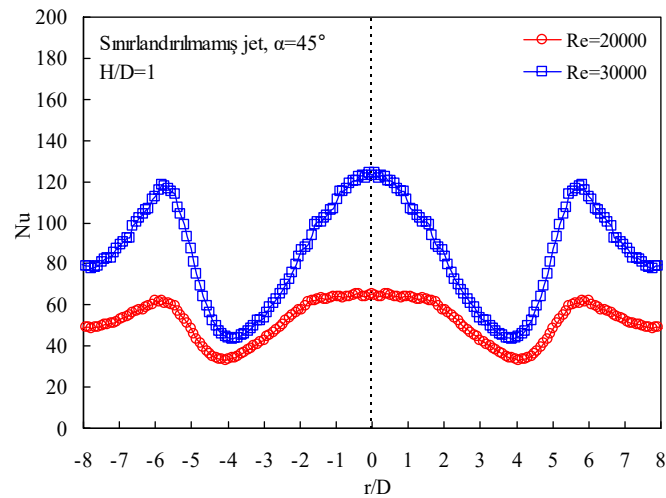
Bu çalışmada, 45° eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış çarpma dizi jet akışlarında çarpma yüzeyindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış jet akış alanlarında, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerleri ve lüle-levha/levhalar arası açıklık değerleri (H/D) 0,5, 1, 3 ve 6 için çarpma levhasının orta eksenli boyunca termal kamera ile

sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Bu dağılımlarından, Reynolds sayısı ve lüle-levha/levhalar arası açıklık değerlerinin yanı sıra sınırlandırıcı levha varlığının çarpma levhası boyunca Nusselt sayısı dağılımları üzerine etkisi araştırılmıştır. Çarpma levhasına dik doğrultudaki birincil jetin her iki tarafında birincil jet çıkış düzlemine göre 45° eğimli olarak konumlanan ikincil jetlerle oluşturulan sınırlandırılmamış dizi jet akışında, çarpma levhasının ortasındaki yatay merkez eksen boyunca iki farklı Reynolds sayısı için elde edilen Nusselt sayısı dağılımları lüle levha arası açıklık değerleri (H/D) 0,5, 1, 3 ve 6 için sırası ile Şekil 4-7'de verilmiştir. Lüle ile levha arasındaki açıklık değerinin $H/D=0,5$ olduğu durumda, her iki Reynolds sayısında çarpma levhası yüzeyi boyunca yatay bir orta eksende ölçülen sıcaklık değerlerinden hesaplanan Nusselt sayısı dağılımları Şekil 4'te verilmiştir. Çarpma levhası boyunca elde edilen Nusselt değerlerinin, Reynolds sayısının 30000 olduğu durumda daha büyük olduğu gözlenmektedir.



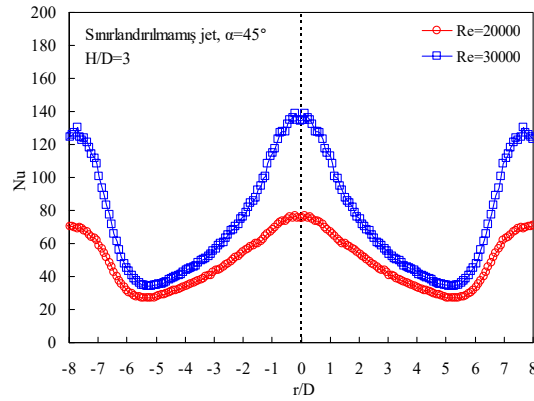
Şekil 4. $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=0,5$ için sınırlandırılmamış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

Reynolds sayısının her iki değerinde de, çarpma levhası üzerinde birincil lüle eksenini hizasındaki durma noktasında ve ikincil jetlerin eksenleri doğrultusundaki çarpma levhası konumlarında ($r/D \approx \pm 5,5$) yerel Nusselt sayısı değerlerinin maksimum (pik) seviyelere ulaştığı anlaşılmaktadır. Çarpma levhası üzerinde oluşan pikler, Reynolds sayısı arttıkça daha keskin hale gelmektedir. Lüle ile levha arası açıklık değeri $H/D=1$ için Şekil 5'te verilen Nusselt sayısı dağılımları, Şekil 4'te verilen dağılımlarla benzerlik göstermekte, çarpma levhası üzerinde, ikincil jetlerin eksenleri doğrultusunda ortaya çıkan pikler $r/D \approx \pm 6$ konumunda gerçekteleşmektedir.

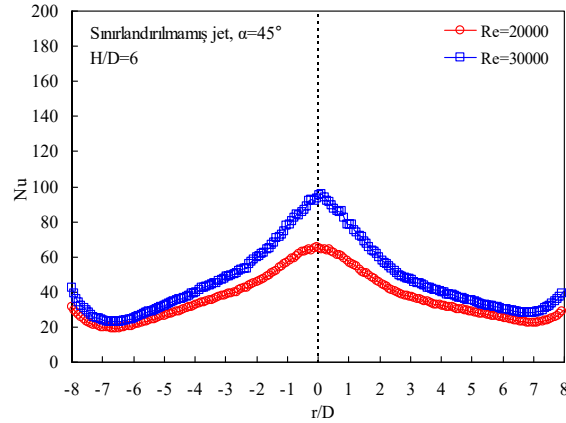


Şekil 5. $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=1$ için sınırlandırılmamış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

Şekil 6’da, lüle ile levha arası açıklık değeri $H/D=3$ iken her iki Reynolds sayısı değeri (20000 ve 30000) için çarpma levhası üzerindeki Nusselt sayısı dağılımları verilmektedir. İkincil jetlerin çarpma levhası üzerinde oluşturduğu pikler $r/D \approx \pm 8$ konumunda gerçekleşmektedir. Lüle ile levha arası açıklık değeri $H/D=6$ iken, her iki Reynolds sayısı değeri (20000 ve 30000) için Şekil 7’de görülen Nusselt sayısı dağılımlarından, ikincil jetlerin eksen doğrultularının çarpma levhası üzerindeki konumlarının daha büyük $\pm r/D$ değerlerinde oluşması nedeniyle çarpma levhası üzerindeki ikincil piklerin kaybolduğu görülmektedir. Nusselt sayısı dağılımlarında iki Reynolds sayısı arasında ortaya çıkan fark, $H/D=6$ açıklığında çarpma bölgesi dışında kaybolmaktadır. Dört farklı lüle-levha arası açıklığa ait grafikler bir arada değerlendirildiğinde, artan Reynolds sayısı değerleri ile birlikte çarpma levhası yüzeyince Nusselt değerlerinin de artış eğilimi sergilediği görülmektedir. Her iki Reynolds sayısı için de, artan lüle ile levha arası açıklığın Nusselt değerlerini azaltmakta ve ikincil jetlerin eksenleri doğrultusunda çarpma levhasında oluşan pikleri ise daha büyük $\pm r/D$ değerlerindeki konumları kaydırdığı anlaşılmaktadır.

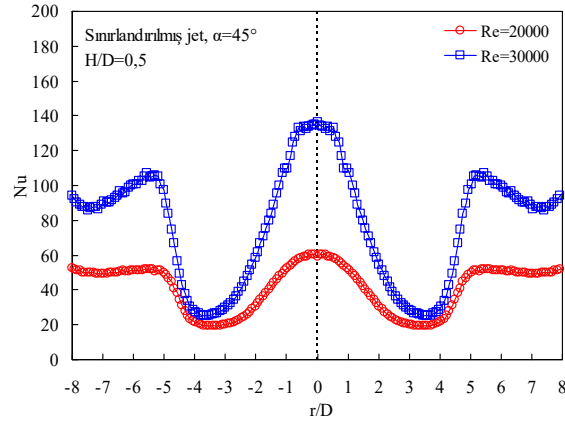


Şekil 6. $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=3$ için sınırlandırılmamış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları



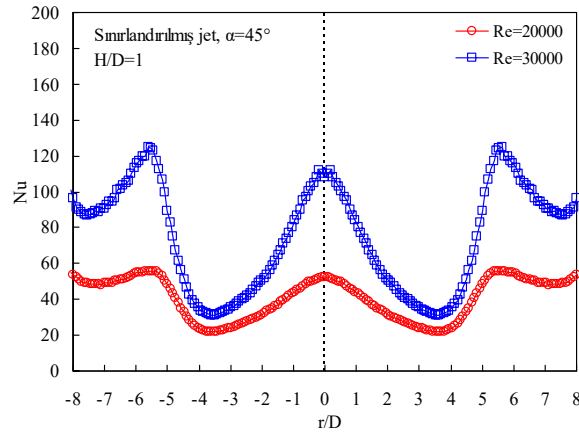
Şekil 7. $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=6$ için sınırlandırılmamış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

Çarpma levhasına dik doğrultudaki birincil jetin her iki tarafında birincil jet çıkış düzlemine göre 45° eğimli olarak konumlanan ikincil jetlerle oluşturulan sınırlandırılmış dizi jet durumunda, çarpma levhasının yatay orta eksenini üzerinde iki farklı Reynolds sayısı değeri için elde edilen Nusselt sayısı dağılımları sınırlandırıcı levha ile çarpma levhası arasındaki açıklık değerleri (H/D) 0,5, 1, 3 ve 6 için sırası ile Şekil 8-11’de verilmiştir. Bu açıklık değerinin $H/D=0,5$ olduğu durumda, Reynolds sayısı değeri 20000 ve 30000 iken çarpma levhası üzeri boyunca yatay orta ekseninde ölçümlenen sıcaklık değerleri kullanılarak hesaplanan Nusselt sayısı dağılımları Şekil 8’de verilmektedir. Bu şekilde, çarpma levhası boyunca elde edilen Nusselt sayısı değerlerinin Reynolds sayısının 30000 değerinde daha büyük olduğu görülmektedir. Reynolds sayısının her iki değerinde de, çarpma levhası üzerinde birincil lüle eksenini hizasındaki durma noktasında ve ikincil jetlerin eksenleri doğrultusundaki çarpma levhası konumlarında ($r/D \approx \pm 5,5$) yerel Nusselt sayısı değerlerinin maksimum (pik) seviyelere ulaştığı anlaşılmaktadır. Çarpma levhası üzerinde oluşan pikler, Reynolds sayısı arttıkça daha keskin hale gelmektedir.

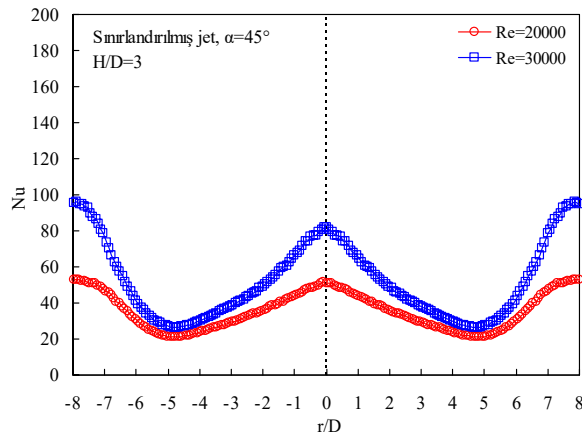


Şekil 8. $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=0,5$ için sınırlandırılmış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

Levhalar arası açıklık değeri $H/D=1$ için Şekil 9'da verilen Nusselt sayısı dağılımları, Şekil 8'de verilen dağılımlarla benzerlik göstermektedir. Şekil 10'da, levhalar arası açıklık değeri $H/D=3$ iken, her iki Reynolds sayısı için de çarpma levhası yüzeyi boyunca oluşan Nusselt sayısı dağılımları verilmektedir. İkincil jetlerin çarpma levhası yüzeyi boyunca oluşturduğu pikler $r/D \approx \pm 8$ konumunda gerçekleşmektedir.

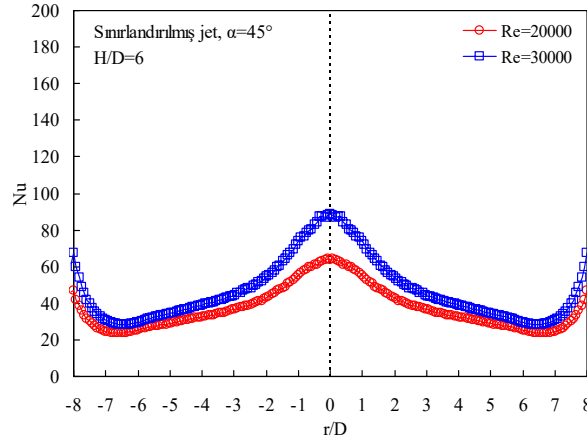


Şekil 9. $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=1$ için sınırlandırılmış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları



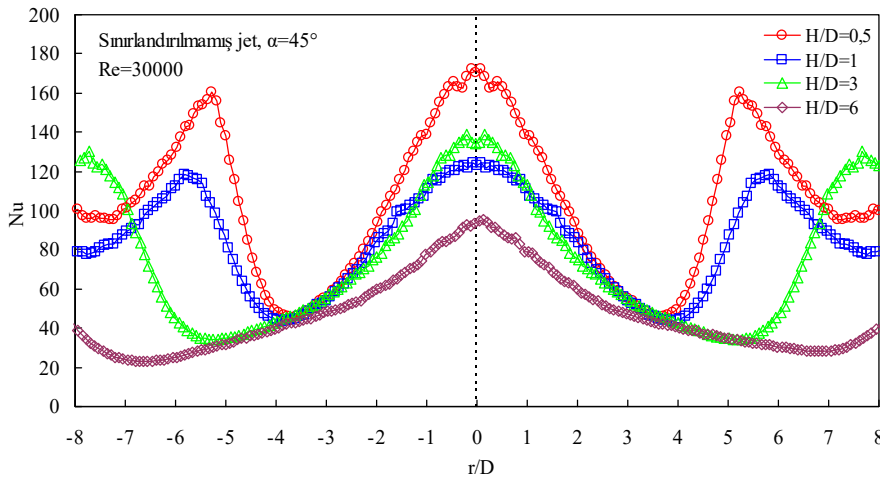
Şekil 10. $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=3$ için sınırlandırılmış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

Levhalar arası açıklık değeri $H/D=6$ iken, Şekil 11’de verilen Nusselt sayısı dağılımlarından, ikincil jetlerin eksen doğrultularının çarpma levhası üzerindeki konumlarının daha büyük $\pm r/D$ değerlerinde oluşması nedeniyle çarpma levhası üzerindeki ikincil piklerin kaybolduğu görülmektedir. Nusselt sayısı dağılımlarında iki Reynolds sayısı arasında ortaya çıkan fark, $H/D=6$ açıklığında çarpma bölgesi dışında kaybolmaktadır. Dört farklı levhalar arası açıklığa ait grafikler bir arada değerlendirildiğinde, Reynolds sayısı değerlerindeki artışın çarpma levhası yüzeyi üzerinde Nusselt sayısı değerlerini artırıcı etki yarattığı görülmektedir. Reynolds sayısının her iki değerinde de levhalar arası açıklığın artışının Nusselt değerlerinde azalmaya ve ikincil jetlerin eksenleri doğrultusunda çarpma levhasında oluşan piklerin ise daha büyük $\pm r/D$ değerlerindeki konumlara kaymasına sebebiyet verdiği anlaşılmaktadır.



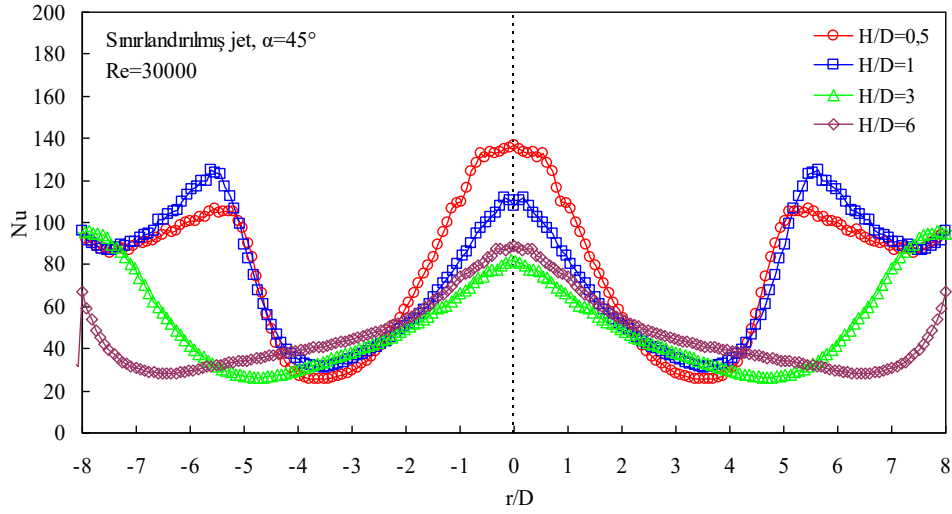
Şekil 11. $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=6$ için sınırlanmış dizi jet akışında çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

Şekil 12’de, jetin sınırlanmadığı ve Reynolds sayısı değerinin 30000 olduğu durum için, çarpma levhasının ortasındaki yatay merkez eksen boyunca açıklık değerleri (H/D) 0,5, 1, 3 ve 6 iken elde edilmiş olan Nusselt sayısı dağılımları üzerinde lüle ile levha arası açıklığın etkisi verilmiştir. Artan lüle ile levha arası açıklık, yerel Nusselt sayısı değerlerini azaltıcı bir etkiye sebebiyet vermektedir. Birincil durma noktasındaki pikler ve eğimli jetleri eksenleri doğrultusunda oluşan pikler aynı düzeyde olmaktadır. $H/D=3$ açıklığa kadar çarpma levhası üzerinde ikincil jetler nedeniyle ortaya çıkan pikler, $H/D=6$ açıklıkta kaybolmaktadır.



Şekil 12. Sınırlanmamış jet, $Re=30000$ ve $\alpha=45^\circ$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

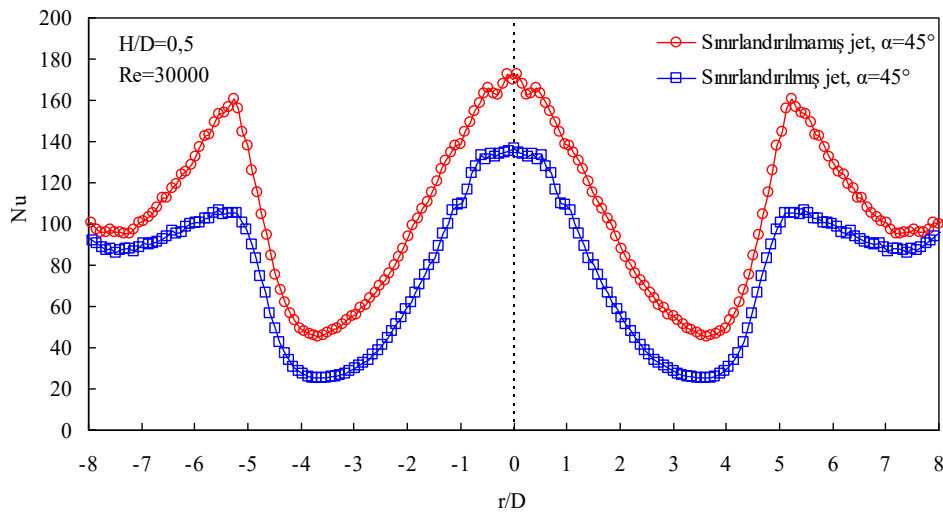
Şekil 13’te, jetin sınırlanıldığı ve Reynolds sayısı değerinin 30000 olduğu durum için, çarpma levhasının ortasındaki yatay merkez eksen boyunca açıklık değerleri (H/D) 0,5, 1, 3 ve 6 iken elde edilmiş olan Nusselt sayısı dağılımları üzerinde lüle ile levha arası açıklığın etkisi verilmiştir. Levhalar arası açıklıktaki artışın, yerel Nusselt değerlerinde azalışa sebebiyet verdiği anlaşılmaktadır.



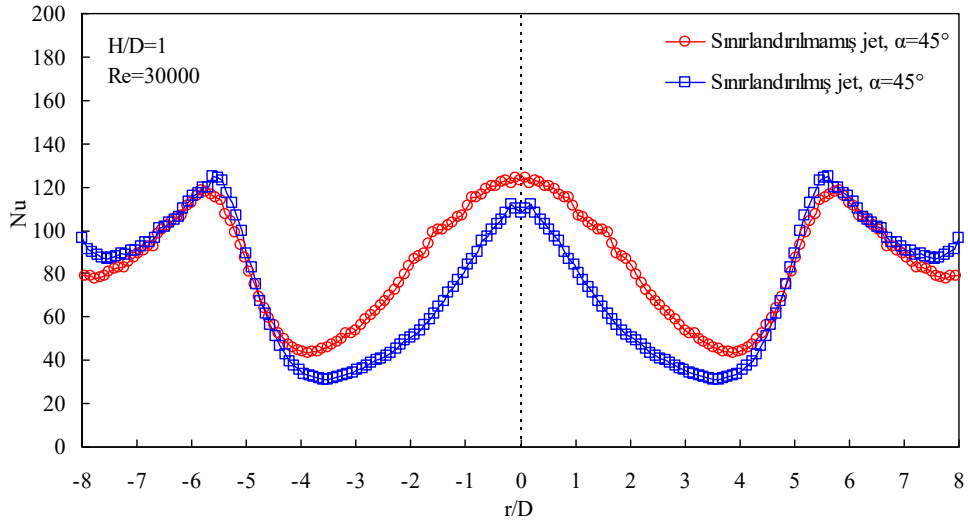
Şekil 13. Sınırlanmış jet, $Re=30000$ ve $\alpha=45^\circ$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

Çarpma levhası üzeri boyunca yatay orta ekseninde elde edilmiş olan Nusselt sayısı dağılımlarındaki sınırlayıcı levha etkisi, lüle-levha/levhalar arası açıklık değerleri (H/D) 0,5, 1, 3 ve 6 için sırası ile Şekil 14-17'de verilmiştir. Lüle-levha/levhalar arası açıklık değeri $H/D=0,5$ iken, jetin sınırlanmadığı durumda, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerinin jetin sınırlanmış jete göre daha büyük değerlerde olduğu anlaşılmaktadır. Sınırlanmamış jette, sınırlanmış jete göre aynı konumda yer alan daha pikler oluşmaktadır (Şekil 14). $H/D=1$ açıklıkta, sınırlanmamış ve sınırlanmış jet durumlarında çarpma levhası üzerindeki Nusselt sayısı dağılımları arasındaki fark sınırlanmamış jete daha büyük olacak şekilde sadece çarpma bölgesinde oluşmaktadır. (Şekil 15). Lüle-sınırlayıcı levha ile çarpma levhası aralarındaki açıklığın $H/D=3$ değerinde, $H/D=0,5$ 'teki durum ile benzer biçimde, sınırlanmış jet durumunda çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri daha küçük olmaktadır (Şekil 16). $H/D=6$ açıklıkta, sınırlayıcı levhanın varlığının, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerine etkisi kaybolmaktadır (Şekil 17).

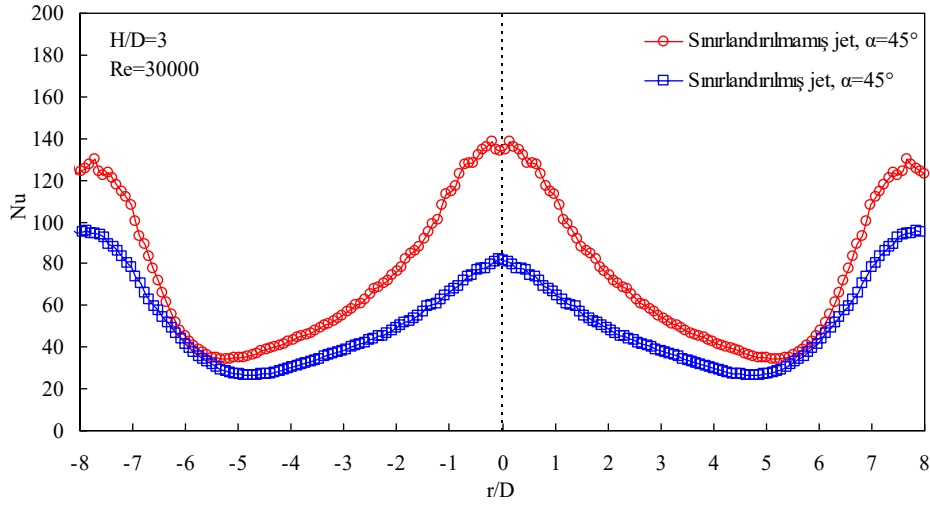
Lüle-levha/levhalar arası açıklığın dört farklı değerine ait dağılımlar bir arada değerlendirildiğinde, sınırlayıcı levha varlığının küçük açıklıklarda çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerini azalttığı, büyük açıklıklarda ise bu etkisinin kaybolduğu görülmektedir. $H/D=3$ açıklıkta, sınırlanmamış jet ve sınırlanmış jet durumlarındaki Nusselt sayısı dağılımları arasındaki fark $H/D=1$ 'deki farka göre daha fazla olmaktadır. Behnia ve ark. [29], çarpan jet akışlarında sınırlanmanın düşük açıklıklarda etkili olduğunu belirtmektedir.



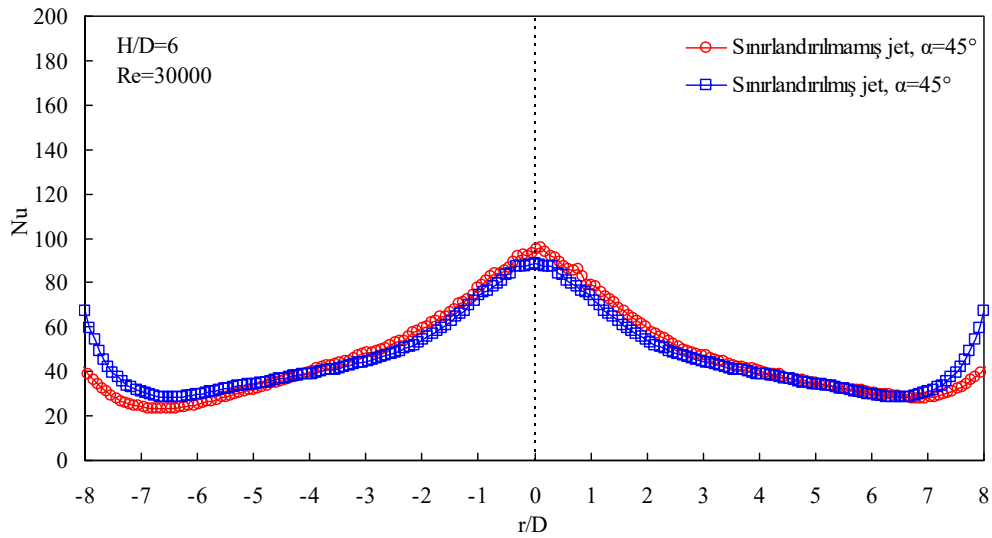
Şekil 14. $Re=30000$, $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=0,5$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları



Şekil 15. $Re=30000$, $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=1$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları



Şekil 16. $Re=30000$, $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=3$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları



Şekil 17. $Re=30000$, $\alpha=45^\circ$ ve $H/D=6$ için çarpma levhası üzerinde Nusselt sayısı dağılımları

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 45° eğimli ikincil jetlere sahip sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış çarpan dizi jet akışlarında çarpma yüzeyindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış her iki çarpan jet akışı durumunda da, çarpma levhası üzerinde birincil lüle eksenine doğrultusundaki durma noktasında ve ikincil jetlerin eksenleri doğrultusundaki çarpma levhası konumlarında yerel Nusselt sayısı pik değerler almaktadır.
- Çarpma levhası üzerinde oluşan pikler, Reynolds sayısı arttıkça daha keskin hale gelmektedir.
- Çarpma levhası boyunca Nusselt değerleri artan Reynolds sayısı ile artmakta, artan lüle-levha/ levhalar arası açıklıkla azalmaktadır. İkincil jetlerin eksenleri doğrultusunda çarpma levhasında oluşan piklerin konumları daha büyük $\pm r/D$ değerlerine kaymaktadır.
- Sınırlandırıcı levha varlığı, küçük açıklıklarda çarpma levhası yüzeyindeki Nusselt değerlerinde azalmaya neden olmakta, büyük açıklıklarda ise azalma etkisi ortadan kalkmaktadır.
- Çarpan jet akışlarıyla soğutma uygulamalarında, jet ile ısı çekilecek yüzey arasındaki açıklığın küçük olduğu durumda sınırlandırılmamış jet, jet ile ısı çekilecek yüzey arasındaki açıklığın büyük olduğu durumda ise sınırlandırılmış jet daha iyi soğutma performansı göstermektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Tanaka, E., 1974. The interference of two dimensional parallel jets experiments on the combined flow of dual jets. *Bulletin of JSME*, 17(109), 920-927.
2. Siclari, M.J., Hill, W.G., Jenkins, R.C., 1981. Stagnation line and upwash formation of two impinging jets. *AIAA Journal*, 19(10), 1286-1293.
3. Mikhail S., Morces S.M., Abou-Ellail M.M.M., Ghaly, W.S., 1982). Numerical prediction of flow field and heat transfer from a row of laminar slot jets impinging on a flat plate. *International Heat Transfer Conference 7*, 377-382.
4. Saad, N.R., Polat, S., Douglas, W.J.M., 1992. Confined multiple impinging slot jets without crossflow effects. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 13(1), 2-14.
5. Barata, J.M.M., 1996. Fountain flows produced by multiple impinging jets in a crossflow. *AIAA Journal*, 34(12), 2523-2530.
6. Rady, M., Arquis, E., 2006. Heat transfer enhancement of multiple impinging slot jets with symmetric exhaust ports and confinement surface protrusions. *Applied Thermal Engineering*, 26(11), 1310-1319.
7. Dong, L.L., Leung, C.W., Cheung, C.S., 2004. Heat transfer and wall pressure characteristics of a twin premixed butane/air flame jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(3), 489-500.
8. Abdel-Fattah, A., 2007. Numerical and experimental study of turbulent impinging twin-jet flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31(8), 1061-1072.
9. Ozmen, Y., 2011. Confined impinging twin air jets at high Reynolds numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(2), 355-363.
10. Koched, A., Pavageau, M., Aloui, F., 2012. Vortex structure in the wall region of an impinging plane jet. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 4(2), 61-69.
11. Al Mubarak, A.A., Shaahid, S.M., Al-Hadhrami, L.M., 2013. Heat transfer in a channel with inclined target surface cooled by single array of centered impinging jets. *Thermal Science*, 17(4), 1195-1206.
12. Buchlin, J.M., 2011. Convective heat transfer in impinging-gas-jet arrangements. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 4(2), 137-149.
13. Attalla, M., Specht, E., 2009. Heat transfer characteristics from in-line arrays of free impinging jets. *Heat and Mass Transfer*, 45, 537-543.
14. Maddox, J.F., Knight, R.W., Bhavnani, S.H., 2015. Liquid jet impingement with an angled confining wall for spent flow management for power electronics cooling with local thermal measurements. *Journal of Electronic Packaging*, 137(3), 031015.
15. Polat, S., Huang, B., Mujumdar, A.S., Douglas, W.J.M., 1989. Numerical flow and heat transfer under impinging jets: A review. *Annual Review of Heat Transfer*, 2, 157-197.

16. Ozmen, Y., Ipek, G., 2016. Investigation of flow structure and heat transfer characteristics in an array of impinging slot jets. *Heat and Mass Transfer*, 52, 773-787.
17. Caliskan, S., Baskaya, S., Calisir, T., 2014. Experimental and numerical investigation of geometry effects on multiple impinging air jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75, 685-703.
18. Tepe, A.Ü., 2019. Gaz türbin kanatlarında jet çarpmalı soğutmanın deneysel ve sayısal incelenmesi. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük, 224.
19. San, J.Y., Chen, J.J., 2014. Effects of jet-to-jet spacing and jet height on heat transfer characteristics of an impinging jet array. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, 8-17.
20. Guoneng, L., Zhihua, X., Youqu, Z., Wenwen, G., Cong, D., 2016. Experimental study on convective heat transfer from a rectangular flat plate by multiple impinging jets in laminar cross flows. *International Journal of Thermal Sciences*, 108, 123-131.
21. Godi, S.C., Pattamatta, A., Balaji, C., 2020. Heat transfer from a single and row of three dimensional wall jets - a combined experimental and numerical study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 159, 119801.
22. Talapati, R.J., Baghel, K., Shrigondekar, H., Katti, V.V., 2024. Influence of inclined unconfined circular air jet impingement on local heat transfer characteristics of smooth flat plate. *International Journal of Thermal Sciences*, 197, 108848, 1-15.
23. Yalçinkaya, O., Durmaz, U., Tepe, A.Ü., Benim, A.C., Uysal, Ü., 2024. Heat and flow characteristics of aerofoil-shaped fins on a curved target surface in a confined channel for an impinging jet array. *Energies*, 17(5), 1238.
24. Baz, F.B., Elshenawy, E.A., El-Agouz, S.A., El-Samadony, Y.A.F., Marzouk, S.A., 2024. Experimental study on air impinging jet for effective cooling of multiple protruding heat sources. *International Journal of Thermal Sciences*, 196, 108707.
25. Ozmen, Y., Baydar, E., 2008. Flow structure and heat transfer characteristics of an unconfined impinging air jet at high jet Reynolds numbers. *Heat and Mass Transfer*, 44, 1315-1322.
26. Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., Dewitt, D.P., 2011. *Introduction to heat transfer*. Wiley, Sixth Edition, New Jersey, ABD, 984.
27. Churchill, S.W., Chu, H.H.S., 1975. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18, 1323-1329.
28. Kline, S., McClintock, F., 1953. Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75, 3-8.
29. Behnia, M., Parneix, S., Shabany, Y., Durbin, P.A., 1999. Numerical study of turbulent heat transfer in confined and unconfined impinging jets. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20(1), 1-9.

SEMBOLLER DİZİNİ

Kısaltmalar

PCB	: Printed Circuit Board (Baskı Devre Kartı)
QVGA	: Quarter Video Graphics Array (Çeyrek Video Grafik Dizisi)

Latin Semboller

P	: Basınç (Pa) – Güç (kW)
Q	: Isıl enerji (W)
A	: Çarpma yüzeyi alanı
D	: Lüle çapı
h	: Isı taşınım katsayısı
H	: Lüle-çarpma yüzeyi arası mesafe
I	: Akım
r	: Durma noktasından radyal doğrultuda uzaklık veya Yarıçap
R	: Çarpma yüzeyi yarıçapı veya Elektriksel direnç
Re	: Reynolds sayısı
T	: Sıcaklık
U ₀	: Jet hızı
V	: Voltaj
Nu	: Nusselt sayısı
k-ε	: k-epsilon türbülans modeli
Pr	: Prandtl sayısı
Ra	: Rayleigh sayısı
k	: Isı iletim katsayısı – Türbülans kinetik enerjisi
q''	: Isı akısı (W/m ²)

Grek Semboller

ρ	: Ro (Akışkan yoğunluğu kg/m ³)
α	: Alfa (Jet eğim açısı)
ε	: Epsilon (Emisivite katsayısı – Türbülans kinetik enerjisinin yutulması)
μ	: Mü (Viskozite)
ν	: Nü (Kinematik viskozite)
σ	: Sigma (Stefan-Boltzman sabiti)
Δ	: Delta (Fark ifadesi)

Alt İndisler

çev	: Çevre ortam
w	: Duvar (Wall)
j	: Jet



Torsiyonel Rijit Fan Kaplinlerinin Tasarlanması ve Optimizasyonu

Abdulkadir YAŞAR^{1,a}, Yasin AYGÜL^{1,b}, Kerimcan ÇELEBİ^{1,c}

¹Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ceyhan/Adana

^aORCID: 0000-0002-1548-2386; ^bORCID: 0009-0008-7064-676X; ^cORCID: 0000-0001-6294-0872

Makale Bilgileri

Geliş : 12.11.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605975

Sorumlu Yazar

Abdulkadir YAŞAR

ayasar@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Sonlu elemanlar analizi

Optimizasyon

Fanlar

Kaplinler

Gerilmeler

Atf şekli: YAŞAR, A., AYGÜL, Y., ÇELEBİ, K., (2024). Torsiyonel Rijit Fan Kaplinlerinin Tasarlanması ve Optimizasyonu. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 939-950.

ÖZ

Kapasite bakımından yüksek debi ihtiyacı gerektiren fanlarda, yüksek motor gücünü fan mekanizmasına iletmek için emniyetli aktarma organlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Torsiyonel Rijit Fan Kaplinler çevre koşulları, sınır şartları ve servis ihtiyaçları açısından gerekli özellikleri sağlayan aktarma organlarıdır. Bu çalışmada, bir kaplin üzerinde analiz ve optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Taguchi parametre tasarım yöntemine göre; İki farklı konik ölçüsü, hammadde kalitesi, keskin köşe radyüsü ve iç çap ölçüleri parametre olarak belirlenmiştir. Montaj sırasında yağlama işlemi, iyi ve kötü duruma etki eden sürtünme katsayısını etkilemektedir. Sekiz farklı geçme toleransında flanş elemanı için sonlu elemanlar analizi yapılarak en büyük, en iyi yaklaşıma göre optimum emniyet katsayısı belirlenmiştir. Aktarma organının nominal tork değerini iletmesi için mekanik hesaplanan hassas alıştırma ölçüleri ile optimum daralma sonucu doğrulanmıştır. Optimize edilen flanş tasarımı, maksimum motor torkunda sonlu elemanlar analizi ile uygun emniyet katsayısında olduğu hesaplanmıştır. Elde edilen veriler çalışmanın sonuç kısmında yorumlanmıştır.

Design and Optimization of Torsional Rigid Fan Couplings

Article Info

Received : 12.11.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605975

Corresponding Author

Abdulkadir YAŞAR

ayasar@cu.edu.tr

Keywords

Finite element analysis

Optimization

Fans

Couplings

Stress

How to cite: YAŞAR, A., AYGÜL, Y., ÇELEBİ, K., (2024). Torsiyonel Rijit Fan Kaplinlerinin Tasarlanması ve Optimizasyonu. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 939-950.

ABSTRACT

In fans that require high flow rates in terms of capacity, safe transmission organs are required to transmit high motor power to the fan mechanism. Torsional Rigid Fan Couplings are transmission components that provide the necessary features in terms of environmental conditions, boundary conditions and service needs. In this study, analysis and optimization studies were implemented on a coupling. According to Taguchi parameter design method; two different taper sizes, raw material quality, sharp corner radius and inner diameter dimensions were determined as parameters. Lubrication during assembly affects the coefficient of friction, which affects both good and bad conditions. Finite element analysis was performed for the flange element with eight different fitting tolerances and the optimum safety coefficient was determined according to the biggest, best approach. The optimum contraction result has been verified with precise running-in measurements calculated mechanically to ensure that the drivetrain transmits the nominal torque value. The data obtained were commented in the conclusion part of the study.

1. GİRİŞ

Günümüzde sanayi kolunda faaliyet gösteren tüm alanlarda mekanik güç aktarımı oldukça yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Herhangi bir güç üreten tahrik üzerinden dönüş hareketini fonksiyon elamana güvenli ve şartlara uygun olarak aktaran ekipmanlara verilen genel isim kaplin olarak tanımlanmaktadır. Yüksek Torsiyonel Rijit Fan Kaplinleri ise yüksek hız, yüksek moment, paralel kaçıklık, eksenel kaçıklık, paralel ve eksenel kaçıklığın bir arada bulunduğu ve de geometrik kısıtlamaların olduğu yerlerde rahatlıkla kullanılmasından dolayı kendisine geniş kullanım alanları bulmaktadır. Rotordaki kaçıklık, dönerek çalışan makinalarda titreşim sorunlarına sebep olan en büyük etmendir. Kaçıklığın olduğu yerlerde rulmanlarda aşınma, millerde deformasyonlar görülmektedir. Kaçıklığa sebep olan birçok durumu gerçek bir sistemde rotorun deformasyonu, üretim ve montaj hataları, yatakların aynı eksende olmaması v.b. şeklinde örnekleyebiliriz. Yüksek Torsiyonel Rijit Fan Kaplinleri; eksenel kaçıklık bulunan motor ve fan kanat sistemi arasında daha büyük momenti ve yüklemeyi rahatlıkla aktarabilmektedir [1].

Hava akışının ihtiyaç duyulduğu tüm endüstriyel alanlarda cebri çekme fanları (ID) ve taze hava fanları (FD) kullanılmaktadır [2]. Termik Santraller ve Doğal Gaz Çevrim Santralleri yüksek debide (500-600 m³/s) hava akış sistemlerinin en çok ihtiyaç duyduğu enerji tesislerindedir. Kapasite bakımından yüksek debi ihtiyacı gerektiren uygulamalarda sistem yüksek güç ve emniyetli aktarma organları gerekmektedir. Sistemi çalıştırmak için yüksek mekanik güç sağlayan elektrik motoru (1000-2500 kW) dönme hareketini fan kanat mekanizmasına aktarmak için iletim elamanı olan Yüksek Torsiyonel Rijit Fan Kaplinlerine ihtiyaç duymaktadır. Kaplinler çevre koşulları, sınır şartları ve servis ihtiyaçları açısından gerekli özellikleri sağlamalıdır. Kaplinler, tasarım aşamasında dikkatli davranılmadığında monte edildiği makinanın sık durmasına sebep olmaktadır.

Bu çalışmada, yüksek debili ID, FD Fanların kullanıldığı endüstriyel alanlarda Torsiyonel Rijit Fan Kaplinlerinin mekanik ve geometrik özelliklerinin incelenmesi ve Taguchi yöntemi vasıtasıyla uygun geçme toleransının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç için tasarımları tamamlanan modeller, Ansys Workbench 2020 R2 programında Sonlu Elemanlar Analizine (SEA) tabi tutulmuştur [3].

Bir deneysel tasarım metodu olan Taguchi metodu, kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçmektedir. Bu suretle, ürün ve prosesteki değişkenlik en aza indirilmeye çalışılmaktadır [4]. Bu metot sayesinde ürünlerin kalitesinin iyileşmesinin yanı sıra, kalite geliştirmede daha az deneme sayısı ile daha doğru sonuç alma imkânını vermektedir [4,5]. Bu yöntemde, kontrol edilebilen faktörler esas alınırken kontrol edilemeyen faktörlere karşı da avantaj sağlanmaktadır [6]. Esas olarak kesirli faktöriyel tasarım yöntemi olan Taguchi metodunda faktörler için tüm birleşimlerinin denenmesi maliyet artışı ve zaman kaybına neden olacağından faktörlerin birleşimlerinin küçük bir kesri alınıp, ortogonal dizi adı verilen özel tablolar kullanılır [7]. Ortogonal diziler, deneysel tasarım çalışmalarında kullanılmak amacıyla oluşturulmuştur [8].

Ansys paket programı gibi arka planında sonlu elemanlar analizi (SEA) kullanan bilgisayar destekli mühendislik programları, tasarlanan ürünün yapısal açıdan güvenli olup olmadığını değerlendirmek için kullanılmaktadır [9-15]. SEA kullanılarak tasarlanan ürünün her noktasına gelen mekanik zorlamalar tespit edilerek yapısal bütünlüğü incelenebilir [16]. Her tasarım senaryosu için yapılarda farklı zorlamalar oluşmaktadır. Taguchi metodu bu zorlamalara göre optimum tasarım elde etmek amacıyla kullanılabilir. Bu metodun kullanılması ile belirli parametrelere göre hazırlanan tasarımlar için SEA sonuçlarına göre en uygun parametre optimizasyonu sağlanabilmektedir [17].

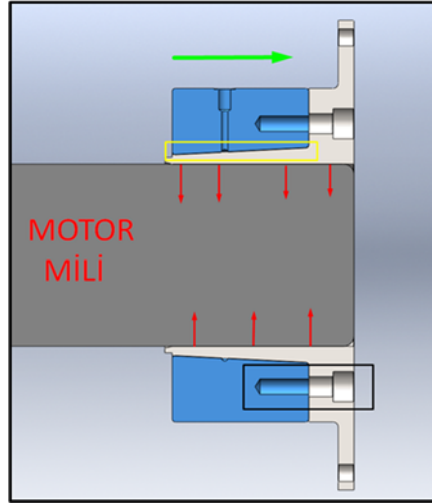
Torsiyonel Rijit Fan Kaplinler, sıkma somunu ve flanş olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Sıkma somunu AISI 4140 kalite çelik ve flanş S355 kalite malzemenin imal edilmektedir. Buradaki kalite seçimi, sıkma somun malzemesinin sert, sıkılan flanş malzemesinin daha az sertlikte olması gerektiğini belirlemektedir. Konik düzlemde alıştırma işlemi flanş üzerinde gerilmeler oluşturacaktır. Bu gerilmeler S355 kalite flanş açısından akma dayanım emniyetine göre güvenli alanda kalması gerekmektedir. Çalışma sonucunda; İki farklı konik ölçüsü, hammadde kalitesi, köşe noktalarındaki yuvarlama ve iç çap faktörleri belirlenerek sekiz farklı geçme toleransında sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Bu veriler Taguchi tolerans tasarım yaklaşımına göre optimize edilip en uygun değer belirlenmiştir. Bulunan optimum veri kullanılarak nihai ürün için sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Aktarma organının nominal tork değerini iletmesi için

hassas alıştırma ölçüleri, mekanik olarak optimizasyon veri sonucu ile hesaplanıp doğrulama gerçekleştirilmiştir.

2. YÖNTEM

Pres geçmelerde, mil ve göbek geçme yüzeyleri arasındaki sürtünme etkisi ile moment ve hareket iletimi sağlanmaktadır. Parçaların birbiri üzerinde kaymamaları için ilaveten kama kullanılmamaktadır. Kama kullanılması ek bir emniyet oluşturmaktadır. Kamalı birleştirmelerde ısıtma ve pres gücü gereken etmenlerde olduğu için bu işlemlerin çalışma ortamlarına uyumu da dikkate alınmalıdır. Kama kullanılmadığı kabul edilerek hesaplamalar yapılmaktadır. Sıkı geçme uygulamalarında delik bir miktar büyümekte, mil ise bir miktar küçülmektedir. Temas yüzeyleri arasında bir basınç ve sürtünmeye bağlı olarak hareket iletimi; şekil değişiminin elastik sınırlar içerisinde kalması durumunda mümkün olmaktadır. Sürtünme kuvvetinin bağlantının aksel yönde zorlanması ile bağlantının radyal yönde zorlanması ile de moment iletimi gerçekleşmektedir [18].

Çalışılmakta olan sistem, milin geniş toleranslarda montajı sonrası baskı oluşturarak geçme toleransına plastik deformasyonla geçişi sağlamaktadır. Bu geçme, boyuna pres toleransında olup herhangi bir kama elemanı olmadan tork aktarımı sağlamaktadır. Şekil 1’de belirtilmiş olan mavi renkli sıkma somunu gri renkli flanş ile sarı kutuda belirtilen konik düzlem üzerinde yeşil çizgi yönünde geçiş sağlamaktadır. Konik düzlemdeki bu geçiş siyah kutu ile belirtilen 8 Adet civatanın çektirme işlemi ile gerçekleşmektedir. Konik düzlemde çektirme sonucu birleşim sağlayan flanş, sıkma somunu tarafından baskı kuvvetine maruz kalmaktadır. Bu kuvvet kırmızı ok ile gösterilen iç çapta daralma oluşturmaktadır. Bu daralma, mil ile sıkı geçme toleransı oluşturup fan ile motor arasında tork aktarımı sağlamaktadır.



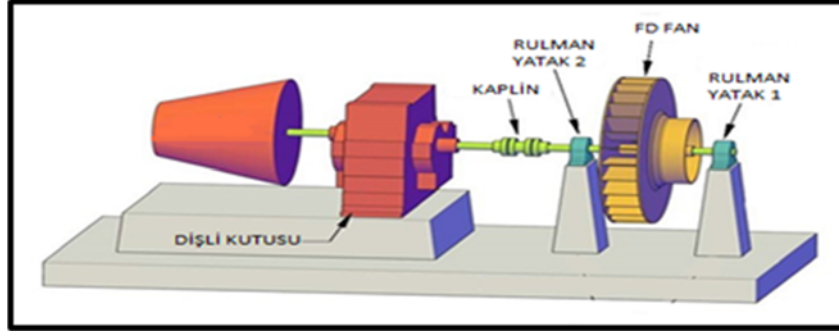
Şekil 1. Kaplin sistemi montaj resmi

Şekil 1’de sıkma işlemi uygulayan sıkma somunu için AISI 4140QT kalite seçilmiştir. Buradaki amaç; sıkılma işlemi sırasında şekil değişimini kendisinde değil de daha az akma gerilmesine sahip S355J22G3 malzemeye sahip flanş da olmasını sağlamaktır. C50 karbon çeliği flanş hammaddesinin alternatifi olarak seçilmiştir. Çizelge 1’de malzemelere ait mekanik özellikler gösterilmektedir.

Yüksek güç aktarımı sağlayan Torsiyonel Rijit Fan Kaplinlerinin aktif olarak kullanıldığı endüstriyel alanlar gözönüne alınarak 2500 kW motor Gücü ve 900 devir/dakika çalışma sınır şartları olarak ele alınmıştır. Kaplin sistemi de Şekil 2’de gösterilmiştir.

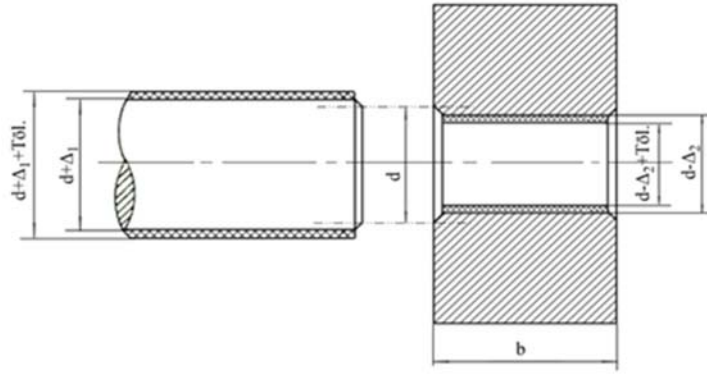
Çizelge 1. Mekanik özellikler

Mekanik özellikler	S355J2G3	AISI 4140QT	C50E
Çekme gerilmesi R-N/mm ² (0-3mm)	510-680	860-1060	650
Akma gerilmesi ReH -N/mm ²	355	730	355
A%-mm (L)	22	14	13
Sertlik HB	141-192	258-322	200



Şekil 2. Kaplin sistemi montaj resmi [18]

Mil çapının delik çapından daha büyük olması mil ve göbek bağlantılarında sıkı geçme oluşturmaktadır. Hem mil hem de delik anma çapının d çapı olması durumunda milin çapı anma çapından Δ_1 kadar daha büyük, delik çapı ise Δ_2 kadar küçük olmalıdır. Toleransların bu ölçülerin üzerine eklenmesi durumunda çap farkı daha da büyüyecektir. Δ oluşan çap farkını gösterirse bu fark, toleransların dikkate alınmadığı en küçük çap farkını gösterecektir. Δ çap farkı, milin göbek içerisine sıkıca yerleştirildiği durumda elastik şekil değişimleri sayesinde yok olmaktadır. Yüzeylerde P basıncı oluşmaktadır. Sıkı geçen malzemelerin yüzeylerinde aşırı baskının oluşması Δ çap farkının çok fazla olmasına bağlıdır. Bu durumda, malzeme plastik deformasyona uğramaktadır. Malzeme yüzeyinde istenilen basıncın olmaması plastik deformasyonun bir sonucu olup bu da malzeme yüzeylerinin bozulmasına sebebiyet vermektedir[18].



Şekil 3. Sıkı geçme tolerans gösterimi

$$\text{Mil Çapı } d_{mil} = d + \Delta_1 \quad (1)$$

$$\text{Mil Çapı } d_{delik} = d - \Delta_2 \quad (2)$$

$$\text{Çap Farkı: } \Delta = d_{mil} - d_{delik} = d + \Delta_1 - (d - \Delta_2) = \Delta_1 + \Delta_2 \quad (3)$$

Milden alınan döndürme momentinin kasnağa aktarılması ancak sürtünme momentinin döndürme momentinden daha büyük olması ile mümkündür ($M_s > M_d$). Dolayısıyla sürtünme momentini döndürme momentinden belirli bir emniyet katsayısı kadar büyük seçilmelidir ($M_s = k \cdot M_d$). Burada, k bağlantının hareketini iletmedeki emniyet katsayısıdır. Çalışmanın titreşim durumuna göre bu katsayı seçilebilir [19].

1) $k=1,25$ (Titreşimsiz ya da az titreşimli bağlantılar)

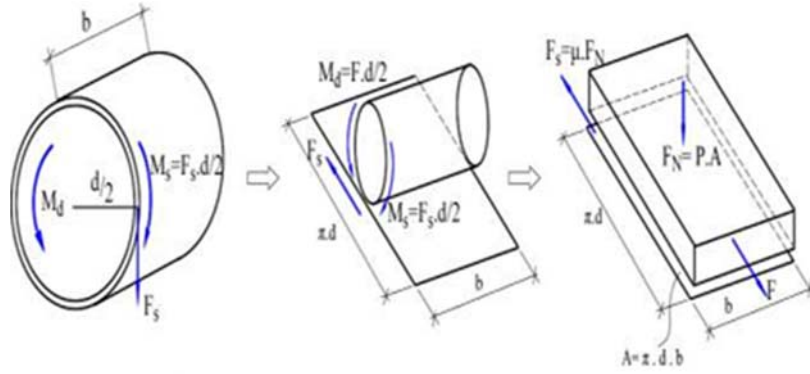
2) $k=1,5$ (Orta titreşimli bağlantılar)

3) $k=2,0$ (Titreşimli ve darbeli bağlantılar)

Sürtünme momentini aşağıdaki eşitlikten bulunabilmektedir;

$$M_s = F_s \cdot \frac{d}{2} = (\mu \cdot F_N) \cdot \frac{d}{2} = \mu \cdot (P \cdot A) \cdot \frac{d}{2} = \mu \cdot P \cdot (\pi \cdot d \cdot b) \cdot \frac{d}{2} \quad (4)$$

$$M_s = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \mu \cdot P \cdot b \cdot d^2 \quad (5)$$



Şekil 4. Sürtünme momenti hesabı [18]

Hareket iletimi, minimum seviyede yüzey basıncının sağlandığı sürtünme momenti sayesinde olmaktadır. Bu basınç değeri yukarıdaki formülden çekilirse aşağıdaki şekilde elde edilir [18].

$$P_{min} = \frac{2.M_s}{\pi.\mu.b.d^2} \quad (6)$$

Sürtünme momenti ve dolayısıyla bu momenti sağlayacak basıncın oluşturulması için gerekli olan çap farkı (Δ), pres geçmelerin boyutlandırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Mil içi boş boru olarak düşünülürse dış ve iç yarıçapları (r_d , r_i) olacaktır. Benzer şekilde göbeğin dış ve iç yarıçaplarını da (R_d , R_i) ile gösterelim. C katsayısı ise yarıçaplar oranını gösterirse, buna çap oranı da diyebiliriz. Oran söz konusu olduğu için olduğu için sonuç değişmeyecektir [18].

$$C_1 = \frac{r_i}{r_d} \quad (\text{mil için}) \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{R_i}{R_d} \quad (\text{göbek için}) \quad (8)$$

Çap farkı (Δ), Eşitlik 9'da gösterilmektedir. Eşitlikte P yüzeyler arasındaki basıncı, d milin ve göbeğin anma çapını, E_1 milin, E_2 göbeğin elastisite modülünü; C_1 milin, C_2 göbeğin yarıçap oranını; ν_1 milin, ν_2 göbeğin poisson oranını göstermektedir [18].

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = P.d \left[\frac{1}{E_1} \left(\frac{1+C_1^2}{1-C_1^2} - \nu_1 \right) + \frac{1}{E_2} \left(\frac{1+C_2^2}{1-C_2^2} - \nu_2 \right) \right] \quad (9)$$

Bu eşitlik, mil ve göbeğin malzeme özellikleri biliniyorsa mil ve göbek arasındaki çap farkının ne kadar olması gerektiğini hesaplama kolaylığını sağlayacaktır. Bu teorik bir değer olup gerçekte malzeme yüzeylerindeki pürüzlerin sıkı geçmede % 60 dolayında ezilmesi nedeniyle oluşan ekstra boşlukların da bu değere eklenmesi gerekmektedir.

Yüzeyler arasındaki basınç artması çap oranının aşırı artışı ile mümkündür. Bu durum, malzemelerin akma sınırını geçip plastik olarak bozulmasına neden olacaktır. Bu durumda malzemenin içinde oluşan kayma gerilmesinin emniyet sınırlarını aşmaması gerekir. Maksimum yüzey basıncı ve oluşan maksimum kayma gerilmesi arasında aşağıdaki eşitlikler yazılabilmektedir.

$$P_{max} = \tau_{em}(1 - C_2^2) \quad (10)$$

$$\tau_{max} = \frac{P_{max}}{1-C_2^2} \leq \tau_{em} \frac{\sigma_{em}}{2} \quad (11)$$

Optimizasyon için kullanılacak Taguchi yönteminde ilk aşama optimize edilecek kalite karakteristiğinin belirlenmesidir. Bu karakteristik, varyasyonun ürün kalitesi üzerinde kritik bir etkisi olan bir parametre olup gözlenecek çıktı veya cevap değişkenidir [20]. Bunlar bu çalışmada iç çap daralması ve en büyük gerilme olarak belirlenmiştir.

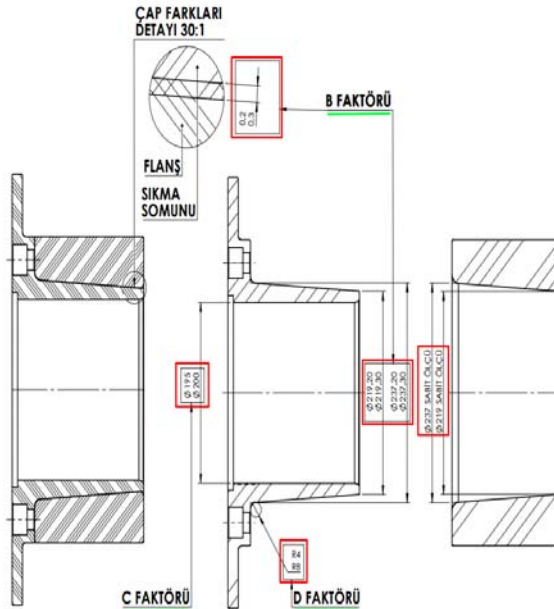
Ayarlanabilen ve korunabilen tasarım faktörleri kontrol parametrelerini oluşturmaktadır. Her test parametresi için seviyeler yani test değerleri bu noktada belirlenmektedir. Bu çalışmada tanımlanan tasarım faktörleri aşağıdaki gibidir:

- Malzemeden gelen faktör parametresinin seçiminde sıkma somunun AISI4140+QT, flanşın ise S355J2 veya C50+N malzeme kalitesinde malzemeden imal edildiği değerlendirilmiştir.
- Saha ortamında yapılan geometrik ölçümler sonucunda Torsiyonel Rijit Fan Kaplinlerinin konik kısımlarına ait başlangıç ölçüsü 219 mm ve bitiş ölçüleri 237 mm olarak ± 1 mm toleransında ölçüm sağlanmıştır. Bu ölçüler referans alınarak konik düzlem üzerinde sıkma somun ölçüsü sabit kabul edilerek sadece flanş ölçülerinde konik başlangıç ve bitiş ölçülerinin ötelenmesi ile konik düzlemin tüm yüzey boyunca teması sağlayacak, sıkı geçme toleransı oluşturulmuştur. Bu öteleme ölçüsü iki farklı değerde alıştırma senaryosu için faktör olarak kabul edilmiştir.
- Motor tahrik milinin geçeceği iç çap geometrik ölçümler sonucunda $\varnothing 195,070$ ve $195,055$ aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu ölçüm hassas delik içi komparatörün mikrometre ile ayarlanması sonucunda, fabrika açık hava koşullarında gerçekleştirilmiştir. Flanş üzerindeki plastik deformasyon sonucunda bu çaptaki daralama miktarı testin önemli parametresidir. Çap miktarı; flanş konik düzlemi ile et kalınlık ölçü miktarını doğrudan etkilemektedir. Daralma miktarı buradaki et kalınlığına bağlı olup alternatif olarak $\varnothing 200$ mm ölçü ile test yapıldığında sonuç optimizasyonunu belirleyecek faktör olarak kabul edilmiştir.
- Yüksek deformasyona maruz kalan flanş üzerindeki keskin köşeler gerilme açısından önemli olup konik düzlem bitimindeki köşe nokta için R4 ve R8 olacak şekilde yuvarlama işlemi yapılarak optimize edilecek faktör belirlenmiştir.

Çizelge 2 ve Şekil 5'te Tasarım faktörleri ve teknik resim üzerindeki gösterimi detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 2. Tasarım faktörleri

Parametre	Faktör kodu	Seviye 1	Seviye 2
Malzeme	A	S355J2	C50+N
Konik düzlem öteleme miktarı	B	0,2	0,3
İç çap ölçüsü	C	195	200
Flanş köşe radüsü	D	R4	R8



Şekil 5. Tasarım faktörleri

İki seviye ve dört faktör parametresinden oluşan veri girişimiz Taguchi Ortogonal Dizi Tasarımı $L8(2^4)$ olarak yapılmıştır (Çizelge 3). Yapılan optimizasyon çalışmasının en büyük emniyet katsayısı ve en iyi yaklaşım için hesaplanan S/N oranı kullanılmıştır. Her eşleşme için SEA yapılarak testler

gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda oluşan maksimum gerilme, flanş hammaddesinin akma gerilmesi olan 355 MPa değerine oranla emniyet katsayısı belirlenmiştir. Her bir eşleşmenin sonucunda mil montajı yapılacak olan 195 mm iç çaptaki daralma ölçüsü, tork aktarılacak geçme toleransı için önem arz etmektedir.

Çizelge 3. Taguchi ortogonal dizi tasarımı (L8)

L8	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	1	1	2
3	1	2	2	1
4	1	2	2	2
5	2	1	2	1
6	2	1	2	2
7	2	2	1	1
8	2	2	1	2

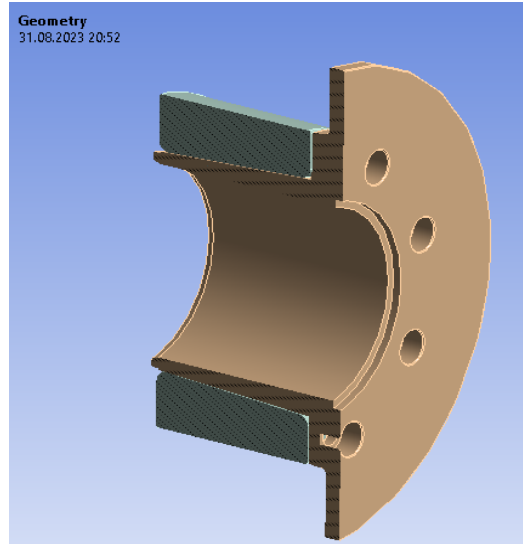
Her seviye için sonlu elemanlar analizi yapılırken sistemin iyi ve kötü durumları göz önüne alınarak analiz yapılmaktadır. İyi durum ve kötü durum için alınan sonuçların ortalaması ile S/N değeri hesaplanmaktadır.

Konik düzlem üzerinde sistem montaj esnasında iken sürtünmeye maruz kalmaktadır. Sistem üzerinde konik çekirme işlemi sırasında konik düzleme yağ enjekte edilmektedir. Kötü durumda yağ kullanılmadan yapılan alıştırma işlemi için $\mu_s=0,19$ alınırken, iyi durum olan yağ kullanılarak yapılan alıştırma durumunda $\mu_s=0,09$ değeri alınmıştır (Çizelge 4).

Çizelge 4. Kayma düzlemindeki sürtünme katsayısı

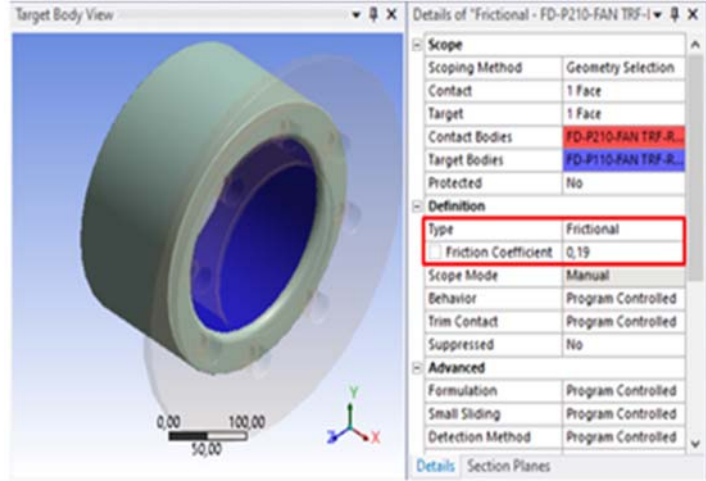
İyi Durum	Yağlı (μ)	0,09
Kötü Durum	Kuru (μ)	0,19

Kaplinin paket program ile modellenmiş hali Şekil 6'da verilmiştir. Ansys yazılımı, kaplinin SEA analizleri için kullanılmış olup kaplin üzerinde belirlenen parametrelere göre 8 adet tasarım ile analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Optimum tasarıma götüreceği analiz sonuçları, L8 ortogonal dizi kullanılarak Taguchi metodu ile belirlenmiştir.



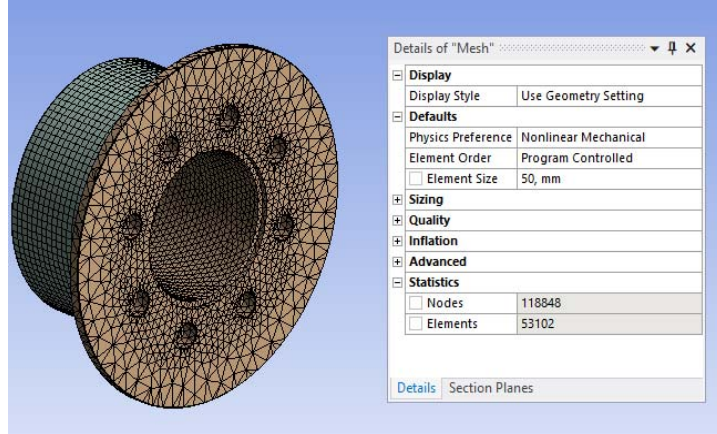
Şekil 6. Paket programda modellenmiş kaplin

SEA çalışmalarında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 1'de gösterilmekte olup elastik bölgedeki davranışlar, analizlerde doğrusal malzeme tanımlaması yapılarak incelenmiştir. Kontak yüzeyleri tanımlanırken (Şekil 7) konik düzlemler için sürtünme katsayısı kötü durum için $\mu_s=0,19$ alınırken, iyi durum için ise $\mu_s=0,09$ olarak alınmıştır.



Şekil 7. Kontak yüzeylerinin tanımlanması

Şekil 8’de parça sonlu elemanlara ayrılmak üzere mesh edilmiştir. Yapılan mesh işleminin sonunda ortaya çıkan veriler Çizelge 5’te gösterilmiştir. Mesh tipi Düzlemsel 2B Mesh olarak seçilmiştir.



Şekil 8. Modelin mesh hali

Çizelge 5. Mesh bilgisi

Eleman boyutu (mm)	50 mm
Eleman sayısı	53102
Düğüm sayısı	118848

Konik düzlemde hareket işlemi 8 adet civatanın çektirme gücü ile elde edilmektedir. Bu civataların flanş üzerinde tepki yüzeyleri sürtünmesiz destek yüzeyleri olarak tanımlanmıştır.

Sıkma somunu ile flanş yüzeyi herhangi bir çektirme olmaksızın doğal temas esnasında sıkma somunu ile arasında açık mesafe kalmaktadır. Bu açık mesafe tamamen kapatılması durumunda 0,2 mm ve 0,3 mm konik yüzeyler geçiş sağlayarak daralma ve plastik deformasyonu sağlayacaktır. Analiz esnasında sıkma somununa +X yönünde flanş dayanma yüzeyine kadar deplasman hareketi verilerek işlem gerçekleştirilmiştir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Oluşturulan 8 adet tasarım ile belirlenen iyi ve kötü durum için SEA gerçekleştirilerek yapılar üzerinde maksimum Von-Misses eşdeğer gerilmesi bulunmuştur. Flanş malzemesi için belirtilen akma dayanımı referans alınarak elde edilen maksimum gerilme oranı ile emniyet katsayısı elde edilmiştir.

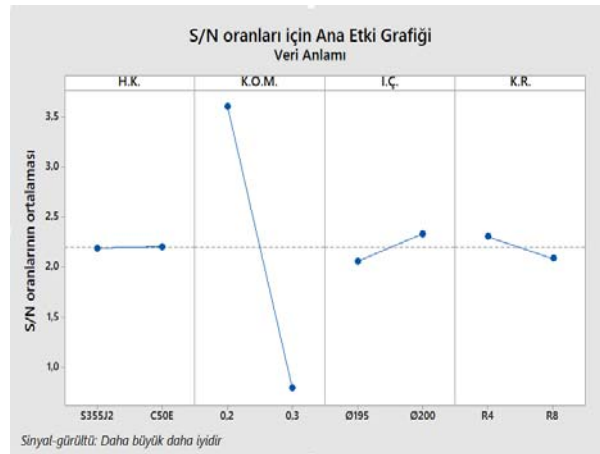
Bu sonuçlara göre Taguchi metodu ile sinyal gürültü oranları bulunmuş ve Çizelge 6'da gösterilmiştir.

Çizelge 6. Analiz ve Taguchi metodu ile S/N sonuçları

	İyi durum			Kötü durum			S/N
	Maks. gerilme (MPa)	İç çap daralma (mm)	Emniyet katsayısı	Maks. gerilme (MPa)	İç çap daralma (mm)	Emniyet katsayısı	
L1	210,88	0,097	1,68	273,64	0,096	1,30	3,466
L2	210,67	0,097	1,69	275,86	0,096	1,29	3,440
L3	311,87	0,146	1,14	309,47	0,145	1,15	1,159
L4	313,27	0,146	1,13	344,73	0,145	1,03	0,681
L5	206,16	0,097	1,72	246,17	0,096	1,44	3,984
L6	207,11	0,097	1,71	277,83	0,096	1,28	3,498
L7	315,64	0,146	1,12	347,95	0,144	1,02	0,608
L8	316,35	0,146	1,12	338,03	0,144	1,05	0,718

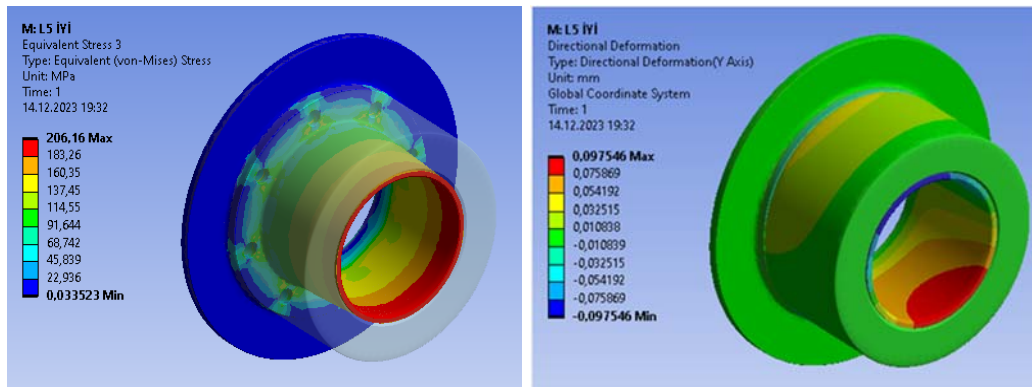
Yapılan sekiz farklı analizden tümünde çap daralması uygun aralıklardadır. Akma gerilmesinin altında maksimum gerilme gözlemlenmiştir. S/N oranları hesaplanırken emniyet katsayısının en yüksek olduğu durum sistem için uygundur.

İstatistiksel hesaplamaların ve analizlerinin uygulanmasında istatistiksel analiz programından yardım alınmıştır. Optimum parametrelerin belirlenebilmesi için program yardımı ile sinyal gürültü oranları için grafikler elde edilmiştir. Şekil 9'da SEA sonuçları kullanarak oluşturulan parametre seviyeleri için S/N grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 9. SEA sonuçlarına göre parametre seviyeleri

Tasarım aşamasındaki değişken parametreler için hesaplanan S/N değerlerinde büyük değerler bizi emniyet katsayısındaki en iyi sonuca ulaştıracaktır. Optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesi için SEA sonuçlarının Taguchi metodunda kullanılması ile en büyük en iyi sonuç L5'te verilen parametreler için elde edilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. L5 için analiz sonuçları

Sıkı geçme toleransı motor mili ile kaplin flanşında olacaktır. Mile bağlı motorun gücü 2500 kW ve devri 900 devir/dakikadır. Bağlantıda orta düzeyde titreşim ve darbe unsuru (1,5 K) dikkate alınmıştır. Buna göre; Eşitlik 1-11 yardımı ile hesaplanan ve Çizelge 7’de verilen mekanik hesaplamalar kullanılarak malzemelerin emniyet sınırları aşılmadan bağlantıya verilecek minimum ve maksimum sıklık değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 7. Mekanik hesaplamalar

M_d	26527,778 Nm
M_s	39791667 Nmm
P_{min}	35,184 N/mm ²
C_1	0
C_2	0,606
Δ_{min}	86,480 mikron
P_{max}	112,302 N/mm ²
Δ_{max}	276,061 mikron

Bu çalışmada, yüzey pürüzlerinin %60 ezildiği varsayılmıştır. Ezilme sebebiyle oluşan boşluğun çap farklarına eklenmesi gerekmektedir. Milin hassas tornalama ile işlendiği düşünüldüğünde mil yüzeylerindeki ortalama pürüzlülük değeri (tepelerle çukurlar arasındaki mesafe) 5µ olarak alınmıştır. Delik için ise normal tornalama işlemi yapıldığı ve ortalama pürüzlülük değeri ise 11 µ olarak alınmıştır. Toplam pürüzlülük değeri 11+5= 16 µ olmakta ve bunun %60’ı ezilirse 9,6 mikronluk daha boşluk oluşmaktadır. Bu değeri 10 mikron olarak alıp çap farkının üzerine eklememiz gerekmektedir. Böylece ezilmeden dolayı eklememiz gereken çap farkı $\delta_{ez}=10 \mu$ olmaktadır.

Yeni oluşan çap farklarını U ile gösterirsek U_{min} ve U_{max} ;

$$U_{min} = \Delta_{min} + \delta_{ez} = 85,678 + 10 = 95,678 \text{ mikron} = 0,09649 \text{ mm} \quad (12)$$

$$U_{max} = \Delta_{max} + \delta_{ez} = 267,426 + 10 = 277,426 \text{ mikron} = 0,28606 \text{ mm} \quad (13)$$

Bulunan değerler; motor dönme momentinin fan mekanizmasına aktarılması için mil ile kaplin flanşı arasındaki sıkı geçme tolerans miktarıdır. Motor mili Ø195 mm ve tolerans miktarını kaplin flanşının iç çapı için uygulanırsa;

$$\text{Torkun aktarılması için Gerek Tolerans} = \text{Ø}195_{-0,28606}^{-0,09649} = \text{Ø}194_{,71394}^{,90351} \quad (14)$$

Kama kullanılmadan ve ısıtma, presleme gibi imkanlar olmadan montaj yapılmasına olanak sağlayan Torsiyonel Rijit Fan Kaplinleri için flanş çapının montaj öncesinde motor miline rahatlıkla alıştırmasının yapılabilmiş olması gerekmektedir. Bu geçiş için aşağıda verilen Montaj Öncesi Ölçülerde flanşın iç çapı imal edilmelidir.

$$\text{Motor Mil Çapı} = \text{Ø}195_{0,000}^{0,000} \quad (15)$$

$$\text{Flanş Deliği İmalat Çapı (Montaj Öncesi)} = \text{Ø}195_{0,050}^{0,070} \quad (16)$$

Taguchi metodu uygulanması sonucu tespit edilen optimum sonuç veren L5 parametrelerinin kullanılması sonucu sıkma somunu ile flanş montajı gerçekleştirildiğinde iç çaptaki daralma miktarı aşağıdaki gibi bulunmuştur.

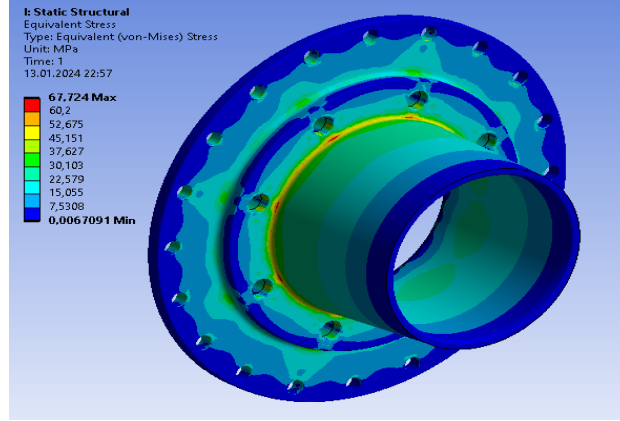
$$0,096 \times 2 \text{ (iki yönde)} = 0,192 \text{ mm} \quad (17)$$

$$(\text{Flanş} + \text{Sıkma Somunu} + \text{Mil})\text{Mont. Sonrası} = \text{Ø}195_{0,050-0,192}^{0,070-0,192} = \text{Ø}194_{,858}^{,878} \quad (18)$$

Mekanik hesaplamalar neticesinde bulunan torkun aktarılması için gerekli kaplin flanşının iç çap değeri ile optimum tasarım parametreleri kullanılarak elde edilen kaplin flanşının iç çap değeri toleranslar da dikkate alınır aşağıdaki gibi bulunmakta ve birbirleriyle uyumlu olmaktadır.

$$(\text{Optimizasyon Sonucu}) \text{Ø}194_{,858}^{,878} = \text{Ø}194_{,713}^{,903} \text{ (Mekanik Hesap Sonucu)} \quad (19)$$

Mile bağlı motorun gücü 2500 kW ve devri 900 devir/dakika'dır, Çizelge 7'de hesaplanan döndürme momenti flanş kullanılarak aktarılmaktadır. Flanşın çevresinde bulunan 20 adet Ø17 çap delik ile bağlantısı yapılmıştır. Ansys ortamında yapılan SEA sonucu sistemde maksimum 67,72 MPa gerilme elde edilmiştir (Şekil 11). S355J2 ve C50N kalite malzemelerin akma sınırı olan 355 MPa ile kıyaslandığında sistem 5,24 kat emniyetlidir.



Şekil 11. Döndürme momenti altında maksimum gerilme

4. SONUÇLAR

- Torsiyonel Rijit Fan Kaplinleri, kama gibi bağlantı elemanları olmadan yüksek motor güçlerini sıkıştırma tekniği ile fan mekanizmasına aktarmaktadır. Sistemdeki sıkma somununu, iç konik yüzey ile flanş dış konik yüzeyi üzerinde hareket ettirilerek geçiş toleransı sağlanmaktadır. Aktarılabilecek tork miktarına uygun toleransın sağlanması için, fiziksel olarak ürünlerin akma gerilmesine oranla emniyetli gerilmeler altında kalması gerekmektedir.
- SEA sonuçları neticesinde Taguchi metodu ile optimum ana değişken parametreleri belirlenmiştir.
- Parametrelere bağlı sekiz farklı test sonucunda optimum sonuç elde edilmiş ve mekanik tolerans hesaplama yöntemi ile doğrulama yapılmıştır.
- Koniklik hesabındaki öteleme parametresi; malzemeler üzerindeki gerilmeleri doğrudan etkilemektedir. Bu durum göz önüne alındığında konik yüzey açılarının aynı ve paralel olması, optimum sonuç aralığında 0,2 mm ötelenmesi gerekmektedir.
- İyi ve kötü durum için konik geçiş sürtünme katsayısı maksimum gerilmeler üzerinde etki sağlayan önemli bir unsurdur. Montaj esnasında yüzeylerin yağlama durumuna dikkat edilmesi gerekmektedir. Sürtünme katsayısı maksimum 0,19 geçmemelidir. Üretim esnasında bu konik geçiş yüzeyleri hassas torna tezgâhlarında işlenmelidir.
- Flanş üzerindeki dayanma, keskin köşe noktasında gerilimde artış olmaması için en az R4 olacak şekilde yuvarlama yapılmalıdır. Bu işlem sıkma somununun dayanma noktasına ulaşmasını engellemeyecek şekilde olmalıdır.

5. KAYNAKLAR

1. Torun, F., 2006. Dişli kaplinlerin diş dibine gerilmesine etki eden parametrelerin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Gebze, 80.
2. Bulgurcu, H., 2015. Havalandırma tesisatı. MMO İstanbul Şube 31. Dönem Havalandırma Tesisatı Kitap Komisyonu, İstanbul, 620.
3. Özden, O.B., Gökçe, B., 2023. Sonlu elemanlar yöntemi ve Taguchi metodu kullanılarak bir kara aracının parametrik olarak optimum tasarımının geliştirilmesi. Dicle University Journal of Engineering, 14(2), 305-313.

4. Canıyılmaz, E., 2001. Kalite geliştirmede Taguchi metodu ve bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
5. Ross, P.J., 1989. Taguchi techniques for quality engineering. McGraw-Hill, Singapore.
6. Taphasanoğlu, S., 2020. Çok yanıtli problemlere sürekli-sürekli kalite karakteristikleri için dinamik Taguchi yöntemi yaklaşımı. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
7. Murat, D., 2013. Kalite karakteristiğinin modellenmesinde tepki yüzeyi metodolojisi: Bir uygulama denemesi. Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
8. Yalçındağ, Y., 2021. Gıda işletmelerinde Taguchi yöntemi ile süreç iyileştirme ve bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
9. Akpolat, A., 2019. Analysis of contact stresses in spur gears by finite element method. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 17, 539-545.
10. Emir, E., Benzer, E., 2021. Structural analysis of industrial foam crusher machine by using finite element method. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 29, 343-350.
11. Gök, A., 2022. Design and numerical analysis of face mask polymer shield against infectious diseases. Journal of Mechanics in Medicine and Biology, 22(6)6, 2250039.
12. Gök, A., Demirci, H., Gök, K., 2016. Determination of experimental, analytical, and numerical values of tool deflection at ball end milling of inclined surfaces. Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 230(2), 111-119.
13. Özden, O.B., Gökçe, B., Erdemir, A., 2022. Investigation of welded joints in finite element analysis. 2nd International Congress on Scientific Advances (ICONSAD'22), 516-522.
14. Sarı, G., Ak, A.F., Akış, A.A., Aydınoğlu, E., 2022. Experimental and numerical modal analysis of a bladed rotor. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 13(1), 57- 63.
15. Esener, E., 2020. Plastisite modellerinde pekleşme etkisinin sonlu elemanlar analizi ile tespiti. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 11(1), 171-181.
16. Gök, K., Gök, A., Kisioglu, Y., 2019. Computer aided finite element simulation of the developed driller system for bone drilling process in orthopedic surgery. Journal of Advanced Manufacturing Systems, 18(4), 583-594.
17. Shaqura, M., Shamma, J.S., 2017. An automated quadcopter CAD based design and modeling platform using solidworks API and smart dynamic assembly. Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 122-131.
18. Çayıroğlu, İ., 2024. Makine elamanları pres sıkı geçme. Ders Notları, Karabük Üniversitesi, Karabük.
19. Temiz, V., 2024. Mil göbek bağlantıları. Makine Elemanları I. Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi.
20. Pınarbaşı, A., 2019. Al 7075'in CNC frezelenmesinde işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve kesme enerjisine etkisinin Taguchi yöntemine göre optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Tarsus Üniversitesi Mersin, 42.

Experimental Investigation of the Effect of Different Parameters on Plate and Frame Heat Exchanger Effectiveness

Merve ALA^{1,a}, Mahir ŞAHİN^{1,b}, Mustafa KILIÇ^{1,c}

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

^aORCID: 0009-0001-4045-5267; ^bORCID: 0000-0002-9565-9160; ^cORCID: 0000-0002-8006-149X

Article Info

Received : 03.09.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606028

Corresponding Author

Mahir ŞAHİN

msahin@atu.edu.tr

Keywords

Heat transfer effectiveness

Plate and frame heat exchanger

Reynolds number

Heat transfer

How to cite: ALA, M., ŞAHİN, M., KILIÇ, M., (2024). Experimental Investigation of the Effect of Different Parameters on Plate and Frame Heat Exchanger Effectiveness. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 951-959.

ABSTRACT

Plate & frame heat exchangers use a series of metal plates to conduct heat transfer between fluids. These fluids are directed through specific channels, ensuring they remain isolated while allowing efficient heat exchange. In recent years, researchers have looked at how different characteristics affect heat exchanger performance. The purpose of this study is to examine the impact of various factors on the effectiveness of the heat exchanger. The experimental analysis was conducted using pure water, considering different Re numbers ranging from 6000 to 30000 and varying hot fluid inlet temperatures between 25°C and 35°C. It was observed that under turbulent flow conditions, the heat transfer effectiveness increased of 13.6% when the Reynolds number varied between Re = 6000 – 20000 at constant $T_{h,in}=35^{\circ}\text{C}$. However, the extent of this increase diminished significantly within the Re = 20000-30000 range. When the inlet temperature of hot fluid was raised $T_{h,in}=25^{\circ}\text{C}$ to 35°C the plate & frame heat exchanger effectiveness increased of 4.3%. This study provides a basis for future studies on heat exchangers used in industrial applications with different geometries and different fluids. It is considered that the results of this study could be used in the future to design more modular and efficient plate heat exchangers for industrial applications.

Plakalı ve Çerçeveseli Isı Değiştiricisi Etkinliğine Farklı Parametrelerin Etkisinin Deneysel İncelemesi

Makale Bilgileri

Geliş : 19.02.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606028

Sorumlu Yazar

Mahir ŞAHİN

msahin@atu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Isı transfer etkinliği

Plakalı ve çerçeveseli ısı değiştiricisi

Reynolds sayısı

Isı transferi

Atıf şekli: ALA, M., ŞAHİN, M., KILIÇ, M., (2024). Plakalı ve Çerçeveseli Isı Değiştiricisi Etkinliğine Farklı Parametrelerin Etkisinin Deneysel İncelemesi. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 951-959.

ÖZ

Plakalı ve çerçeveseli ısı değiştiricileri, akışkanlar arasında ısı transferini sağlamak için bir dizi metal plaka kullanır. Bu akışkanlar, belirli kanallar boyunca yönlendirilip izole edilmeleri sağlanırken verimli bir ısı alışverişi gerçekleşir. Son yıllarda, araştırmacılar farklı özelliklerin ısı değiştirici performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmanın amacı, çeşitli faktörlerin ısı değiştiricinin etkinliği üzerindeki etkisini araştırmaktır. Deneysel analiz, farklı 6000 ile 30000 arasında değişen Re sayıları ve 25°C ile 35°C arasında değişen sıcak akışkan giriş sıcaklıkları dikkate alınarak saf su kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Türbülanslı akış koşulları altında, $T_{h,in}=35^{\circ}\text{C}$ sabitken, Reynolds sayısının 6000 ile 20000 arasında değişmesi durumunda ısı transfer etkinliğinin %13,6 arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, bu artış, Re = 20000-30000 aralığında önemli ölçüde azalmıştır. Sıcak akışkan giriş sıcaklığı $T_{h,in}=25^{\circ}\text{C}$ 'den 35°C'ye artırıldığında, plakalı ve çerçeveseli ısı değiştiricisinin etkinliği %4,3 artmıştır. Bu çalışma, farklı geometrilere ve farklı akışkanlar için endüstriyel uygulamalarda kullanılan ısı değiştiricileri üzerine yapılacak gelecekteki çalışmalar için bir temel oluşturmaktadır. Bu çalışma sonuçlarının, gelecekte endüstriyel uygulamalar için daha modüler ve verimli plakalı çerçeveseli ısı değiştiricileri tasarımında kullanılabileceği düşünülmektedir.

1. INTRODUCTION

Plate heat exchangers (PHE) have grown more necessary components in a variety of sectors, including chemical processing, energy systems, food production, and HVAC systems, thanks to their small size, excellent heat transmission efficiency and ease of maintenance. These devices are highly prized for their capacity to offer a wide surface area for heat transmission in a confined volume, making them excellent for applications with limited space but critical thermal performance [1-2]. Khan et al. [1] shown that using corrugated plates in PHEs improves turbulence and boosts convective heat transfer.

In literature, studies in this field are quite diverse. Heat transfer enhancement methods, the impact of flow patterns, hydraulic performance, fouling, performance of the material used, CFD modeling and experimental studies are some of the research interests. In the past few decades, both experimental and numerical research have significantly improved our understanding of fluid flow phenomenon and heat transfer in PHEs. The chevron pattern on the plates, for example, has a considerable influence on heat transmission and pressure drop performance, as demonstrated by Martin [3] and Gherasim et al. [2]. The chevron angle is very important in defining the degree of turbulence within the heat exchanger, which has a direct influence on thermal performance and energy consumption [4]. Dvořák and Vít [5] utilized computational fluid dynamics (CFD) to investigate heat transfer and fluid flow in PHEs, providing valuable insights for device optimization. Mocnik et al. [6] studied the effect of low Reynolds number flow, $70 \leq Re \leq 469$, on heat exchanger plates in a dimple structure. They stated that there are dead and live zones in the flow channel in such a structure. According to their findings, as the Reynolds number rises, so does the volumetric proportion of dead zones. At $Re \geq 469$, the channel experiences totally turbulent flow. Jouhara et al. [7] experimentally and theoretically studied multi-pass heat pipe-based heat exchangers. The findings demonstrated that the Reynolds number and number of flows are closely related to heat transfer rate, with effectiveness improving as the number of flows rose. The use of nanofluids has emerged as a viable option for improving heat transmission in PHEs. Javadi et al. [8] discovered that adding nanoparticles to the working fluid can significantly enhance heat transfer rate, but it could also result in a rise in pressure loss. When designing PHE systems, it is critical to evaluate the trade-off between enhanced thermal performance and higher pumping power. Similarly, Rios-Iribe et al. [9] studied non-Newtonian fluids and their influence on the thermal-hydraulic performance of PHEs, adding to our understanding of fluid characteristics in these systems.

Zheng et al. [10] examined the heat transfer properties of plate heat exchangers utilized in solar power installations using various nanofluids. The results indicated that nanofluids induce more heat transfer along with pressure loss than the primary fluid. Ahmadi et al. [11] studied the thermal conductivity of nanofluids with experimental and theoretical studies. The study found that temperature, nanoparticle form, and condensation all had an impact on thermal conductivity. The findings suggested that the thermal conductivity of nanofluids increases with rising temperature and nanoparticle concentration. Yang et al. [12] researched the heat transfer approach of pure water on strip fins at 18 various values, stressing the significance of the ratio of a single cell's front fin tip area to the square of the fin thickness. The outcomes suggest that the smaller the ratio, the better the heat transfer capability of the water. Song et al. [13] investigated the heat transfer qualities of the strip fin at different Reynolds numbers, highlighting the importance of a relationship between the fins' heat transfer and flow resistance properties as a foundation for heat exchanger improvement. Jiang et al. [14] performed experimental and theoretical studies on the thermo-hydraulic qualities of liquid helium flow via offset-strip fins. The study identified a tendency in the fluctuation of fin performance under various temperature settings. Wang et al. [15] proposed a novel heat exchanger structure that combines optimized topology and the moving asymptotic technique. They examined the improved structure's thermal and hydraulic performance, as well as its channel composition. The findings indicate that parameter adjustments have an effect on topology. Yu et al. [16] used an efficient and exact technique to improve capsule-type plate heat exchangers. They used a back propagation neural network to generate an approximation model. Following optimization, the heat transfer coefficient improved by 8.3%, while the friction coefficient increased by 14.3%, hence improving the heat transfer effect.

Ho et al. [17] examined micro-surfaces using electrochemical etching, a new method for increasing the thermo-hydraulic capacity of plate heat exchangers. The experimental findings on heat transfer and pressure drop of smaller surfaces were obtained in the Reynolds number ranges of 3000-15000. Investigations illustrate that compared to a smooth surface, the friction factor and pressure drop rise, while the NTU number improves dramatically. Wci'slik [18] investigated the link between the Nusselt number and the

efficiency of a TiO₂:SiO₂/EG: DI nanofluid injected in varying percentages to a chevron-type heat exchanger. The findings indicated that the Nusselt number has a considerable impact on efficiency. Liu et al. [19] provided a physical and mathematical model for a three-layer, two-channeled plate heat exchanger. The heat transfer efficiency and pressure drop results, utilizing water as the working fluid, are analyzed by integrating both numerical simulations and experimental data. Thermal stress and life analysis are also simulated at various temperatures. The results reveal that the lifespan reduces as the working temperature rises, stress concentration spots appear, and thermal stress increases. Kilic and Efeoglu [20] used the impinging fluid jet approach to statistically examine how nanofluids may improve heat transfer from the surface which subjected to high heat flux. The study evaluated the variance in the average Nusselt number. Nazari et al. [21] utilized nanoparticles for working fluids and vortex generators to improve the functioning of fin-plate heat exchangers. They investigated the hybrid nanofluid MWCNT-Fe₃O₄/H₂O with varied fin orientations. The use of vortex generators improves heat transfer mostly by reducing the thermal boundary layer and developing turbulent flow, whereas nanofluids enhance thermal performance by increasing the fluid's thermal conductivity. Dvořák and Vít [22] compared CAE methodologies for PHE design and utilized CFD simulations to simulate a plastic recuperative counter-flow PHE. Their findings revealed the efficacy of CFD tools in estimating pressure drop and heat transfer performance, offering an efficient alternative to experimental trials. They discovered that altering the plate pitch and thickness of the material could have major effects on both pressure drop and the heat transfer coefficient, making CFD an effective tool for developing PHE systems.

Al-Turki et al. [23] studied the frictional, thermal, and exergetic properties of non-parallel plate arrangements in PHE. Their study compares eight different non-parallel layouts to the standard parallel design frequently employed in PHEs. Using verified 3D numerical simulations, the paper demonstrates that non-parallel designs dramatically improve heat transfer performance, with certain configurations obtaining Nusselt values that much exceed those of parallel arrangements. The authors conclude that non-parallel plate layouts provide a viable option for increasing the efficiency of PHEs, particularly in applications requiring improved heat transfer.

Mikhaeil et al. [24] introduced a novel plate heat exchanger for adsorption heat pumps and heat energy storage systems. Their experimental setting indicated a significant increase in water adsorption efficiency, which contributed to a 310% gain in total system performance. This work highlights the potential for adsorber heat exchangers to transform adsorption-based thermal systems. Li and Hrnjak [25] studied the improper distribution of single-phase fluid flow in heat exchangers. The work employs both experimental and mathematical techniques to highlight the impact of unequal flow distribution among parallel streams on overall heat exchanger performance. Owing to the authors, pressure drop across headers and across channels has the largest influence on uneven distribution. Their findings reveal that flow maldistribution gets more significant as the number of plates grows, resulting in a loss of thermal efficiency. Two distribution models based on equal total pressure drop were presented and validated using experimental data, revealing that, while overall flow rate has little influence, the variety of plates has a considerable impact on uneven distribution.

Kilic et al. [26] emphasized the importance of surface deformations in industrial cylinders and performed computational analyses on the cooling process of a commercial cylinder with swirling jets for a variety of parameters, including Re number and hot fluid input temperature. As a result of their findings, they observed that an increase in the Reynolds number leads to a significant reduction in the temperature difference between the inner and outer surfaces of the cylinder, decreasing by 45.4%. This reduction indicates that higher Reynolds numbers enhance the convective heat transfer, promoting better thermal equilibrium within the system. A smaller temperature differential suggests that the heat is being more effectively transferred across the surfaces, likely due to the increased turbulence and fluid mixing associated with higher Reynolds numbers. Consequently, the efficiency of heat dissipation improves, highlighting the importance of Reynolds number optimization in such thermal systems.

Chen et al. [27] studied the reliability of a new plate heat exchanger construction in a solid oxide fuel cell (SOFC) setup. To investigate natural convection heat transmission in the SOFC setup, the researchers used an inverse computational technique that combined numerical simulations and experimental temperature measurements. Their findings show how the positioning of two ducts (high-temperature and low-temperature) influences the creation of primary vortices, velocity patterns, and air temperature distribution within the hot box. The study shows that reliable heat transfer predictions in systems with lower duct spacings require proper flow models, like the realizable $k-\epsilon$ model with a standard wall function.

A review of the literature reveals the presence of various types of heat exchangers and experimental studies with different types of fluids. Unlike previous studies, this research experimentally investigates the impact of different parameters on the effectiveness of a heat exchanger commonly used in industrial applications. Specifically, the study examines the effects of varying Re numbers between $Re = 6000 - 30000$ and hot fluid inlet temperatures ranging from $T_{h,in} = 25\text{ }^{\circ}\text{C} - 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ on the effectiveness of the plate and frame heat exchanger. This study will provide a basis for future studies with different fluids for heat exchangers of different types and geometries.

2. MATERIAL AND METHOD

The plate-type heat exchanger used in this study is made of stainless steel, a material recognized for its high corrosion resistance, durability, and thermal conductivity, making it suitable for heat exchanger applications. The unit is made up of six plates, which play an important role in allowing heat transmission between fluids. The number of plates has a direct impact on the surface area available for heat exchange, with more plates typically resulting in higher heat transfer efficacy due to greater contact area between the fluids. The use of stainless steel as a material ensures that the exchanger can withstand a wide range of circumstances, including high temperatures and harsh conditions, without sacrificing its rigidity or performance. The heat transfer area is 480 cm^2 . In terms of dimensional dimensions, length is 450 mm , width is 250 mm and height is 100 mm . A list of the most commonly used heat exchanger materials in practice is presented in Table 1.

Table 1. The most frequently utilized heat exchanger materials in practice

Material	Maximum operation temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Typical application	References
Carbon steel	427	Low-cost heat exchangers in oil and gas industry	[28], [29]
Stainless steel	816	High-temperature, corrosive environments like chemical and power plants	[30], [31]
Copper	260	Electronics cooling and heat sinks	[28], [29], [31]
Copper alloy	400	Marine and desalination applications	[29], [31]
Aluminum alloy	204	Automotive and lightweight applications	[29], [32], [33]

The Reynolds number was selected between $Re = 6000 - 30000$ in the study. Pure water is used as cold and hot fluid. The plates of the heat exchanger were arranged to allow counterflow of hot water between them. In the experiment, hot water was introduced into the system at different flow rates with inlet temperatures of $T_{h,in} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, and $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the cold inlet temperature was kept constant at $T_{c,in} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

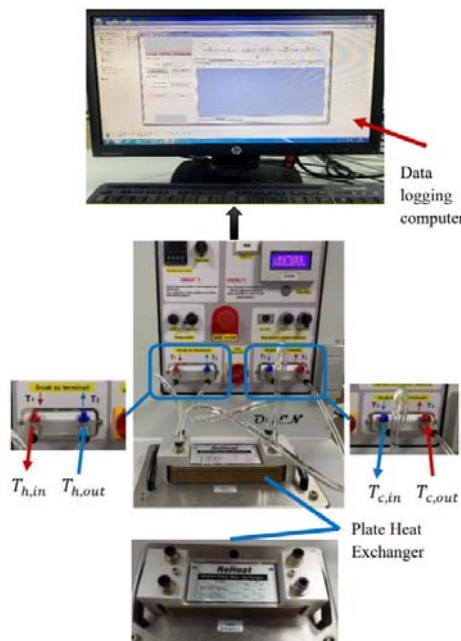


Figure 1. The experimental setup, as well as the plate and frame heat exchanger, are shown schematically

The technical requirements for the plate and frame heat exchanger, as shown in Table 2, emphasize the significance of material selection in determining the unit's performance and lifetime. The choice of materials, such as stainless steel or carbon steel, is crucial for guaranteeing longevity, corrosion resistance, and good heat conductivity. Choosing the proper material may have a considerable impact on the heat exchanger's heat transfer efficiency, capacity to endure operating conditions, and maintenance needs, all of which have a direct impact on both operational costs and system dependability over time.

Table 2. Technical details of the plate & frame heat exchanger and experiment parameters

Plate & frame heat exchanger	
Plate material	Stainless steel
Plate number	6
Heat transfer area	480 cm ²
Length*width*height	450*250*100 mm

The heat exchanger plate is made of stainless steel, which is known for its exceptional corrosion resistance, high temperature tolerance, and mechanical strength. These characteristics guarantee consistent performance under a variety of temperature and chemical environments while retaining structural integrity. The six plates offer a balanced heat transfer surface area of 480 cm², maximizing heat exchange while reducing space needs. The tiny dimensions (450*250*100mm) reflect a design that is optimized for efficiency in areas where space and energy savings are critical, without sacrificing performance.

To get reliable and useful findings from studies using the plate and frame heat exchanger, flow parameters must be precisely set. The choice of Reynolds numbers and inlet temperatures for both hot ($T_{h,in}$) and cold ($T_{c,in}$) streams is critical, since they have a direct impact on heat transfer efficacy and system performance. The Reynolds number, which regulates the flow regime (laminar or turbulent), is changed to mimic various operational circumstances. Inlet temperatures are calibrated to create a constant thermal gradient between the hot and cold streams, resulting in detectable heat transfer behavior throughout a wide variety of flow rates and thermal loads. The working ranges of the parameters in the experimental study are expressed in the table.

Table 3. The parameters performed in the study

Experiment parameters		
Re number	$T_{h,in}$ (°C)	$T_{c,in}$ (°C)
6000	25	20
15000	35	20
20000	45	20
30000	55	20

The flow parameters used in this study are especially intended for systems that run at low temperatures, such as waste heat recovery systems, where efficiency in moderate thermal settings is critical. These systems often deal with small temperature differentials; thus, it is critical to optimize flow conditions for optimal heat transmission. The Reynolds values used (6000 to 30000) range from lower to higher turbulent flow regimes, ensuring that a wide range of operating scenarios are covered. This range is appropriate for applications that demand improved convective heat transfer while minimizing pressure losses. The cold input temperature is kept constant at 20°C to imitate circumstances often observed in industrial cooling operations, while altering the hot inlet temperature enables for the evaluation of heat exchanger performance under various thermal loads. This technique gives full knowledge of the system's behavior in real-world applications requiring waste heat recovery at low to moderate temperatures.

3. DATA REDUCTION

In this experimental study, inlet temperature and Reynolds number are used as parameters to calculate heat transfer performance and effectiveness. The Reynolds number (Re), a dimensionless quantity, is calculated using the following equation: (1-4) [34]

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (1)$$

where ρ is the fluid density (kg/m³), V is the fluid velocity (m/s), D_h is the hydraulic diameter of the fluid inlet (m), and μ is the fluid's dynamic viscosity (Pa·s). This formula links essential flow properties, assisting

in determining whether the flow regime is laminar, transitional, or turbulent. The Reynolds number is critical in the analysis of fluid flow and heat transfer in heat exchangers, since it has a direct influence on convective heat transfer efficiency. For hot and cold fluid flows:

$$\dot{Q}_{cold} = \dot{m}_c c_{pc} (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{hot} = \dot{m}_h c_{ph} (T_{h,in} - T_{h,out}) \quad (3)$$

The expression $\dot{m}_c c_p$ is the product of the specific heat and the mass flow rate of the fluid and is calculated separately for each of the hot fluid and cold fluid.

Maximum heat transfer rate in the heat exchanger is determined as;

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} \Delta T_{max} \quad (4)$$

Heat transfer effectiveness is expressed by the dimensionless parameter ϵ and is defined as

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}_{act}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{\text{Actual heat transfer rate}}{\text{Maximum heat transfer rate}} \quad (5)$$

The actual heat transfer rate is the quantity of heat exchanged between fluids during the operation of a heat exchanger [34]. It is an important aspect in calculating the heat exchanger's efficacy, which is the ratio of actual heat transfer to maximal heat transfer under ideal conditions. The maximum heat transfer implies ideal efficiency, but the actual heat transfer considers real-world variables such as fluid flow rates, temperature variations, and the heat exchanger's physical design. This ratio assesses the heat exchanger's efficiency in comparison to its theoretical maximum.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Effect of Different Re Number on Heat Exchanger Effectiveness

At a constant water temperature of 35°C, the flow rate was gradually adjusted, resulting in an increase in the Reynolds number from Re = 6000 to Re = 30000. The experimental results revealed that when the hot inlet temperature $T_{h,in}$ was maintained at 35°C, the effectiveness of the heat exchanger increased significantly as the Reynolds number rose from Re = 6000 to Re = 20000. Beyond Re = 20000, however, the increase in effectiveness was minimal. (Figure 2)

At 35 °C, while the effectiveness increased by 11.6% as the Reynolds number raise from Re = 6000 to Re = 20000, only a 2.0% increase was observed when the Reynolds number further increased from Re = 20000 to Re = 30000.

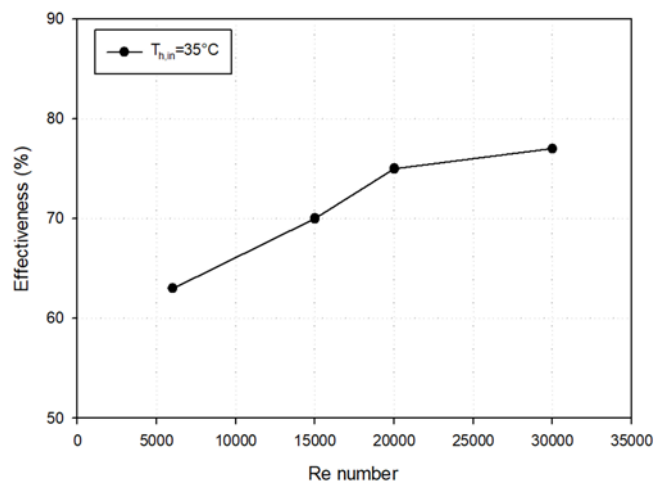


Figure 2. Variation of heat exchanger effectiveness at different Reynolds numbers at constant hot inlet temperature

The results clearly demonstrate that raising the Reynolds number from 6000 to 20000 at a constant input temperature of 35°C improves heat exchanger efficacy by 11.6%, owing to improved turbulence and convective heat transfer. However, above $Re = 20000$, the gain in effectiveness is negligible, at just 2%, showing that the system is approaching an ideal turbulence level where additional increases in flow rate provide diminishing benefits. This demonstrates the practical limitations of the Reynolds number's influence on heat transfer within this setup.

4.2. Effect of Different Hot Inlet Temperatures on Heat Exchanger Effectiveness

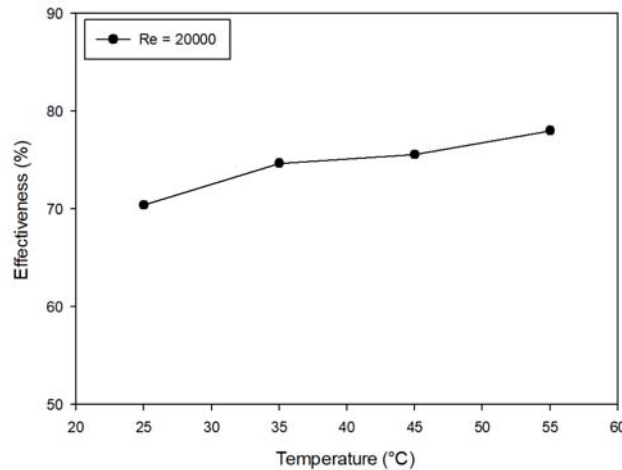


Figure 3. The effect of different $T_{h,in}$ temperature on the constant $Re = 20000$ on the effectiveness

When examining the effect of hot inlet temperature on effectiveness at a constant Reynolds number of 20000, a total increase of 7.6% in effectiveness was observed as the temperature increased from 25°C to 55°C. The most significant increase, 4.3%, occurred between 25°C and 35°C. Subsequently, a more moderate increase of 2.4% was noted between 45°C and 55°C. This pattern suggests that the initial rise in inlet temperature significantly enhances effectiveness, but the rate of increase slows as the temperature approaches higher levels (Figure 3).

5. CONCLUSIONS

In this study, the effect of different parameters on the effectiveness of plate and frame heat exchanger was investigated experimentally. The investigated parameters are Re number ranging from 6000 to 30000 and hot fluid inlet temperature ranging from 25 °C to 55 °C. In conclusion;

- When the Reynolds number was rose in the range of 6000-30000, it was determined that the heat exchanger effectiveness increased of 13.6% at a constant $T_{h,in} = 35$ °C. It was examined that the heat exchanger effectiveness increases at all Re numbers since the velocity of the fluid increases the value of the overall heat transfer coefficient.
- When the inlet temperature of hot fluid was increased in the range o $T_{h,in} = 25$ °C - 55 °C, it was determined that the heat exchanger effectiveness increase of 4.3%. The comparatively minor improvement in effectiveness at higher inlet temperatures can be ascribed to the fact that heat exchanger performance is not primarily determined by inlet temperature. While the intake temperature affects the thermal gradient between the hot and cold fluids, the total performance of the heat exchanger is determined by a number of parameters, including heat exchanger design, flow characteristics, and available surface area for heat transfer. As the temperature rises, the system may reach a point where further increases in inlet temperature have diminishing impacts on efficacy due to constraints in these other elements, such as the previously set flow regime or the exchanger's maximum heat transfer capacity.
- Based on the findings of this study, future research can explore the performance of various heat exchanger types and alternative working fluids, such as nanofluids, across differently structured heat

transfer surface areas. These investigations could provide valuable insights into optimizing heat exchanger designs. Additionally, the results of this study offer a foundation for developing new heat exchanger models with modular construction, aiming to achieve superior heat transfer effectiveness and adaptability for diverse industrial applications.

6. REFERENCES

1. Khan, T.S., Khan, M.S., Chyu, M.C., Ayub, Z.H., 2010. Experimental investigation of single phase convective heat transfer coefficient in a corrugated plate heat exchanger for multiple plate configurations. *Applied Thermal Engineering*, 30(8-9), 1058-1065.
2. Gherasim, I., Taws, M., Galanis, N., Nguyen, C.T., 2011. Heat transfer and fluid flow in a plate heat exchanger part I. experimental investigation. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(8), 1492-1498.
3. Martin, H., 1996. A theoretical approach to predict the performance of chevron-type plate heat exchangers. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 35(4), 301-310.
4. Kanaris, A.G., Mouza, A.A., Paras, S.V., 2009. Optimal design of a plate heat exchanger with undulated surfaces. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(6), 1184-1195.
5. Dvořák, V., Vít, T., 2017. Evaluation of cae methods used for plate heat exchanger design. *Energy Procedia*, 111, 141-150.
6. Močnik, U., Čikić, A., Muhič, S., 2024. Numerical and experimental analysis of fluid flow and flow visualization at low Reynolds numbers in a dimple pattern plate heat exchanger. *Energy*, 288, 129812.
7. Jouhara, H., Almahmoud, S., Brough, D., Guichet, V., Delpech, B., Chauhan, A., Serey, N., 2021. Experimental and theoretical investigation of the performance of an air to water multi-pass heat pipe-based heat exchanger. *Energy*, 219, 119624.
8. Javadi, F.S., Sadeghipour, S., Saidur, R., BoroumandJazi, G., Rahmati, B., Elias, M.M., Sohel, M.R., 2013. The effects of nanofluid on thermophysical properties and heat transfer characteristics of a plate heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 44, 58-63.
9. Rios-Iribe, E.Y., Cervantes-Gaxiola, M.E., Rubio-Castro, E., Hernández-Calderón, O.M., 2016. Heat transfer analysis of a non-Newtonian fluid flowing through a plate heat exchanger using CFD. *Applied Thermal Engineering*, 101, 262-272.
10. Zheng, D., Wang, J., Chen, Z., Baleta, J., Sundén, B., 2020. Performance analysis of a plate heat exchanger using various nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 158, 119993.
11. Ahmadi, M.H., Mirlohi, A., Nazari, M.A., Ghasempour, R., 2018. A review of thermal conductivity of various nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*, 265, 181-188.
12. Yang, Y., Li, S., Liu, H., 2023. Experimental investigation on the heat transfer behavior of water in offset strip fin channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 202, 123656.
13. Song, R., Cui, M., Liu, J., 2017. A correlation for heat transfer and flow friction characteristics of the offset strip fin heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, 695-705.
14. Jiang, Q., Zhuang, M., Zhu, Z., Shen, J., 2019. Thermal hydraulic characteristics of cryogenic offset-strip fin heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 150, 88-98.
15. Wang, D., Wu, Q., Wang, G., Zhang, H., Yuan, H., 2024. Experimental and numerical study of plate heat exchanger based on topology optimization. *International Journal of Thermal Sciences*, 195, 108659.
16. Yu, C., Shao, M., Zhang, W., Wang, G., Huang, M., 2024. Study on heat transfer synergy and optimization of capsule-type plate heat exchangers. *Processes*, 12(3), 604.
17. Nguyen, D.H., Nguyen, P.Q., Rehman, R.U., Kim, J.F., Ahn, H.S., 2024. Optimizing the effect of micro-surface on the thermal hydraulic performance of plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 239, 122172.
18. Wciślik, S., 2024. The influence of nusselt correlation on exergy efficiency of a plate heat exchanger operating with TiO₂: SiO₂/EG: DI hybrid nanofluid. *Inventions*, 9(1), 11.
19. Liu, X., Liu, Y., Wang, Y., Chen, X., Feng, X., Wang, S., Liu, Q., 2024. In situ heterojunction-based PEC sensor coupled with LSPR for sensitive detection of aflatoxin B1. *Journal of the Electrochemical Society*, 171(4), 046501.
20. Wang, Y., Ding, S., Yan, A., Wang, F., 2024. Characterization of brazed plate heat exchanger performance based on experimental and coupled heat-fluid-solid numerical simulation. In *Journal of Physics: Conference Series*, 2683(1), 012016. IOP Publishing.

21. Alhuyi Nazari, M., Mukhtar, A., Mehrabi, A., Ahmadi, M.H., Sharifpur, M., Luong, T.N.L., 2024. Effect of using hybrid nanofluid and vortex generator on thermal performance of plate-fin heat exchanger: numerical investigation. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(9), 4227-4237.
22. Dvořák, V., Vít, T., 2017. CAE methods for plate heat exchanger design. *Energy Procedia*, 134, 234-243.
23. Al-Turki, Y.A., Moria, H., Shawabkeh, A., Pourhedayat, S., Hashemian, M., Dizaji, H.S., 2021. Thermal, frictional and exergetic analysis of non-parallel configurations for plate heat exchangers. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 161, 108319.
24. Mikhaeil, M., Gaderer, M., Dawoud, B., 2020. On the development of an innovative adsorber plate heat exchanger for adsorption heat transformation processes; an experimental and numerical study. *Energy*, 207, 118272.
25. Li, W., Hrnjak, P., 2021. Distribution de l'écoulement monophasique dans les échangeurs de chaleur à plaques: expériences et modèles. *International Journal of Refrigeration*, 126, 45-56.
26. Kılıç, M., Şahin, M., Demircan, T., Kilinc, Z., Ullah, A., 2023. Numerical investigation of cooling an industrial roller by using swirling jets. *El-Cezeri*, 10(1), 147-159.
27. Chen, H.T., Chang, S.C., Hsu, M.H., You, C.H., 2021. Experimental and numerical study of innovative plate heat exchanger design in simplified hot box of SOFC. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 181, 121880.
28. Wang, B., Klemeš, J.J., Li, N., Zeng, M., Varbanov, P.S., Liang, Y., 2021. Heat exchanger network retrofit with heat exchanger and material type selection: A review and a novel method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110479.
29. Careri, F., Khan, R.H., Todd, C., Attallah, M.M., 2023. Additive manufacturing of heat exchangers in aerospace applications: a review. *Applied Thermal Engineering*, 121387.
30. Li, K., Zeng, Y., 2022. Corrosion of heat exchanger materials in co-combustion thermal power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112328.
31. Cramer, C.L., Lara-Curzio, E., Elliott, A.M., Aguirre, T.G., Yoon, B., Fricke, B.A., Nawaz, K., 2024. Material selection and manufacturing for high-temperature heat exchangers: Review of state-of-the-art development, opportunities, and challenges. *International Journal of Ceramic Engineering & Science*, 6(5), e10230.
32. Li, J., Yang, Z., Hu, S., Duan, Y., 2021. Influences of fluid corrosivity and heat exchanger materials on design and thermo-economic performance of organic Rankine cycle systems. *Energy*, 228, 120589.
33. Zhang, X., Keramati, H., Arie, M., Singer, F., Tiwari, R., Shooshtari, A., Ohadi, M., 2018. Recent developments in high temperature heat exchangers: A review. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 11.
34. Cengel, Y.A., Ghajar, A.J., 2014. *Heat and Mass Transfer Fundamentals and Applications*. (in SI Units). 5th Edition, McGraw-Hill Higher Education, New York.

ABBREVIATIONS

PHE	Plate Heat Exchangers
NTU	Number of transfer unit
Re	Reynolds number
$T_{h,in}$	Inlet temperature of hot fluid
CAE	Computer-Aided Engineering
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
$T_{c,in}$	Inlet temperature of cold fluid
HVAC	Heating, Ventilation, and Air Conditioning
$T_{c,out}$	Outlet temperature of cold fluid
EG	Ethylene Glycol
$T_{h,out}$	Outlet temperature of hot fluid
DI	Deionized Water
MWCNT	Multi-Walled Carbon Nanotubes



Design and Realization of a Novel Programmable Tobacco Smoking Simulator

Mustafa İSTANBULLU^{1,a}, A. Özgür POLAT^{2,3,b}, Koray SOYGUN^{4,c}, Deniz YUVA^{5,d}

¹Cukurova University, Faculty of Engineering, Department of Biomedical Engineering, Adana, Türkiye

²Karamanoğlu Mehmetbey University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Karaman, Türkiye

³Solvaytech Engineering, Adana, Türkiye

⁴Cukurova University, Faculty of Dentistry, Department of Prosthetic Dentistry, Adana, Türkiye

⁵Hatay Oral and Dental Health Center, Ministry of Health, Hatay, Türkiye

^aORCID: 0000-0001-5414-7380; ^bORCID: 0000-0002-4922-6567; ^cORCID: 0000-0002-0145-3947;

^dORCID: 0000-0003-4868-4715

Article Info

Received : 06.06.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606041

Corresponding Author

Mustafa İSTANBULLU

mistanbullu@cu.edu.tr

Keywords

Smoking simulator

Effects of Smoke

Dental analysis

3D modelling

Microcontroller

How to cite: İSTANBULLU, M., POLAT, A.Ö., SOYGUN, K., YUVA, D., (2024). Design and Realization of a Novel Programmable Tobacco Smoking Simulator. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 961-968.

ABSTRACT

Cigarette smoke significantly impacts teeth and dental composites, making smoking simulators vital for studying discoloration, staining, surface roughness, and topography. Conventional simulators face challenges such as incomplete process simulation, inadequate smoke exposure unit design, and improper specimen positioning. This study presents a novel, accurate, and automatic tobacco smoking simulator addressing these issues. The simulator includes a life-sized artificial mouth unit, 3D-printed jaw models for natural dental sample positioning, a vacuum system to simulate positive/negative pressure, and a reprogrammable microcontroller for customizable smoking profiles. Tested with 140 cigarettes over 14 days, the system effectively demonstrated color changes in dental materials. Adjustable parameters such as puff volume, inhalation/exhalation time, smoke density, and smoking speed allow replication of low, moderate, and high-intensity smoking profiles. Portable, low-cost, and versatile, the simulator provides a robust solution for research and education, enabling investigations into the effects of smoke on teeth and dental materials under realistic conditions.

Özgün Programlanabilir Bir Sigara İçme Simülatörünün Tasarımı ve Gerçekleşmesi

Makale Bilgileri

Geliş : 06.06.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606041

Sorumlu Yazar

Mustafa İSTANBULLU

mistanbullu@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Sigara içme simülatörü

Sigara dumanı etkileri

Dental analiz

3B modelleme

Mikrokontrolcü

Atf şekli: İSTANBULLU, M., POLAT, A.Ö., SOYGUN, K., YUVA, D., (2024). Design and Realization of a Novel Programmable Tobacco Smoking Simulator. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 961-968.

ÖZ

Sigara dumanının dişler ve dental kompozitler üzerindeki etkileri, renk değişimi, lekelenme, yüzey pürüzlülüğü ve topografya gibi konuların incelenmesinde önemli bir araştırma alanıdır. Ancak geleneksel sigara simülatörleri, sürecin eksik simülasyonu, uygun olmayan duman maruziyet birimi tasarımı ve dental örneklerin yanlış yerleştirilmesi gibi sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu çalışma, bu eksiklikleri gidermeyi amaçlayan yenilikçi, doğru ve otomatik bir sigara simülatörü sunmaktadır. Simülatör, gerçek bir ağız hacmine sahip yapay bir ağız birimi, doğal diş yerleşimi için 3D yazıcıyla üretilmiş çene modelleri, pozitif/negatif basınç oluşturmak için bir vakum sistemi ve özelleştirilebilir sigara profilleri için yeniden programlanabilir bir mikrodenetleyici içermektedir. 14 gün boyunca 140 sigara ile test edilen sistem, dental materyallerdeki renk değişimlerini etkili bir şekilde göstermiştir. Ayarlanabilir parametreler (nefes hacmi, soluk alıp verme süresi, duman yoğunluğu, sigara içme hızı) düşük, orta ve yüksek yoğunluklu sigara profillerinin simülasyonunu sağlamaktadır. Taşınabilir, düşük maliyetli ve çok yönlü bu simülatör, araştırma ve eğitim için güçlü bir çözüm sunmaktadır.

1. INTRODUCTION

In recent years, the appearance of teeth has great importance for patients and dentists. The desire of patients to have whiter teeth has led dentists to meet expectations in terms of dental aesthetics. Discoloration of teeth is a common condition that almost everyone is exposed to. Watts and Addy [1] reported that tooth discoloration is classified as internal or external staining. Intrinsic stains are the result of the incorporation of pigmented materials into dental tissues. Localized discoloration may result from pulp necrosis and bleeding, infection of primary teeth, inadequate endodontic treatment, and amalgam staining as stated in the study of Hattab et al. [2]. Moreover, as given in [2,3], internal discoloration may also be caused by environmental or genetic factors affecting tooth structures, such as dental fluorosis, tetracycline therapy, childhood diseases, and hereditary disorders such as amelogenesis and dentinogenesis imperfecta. Another reason causing discoloration on the teeth could be due to habits that lead to external stains, using a substance that contains pigmented material or various chromogens. Addy and Moran [4] shown that, coffee, tea, red wine, orange juice, soft drinks, and food colorants are considered coloring agents that cause tooth discoloration. In addition, researchers [1,2,5] reported that occupational exposure to chemicals, tobacco smoking, chewing, mouthwashes, and frequent use of certain drugs are etiological factors that cause tooth discoloration.

In the literature, researchers investigate the effects of tobacco smoke on the color change, surface roughness, and surface topography of tooth samples. In these studies, using primitive smoking devices/simulators is the overall approximation for exposing dental samples to tobacco smoke. Patil et al. [6] placed 30 dental specimens in a plastic box including a hole to place the cigarette. Dental samples are exposed to tobacco smoke through a vacuum system. However, contrary to their natural placement in the mouth, tooth samples were placed on a circular teeth holder. The plastic box where the tooth samples are placed is much larger than the natural volume of a mouth. Thus, the large box volume makes an essential difference in the exposure of the teeth to tobacco smoke in terms of low smoke density. In the study of Roman et al. [5], only one dental sample is placed in the smoking device. The capsule where the tooth sample is placed is tiny compared to the natural volume of a mouth, unlike Patil's study. The tiny tooth capsule leads to high smoke density and over-smoke exposure. Furthermore, since the placement of the tooth sample in the capsule differs from the natural position of the tooth in the mouth, the experiment could not correctly simulate the smoke exposure process. Mathias et al. [7] designed a smoking device with two chambers to analyze the effects of tobacco smoke on composite tooth specimens. In the related device, dental samples are exposed to the smoke of ten cigarettes simultaneously. As in previous studies, the volume of the unit where the dental samples are placed differs considerably from the natural mouth volume. Similarly, the smoking device in the study of Wasilewski et al. [8] also has an inappropriate simulation environment in terms of both natural mouth volume and exposure process to tobacco smoke. The problems mentioned above are also observed in other studies in the literature [8-13] discussing the various effects of tobacco smoke on dental samples.

The literature studies summarized above indicate that, common problems arise in smoking simulator devices. Firstly, the smoking process has not been simulated correctly yet. In these studies, dental samples are only exposed to tobacco smoke for a particular time. However, the smoking process consists of three stages: inhaling the smoke, keeping it in the mouth for a specific time, and exhaling the smoke. Previous studies have not adequately examined the smoking process in a way that reflects natural smoking behaviors. This paper addresses this gap by presenting a novel simulator that more accurately mimics the natural smoking process, offering improvements over earlier designs and methodologies.

The second problem for traditional smoking simulators is the inaccurate design in dimensions of the oral environment where the teeth are exposed to smoke. In the recent studies, the volume of the unit where the dental samples are exposed to tobacco smoke is usually much larger than the natural volume of the mouth. Thus, experiments in the literature fundamentally differ from the actual smoking process regarding smoke density.

The third problem with traditional smoking simulators is positioning dental specimens incorrectly in the smoke exposure unit. In the existing studies, tooth samples are exposed to tobacco smoke on single, circular, or linear tooth holders. However, dental specimens should have been positioned realistically as in a mouth during the experiment to achieve more accurate results.

Due to the deficiencies of the previous smoking simulator designs, a novel design is necessary to obtain and analyze the effects of cigarette smoke on dental specimens more accurately.

On the other hand, although commercially analytical smoking machines are available (Cerulean, Milton Keynes, UK), these devices mainly utilized for investigation of various chemicals in tobacco smoke, nicotine analysis, particulate matter determination, cigarette burning time, and combustion temperature. These devices are not designed to simulate different smoking profiles and do not provide tobacco smoke exposure to dental specimens similarly positioned in the mouth.

This paper addresses the critical gaps identified in the existing literature by presenting a novel, accurate, and automated smoking simulator designed specifically for dental research. Unlike previous devices, the simulator developed in this study replicates the entire smoking process ensuring a more realistic simulation of smoke exposure. Furthermore, the simulator incorporates a 3D-printed upper and lower jaw model to position dental specimens in a manner that mimics their natural placement in the mouth, which enhances the accuracy of exposure. The artificial mouth unit is designed to have a volume identical to that of an adult human, ensuring proper smoke density during the experiment. Additionally, the reprogrammable controller allows for the simulation of different smoking profiles (low, moderate, and high). These innovations make the presented simulator a valuable tool for accurately investigating the effects of cigarette smoke on dental materials, providing a solution to the limitations of previous designs.

2. MATERIALS AND METHODS

The presented novel reprogrammable smoking simulator system aims to simulate the complete smoking process of a low, moderate, or high-level smoker. Besides, users can define the smoking profile in terms of puff volume, inhalation/exhalation time, smoke density, and smoking speed. In the literature, it has not been designed that such a smoking simulator which uses the natural volume of the mouth, achieves the inhalation/exhalation process, and places the teeth in their original position inside the mouth. Since the presented simulator simulates the complete smoking process, the various effects of smoke on tooth samples can be observed as correctly as in real life.

In recent years, 3D printing and modeling techniques, as suggested in [14-17], are emerging to design and simulate the systems more realistically. Today many studies in various fields contain 3D modeling and printings. Hence, 3D models of the upper and lower human jaws, in the same dimensions with an adult man's, are printed in this work, as shown in Figure 1. Upper and lower 3D jaw models contain tooth knobs to mount the tooth samples in their natural positions in the mouth.

After placing the desired number of tooth samples (methyl methacrylate) on the jaw models, both jaws are fixed in an artificial mouth unit, as shown in Figure 2. Contrary to the systems in the literature, the artificial mouth unit of the presented simulator is designed according to an adult man average mouth dimensions (70.5ml) as stated in the study of Khare et al [18]. Besides, the artificial mouth unit is air-tight during the smoke exposure process.



Figure 1. 3D printings of upper and lower human jaws

The presented simulator has two step-motor systems operating synchronically. The first motor system inserts and removes the cigarette from the artificial mouth unit, while the second provides a vacuum according to a pre-defined smoking profile. The second motor system operates based on creating positive and negative pressure on the artificial mouth unit. The two motor systems run simultaneously until the

cigarette is consumed. The presented simulator operates as many times as the number of cigarettes that will expose the tooth samples to the smoke. Finally, the remaining smoke is exhausted using two fans and a flue unit.



Figure 2. Natural placement of dental samples on the 3D printed jaw model

2.1. Software and Hardware of the Simulator

A 12V power supply provides the power of the smoking simulator. The presented smoking simulator is controlled by an ATMEGA328P microcontroller and application-specific software. The software contains two main parts. The first part controls the process of inhalation/exhalation of the cigarette, while the second controls the negative pressure that will be created in the artificial mouth. The flow chart of the presented smoking simulator is given in Figure 3.

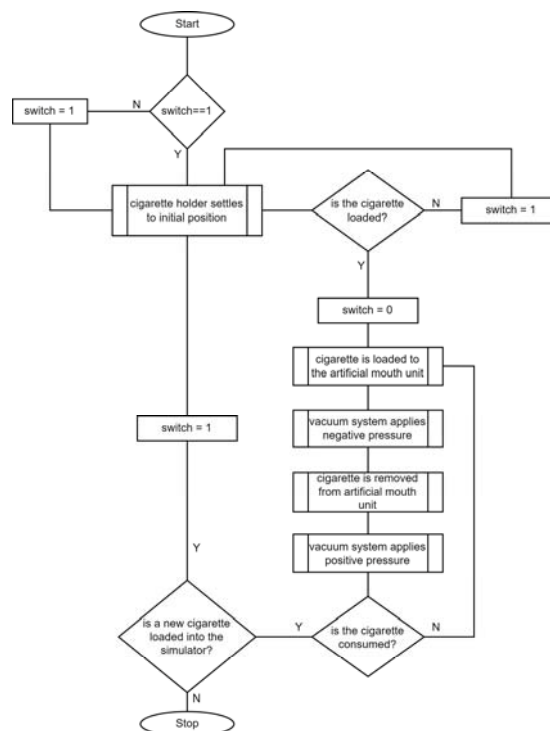


Figure 3. The flow chart of the smoking simulator

Inserting and removing the cigarette from the artificial mouth unit is done by the first part of the simulator. The related part consists of a cigarette holder, an artificial mouth unit, a 3D-printed upper/lower jaw, the motor that provides the linear movement of the cigarette in two axes, a rack, and various connection equipment. The second part of the presented simulator performs the inhalation and exhalation of the smoke to the artificial mouth unit. This part consists of an injection cylinder, a holder, a motor that provides the linear movement of the injection piston in two axes, a shaft, and various connection equipment. Figure 4(a)

shows the technical drawing of the complete system in a 1/5 ratio, while the 3D model of the simulator is given in Figure 4(b).

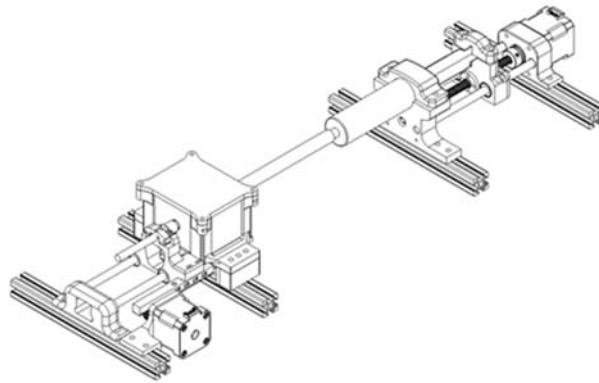
Before operating the presented smoking simulator, a cigarette should be placed in the cigarette holder, and tooth samples should be placed on the 3D jaw model in natural positions. When the simulator starts, the cigarette holder and injection piston come to their starting positions. Hence, the two parts of the system mentioned above start to run simultaneously. At first, the cigarette is placed in the artificial mouth via motor and rack in the first part, and then, the piston in the second part moves to the new position by creating negative pressure (inhalation process). This new position of the piston can be defined by using the following equation:

$$\Delta V = K \eta \lambda \quad (1)$$

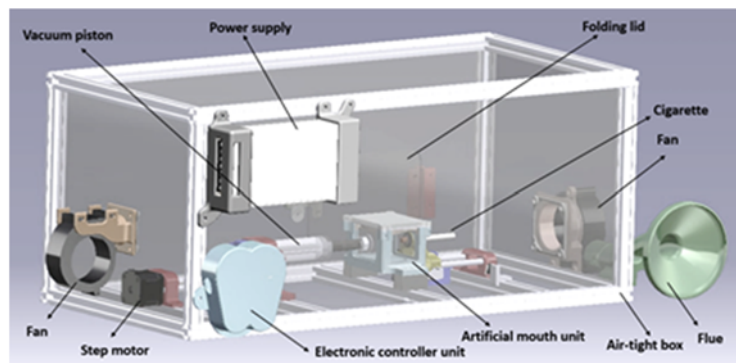
where, ΔV is the inhalation volume of the tobacco smoke, η is the circular tour number, λ is the pitch range of the shaft, and K is the volume transformation coefficient in ml/m.

When the injection piston comes to its new position, the tobacco smoke is propagated in the artificial mouth unit in ΔV volume.

In the next step, the cigarette holder comes to the previous position, and the cigarette is removed from the artificial mouth. After that, to exhaust the cigarette smoke from the artificial mouth unit, the injection piston creates positive pressure and comes to its previous position. Hence, the inhalation/exhalation process is performed. This cycle continues until the cigarette is consumed. Commercially available short-length cigarettes were tested on the simulator. The cigarette length and puff volume were kept constant. The amount of cigarette burned during each puff was measured, and through trial and error, it was determined that the cigarette is completely consumed after 37 cycles. Therefore, when a cigarette is lighted up on the simulator, the simulator operates for 37 cycles for short-length cigarettes before automatically stopping. The presented smoking simulator is placed in an air-tight box, and the remaining smoke is continuously exhausted via two fans and a flue system.



a) Technical drawing of the mechanical system in a 1/5 ratio



b) Details of the equipment

Figure 4. Design of the smoking simulator

3. RESULTS AND DISCUSSION

Discoloration, stain, surface roughness, and surface topography are common adverse effects of cigarette smoke on teeth or dental composite specimens. Unfortunately, many researchers focusing on these topics study with primitive simulators. Traditional smoking simulators generally suffer from three main issues: absence of inhalation/exhalation process of smoking, high/low smoke exposure densities of dental specimens, and incorrect positioning of tooth samples during the experiments. These major unsolved problems of traditional smoking simulators cause insufficient and inaccurate data during the analysis. In this work, the complete process of smoking is modelled and simulated by the presented novel simulator.

The presented simulator is designed to simulate cigarette smoking in a manner that closely mimics real-life conditions, allowing for controlled exposure of dental samples to cigarette smoke. Based on a comprehensive literature review, it was determined that the average human oral cavity volume is 178.75 cm³, the average puff volume is 43 ml, the average puff duration is 1.8 seconds, and the average number of cigarettes smoked per day is 10. A rectangular prism-shaped artificial mouth unit with dimensions of 6.5 x 5 x 5.5 cm has been designed for the simulator. This artificial mouth unit features a 0.5 cm diameter hole to insert a cigarette. Integrated into the artificial mouth unit is a vacuum system that draws cigarette smoke in and expels it. The planned smoking cycles for testing the presented simulator are as follows: A cigarette is automatically inserted into the artificial mouth unit, and by creating negative pressure, a total of 43 ml of cigarette smoke is drawn in over 1.8 seconds. Following this, a mechanism removes the cigarette from the artificial mouth unit. Next, positive pressure is generated within the artificial mouth unit to expel the smoke at the same rate and volume. These processes complete one cycle. After the first cycle, the cigarette is reinserted into the artificial mouth unit, and the cycles continue until the cigarette is wholly consumed.

In order to test the presented smoking simulator, dental samples mounted on 3D printed jaw model given in Figure 2 are used as a control group. Related samples are exposed smoke of 140 cigarettes (10 cigarettes per day) in 14-day duration. Dental samples exposed to cigarette smoke were brushed twice daily with toothpaste for 2 minutes. As a experiment group, Figure 5 shows the discoloration of samples after testing the system. The presented simulator offers a controlled, reprogrammable and accurate smoking simulation. The photograph of the presented smoking simulator is given in Figure 6.



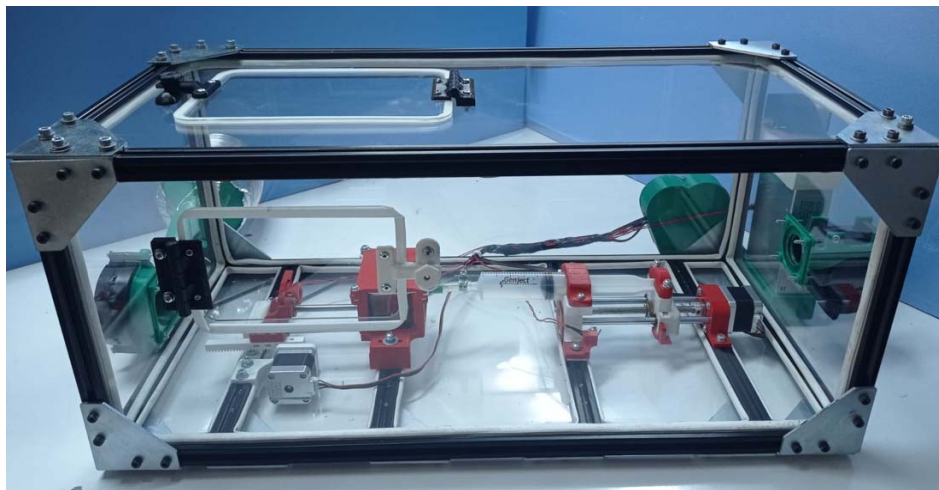
Figure 5. Dental samples after 140 cigarette smoke exposure

Table 1 provides a detailed comparison between this study's simulator and other advanced models in the literature, highlighting several significant improvements. The presented simulator distinguishes itself by uniquely positioning dental specimens in a natural mouth placement, enabling realistic smoke exposure on samples—a feature absent in prior designs. By replicating the natural orientation of dental samples within a mouth structure, this simulator more accurately mimics actual conditions encountered during smoking, thereby enhancing the validity of the measurements. Furthermore, unlike previous simulators, this device incorporates inhalation and exhalation processes, a critical factor that adds dynamic flow to the simulation, which more closely resembles real-life smoking patterns.

Table 1. Comparison of the presented study with the other state of art studies

Ref.	Natural placement of samples	Simulation environment volume	Inhalation/exhalation processes	Different smoking profiles
[5]	No	<10 ml (high exposure)	No	No
[6]	No	>1500 ml (low exposure)	No	No
[7]	No	>1000 ml (low exposure)	No	No
[8]	No	>750 ml (low exposure)	No	No
Prop. Study	Yes	≈ 70.5 ml (proper exposure)	Yes	Yes

A key design feature of the presented simulator is its simulation chamber, which approximates the volume of an adult male mouth (70.5 ml). This carefully controlled environment avoids the high or low smoke exposure levels seen in previous systems, where larger chambers (750–1500 ml) often diluted exposure. By achieving a balanced exposure intensity, this device offers a more consistent simulation that can enhance the reliability of results, particularly when studying material degradation or surface alterations in dental specimens. Additionally, the simulator's adaptability allows it to run three smoking profiles—low, moderate, and high exposure settings—reflecting variations in individual smoking habits. This feature makes it possible to examine the differing impacts of smoking intensity on dental materials and soft tissues, expanding its range of potential applications.

**Figure 6.** The photograph of the presented smoking simulator

In overcoming these major limitations of earlier devices, the simulator's microcontroller-based control mechanism ensures high flexibility and programmability, making it a versatile and accessible research tool. This low-cost, user-friendly, fully automated platform supports not only whole-cigarette exposure simulations but also an array of experimental needs. Planned future studies include investigating cigarette smoke's impact on osseointegration in intraosseous applications, specifically between bone and dental implants, to better understand how smoke affects implant stability. Additional experiments will assess the effects of cigarette smoke on the color and surface properties of dental application materials, such as restorative resins and composites, providing insight into long-term aesthetic outcomes.

Furthermore, animal studies using the simulator could explore the effects of smoke on soft tissue healing in periodontal applications, yielding valuable information on how smoke exposure influences recovery and tissue regeneration. Beyond its research utility, the simulator is envisioned as an educational tool, capable of demonstrating to patients and dental students the detrimental effects of smoking on teeth and dental materials, thereby promoting greater awareness of smoking's risks.

4. ACKNOWLEDGMENTS

This work is supported by Scientific Research Projects Unit of Çukurova University, in project TDH-2021-14095. The simulator designed and implemented in this study has been patented, named a "Programlanabilir Sigara İçme Simülatorü" (Patent No: TR 2022 018975B), and protected by the Turkish Patent and Trademark Office.

5. REFERENCES

1. Watts, A., Addy, M., 2001. Tooth discolouration and staining: a review of the literature. *British Dental Journal*, 190(6), 309-316.
2. Hattab, F.N., Qudemiat, M.A., Al-Rimawi, H.S., 2013. Dental discoloration: an overview. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 11(6), 291-310.
3. Nathoo, S.A., 1997. The chemistry and mechanism of extrinsic and intrinsic discoloration. *J. Am. Dent. Assoc.*, 128, 6-10.
4. Addy, M., Moran, J., 1985. Extrinsic tooth discoloration by metals and chlorhexidine. II. Clinical staining produced by chlorhexidine, iron and tea. *British Dental Journal*. 159(10), 331-334.
5. Alandia-Roman, C.C., Cruvinel, D.R., Sousa, A.B.S., Pires-de-Souza, F.C.P., Panzeri, P., 2019. Effect of cigarette smoke on color stability and surface roughness of dental composites. *Journal of Dentistry*, 41(3), 1-5.
6. Patil, S.S., Dhakshaini, M.R., Gujjari, A.K., 2013. Effect of cigarette smoke on acrylic resin teeth. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 7(9), 2056-9.
7. Mathias, P., Costa, L., Saravia, L.O., Rossi, T.A., Cavalcanti, A.N., Nogueira-Filho, G.R., 2010. Morphologic texture characterization allied to cigarette smoke increase pigmentation in composite resin restorations. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 22(4), 252-259.
8. Takeuchi, C.Y.G., Correa-Afonso, A.M., Pedrazzi, H., Dinelli, W., Palma-Dibb, R.G., 2011. Deposition of lead and cadmium released by cigarette smoke in dental structures and resin composite. *Microscopy Research and Technique*, 74(3), 287-291.
9. Bazzi, J.Z., Bindo, M.J.F., Rached, R.N., Mazur, R.F., Vieira, S., Souza, E.M., 2012. The effect of at-home bleaching and toothbrushing on removal of coffee and cigarette smoke stains and color stability of enamel. *Journal of the American Dental Association*, 143(5), e1-e7.
10. DeMarini, D.M., Gudi, R., Szkudlinska, A., Rao, M., Recio, L., Kehl, M., Kirby, P.E., Polzin, G., Richter, P., 2008. Genotoxicity of 10 cigarette smoke condensates in four testsystems: comparisons between assays and condensates. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 650(1), 15-29.
11. Mahross, H.Z., Mohamed, M.D., Hassan, A.M., Baroudi, K., 2015. Effect of cigarette smoke on surface roughness of different denture base materials. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 9(9), ZC39-ZC42.
12. Vitoria, L.A., Aguiar, T.R., Santos, P.R.B., Cavalcanti, A.N., Mathias, P., 2013. Changes in water sorption and solubility of dental adhesive systems after cigarette smoke. *ISRN Dentistry*, 605847, 1-5.
13. Zanetti, F., Zhao, X., Pan, J., Peitsch, M.C., Hoeng, J. Ren, Y., 2019. Effect of cigarette smoke and tobacco heating aerosol on color stability of dental enamel, dentin, and composite resin restorations. *Quintessence International*, 50(2), 156-166.
14. Kumar, P., Vaid, D., Singh, S., Kumar, J., Kumar, A. Dwari, S., 2021. Design of 3D printed multi-wavelength DRA. *IETE Technical Review*, 38(6), 662-671.
15. Dawood, A., Marti, B., Sauret-Jackson, V., 2015. 3D printing in dentistry. *British Dental Journal*, 219(11), 521-529.
16. Mishra, S., 2016. Application of 3D printing in medicine. *Indian Heart Journal*, 68(1), 108-109.
17. Segaran, N., Saini, G., Mayer, J.L., Naidu, S., Patel, I., Alzubaidi, S., Oklu, R., 2021. Application of 3D printing in preoperative planning. *Journal of Clinical Medicine*, 10(5), 917.
18. Khare, N., Patil, S.B., Kale, S.M., Sumeet, J., Sonali, I., Sumeet, B., 2012. Normal mouth opening in an adult Indian population. *Journal of Maxillofacial and Oral Surgery*, 11(3), 309-313.

Investigation of Dyestuff Recycled from Wastewater Containing Indigo/Sulfur Dyes

Ashı ULUÇAY^{1,a}, Gökhan CEYHAN^{1,2,b}, Onur BALCI^{3,c}, Ceren IŞIK^{4,d}, Sıddık YAVUZ^{1,e}

¹Kahramanmaraş Sutcu İmam University, Materials Science And Engineering, Kahramanmaraş, Türkiye

²Kahramanmaraş Sütçü İmam University, TBMYO, Onikişubat, Kahramanmaraş, Türkiye

³Innovative R&D Consultancy, Kahramanmaraş TGB, Onikişubat, Kahramanmaraş, Türkiye

⁴İskur Denim R&D Center, Dulkadiroğlu, Kahramanmaraş, Türkiye

^aORCID: 0009-0005-9402-1359; ^bORCID: 0000-0002-9127-2348; ^cORCID: 0000-0001-6885-7391;

^dORCID: 0009-0007-9647-1913; ^eORCID: 0000-0003-1585-8336

Article Info

Received : 06.11.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606078

Corresponding Author

Gökhan CEYHAN

gceyhan@ksu.edu.tr

Keywords

Indigo dyestuff

Sulfur dyestuff

Wastewater

Carbon footprint

Denim

How to cite: ULUÇAY, A., CEYHAN G., BALCI, O., IŞIK, C., YAVUZ, S., (2024). Investigation of Dyestuff Recycled from Wastewater Containing Indigo/Sulfur Dyes. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 969-978.

ABSTRACT

Turkey is one of the important centers of denim fabric production in the world. Warp yarn is usually dyed using indigo and/or sulfur dyes according to the impregnation method. The common feature of these two dyes is that they are insoluble in water and dye temporarily with a reduction reaction. The recovery of dyes in wastewater is targeted. Wastewater containing indigo and sulfur dyes taken from İskur Denim was sedimented using the chemical flocculation technique and solid material was obtained after drying. The sedimentation process was affected by the pH of the environment, the mixing speed and the concentration of sedimentation chemicals. The best sedimentation was achieved by adding flocculators supplied by AKKİM to the wastewater sample in the pH range of 8-8.5. The obtained sludge was subjected to condensation reaction with the developed binding agent. The energy levels of the highest occupied molecular orbital and the lowest unoccupied molecular orbital of the dyes obtained from indigo and sulfur wastewater were determined as -4.78 eV and -4.04 eV, respectively, by cyclic voltammetry. These values are very close to the original dyes and give hope for dyeing performance.

İndigo/Kükürt Boyaları İçeren Atık Sulardan Geri Dönüştürülen Boyar Maddelerin Araştırılması

Makale Bilgileri

Geliş : 06.11.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606078

Sorumlu Yazar

Gökhan CEYHAN

gceyhan@ksu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

İndigo boyar madde

Kükürt boyar madde

Atık su

Karbon ayak izi

Denim

Atf şekli: ULUÇAY, A., CEYHAN G., BALCI, O., IŞIK, C., YAVUZ, S., (2024). Investigation of Dyestuff Recycled from Wastewater Containing Indigo/Sulfur Dyes. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 969-978.

ÖZ

Türkiye denim kumaş üretiminde Dünya'nın önemli merkezlerinden biridir. Çözümlü ipliği genellikle emdirme yöntem ile indigo ve/veya kükürt boyarmaddeler kullanılarak boyanmaktadır. Bu iki boyar maddenin ortak özelliği, suda çözünmemesi ve indirgenme reaksiyonu ile geçici çözünür özellikte boyama yapmasıdır. Atık sularda bulunan boyar maddelerin geri kazanımı hedeflenmiştir. İskur Denim'den alınan indigo ve kükürt boyarmaddeleri içeren atık sular, kimyasal flokülasyon tekniği kullanılarak çökertilmiş ve kurutma sonrası katı madde elde edilmiştir. Çöktürme işleminin ortamın pH'sı, karıştırma hızı ve çöktürme kimyasallarının konsantrasyonu etkin olmuştur. En iyi çökelme; pH 8-8.5 aralığında atık su numunesine AKKİM'den temin edilen floklaştırıcıların eklenmesiyle sağlanmıştır. Geliştirilen bağlayıcı ajanla birlikte, elde edilen çamur kondenzasyon reaksiyonuna tabi tutulmuştur. Atıktan sudan elde edilen indigo ve sülfür boyalardan en yüksek dolu moleküler yörünge ve en düşük boş moleküler yörünge enerji seviyeleri sırasıyla -4,78 eV ve -4,04 eV olarak dönüşümlü voltametri ile belirlenmiştir. Bu değerler orijinal boyar maddelere oldukça yakın değerler olup, boyama performansı için umut vermektedir.

1. INTRODUCTION

In today's textile industry, with the acceleration of the concept of fashion and fast consumption, the need to explore different alternative materials is increasing day by day. For this purpose, new approaches to the production of yarns, fibers, fabrics and dyestuffs are emerging. Here, the perception of difference comes to the fore for customer satisfaction. Environmental factors and sustainability concepts have gained awareness in recent years thanks to the mandatory environmental policies of countries and the work of non-governmental organizations. The textile industry, which is a very large and important sector, employs approximately 35 million people worldwide and contributes 7% to total exports [1]. Today, denim is widely used in daily life for its ease of use and accessibility. Color is a very important concept in denim fabrics. Different color tones desired in the final products offer advantages in terms of wear and effect processes that give the feeling of being worn and tailor-made. It is often presented as a fabric made of many-colored cotton yarns, especially in different shades of blue and black [2]. Color is an important physicochemical property in denim fabric [3]. It is one of the most important factors determining the quality of the final product. For this purpose, denim dyeing, washing and effecting processes involve an important and multiple series of chemical processing steps. The large number of chemicals and dyes used in today's denim production facilities, as well as the high-water consumption, draws attention in terms of environmental sustainability.

The textile industry is a significant source of wastewater due to the discharge of pollutants such as dyes, which, like plastics, are not naturally degradable [4]. Intensive studies have been carried out on synthetic dyes to obtain more vivid and bright colors or more pastel colors in the variety of color charts. The use of transition metals to chemically transform color pigments into more complex structures is common [5]. This causes some difficulties in the denim industry in the recovery or removal of the excess of indigo derivatives that go to waste after the dyeing process. It makes it difficult to remove it from wastewater by photocatalytic or chemical processes in the literature [6]. Failure to recover or treat synthetic dyes from wastewater has the potential to pose serious environmental and health hazards. Studies on living life in locations where wastewater is concentrated provide evidence that long-term contact can cause skin and eye irritation, corneal lesions, and skin cancer in humans [7]. With a more specific approach, water consumption is quite high in processes used only for textile dyeing. The wastewater discharged to the environment shows numerical values directly proportional to this [8]. Here, we cannot only talk about waste dye in the dyeing process. Many chemicals used in the dyeing process are also included in this suspension mixture. For example, the excess of indigo blue and sodium hypochlorite reacts in the wastewater to form xylene and releases a very dangerous molecule for the environment [9]. Biological, physicochemical and advanced oxidation processes are the methods used to remove all kinds of dyes and other chemical pollutants in wastewater [10]. It is observed that the removal efficiencies of dyes containing natural color pigments are quite high in biological treatment processes, while the removal efficiency of dyes containing synthetic color pigments is quite low [11]. In some studies, it is reported that almost complete color removal is achieved by nanofiltration and reverse osmosis processes in textile wastewater [12]. In addition, Photo electrocatalytic processes provide 100% color removal of synthetic dyes in water [13] and Photo-Fenton process provides over 98% color removal in wastewater [14].

With the development and progress of the industry, the increase in demand for color pigments and therefore dyes have led to the research and development of synthetic production methods. When we look at the synthesis conditions, large-scale dyestuff production methods have been established with the use of environmentally unfriendly chemicals [15]. In the extraction process, which is one of the production methods, indigo dye is initially synthesized in the form of indigotin. It is then subjected to fermentation to obtain the indoxyl and indigo form. In addition to electrochemical and chemical reduction, new methods such as electrocatalytic and catalytic hydrogenation are also used to produce indigo dye [16]. When we look at the origin of indigo dyes used in denim dyeing, they are blue colored organic compounds obtained by biosynthesis of secondary metabolites of plants and marine mollusks [17]. In the electromagnetic spectrum, indigo dyes, which absorb the wavelength between 415-445 nm in the visible region, exhibit all notes of blue. When we look at its structure, there are carbonyl (RCO) and ketone groups (RCOR). In this respect, we can say that it dissolves more easily and more in polar solvents [18]. Approximately 57% of this dyestuff (indigo), which is widely used in the denim industry, is used in the textile industry, 21% in the construction dye industry, 10% in the pulp and paper industry, 8% in the leather tanning industry and 8%

in the dye industry [19]. Looking at the literature, limited research has been conducted on dye recycle except for chemical pollutants in wastewater. Recycle of the excess material that does not dye the fibers during and after the dyeing process without reacting with other chemicals in wastewater will offer serious advantages

In this study, it was aimed to develop a method to recover indigo and sulfur dyestuffs used in denim clothing from wastewater. The recycled dyestuffs will be examined in terms of reuse possibilities.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Material

For this study, the wastewater samples generated because of the processes in which dyeing with sulfur and indigo dyestuff were obtained from İskur Denim R&D Center company. For this process, wastewater samples were taken regularly at certain time intervals (every 5 minutes) and collected in a 50-liter container. The water chemicals used for the precipitation process in dyed wastewater were Akua End 3210 (Decolorizing solution), Akua End 2110 (Poly Aluminum Chloride Solution), Akua End 5220 (Anionic Polyelectrolyte Solution), Akua End 6133 (Decolorizing solution) and Akua End 5450 (Cationic Polyelectrolyte Solution) were obtained from AKKİM. Sulfuric acid used for pH adjustment during the studies was obtained from Merck company. For chemical flocculation of wastewater, AZ Instrument AZ-86031 Water Quality Meter branded pH meter, Velp Scientifica branded FP4 Portable Flocculation tester model jar test devices and Nucleon NST 30 branded oven for drying process were used. ISOTEX branded magnetic stirrer with heater was used for mixing and RADWAG AS 220 R.2 PLUS model Analytical Balance was used for weighing. For the evaluation and analysis of the results, services were obtained from Kahramanmaraş Sütçü İmam University, USKİM R&D laboratory and Gaziantep University, Uluğ Bey Advanced Technology Application and Research Center (ULUTEM) Laboratories. For this purpose, IRTracer-100 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) was used.

2.2. Methods

2.2.1. Chemical Floccification of Sulfur Dyed Wastewater Sample

The pH of the wastewater sample, which was dyed with sulfur dye obtained from Iskur Denim Company, was checked for preliminary preparation before the chemical floccification process. The chemical precipitation process was carried out according to the in-house method. The pH value of the sample was measured with a pH meter and determined as 13.28. Since the pH value required for the effective use of the decolorizing water chemicals provided by AKKİM Chemical Industry and Trade Inc., is in the range of 8.00-8.50, sulfuric acid was added to the water to keep the pH value in the range of 8.00-8.50. Accordingly, the amount of sulfuric acid added to 1 liter wastewater sample with a micropipette and the pH values obtained accordingly are presented in Table 1. While the pH value of 1 liter wastewater sample was 13.28, the pH value was reduced to 8.47 by adding 3030 µL (3.03 mL) sulfuric acid.

Table 1. pH values changing with the amount of sulfuric acid added

	Sulfuric acid (µL)	pH values
Wastewater sample dyed with sulfur dye	50 -1000 µL	13.27-12.99
	1000-2000 µL	12.99-12.31
	2000-3000 µL	12.31-8.84
	3000-3030 µL	8.84-8.47
Wastewater sample dyed with indigo dye	50- 250 µL	10.58-9.96
	250-500µL	9.96-8.94
	500-520 µL	8.94-8.43

A preliminary study was carried out manually to determine the appropriate water chemistry and amount of the pH-adjusted wastewater sample. As a result of the preliminary study, Akua End 3210, Akua End 2110 and Akua End 5220 chemicals were used. Then, quantity work was done manually. In Figure 1, 100

ml of the pH-adjusted wastewater sample was taken into a beaker and placed in the magnetic stirrer. 100 μL Akua End 3210 and 100 μL Akua End 2110 were added to the magnetic stirrer and floc formation was observed by rapid mixing for 5 minutes. Then, 200 μL Akua End 5220 was added and the flocs obtained were precipitated by fast mixing for 2 minutes and slow mixing for 3 minutes. In Figure 1, it is observed that dye and foreign matter residues settle to the bottom because of chemical flocculation applied to the wastewater sample.

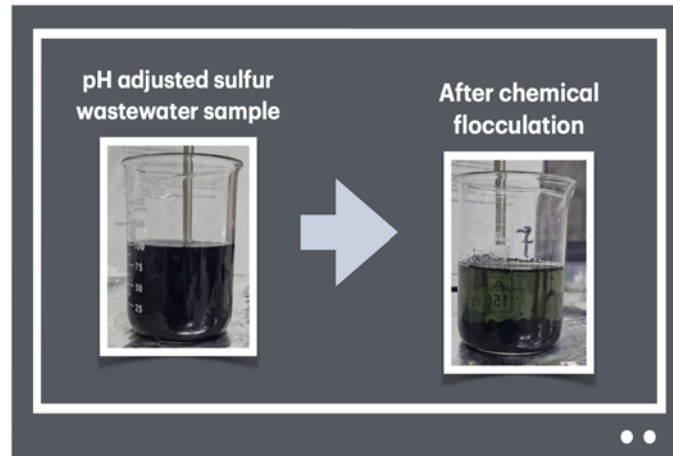


Figure 1. Chemical flocculation process

The same study was carried out on the jar test device. The pH-adjusted wastewater sample was taken into a 500 ml glass beaker. In Figure 2, 500 ml of wastewater sample was placed in the jar test device and rapid mixing was applied at 200 rpm for 2 minutes. In Figure 2, 500 μL Akua End 3210 and 500 μL Akua End 2110 were added to the wastewater sample, respectively, and rapid mixing was done at 200 rpm for 5 minutes, and it was observed that flocs were formed as a result. In Figure 2, 1000 μL Akua End 5220 was added and rapid mixing was done at 200 rpm for 2 minutes and the reaction took place. Then, the flocs formed by slow mixing at 50 rpm for 3 minutes are shown in Figure 2.

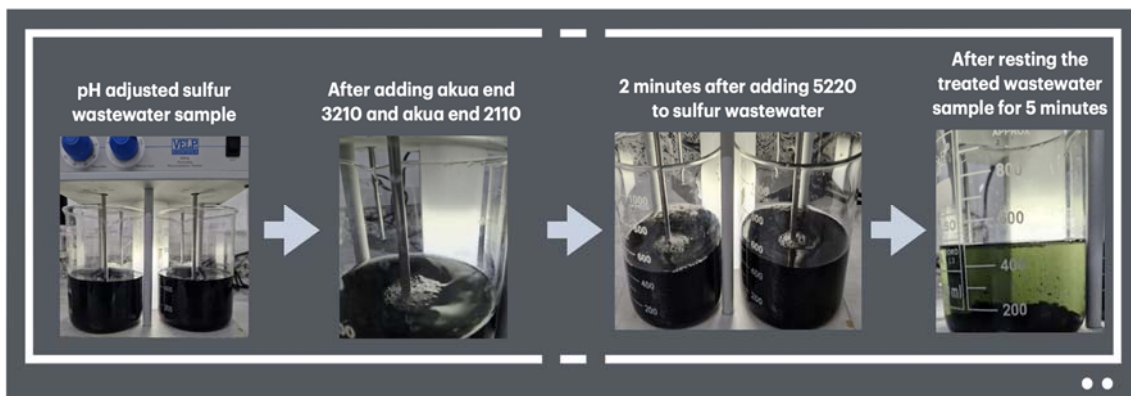


Figure 2. Chemical flocculation with jar test device

As a result of chemical flocculation, the materials that settled to the bottom and the filtrate were separated from each other. The obtained materials were taken into a beaker, and the sludge was subjected to the dewatering process. During this process, Akua End 5450 was added and first rapid mixing was performed at 200 rpm for 3 minutes, followed by slow mixing at 50 rpm for 2 minutes. Complete separation of the precipitated solid and liquid was achieved (Figure 3).

The solid that settled at the bottom was placed in a petri dish and dried in an oven at 110 degrees for 5 hours (Figure 3). In this way, an attempt was made to obtain dyed material by removing the moisture in the solid. The dye residue obtained because of the drying process was ground into smaller particles with the help of a grinder.

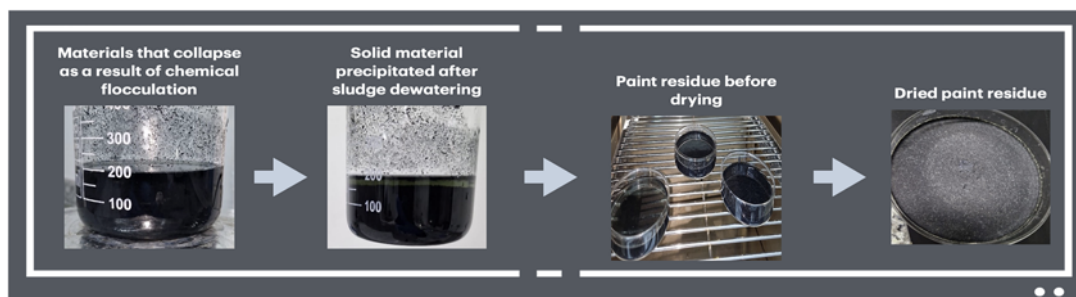


Figure 3. Solid material precipitated because of chemical flocculation

2.2.2. Chemical Flocculation Process of Wastewater Sample Dyed with Sulfur Dye

The pH values of the wastewater sample dyed with indigo dye were determined and recorded before the chemical flocculation process. The pH value of the sample was determined as 10.58. For the effective use of decolorizing water chemicals, the pH value is adjusted between 8.00-8.50 with sulfuric acid. In this context, the amount of sulfuric acid added to 1 liter of wastewater sample with a micro pipette and the pH values obtained accordingly are presented in Table 1. While the pH value of the 1-liter wastewater sample was 10.58, the pH value was reduced to 8.43 by adding 570 μL (0.570 mL) of sulfuric acid. Preliminary studies were carried out manually to determine the appropriate water chemistry and amount of the pH-adjusted wastewater sample. As a result of the preliminary study, it was decided to use the chemicals Akua End 6133 and Akua End 5220. Then, quantity work was done manually. In Figure 4, 100 ml of the pH-adjusted wastewater sample was taken into a beaker and placed in the magnetic stirrer. Floc formation was observed by adding 100 μL of Akua End 6133 to the magnetic stirrer and mixing rapidly at 200 rpm for 5 minutes. Then, 100 μL of Akua End 5220 was added and the flocs obtained were precipitated by rapid mixing at 200 rpm for 1 minute and slow mixing at 50 rpm for 3 minutes. In Figure 4, it was observed that dye and foreign matter residues settled to the bottom because of chemical flocculation applied to the wastewater sample.

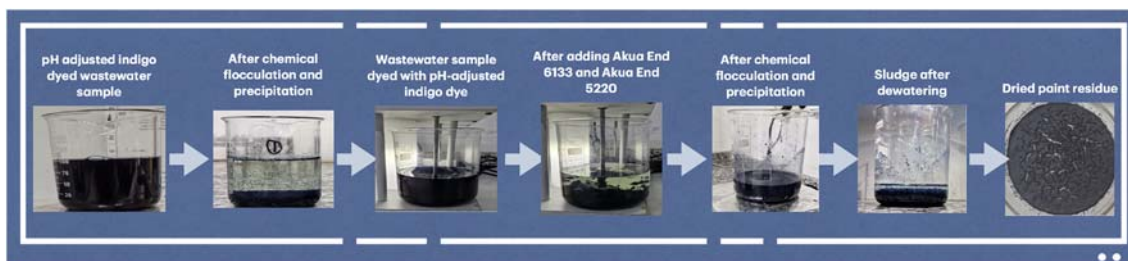


Figure 4. Chemical flocculation of wastewater dyed with indigo dye

The same study was carried out on the jar test device. The pH-adjusted wastewater sample was taken into a 500 ml glass beaker. In Figure 2.3, 500 ml of wastewater sample was placed in the jar test device and mixing was applied at 200 rpm. 100 μL of Akua End 6133 was added to the wastewater sample and rapid mixing was done at 200 rpm for 5 minutes and as a result, flocs were formed. 100 μL Akua End 5220 was added and rapid mixing was done for 2 minutes at 200 rpm and the reaction was completed. Then, by slow mixing at 50 rpm for 3 minutes, the flocs formed were precipitated as shown in Figure 4. The materials that settled to the bottom because of chemical flocculation and the filtrate were separated from each other and the obtained materials were taken into a beaker and subjected to the sludge dewatering process. During this process, Akua End 5450 was added and first rapid mixing was performed at 200 rpm for 3 minutes, followed by slow mixing at 50 rpm for 2 minutes. Complete separation of the precipitated solid and liquid was achieved. The solid that settled to the bottom was placed in a petri dish and dried in an oven at 110 degrees for 5 hours. In this way, an attempt was made to obtain dyed material by removing the moisture in the solid.

2.2.3. Purification of Residual Dyestuff

For this process, firstly, the dye residues were pulverized in a Resh II brand disc grinder until they became free flowing. Then, it was passed through sequential sieves (Brabender) to ensure that the particle sizes

were close to each other. With the new generation binding agent that our group had previously synthesized, the dye molecules in the residue were combined and their functional groups were activated. The obtained pure compound was characterized by analytical and spectroscopic methods. Single crystals of these compounds were obtained from the CHCl_3 -EtOH solution by slow evaporation technique. Structural characterizations were made using FTIR and Raman techniques. The synthesis reactions of these compounds are given in Figure 5.

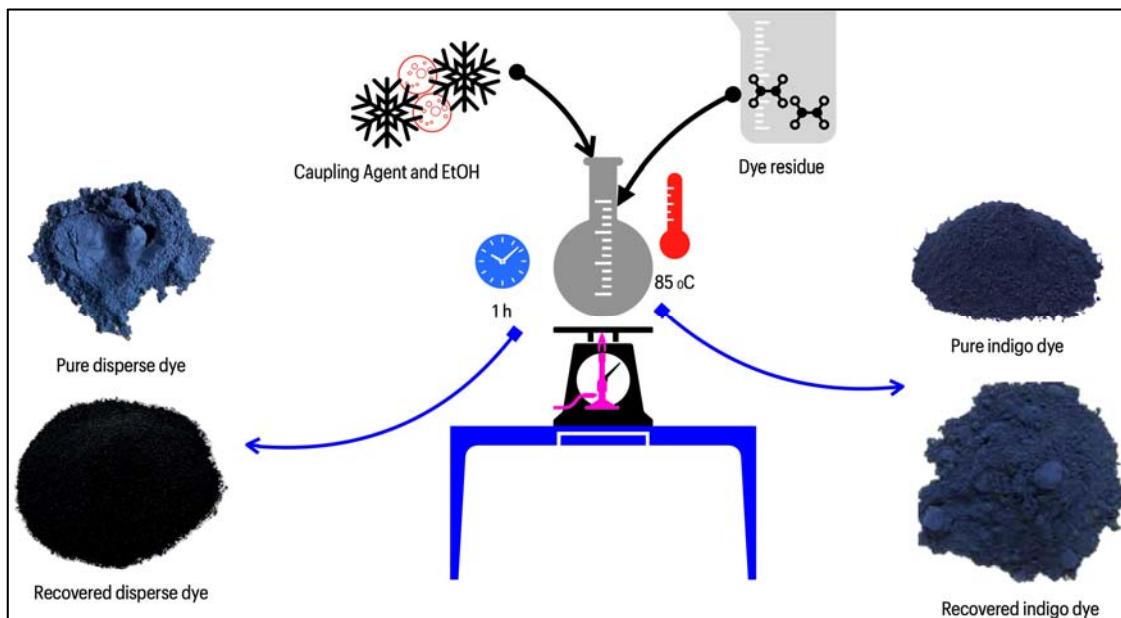


Figure 5. Synthesis step

3. RESULT AND DISCUSSION

This study is based on the recycle of the dyes used in the wastewater of denim factories in the textile industry, their recycling and inclusion in the dyeing process. The reason for choosing the denim industry as a target was the intense use of sulfur, indigo, cationic and reactive dyes [20]. The wastewater was supplied from Iskur Denim, one of the denim companies operating intensively in our region. For this purpose, samples were collected at regular intervals from the output of the dispatch and indigo dyeing lines. Again, precipitation agents were procured from AKKİM, which has an important product portfolio in textile treatment chemicals, and their effects on the chemical flocculation process were examined. For this purpose, certain amounts of samples were taken from the wastewater and the residues described in the previous section were obtained. The behavior of the obtained pure compound in organic and inorganic solvents was examined and is presented in Table 2.

Table 2. Resolution data

	Pure indigo/sulfur dye	Residue dye	Recovered indigo/sulfur dye
Water	+++ / +++	+	+++ / +++
EtOH	+++ / +++	++	+++ / +++
MeOH	++ / +	++	++ / ++
Acetone	+ / +	+	+ / +
Diethyl ether	+ / +	+	+ / +
Chloroform	++ / +	+	++ / ++
DMF	+++ / +++	+++	+++ / +++

+: bad, ++: medium, +++: good

As can be seen from the infrared spectral data of the compound, the functional groups observed in the FTIR spectrum of the dye obtained after purification are shown in Figure 6. The peak aromatic $\nu(\text{C-H})$ stretch observed at 3022.45 cm^{-1} , the $\nu(\text{O-H})$ stretch of carboxylic acids observed at 2361 cm^{-1} , the $\nu(\text{N-H})$ bending at 1549.43 cm^{-1} , the peak at 1436.87 cm^{-1} . $\nu(\text{C-H})$ in-plane bending indicates the presence of carboxylic acid (C-O) at 1227.45 cm^{-1} , bends at 789.45 cm^{-1} indicate the presence of aromatic $\nu(\text{C-H})$, and at 670.76

cm^{-1} the presence of acid chlorine $\nu(\text{C-Cl})$. This peak corresponds to the chloroform $\nu(\text{CHCl}_3)$ peak used in purification and obtaining single crystals [21-25].

A similar situation is the case in the FTIR results of the recovered sulfur dye obtained as a result of the purification and condensation process after the residue obtained from the wastewater sample containing sulfur dye.

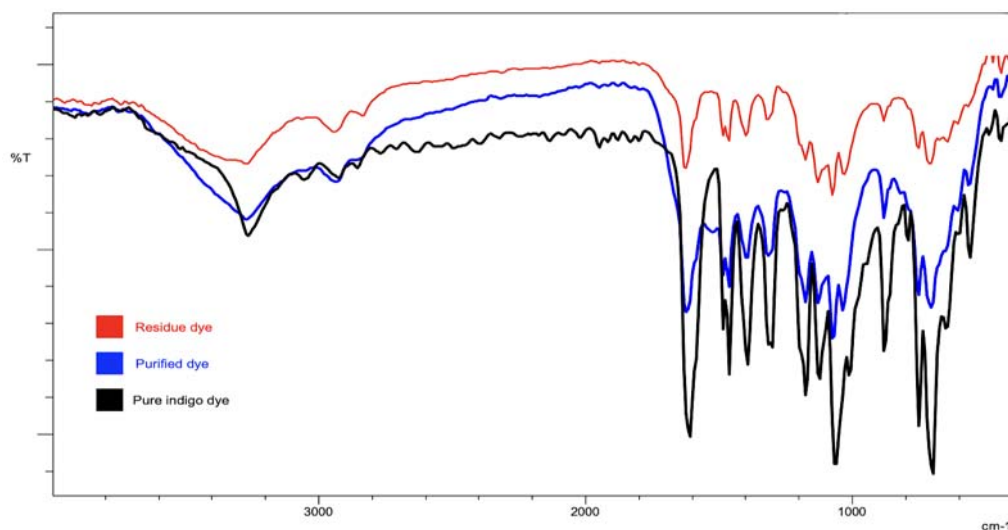


Figure 6. FTIR spectra of indigo dye

A similar situation is the case in the FTIR results of the recovered sulfur dye obtained as a result of the purification and condensation process after the residue obtained from the wastewater sample containing sulfur dye. The presence of azo and sulfonic groups is seen in the spectra of the residue and purified sulfur dye. However, the spectra of the dye recovered by purification are more intense. When examined, the spectrum peak belonging to the sulfonic group can be attributed to the $\nu(\text{S-S})$ stretching at 554 cm^{-1} , the $\nu(\text{C-H})$ stretching at 2932 cm^{-1} and the $\nu(\text{N-H})$ stretching at 3446 cm^{-1} . In the dye obtained as a result of purification and condensation, the aliphatic $\nu(\text{C-H})$ stretching gives an intense peak at 1458 cm^{-1} as a result of the combination of the degraded end groups with the binding agent. It is seen that the degraded disulfide group and azo group of the residual dye appear after the purification process. When we look at the spectra of the purified dye, $\nu(\text{N-H})$ bending is seen at 1545 cm^{-1} , $\nu(\text{C=O})$ stretching at 1735 cm^{-1} , $\nu(\text{C-H})$ stretching at 2971 cm^{-1} . In the sample of the residue, $\nu(\text{O-H})$ stretching showed irregular peaks in the range of $3500\text{-}300 \text{ cm}^{-1}$ (Figure 7).

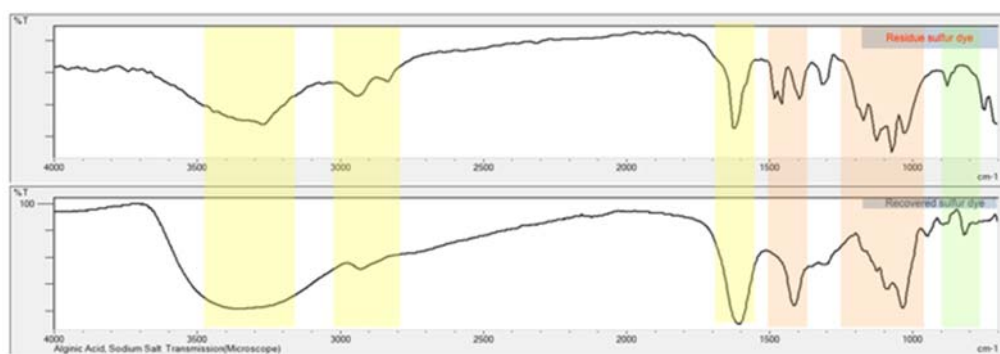


Figure 7. FTIR spectra of sulfur dye

The level energies of the highest occupied molecular orbital and the lowest empty molecular orbital of the dyes obtained from the original indigo wastewater were measured by cyclic voltammetry technique as -4.78 eV and -4.04 eV , respectively. These values are very close to the original dyestuff and give hope for dyeing performance. Alternating voltammetry technique was used for the original dye and the purified dye.

The electrochemical properties of the compounds were investigated at 293 °K with DMF-0.1 M Bu_4NBF_4 as the supporting electrolyte. All potentials mentioned were performed at scan rates in the range of 100–1000 mVs^{-1} . For calibration, it was checked using an internal ferrocene-ferrocenium standard. Electrochemical studies were carried out in a solution of 1×10^{-4} M concentration. Voltammograms of the original indigo dye and the dye purified from the residue are shown in Figure 7. Voltammograms were recorded in the range of -2.0 to 2.0 V against the Ag^+/AgCl reference electrode. In 1×10^{-4} M DMF solution, pure indigo dye has two anodic peak potentials in the range of -0.87-0.45 V at scan rates of 100-1000 mV/s . Additionally, two cathodic peaks are observed in the -0.36-0.91 V range. On the other hand, in 1×10^{-4} M DMF solution, there are anodic peak potentials in the range of -0.90-0.93 V and cathodic peak potentials in the range of 0.62-0.93 V at all scan rates of the ligand, respectively. For pure indigo dye at these concentrations, all redox processes are reversible.

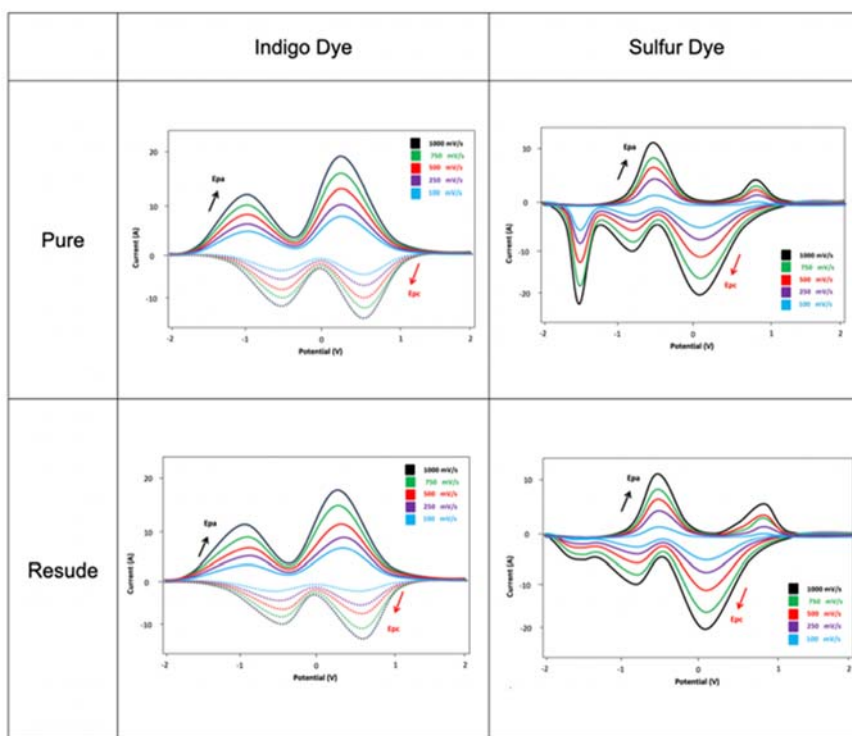


Figure 8. Cyclic voltammogram

This indicates to us that this material will have the potential to be reused after use. The dye residue purified in 1×10^{-4} M DMF solution shows reversible redox processes at all scan rates (Figure 8a-b). It has two anodic peak potentials in the range of -1.03-1.09 V at scan rates of 100-1000 mV/s . Additionally, the complex has two cathodic peaks in the -0.30-0.82 V range. In the electrochemical measurements of both indigo and sulfur dyes obtained by purification from the residues recovered from wastewater and indigo and sulfur dyes, reversible redox potentials were observed. When the voltammograms were examined, it was seen that they were approaching their pure states. There are two anodic and cathodic peak potentials. Anodic peak potentials are between -0.98mV and 0.47mV, and cathodic peak potentials are between 0.57mV and -0.48mV. All dye samples show reversible redox processes with two-electron reduction.

4. CONCLUSIONS

In the dye recovery study, the performance of commercially available flocculation chemicals was examined. Here, the flocculation capacities of Akua End 3210, Akua End 2110 and Akua End 5220 chemicals in wastewater were examined. Instead of water purification, which has been extensively studied in the literature, some studies have been carried out on the recovery and reuse of used dye. For this purpose, content analysis of the remains is important. In general, the presence of unprocessed chemicals depending on the processes puts the structure in a complex situation. For this reason, dissolution conditions in different solvents were examined and it was physically observed that it dissolves well in polar solvents and worse in

non-polar solvents. For this purpose, a water release reaction was carried out in combination with ethyl alcohol and binding agent to remove the contaminations in the structure. The resulting synthesis compound was purified by recrystallization from ethyl alcohol and analytical and spectroscopic characterizations were made. Among the parameters examined here, the values found in the FTIR spectroscopy of the original indigo dye, and the purified residual dye are almost the same, only there are decreases in the (C-H) bond strengths. In reversible voltammetry studies of the material, it is seen that the purified dye residue shows a lower redox potential than the original.

In the light of this information, it has been shown that dyestuffs close to the original one can be obtained by using basic purification processes that are not commercially costly. Thus, this developed method paved the way for the reuse of indigo and sulfur dyestuffs. In the continuation of the study, the ability of the recovered and characterized dyestuff to re-dye cotton materials will be investigated.

5. REFERENCES

1. Hussain T., Wahab A., 2018. A critical review of the current water conservation practices in textile wet processing. *J. Clean. Prod.*, 198, 806-819.
2. Hole G., Hole A.S., 2020. Improving recycling of textiles based on lessons from policies for other recyclable materials: A minireview. *Sustain. Prod. Consum.*, 23, 42-51.
3. Kumar P., Pavithra K.G., 2019. Water and textiles, in: S. Muthu, water in textiles and apparel: Consumption, footprint, and life cycle assessment. Woodhead Publishing Ltd., 21-40.
4. Arnal, J.M., Leon, M.C., Lora, J., Gozalvez, J.M., Santafe, A., Sanz, D., Tena, J., 2008. Ultrafiltration as a pre-treatment of other membrane technologies in the reuse of textile wastewaters. *Desalination*, 221, 405-412.
5. Ciardelli G., Corsi L., Marcucci M., 2000. Membrane separation for wastewater reuse in the textile industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 31, 189-197.
6. Huber, P., Ossard, S., Fabry, B., Bermond, C., Craperi, D., Fourest, E., 2014. Conditions for cost efficient reuse of biological sludge for paper and board manufacturing. *J. Clean. Prod.*, 66, 65-74.
7. Kim, T.-H., Park, C., Kim, S., 2005. Water recycling from desalination and purification process of reactive dye manufacturing industry by combined membrane filtration. *J. Clean. Prod.*, 13, 779-786.
8. Li, C.-H., He, J.-X., 2013. Advanced treatment of spent acid dye bath and reuse of water, salt and surfactant therein. *J. Clean. Prod.*, 59, 86-92.
9. Meksi, N., Ben Ticha, M., Kechida, M., Mhenni, M.F., 2012. Use of eco-friendly hydroxy carbonyls as reducing agents to replace sodium dithionite in indigo dyeing processes. *J. Clean. Prod.*, 24, 149-158.
10. Othman, M.R., Hassan, M.A., Shirai, Y., Baharuddin, A.S., Ali, A.A.M., Idris, J., 2014. Treatment of effluents from palm oil mill process to achieve river water quality for reuse as recycled water in a zero-emission system. *J. Clean. Prod.*, 67, 58-61.
11. Porter, J.J., 1990. Membrane filtration techniques used for recovery of dyes, chemicals and energy. *Am. Dyest. Rep.*, 22, 21-26.
12. Qu, F., Liang, H., Zhou, J., Nan, J., Shao, S., Zhang, J., Li, G., 2014. Ultrafiltration membrane fouling caused by extracellular organic matter (EOM) from micro-cystis aeruginosa: Effects of membrane pore size and surface hydrophobicity. *J. Memb. Sci.*, 449, 58-66.
13. Riera-Torres, M., Gutierrez-Bouzan, C., Crespi, M., 2010. Combination of coagulation flocculation and nanofiltration techniques for dye removal and water reuse in textile effluents. *Desalination*, 252, 53-59.
14. Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., Nigam, P., 2001. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresour. Technol.*, 77, 247-255.
15. Vedrenne, M., Vasquez-Medrano, R., Prato-Garcia, D., Frontana-Urbe, B., Hernandez-Esparza, M., Andres, J.M., 2012. A ferrous oxalate mediated photo-fenton system: toward an increased biodegradability of indigo dyed waste-waters. *J. Hazard. Mater.*, 243, 292-301.
16. Vuorelma, A., John, P., Keskitalo, M., Kulandainathan, M.A., Marken, F., 2008. Electrochemical and sonoelectrochemical monitoring of indigo reduction by glucose. *Dyes and Pigment*, 76, 542-549.
17. Zhang, S., Wang, R., Zhang, S., Li, G., Zhang, Y., 2014. Treatment of wastewater containing oil using phosphorylated silica nanotubes (PSNTs)/polyvinylidene fluoride composite membrane. *Desalination*, 332, 109-116.

18. Sala, M., Gutierrez-Bouzan, M.C., 2012. Electrochemical techniques in textile processes and wastewater treatment. *Int. J. Photoenergy*, 1-12.
19. Sahinkaya, E., Uzal, N., Yetis, U., Dilek, F.B., 2008. Biological treatment and nano-filtration of denim textile wastewater for reuse. *J. Hazard. Mater.*, 153, 1142-1148.
20. Willet J., Wetser K., Vreeburg J., Rijnaarts H., 2019. Review of methods to assess sustainability of industrial water use. *Water Resour. Ind.*, 21, 100110.
21. Chanayath, N., Lhieochaiphant, S., Phutrakul, S., 2002. Pigment extraction techniques from the leaves of *Indigofera tinctoria* Linn. and *Baphicacanthus cusia* Brem. and chemical structure analysis of their major components. *Chiang Mai University Journal*, 1(2), 149-160.
22. Garcia-Macias, P., John, P., 2004. Formation of natural indigo derived from woad (*Isatis Tinctoria* L.) in relation to product purity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, 7891-7896.
23. Gilbert, G.K., Cooke, T.D., 2001. Dyes from plants: past usage, present understanding and potential. *Plant Growth Regulation*, 34, 57-69.
24. Kongkachuichay, P., Shitangkoon, A., Hirunkitmonkon, S., 2010. Thermodynamics study of natural indigo adsorption on silk yarn. *Chiang Mai Journal of Science*, 37(2), 363-367.
25. Laitonjam, W.S., Wangkheirakpam, S.D., 2011. Comparative study of the major components of the indigo dye obtained from *Strobilanthes flaccidifolius* Nees. and *Indigofera tinctoria* Linn. *International Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, 3(7), 108-116.

Üç Farklı Metasezgisel Algoritma Kullanılarak Petek Kirişlerin Yer Değiştirme Optimizasyonu

Marwan Abdulkareem Shakir ALBAYATI ^{1,a}, Ahmad Reshad NOORI ^{1,b}

¹*İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul*

^a*ORCID: 0009-0001-0088-1114;* ^b*ORCID: 0000-0001-6232-6303*

Makale Bilgileri

Geliş : 04.11.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606085

Sorumlu Yazar

Marwan Abdulkareem Shakir ALBAYATI
marwanshakir6@gmail.com

Anahtar Kelimeler

Petek kiriş

Optimizasyon

Deplasman

Meta-sezgisel algoritma

Atf şekli: ALBAYATI, M.A.S., NOORI, A.R., (2024). Üç Farklı Metasezgisel Algoritma Kullanılarak Petek Kirişlerin Yer Değiştirme Optimizasyonu. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 979-990.

ÖZ

Petek kirişlerin kullanımı, çok yönlü mimari özellikleri nedeniyle son dönemde büyük ilgi görmektedir. Bu özellikler, farklı şekillerde boşluk içeren belirgin geometrik formları kapsamaktadır. Petek kirişler, artan eğilme mukavemeti sağlayarak hem ekonomik hem de çevresel açıdan faydalıdır; ayrıca, ağırlık artışı olmaksızın üretim teknikleri sayesinde kesit direncini artırmaktadır. Bu kirişler hastaneler, depolar, otoparklar, okullar ve alışveriş merkezleri gibi çeşitli yapılarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada, altıgen boşluklu petek kirişlerin performansı S235, S255 ve S355 olmak üzere üç farklı malzeme kullanılarak optimize edilmiştir. Optimum kesit boyutları, düşey yer değiştirmeyi temsil eden bir amaç fonksiyonu yardımıyla belirlenmiştir. Optimizasyon için çiçek tozlaşması algoritması (FPA), ateş böceği algoritması (FA) ve yarasa algoritması (BA) olmak üzere üç farklı meta-sezgisel algoritma kullanılmıştır. Üç algoritmanın karşılaştırma sonuçları, ateş böceği ve çiçek tozlaşması algoritmalarının benzer sonuçlar verdiğini ve çiçek tozlaşması algoritmasının uygulama açısından en uygun algoritma olduğunu göstermiştir.

Deflection Optimization of Castellated Beams Using Three Different Meta-heuristic Algorithms

Article Info

Received : 04.11.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606085

Corresponding Author

Marwan Abdulkareem Shakir ALBAYATI
marwanshakir6@gmail.com

Keywords

Castellated beam

Optimization

Displacement

Meta-heuristic algorithms

How to cite: ALBAYATI, M.A.S., NOORI, A.R., (2024). Üç Farklı Metasezgisel Algoritma Kullanılarak Petek Kirişlerin Yer Değiştirme Optimizasyonu. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 979-990.

ABSTRACT

The usage of castellated beams has recently attracted great attention due to their versatile architectural features. These include distinct geometric forms containing web openings in different shapes. Castellated beams are economically and environmentally beneficial by providing increased flexural rigidity without increasing their weight by changing production techniques. These beams are used in various structures such as hospitals, warehouses, parking lots, schools, and shopping malls. In this study, the performance of castellated beams with hexagonal web openings is optimized for three different materials such as S235, S255, and S355. The optimum section dimensions are computed using an objective function representing the maximum vertical displacement of the beam. Three different meta-heuristic algorithms, namely, the flower pollination algorithm (FPA), firefly algorithm (FA), and bat algorithm (BA), are employed. The comparison results of the three algorithms showed that firefly and flower pollination algorithms have similar results and the flower pollination algorithm is the most suitable for engineering applications.

1. GİRİŞ

Çelik yapılar, birçok avantajı nedeniyle son yıllarda inşaatın en önemli formlarından biri haline gelmiştir. Bu avantajlar arasında, dünyanın karşı karşıya olduğu doğal kaynak tüketimini azaltmak ve zararlı karbondioksit (CO₂) emisyonlarını azaltıp çevre dostu yapılar oluşturarak sürdürülebilirliği teşvik etmek bulunmaktadır. Ayrıca, çeşitli şekil ve tasarımlara sahip belirgin mimari formlara getirilebilmektedir.

Yapısal çerçevelerin tasarım sürecinin ve maliyetlerinin belirlenmesi son derece karmaşıktır. Bu süreç, metaheuristik olarak bilinen çeşitli yöntemler kullanan sistematik, verimli ve hızlı yinelemelere dayanan optimizasyon ilkelerine dayanır [1]. Bunlar, çevresel koşullara göre tasarım ve maliyet sorunlarını ele alma konusunda yüksek bir yetenekle donatılmış metaheuristik optimizasyon algoritmalarıdır. Optimizasyon algoritmalarının üç ana özelliği vardır: hızlı çözümlenme, karmaşık problemleri ele alabilme yeteneği ve etkin algoritmalar geliştirme [2]. Optimizasyon algoritmalarının verimliliği, milyonlarca yıl boyunca doğal olarak evrimleşen en iyi biyolojik sistemleri simüle etme ve seçme yeteneğine dayanır. Bu algoritmalar arasında, ateşböceği ideal yanma mekanizmasını izleyen ateşböceği algoritması (FA) bulunmaktadır. Bu algoritma, modern bir metaheuristik algoritma olarak kabul edilmektedir [3]. Ayrıca, standart ve konveks olmayan optimizasyon problemlerini çözmek için de kullanılır [4,5]. Bu algoritmanın felsefesi, en iyi çözümü bulmak için optimal tasarım sürecine benzer; burada ateşböceğinin yanışı, diğer ateşböceklerini en parlak ışığa çekmek için bir sinyal işlevi görür [6]. Bir diğer önemli algoritma ise çiçeklerin farklı tozlaşma yöntemlerine dayanan çiçek tozlaşma algoritması (FPA)dır. Bu algoritma, optimizasyon sistemi içinde optimal bir arama yapmak için matematiksel denklemler kullanarak iki süreç aracılığıyla: yerel tozlaşma ve küresel tozlaşma gerçekleştirir [1]. Yaygın olarak kullanılan bir diğer algoritma ise yarasaların barınaklarını ve avlarını bulma davranışına ve yankı ile konum belirleme yoluyla kendilerini koruma yeteneklerine dayanan yarasalar algoritması (BA)dır. Yarasalar, çevrelerinden geri dönen yankıları dinleyerek sesler yayarlar. Bu algoritma, çeşitli ve karmaşık optimizasyon problemlerini çözmeye oldukça etkilidir [7].

Bu algoritmaların çözdüğü en önemli tasarım ve maliyet problemleri arasında, petek kirişlerin optimizasyonu yer almaktadır. Petek kirişler, en karmaşık ve önemli yapısal bileşenlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu kirişler, daha az doğal kaynak gerektirirken yüksek performans verimliliği sayesinde modern inşaatlarda önemli bir unsur haline gelmiştir. Ayrıca, süresi kısıtlı olan inşaat projelerinde zaman tasarrufu sağlarlar. Görünüm açısından, yapının koşullarına bağlı olarak farklı şekil ve boyutlarda düzenli ve etkileyici bir mühendislik ve mimarlık estetiği sunmaktadır. Bu kirişlerde açılan boşluklar, daire, kare, dikdörtgen, beşgen ve altıgen gibi farklı şekillerde olabilmektedir. [8,9]. Yeni ve çeşitli şekillerinin yanı sıra, petek kirişlerin taşınması ile montajı kolaydır [10], bu da katlar arasındaki mesafenin azalmasına yol açar [23]. Petek kirişlerin en önemli özelliklerinden biri, eğilmeye karşı yüksek mukavemet göstermeleridir. Uzun açıklıklarda mükemmel performans sunarlar [8,12,14,15]. Kirişin ağırlığında herhangi bir artış olmadan kesitleri dış yükler altında düşey yer değiştirmeye karşı yüksek direnç sağlar [3,4].

Şekil açısından petek kirişler iki tipe ayrılır: "I" şekli ve "H" şekli. Üretim süreci, kirişlerin yarı altıgen bir boşluk oluşturmak için oksijen veya plazma kesimi ile kesilmesiyle başlamaktadır. Bu işlem, birden fazla parça için uygulanır ve her iki parça, aralarındaki boşluk yarım birimden fazla olmayacak şekilde yaklaştırıldıktan sonra kaynaklanır. Kaynak işlemi tamamlandıktan sonra, petek kirişin nihai şekli elde edilir [1,2,4]. Bu işlem, petek kirişin kesit yüksekliğini artırır, bu da kirişin atalet momentinin ve eğilme rijitliğinin artmasına neden olur [1,4,12]. Ancak, aynı zamanda, petek kirişlerinin yükseklüğünün artırılması, stabilite sorunlarına yol açabilir [17]. Daha önce bahsedildiği gibi, petek kirişlerde farklı şekillerdeki deliklerin bulunması, görsel olarak hoş bir mühendislik tasarımı yaratırken kullanılan çelik miktarını azaltır ve bu da maliyetlerin düşmesine yol açar. Bu delikler, kablolama, iletişim sistemleri ve diğer hizmetler için de kullanılabilir [3,4,18]. Ancak, aynı zamanda petek kirişlerin karşılaştığı birçok sorunun ana nedenidir. Delikler, kirişin yük taşıma kapasitesini etkilediğinden, farklı göçme modlarına yol açarak yapısal performansını değiştirir [2,19]. Kesme kuvvetlerinin aktarımı açısından değişiklikler meydana geldiğinden, deliklerin geometrik şekilleri farklı göçme türlerine sebep olabilmektedir [20]. Başka bir deyişle, delikler, kesme direncinde oluşturdukları azaltma nedeniyle kirişin aksel basınç ve eğilme kapasitesini düşürür [22] ve gerilme dağılımında değişikliklere neden olmaktadır [23].

Birçok çalışma, petek kirişlerde meydana gelen göçme türlerini tartışmış ve bu göçmelerin nedenleri ile nasıl giderilebileceğini vurgulamıştır. Bu göçme türlerinden biri, kirişin üst T-kesitinde, özellikle deliklerin

üstünde meydana gelen paralelkenar şeklindeki deformasyonun yaşandığı durum ya da Vierendeel mekanizmasıdır. Bu göçmenin nedeni, boşluğun köşelerinde plastik mafsalların oluşmasıdır; yüksek kesme kuvvetleri bu köşelerin yırtılmasına yol açmaktadır. Bu mekanizmanın fiziksel açıklaması, normal ve kayma gerilmeleri arasındaki etkileşimdir; bu etkileşim, T-kesitinin uçlarında çeliğin akmasına neden olur. Bu göçme mekanizmasını etkileyen faktörler arasında deliklerin çapı ve gövdenin genişliği bulunur. Diğer bir göçme türü ise eğilmeden kaynaklanır; bu durumda kiriş, aşırı eğilme gerilmelerine maruz kalır [8,9,24-26,13].

Petek kirişlerdeki deliklerin üstünde ve altında bulunan T-kesitleri, akma gerilmeleri nedeniyle plastik bir duruma ulaşır. Üst kısım basınç, alt kısım ise çekme tesirinde kalır. Bu da kesit alanının basit eğilmeye maruz kalması sonucunda meydana gelir. En kritik göçme tipi ise, kirişin gövdesinin yanal burulmalı burkulmasıdır [13]. Bu göçmede, başlık gövdenin deformasyonu nedeniyle yanlara doğru bükülür ve burkulur. Bu durum, peteğin burulma direncini azaltır. Bu tür göçmeyi önlemek için, kirişin basınç bölgesine yanal destekleme kullanılır [8,13,25,27,28]. Petek kirişlerinde kaynak birleşimlerinin yırtılması, yatay kayma gerilmelerinin neden olduğu bir göçme türüdür. Bu gerilmeler, kaynaklı ek yerlerinin akma mukavemetini aştığında yırtılmaya neden olabilir. Bu göçmeyi önlemek için kaynak işleminin tasarım standartlarına uygun olması oldukça önemlidir [29]. Petek kirişin gövdesinde iki tür göçme meydana gelebilir. Birincisi, yoğun basınç kuvvetlerinden kaynaklanan gövdenin burkulması olup [15] ikinci tür göçme ise gövdenin yerel veya kesme burkulmasıdır; bu, gövdenin ince olmasından kaynaklanır. Bu göçme, gövdenin burkulmasına eşlik eden yanal yer değiştirme şeklinde ortaya çıkmaktadır [30-33].

Yazarların bilgisine göre petek kirişlerin düşey yer değiştirme optimizasyonu ateş böceği, çiçek tozlaşması ve yarasa algoritması ile daha önce araştırılan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada üç adet etkin algoritma kullanılarak petek kirişin en uygun kesit boyutları olan kesit yüksekliği, üst ve alt başlıkların genişliği, başlık kalınlığı, gövde genişliği ve deliğin yüksekliği ve genişliği ile petek kirişin düşey yer değiştirmesini temsil eden amaç fonksiyon değeri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, iki metreden on metreye kadar farklı uzunluklardaki petek kirişler için yapılmıştır.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada, çiçek tozlaşma algoritması (FPA), ateş böceği algoritması (FA) ve yarasa algoritması (BA) kullanılarak gövdesinde altıgen boşluklar bulduran ve düzgün yayılı yük etkisinde olan I petek kirişlerin düşey yer değiştirmeye dayalı optimizasyonu yapılmıştır.

2.1. Malzeme Özellikler

Kirişin yapıldığı malzeme ise S235 , S255 ve S355 olarak varsayılarak tasarım sonuçları elde edilmiştir. Bu malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

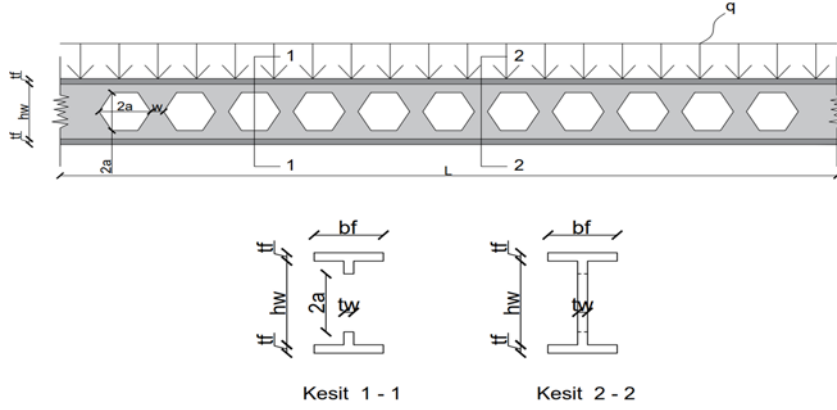
Çizelge 1. Çelik malzemelerinin mekanik özellikleri

Çelik sınıfı	f_y (Akma dayanımı)	σ_{em} (Emniyet gerilmesi)	Elastisite modülü
	MPa	MPa	MPa
S235	235	140	200000
S255	255	150	200000
S355	355	210	200000

2.2. Geometrik Özellikler

Kirişin geometrisi şekil 1’de çizilmiştir. Bu çalışmada yanal burulmalı burkulma, Vierendeel mekanizması, kaynak birleşimlerinin yırtılması ve kesme göçmesi gibi kısıtlar ihmal edilerek yalnız sehim için optimizasyon yapılmıştır. Kirişin gövdesinden bulunan boşluk sayıları dışarıdan girilerek boşluk ölçüsü ve boşluklar arası mesafe algoritmalar yardımıyla elde edilmiştir. Çözülen tüm kiriş modelleri için kenar boşluğu ile mesnet arasındaki mesafe 30 cm olarak sabit tutulmuştur. Bu mesafenin sabit tutulmasının amacı mesnete yakın bölgelerde gerilme ve iç kuvvetlerinin kirişin açıklık bölgesine göre daha büyük olmasıdır. Ele alınan petek kirişler için sabit – kayıcı sınır koşulu göz önüne bulundurulmuştur. Optimizasyon çalışmalarına ait parametrik sonuçlar on adet farklı kiriş uzunluğu ($L = 200$ cm, $L = 300$ cm,

$L = 400$ cm, $L = 500$ cm, $L = 600$ cm, $L = 700$ cm, $L = 750$ cm, $L = 800$ cm, $L = 900$ cm ve $L = 1000$ cm) için hesaplanmıştır. Bu uzunluklara ait boşluk sayıları Çizelge 2’de listelenmiştir.



Şekil 1. Kiriş geometrisi ve kesiti

Çizelge 2. Kiriş uzunlukları ve boşluk sayıları

Kiriş uzunluğu (L) - cm	Boşluk sayısı (n_b) - adet
200	5
300	9
400	11
500	15
600	17
700	21
750	22
800	23
900	27
1000	29

2.3. Tasarım Değişkenleri

Araştırmada kullanılan tasarım değişkenleri gövde yüksekliği (h_w), başlık genişliği (b_f), gövde genişliği (t_w), başlık kalınlığı (t_f), boşluk yüksekliği ($2a$) ve kaynak uzunluğu (w) için minimum ve maksimum değerler Çizelge 3’te özetlenmiştir.

Çizelge 3. Kiriş tasarım değişkenleri için minimum ve maksimum değerler listesi

Kısaltma	Tanım	Minimum değer (cm)	Maksimum değer (cm)
h_w	Gövde yüksekliği	10	72
b_f	Başlık genişliği	8	25
t_w	Gövde genişliği	0,7	1,5
t_f	Başlık kalınlığı	0,4	1,5
a	Boşluk yüksekliği / 2	$0,3 h_w$	$0,4 h_w$
w	Kaynak uzunluğu	$0,5 a$	a

2.4. Tasarım Kısıtları

Tasarım kısıtlamaları Eşitlik (1-3)’te verilmiştir. Birinci kısıt (g_1), kirişin etkin kesit alanını yani alt ve üst T kesitinin toplam alanını temsil etmekte olup bu alan 40 cm^2 ile sınırlandırılmıştır. İkinci kısıt (g_2) ise kirişin güvenle taşıyabileceği yükü temsil etmektedir. Bu kısıt için Çizelge 1’de verilen ve mazlmeye bağlı emniyet gerilmesi değerinden yararlanmıştır. Üçüncü kısıtta (g_3), kenar boşlukların merkezinden mesnete olan mesafenin 30 cm olduğu varsayılarak çubuğun toplam boyundan 60 cm eksiltiştir.

$$g_1 = 2 \times b_f \times t_f + t_w(h_w - a) \leq 40 \quad (1)$$

$$g_2 = (L^2 \times q \times (h_w + 2 \times t_f)) / (16 \times (\frac{1}{12} \times b_f \times (h_w + 2 \times t_f)^3 - 1/12 \times t_f^3 \times (b_f - t_w)) - 2 \times a^3 \times \frac{t_w}{3}) \leq \sigma_{em} \quad (2)$$

$$g_3 = (n_b - 1) \times w + 2 \times a \times n_b \leq L - 60 \quad (3)$$

2.5. Amaç Fonksiyonu

Optimizasyon problemi genellikle bir amaç fonksiyonu ile belirlenmektedir. Petek kirişlerin tasarımı, düşey yer değiştirme miktarının belirlenmesini gerektirebilir. Bu çalışmada düşey yer değiştirme değerinin mümkün olan en optimum seviyede tutulması istenmektedir. Basit kirişin maksimum yer değiştirmesi için amaç fonksiyonu, Eşitlik 4'te verilmiştir [10]. Petek kirişlerin en büyük yer değiştirmesi için ince ve kalın çubuk teorisi kullanılmaktadır. Kalın kiriş teorisi kullanıldığında kirişin gövdesinin kayma deformasyon teorilerine göre ele alınıp yer değiştirme değerlerinin saptanması gerekir. Bu çalışmada, kayma deformasyon etkisi ihmal edilerek ince çubuk teorisinin kullanılması benimsenmiştir.

$$F_x = 5 \times L^4 \times q / (384 \times E \times I_{re}) \quad (4)$$

Bu denklemde, q uygulanan düzgün yayılı yükün şiddetini, E çeliğin elastisite modülünü ve I_{re} petek kiriş için küçültülmüş alan atalet momentini tanımlamaktadır. Basit mesnetli kirişlerin yapısal analizi doğrultusunda amaç fonksiyonu denklemi kirişin ortasında oluşan en yüksek düşey yer değiştirme büyüklüğüdür. Küçültülmüş alan atalet momenti Eşitlik (5) ve düzgün yayılı yükün şiddeti Eşitlik (6) yardımıyla hesaplanır [10].

$$I_{re} = (1/12 \times b_f \times (h_w + 2 \times t_f)^3) - (\frac{1}{12} \times h_w^3 \times (b_f - t_w) - (2 \times a^3 \times \frac{t_w}{3})) \quad (5)$$

$$q = f_y \times I_{re} / (L^2 \times (h_w + 2 \times t_f)) \quad (6)$$

2.6. Çiçek Tozlaşma Algoritması (FPA)

Bu algoritma, erkekten dişiye polen transferi fikrine dayanmaktadır, bu süreç tozlaşma süreci olarak bilinmektedir. Bu, kendi kendine tozlaşma (yerel tozlaşma olarak adlandırılır) veya karışık tozlaşma (küresel tozlaşma olarak adlandırılır) şeklinde olabilir ve anahtar olasılık ile çözülecek sorunun alt ve üst sınırları ile nüfus sayısı tarafından kontrol edilmektedir. Algoritma, arama alanı içinde değerlerin dağıtılmasıyla başlar. Daha sonra amaç fonksiyonu hesaplanır ve seçilen anahtar olasılık katsayısına bağlı olarak arama işlemi küresel veya yerel olabilmektedir. Ardından adım boyutu belirlenir ve amaç fonksiyonu değeri yeni değerlere göre güncellenmektedir. Bu işlem, belirli bir yinleme sayısı tamamlanana kadar tekrar edeceği için burada bir döngü oluşturulur; bu çalışmada iterasyon sayısı 20,000 ve çiçek/popülasyon sayısı 20 olarak alınmıştır. Bu algoritma ile ilgili teorik bilgiler Yang ve arkadaşları [36]'de verilmiştir.

2.7. Ateşböceği Algoritması (FA)

Bu algoritma ateşböceklerinin yaydığı ışığın işlevine dayanmaktadır. Bu ışığın yoğunluğu, ateşböcekleri arasındaki mesafe arttıkça azalır ve ışığı emen hava, mesafe arttıkça bu yoğunluğu azaltmaya yardımcı olmaktadır. Bu algoritma, ters kare yasasına dayalı olarak sabit bir ışık emme katsayısını belirtir ve tüm ateşböceklerinin tek cinsiyette olduğunu ve ışık yoğunluğu ile birbirlerine çekildiğini, yani daha az parlak bir ateşböceğinin daha parlak olana doğru hareket ettiğini vurgular. Parlaklık arasında fark yoksa, ateşböcekleri rastgele hareket etmektedir. Parlaklık, amaç fonksiyonu ile yakından ilişkilidir ve her ateşböceğinin belirli bir konumu ve parlaklığı olmaktadır. Bu algoritma, rastgele bir çözüm kümesi oluşturularak, parlaklık yoğunluğunu hesaplayarak ve ardından grubun her bir ateşböceğinin yeni konumunu güncelleyerek başlamaktadır. Bir sonraki adım, yeni amaç fonksiyonunu hesaplamak ve eski fonksiyonla karşılaştırmaktır. Yeni olan daha iyiyse, veriler güncellenir ve sonlandırma kriterleri karşılanırsa işlem sona erer; aksi takdirde işlem tekrarlanır. Bu çalışmada 30,000 iterasyon sayısı ve 20 ateş böceği sayısı kullanılmıştır. Bu metodun kabulleri kısıtları ve teorisi Yang ve arkadaşları [36]'de mevcuttur.

2.7. Yarasa algoritması (BA)

Bu algoritma, bir yarasanın belirli bir konumu olduğunu, belirli bir hızda uçtuğunu ve dalga boyu ve yoğunluğuna göre değişen bir frekansa sahip olduğunu varsaymamaktadır. Dalga boyu veya frekans, yarasanın hedefe yakınlığına göre ayarlanır; burada amaç fonksiyonu, problem alanındaki en iyi çözümleri seçerek çözüm kalitesini değerlendiren bir araç olarak işlev görmektedir. Birincil fonksiyon değeri, ses ve darbe oranı kullanılarak yakınsama hızını kontrol eder. Yerel arama süreci, yeni konumların tekrarlanan güncellenmesi olarak kendini gösterir, çünkü yarasalar ile avlar arasındaki mesafeler güncellenmiş konumlara göre değişmektedir. Arama, belirli kriterler ve belirli yinelemeler doğrultusunda en iyi amaç fonksiyonu değerini bulmak için devam etmektedir. Bu çalışmada iterasyon sayısı 15,000 ve yarasa sayısı/ popülasyon boyutu 60 olarak kabul edilmiştir. Bu algoritma ile ilgili detaylı teorik bilgiler Bekdaş ve arkadaşları [37]'da bulunabilir. Yukarıdaki algoritmaların uygulanması için Matlab programında kod yazılmıştır. Kod yazılmasında Bekdaş ve arkadaşları [37]'dan faydalanmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada, ateş böceği, çiçek tozlaşması ve yarasa algoritmaları kullanılarak petek kirişler için optimum boyutlar sayısal olarak araştırılmıştır. Bilindiği üzere petek kirişlerin tasarımında kesme göçmesi, kaynak yırtılması göçmesi, yanal burulmalı burkulma göçmesi, Vierendeel göçmesi, eğilme göçmesi vb. kriterler önem arz etmektedir. Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında araştırmacılar çoğunlukla bu kriterlere göre optimizasyon yapmaktadır. Çelik yapı elemanlarının tasarımında yapıların güvenli olabilmesi için sehim kriterinin de projelendirme aşamasında dikkate alınması gerekir. Ancak, mevcut çalışmaların çoğu bu kısıtı gözardı ederek optimizasyon gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada literatürden farklı olarak yalnız sehim (en büyük yer değiştirme) değerlerine göre optimizasyon yapılarak tasarım için optimum değerlerin bulunması amaçlanmıştır.

Uygulamada kirişlere çeşitli sınır koşulları uygulanabilmektedir. Ancak, çelik kirişlerin sıcaklık etkisi altında belli bir miktar yatay yer değiştirmesine izin verilir. Bu durum kirişte iç kuvvetlerin oluşmamasını ve böylelikle kesitlerin büyümemesini sağlar. Bu sebepten mevcut çalışmada basit mesnetli kirişlerin analizi tercih edilmiştir. Kiriş için uzunluk ve ilgili boşluk sayıları Çizelge 2'de listelenmiştir. Başlık kalınlığı, boşluk yüksekliği, başlık genişliği, gövde yüksekliği, gövde genişliği ve kaynak uzunluğu için minimum ve maksimum değerler Çizelge 3'te özetlenmiştir. Sayısal örneklerde pratikte çoğunlukla kullanılan S235, S255 ve S355 çelik malzemeleri tercih edilmiştir. Statik analiz için gerekli olan malzeme özellikleri ise Çizelge 1'de gösterilmiştir. S235 için elde edilen sonuçlar Çizelge (4-5)'te, S255 için hesaplanan sonuçlar Çizelge (6-7)'de ve S355 malzemeli kiriş için tasarım değerleri Çizelge (8-9)'da listelenmiştir.

Çizelge (4-9) incelendiğinde petek kiriş üretiminde kullanılan malzeme türünün sonuçlar üzerinde çok belirgin bir etkisi olmadığı görülmektedir. Analizde ele alınan üç farklı malzeme tipi arasında kesit boyutları açısından kayda değer bir farklılık bulunmamaktadır. Bununla birlikte, yüksek akma gerilmesine sahip kirişlerde maksimum düşey yer değiştirme değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek akma gerilmesine sahip kirişlerin taşıyabileceği yük kapasitelerinin yüksek olması ve elastisite modüllerinin aynı olmasından kaynaklanmaktadır. Kirişlerin eğilme kapasitesinde ve yer değiştirme değerlerinin hesaplanmasında önemli bir rolü olan gövde yüksekliğinin sonuçları her üç algortmada benzer sonuçlar vermektedir. Bu boyut, malzeme özelliklerinden çok etkilenmemektedir. Kirişin başlık genişliği için üç algoritma farklı değerler vermektedir. Uygulanan kısıtlarda bu değerler gövde yüksekliğine göre etkisinin az olması sebebiyle elde edilen sonuçların farklı olduğu düşünülmektedir. Çizelge (4-9)'e göre FPA algoritması gövde genişliği en yüksek değerleri ve BA algoritması gövde genişliği için en küçük değerleri vermektedir. Mühendislik pratiği açısından FPA değerlerinin daha uygulanabilir olduğu söylenebilir. FA ve FPA algoritmalarından elde edilen başlık genişlik değerlerinin birbirine yakın olduğu saptanmıştır.

Çizelge 4. S235 için optimum tasarım değerleri (L=200,300,400,500,600 cm)

Tasarım değişkeni	Kullanılan algoritma	L = 200 cm	L = 300 cm	L = 400 cm	L = 500 cm	L = 600 cm
h_w (cm)	FPA	38.8890	36.3410	41.3292	39.6396	42.8438
	FA	38.8889	36.3636	41.9753	39.6396	42.8571
	BA	38.8872	36.3548	41.9262	39.6387	42.8567
b_f (cm)	FPA	25.0000	24.9926	10.2268	25.0000	10.9978
	FA	12.8628	9.2234	9.1062	9.4270	10.7449
	BA	8.9959	9.4062	9.2718	8.8740	8.5832
t_w (cm)	FPA	0.7000	0.7000	0.7000	0.8829	1.2574
	FA	0.7028	0.7772	0.7000	1.3089	1.1643
	BA	0.7000	0.7000	0.7000	0.7238	0.7000
t_f (cm)	FPA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
	FA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
	BA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
a (cm)	FPA	11.6667	10.9023	12.3988	11.8759	12.8531
	FA	11.6667	10.8091	12.5926	11.8919	12.8571
	BA	11.6661	10.9064	12.5779	11.8916	12.8570
w (cm)	FPA	5.8333	5.4698	6.7227	5.9809	6.4371
	FA	5.8333	5.4545	6.2963	5.9459	6.4286
	BA	5.8331	5.4532	6.2289	5.9458	6.4285
F_x (cm)	FPA	0.0146	0.0353	0.0549	0.0899	0.1203
	FA	0.0146	0.0353	0.0549	0.0898	0.1203
	BA	0.0146	0.0353	0.0549	0.0898	0.1203

Çizelge 5. S235 için optimum tasarım değerleri (L=700,750, 800, 900, 1000 cm)

Tasarım değişkeni	Kullanılan algoritma	L = 700 cm	L = 750 cm	L = 800 cm	L = 900 cm	L = 1000 cm
h_w (cm)	FPA	41.0254	42.2018	43.2749	41.7600	43.5185
	FA	41.0254	42.2018	43.2749	41.7910	43.5185
	BA	41.0236	42.1997	43.2622	41.7899	43.5177
b_f (cm)	FPA	11.7070	17.0027	25.0000	9.5791	15.0462
	FA	11.5340	21.3614	24.4363	8.9140	13.5612
	BA	8.9911	9.2825	8.8065	8.9392	8.3595
t_w (cm)	FPA	1.5000	0.7000	0.7000	1.5000	0.8657
	FA	1.0731	0.9177	0.9226	1.0406	1.4279
	BA	0.7000	0.7000	0.7390	0.7494	0.7267
t_f (cm)	FPA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
	FA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
	BA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
a (cm)	FPA	12.3076	12.6606	12.9825	12.5280	13.0555
	FA	12.3077	12.6606	12.9825	12.5373	13.0556
	BA	12.3071	12.6599	12.9787	12.5370	13.0553
w (cm)	FPA	6.1540	6.3303	6.4912	6.2880	6.5278
	FA	6.1538	6.3303	6.4912	6.2689	6.5278
	BA	6.1535	6.3300	6.4893	6.2685	6.5277
F_x (cm)	FPA	0.1705	0.1906	0.212	0.277	0.3293
	FA	0.1705	0.1906	0.2119	0.277	0.3293
	BA	0.1705	0.1906	0.2119	0.277	0.3292

Çizelge 6. S255 için optimum tasarım değerleri (L=200,300,400,500,600 cm)

Tasarım değişkeni	Kullanılan algoritma	L = 200 cm	L = 300 cm	L = 400 cm	L = 500 cm	L = 600 cm
h_w (cm)	FPA	38.8889	36.1316	41.8953	39.6396	42.8571
	FA	38.8889	36.3636	41.9753	39.6396	42.8571
	BA	38.8855	36.3353	41.9640	39.6377	42.8570
b_f (cm)	FPA	8.2776	25.0000	9.0824	18.4651	25.0000
	FA	10.5427	19.2273	10.7452	23.1754	14.8044
	BA	9.0079	9.9409	8.8349	9.0250	9.1971
t_w (cm)	FPA	0.7167	0.7005	0.7000	1.1383	1.5000
	FA	1.4108	1.3067	0.9190	1.0213	0.8538
	BA	0.7000	0.7000	0.7000	0.7678	0.7000
t_f (cm)	FPA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
	FA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
	BA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
a (cm)	FPA	11.6667	10.8395	12.5686	11.8919	12.8871
	FA	11.6667	10.9091	12.5926	11.8919	12.8571
	BA	11.6656	10.9053	12.5892	11.8913	12.8571
w (cm)	FPA	5.8333	5.6112	6.2491	5.9459	6.4286
	FA	5.8333	5.4545	6.2963	5.9459	6.4286
	BA	5.8328	5.4512	6.2946	5.9457	6.4285
F_x (cm)	FPA	0.0157	0.03822	0.0588	0.097	0.1303
	FA	0.0157	0.03822	0.0588	0.097	0.1303
	BA	0.0157	0.03822	0.0588	0.097	0.1303

Çizelge 7. S255 için optimum tasarım değerleri (L=700,750, 800, 900, 1000 cm)

Tasarım değişkeni	Kullanılan algoritma	L = 700 cm	L = 750 cm	L = 800 cm	L = 900 cm	L = 1000 cm
h_w (cm)	FPA	41.0256	42.2018	43.2749	41.7688	43.5185
	FA	41.0256	42.2018	43.2749	41.7910	43.5185
	BA	41.0249	42.2018	43.2747	41.7894	43.5185
b_f (cm)	FPA	14.7274	25.0000	8.0000	14.3884	8.0000
	FA	13.4461	23.4113	8.9940	11.1301	8.6387
	BA	8.2858	9.2139	8.5769	8.6965	8.6226
t_w (cm)	FPA	1.0837	0.7000	1.5000	0.8571	0.7000
	FA	1.5000	1.4298	1.4254	0.9317	1.2378
	BA	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000
t_f (cm)	FPA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
	FA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
	BA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
a (cm)	FPA	12.3077	12.6606	12.9825	12.5306	13.0556
	FA	12.3077	12.6606	12.9825	12.5373	13.0556
	BA	12.3075	12.9824	12.9824	13.0554	13.0554
w (cm)	FPA	6.1538	6.3303	6.4912	6.2825	6.5278
	FA	6.1538	6.3303	6.4912	6.2687	6.5278
	BA	6.1537	6.3302	6.6378	6.5277	6.5277
F_x (cm)	FPA	0.18424	0.2068	0.22932	0.2999	0.35672
	FA	0.18424	0.2068	0.22932	0.2999	0.35672
	BA	0.18424	0.2068	0.22932	0.2999	0.35672

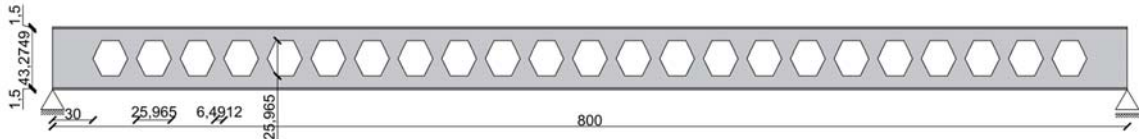
Çizelge 8. S355 için optimum tasarım değerleri (L=200,300,400,500,600 cm)

Tasarım değişkeni	Kullanılan algoritma	L = 200 cm	L = 300 cm	L = 400 cm	L = 500 cm	L = 600 cm
h_w (cm)	FPA	38.8889	36.3636	41.9753	39.6395	42.8537
	FA	38.8889	36.3636	41.9753	39.6396	42.8571
	BA	38.8507	36.3630	41.9727	39.6344	42.8528
b_f (cm)	FPA	16.3884	25.0000	25.0000	25.0000	20.8046
	FA	14.1181	9.1737	11.9905	20.3979	15.6762
	BA	9.4825	9.5088	8.7141	9.0362	8.7394
t_w (cm)	FPA	1.5000	1.5000	1.5000	0.7000	0.7000
	FA	1.1629	0.9099	1.2873	1.4190	1.3041
	BA	0.7000	0.7204	0.7000	0.7000	0.7000
t_f (cm)	FPA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
	FA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
	BA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
a (cm)	FPA	11.6667	10.9091	12.5926	11.8919	12.8561
	FA	11.6667	10.9091	12.5926	11.8919	12.8571
	BA	11.6552	10.9089	12.5918	11.8903	12.8558
w (cm)	FPA	5.8333	5.4545	6.2963	5.9460	6.1538
	FA	5.8333	5.4545	6.2963	5.9459	6.1538
	BA	5.8276	5.4545	6.2959	5.9452	6.4279
F_x (cm)	FPA	0.02156	0.05292	0.08134	0.13426	0.18032
	FA	0.02156	0.05292	0.08134	0.13426	0.18032
	BA	0.02156	0.05292	0.08134	0.13426	0.18032

Çizelge 9. S355 için optimum tasarım değerleri (L=700,750, 800, 900, 1000 cm)

Tasarım değişkeni	Kullanılan algoritma	L = 700 cm	L = 750 cm	L = 800 cm	L = 900 cm	L = 1000 cm
h_w (cm)	FPA	41.0256	42.2018	43.2749	41.7910	43.5185
	FA	41.0256	42.2018	43.2749	41.7910	43.5185
	BA	41.0248	42.2011	43.2733	41.7906	43.5115
b_f (cm)	FPA	21.1272	19.5431	19.3459	11.2698	25.0000
	FA	8.6286	11.6624	10.9708	8.3582	12.1932
	BA	8.6861	9.0528	8.9289	9.1270	8.7405
t_w (cm)	FPA	0.7536	0.7000	0.7096	0.7000	0.7000
	FA	1.2427	0.8184	0.7000	1.5000	1.0357
	BA	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000
t_f (cm)	FPA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
	FA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
	BA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
a (cm)	FPA	12.3077	12.6606	12.9825	12.5373	13.0556
	FA	12.3077	12.6606	12.9825	12.5373	13.0556
	BA	12.3074	12.6603	12.9820	12.5372	13.0534
w (cm)	FPA	6.1538	6.3303	6.4912	6.2687	6.5278
	FA	6.1538	6.3303	6.4912	6.2687	6.5278
	BA	6.1537	6.3302	6.4910	6.2686	6.5267
F_x (cm)	FPA	0.25578	0.28616	0.31752	0.41552	0.49392
	FA	0.25578	0.28616	0.31752	0.41552	0.49392
	BA	0.25578	0.28616	0.31752	0.41552	0.49392

Çizelge (4-9) incelendiğinde algoritmalar arasında gövde genişliği değerlerinde belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. BA algoritması için elde edilen gövde genişliği değerlerinin pratik açıdan uygulanabilir olduğu ve sonuçların uyum içinde bir bütünlük sağladığı söylenebilir. Ancak, FPA ve FA algoritmalarında, gövde genişliği değerlerinin bir uyum sergilemediği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kullanılan her üç algoritma da başlık genişliği, boşluk yüksekliği ve kaynak uzunluğu için benzer ve uyumlu davranış göstermiştir. Başlık kalınlığı her üç algortmada bütün malzeme tipleri ve kiriş uzunlukları için aynı çıkmıştır. Buradan başlık kalınlığının stabil bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Çözülen örneklerin çoğunda kiriş uzunluğu arttıkça boşluk yüksekliğinin ve kaynak uzunluğunun da artması görülmüştür. Petek kirişine ait kesit geometrisi, açıklığın artmasıyla birlikte bir artış göstermiştir. Kullanılan her üç algortmadan elde edilen sonuçlara göre amaç fonksiyonlarının üst üste çakıştığı saptanmıştır. Optimizasyon çalışması sonucunda elde edilen örnek bir kiriş, şematik olarak Şekil 2’de çizilmiştir.



Şekil 2. Petek bir kirişin şematik gösterimi (tüm boyutlar cm cinsinden verilmiştir)

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada FA, FPA ve BA algoritmaları yardımıyla altgen boşluklu basit kirişin optimizasyon analizi yapılmıştır. En büyük yer değiştirme değerleri amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir ve üç adet tasarım kısıtı uygulanmıştır. Sonuçlar hesaplanırken kayma deformasyon etkisi dikkate alınmamıştır. Parametrik çalışmaların yapılması amacıyla S235, S255 ve S355 çelik sınıfları ve 10 adet farklı kiriş boyu için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada elde edilen önemli sonuçlar şöyledir:

- Akma değeri arttıkça düşey yer değiştirme değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir.
- Petek kirişin uzunluğu arttıkça düşey yer değiştirme değerin de artış göstermektedir.
- Kesit boyutlarında ise uzunluğun artmasıyla birlikte milimetre cinsinden az ve kademeli bir artış gözlemlenmiştir.
- Kullanılan algoritmaların sonuçlarına göre, petek kirişin başlık genişliğinde ve gövde genişliğinde farklar gözlemlenmiştir. Diğer kesit boyutları arasındaki farklar ise oldukça küçüktür ve bu farklar göz ardı edilebilir seviyededir.
- Düşey yer değiştirme değerleri, boşluk yüksekliği ve kaynak uzunluğu ise tüm algoritmalar için eşit çıkmıştır.

Bazı sonuçların farklı olması algoritmaların çalışma yöntemi, güncellenme ve doğrulama sayısı ile girdilerin ve çıktının doğasından kaynaklanmaktadır.

5. KAYNAKLAR

1. Kayabekir, A.E., Bekdaş, G., Nigdeli, S.M., 2021. Optimum design of reinforced concrete T-beam considering environmental factors via flower pollination algorithm. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(4), 166-178.
2. Yang X.S., 2008. *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. Luniver Press: Bristol.
3. Yang, X.S., 2010. Firefly algorithm, levy flights and global optimization. In *Research and Development in Intelligent Systems XXVI: Incorporating Applications and Innovations in Intelligent Systems XVII*, Springer London, 209-218.
4. Yang, X.S., Gandomi, A.H., 2012. Bat algorithm: A novel approach for global engineering optimization. *Engineering Computations*, 29(5), 464-483.
5. Gandomi, A.H., Yang, X.S., 2011. Benchmark problems in structural optimization. In *Computational Optimization, Methods and Algorithms*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 259-281.
6. Erdal, F., 2017. A firefly algorithm for optimum design of new-generation beams. *Engineering Optimization*, 49(6), 915-931.

7. Hasançebi, O., Teke, T., Pekcan, O., 2013. A bat-inspired algorithm for structural optimization. *Computers & Structures*, 128, 77-90.
8. Sorkhabi, R.V., Naseri, A., Naseri, M., 2014. Optimization of the castellated beams by particle swarm algorithms method. *APCBEE Procedia*, 9, 381-387.
9. Barkiah, I., Darmawan, A.R., 2021. Comparison behavior of flexural capacity castellated beam of hexagonal opening with circle opening. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 12(8).
10. Elaiwi, S.S., 2019. Analysis and design of castellated beams. Doctoral Dissertation. University of Plymouth. United Kingdom.
11. Hosain, M.U., Spiers, W.G., 1973. Experiments on castellated steel beams. *J Am Weld Soc, Weld Res Suppl*, 52(8), 329-3423.
12. Pachpor, P.D., Gupta, L.M., Deshpande, N.V., Bedi, K., 2011. Parametric study of castellated Beam. *Advanced Materials Research*, 163, 842-845.
13. Megharief, J.D., 1997. Behavior of composite castellated beams. Master Thesis, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Canada.
14. Kshirsagar, V.V., Parekar, S.R., 2018. Behaviour of castellated beams with and without stiffeners-A review. *Behaviour*, 5(04), 2964-2969.
15. Mezher, N.A.M., Noori, A.R., Ertürkmén, D., 2023. Influence of the web opening shapes on the bending and free vibration responses of castellated steel beams. *International Journal of Engineering Technologies IJET*, 8(2), 83-100.
16. Mehetre, A.J., Talikoti, R.S., 2020. Effect of fillet radii on moment carrying capacity of sinusoidal web opening castellated steel beams in comparison with hexagonal web openings. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44, 151-161.
17. Hashim, N.S., De'nan, F., 2024. The magnitude of stress concentration of I-beam with web opening because of lateral-torsional buckling effects. *World Journal of Engineering*, 21(2), 386-397.
18. Boyer, J.P., 1964. Castellated beams-new developments. *AISC Engineering Journal*, 1(3), 104.
19. Mohebbkhan, A., Showkati, H., 2005. Bracing requirements for inelastic castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 61(10), 1373-1386.
20. Durif, S., Bouchair, A., 2012. Behavior of cellular beams with sinusoidal openings. *Procedia Engineering*, 40, 108-113.
21. Deshmukh, M.N., Kasnale, A., 2019. Behaviour of castellated beam with coupled stiffener. *Behaviour*, 6(06), 353-360.
22. Yuan, W.B., Yu, N.T., Bao, Z.S., Wu, L.P., 2016. Deflection of castellated beams subjected to uniformly distributed transverse loading. *International Journal of Steel Structures*, 16, 813-821.
23. De Oliveira, J.P., Cardoso, D.C.T., Sotelino, E.D., 2019. Elastic flexural local buckling of Litzka castellated beams: Explicit equations and FE parametric study. *Engineering Structures*, 186, 436-445.
24. Kang, L., Hong, S., Liu, X., 2021. Shear behaviour and strength design of cellular beams with circular or elongated openings. *Thin-Walled Structures*, 160, 107353.
25. Ferreira, F.P.V., Martins, C.H., De Nardin, S., 2020. Advances in composite beams with web openings and composite cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 172, 106182.
26. Demirdjian, S., 1999. Stability of castellated beam webs. Master Thesis, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Canada.
27. Kshirsagar, V.V., Parekar, S.R., 2018. Behaviour of castellated beams with and without stiffeners-A review. *Behaviour*, 5(04), 2964-2969.
28. Morkhade, S.G., Shirke, T., Mansuke, A., Chavan, M.U., Gupta, L.M., 2021. Experimental and analytical investigation of castellated steel beams with varying openings eccentricity. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 102(2), 479-488.
29. Verweij, J.G., 2010. Cellular beam-columns in portal frame structures. Master Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
30. Panedpojaman, P., Thepchatri, T., Limkatanyu, S., 2014. Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams. *Thin-Walled Structures*, 76, 92-104.
31. Grilo, L.F., Fakury, R.H., De Souza Verissimo, G., 2018. Design procedure for the web-post buckling of steel cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 148, 525-541.
32. Tsavdaridis, K.D., D'Mello, C., 2011. Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(10), 1605-1620.
33. Erdal, F., Saka, M.P., 2013. Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 80, 355-368.

34. Łukasik, S., Żak, S., 2009. Firefly algorithm for continuous constrained optimization tasks. In Computational Collective Intelligence. Semantic Web, Social Networks and Multiagent Systems: First International Conference, Springer Berlin Heidelberg. ICCCI 2009, Wrocław, Poland, October 5-7, 2009. Proceedings 1, 97-106.
35. Johari, N.F., Zain, A.M., Noorfa, M.H., Udin, A., 2013. Firefly algorithm for optimization problem. Applied Mechanics and Materials, 421, 512-517.
36. Yang, X.S., Bekdaş, G., Nigdeli, S.M., 2016. Metaheuristics and optimization in civil engineering. Switzerland, Cham: Springer International Publishing.
37. Bekdaş, G., Nigdeli, S.M., Yücel, M., Kayabekir, A.E., 2021. Yapay zeka optimizasyon algoritmaları ve mühendislik uygulamaları. Seçkin Yayıncılık, Ankara.

Comparison of Feature Extraction Methods in High Dimensional Time Series

Emre KILINÇ^{1,a}

¹Ağrı İbrahim Çeçen University, Patnos Vocational College, Department of Computer Technologies, Ağrı, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-5250-9322

Article Info

Received : 19.08.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606090

Corresponding Author

Emre KILINÇ
ekilinc@agri.edu.tr

Keywords

Machine learning

Feature extraction

Time series

Dimension reduction

How to cite: KILINÇ, E., (2024). Comparison of Feature Extraction Methods in High Dimensional Time Series. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 991-997.

ABSTRACT

Working with high-dimensional datasets increases the workload on machine learning models. Therefore, before making predictions, the most meaningful data points in the entire data set must be determined. It is highly important to improve model performance, especially in the field of machine learning. For this reason, five feature selection methods—Mutual Information, Principal Component Analysis, Chi-square, Information Gain, and Variance Thresholding—commonly used in the literature, were tested on the 14400 feature data set obtained with a system previously proposed to determine the sand, silt and clay ratios in the soil. The success of these five methods is presented comparatively using R-square (R^2) and Mean Absolute Error (MAE) metrics. The best results were obtained with the Information Gain method for sand ($R^2 = 0.44$), with Chi-square for silt ($R^2 = 0.17$), and with Variance Thresholding for clay ($R^2 = 0.61$).

Yüksek Boyutlu Zaman Serilerinde Özellik Çıkarma Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Makale Bilgileri

Geliş : 19.08.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606090

Sorumlu Yazar

Emre KILINÇ
ekilinc@agri.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Makine öğrenmesi

Özellik çıkarma

Zaman serisi

Boyut indirgeme

Atıf şekli: KILINÇ, E., (2024). Comparison of Feature Extraction Methods in High Dimensional Time Series. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 991-997.

ÖZ

Yüksek boyutlu veri setlerinde, makine öğrenmesi ile çalışmak iş yükünde artışa sebep olmaktadır. Bu nedenle tahminleme işlemleri yapılmadan önce, tüm veri seti içerisindeki en anlamlı veri noktalarının belirlenmesi gerekmektedir. Özellikle makine öğrenmesi alanında model performansını artırmak için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle daha önce topraktaki kum, silt ve kil oranlarını belirlemek amacıyla önerilen bir sistemle elde edilen 14400 özellikli veri seti üzerinde, literatürde sıklıkla kullanılan Karşılıklı Bilgi, Temel Bileşen Analizi, Ki-kare, Bilgi Kazancı ve Varyans Eşiği Belirleme özellik seçme metotları denenmiştir. Bu 5 metodun başarı sonuçları R-kare (R^2) ve Ortalama Mutlak Hata (OMH) cinsinden karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. En iyi sonuçlar kum için Bilgi Kazancı metodu ile ($R^2 = 0.44$), silt için Ki-kare ile ($R^2 = 0.17$), kil için Varyans Eşiği Belirleme ile ($R^2 = 0.61$) elde edilmiştir.

1. INTRODUCTION

Feature extraction is the process of converting raw data into a more informative format so that machine learning algorithms can be processed effectively and is a critical process in machine learning [1-3]. These extracted features are essential for functions such as classification, pattern recognition and understanding complex processes [4]. In fields such as monitoring, image recognition, and structural engineering, selecting and extracting relevant features is important for accurate analysis and decision making [5,6]. Advanced feature extraction methods show promise in automating the feature extraction process and improving classification accuracy [7-9].

Feature extraction is also a fundamental process in the analysis of time series signals in various fields. Identifying meaningful features by reducing the size of time series data increases the performance and accuracy of machine learning models put forward [10,11]. Various feature extraction methods have been developed in the literature to extract relevant information from datasets, such as Mutual Information (MI), Principal Component Analysis (PCA), Chi-square, Information Gain (IG) and Variance Threshold (VT) methods [12,13]. MI and IG measure the dependence between variables and uncertainty between features and are used in text processing, biomedical, etc [12]. PCA is a technique used to reduce the dimension of a dataset by mapping data to a new coordinate system to capture the most significant variance [14]. Chi-square is used in tasks such as sentiment analysis and disease prediction by assessing the relationship between features and target variables [15]. Variance Thresholding is ideal for eliminating low-variance features that provide insignificant information and to decrease the data workload. After all, researchers can improve the efficiency and accuracy of various applications by using advanced feature extraction techniques tailored to the characteristics of time series data.

In this study, experiments were carried out on a data set consisting of 66 observations and 14400 features using the 5 feature extraction algorithms mentioned above, and the results are presented comparatively in detail in the following sections.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Dataset

In the study, time series signals obtained with the system called USTA, which was introduced in a previous study, were used [16]. In the previous study, the amplitude of sound transmitted through the soil-water mixture was measured with a pair of transmitter-receiver sensor. For 80 soil samples, a time series dataset of 14400 features, ranging from 0 to 5 volts, was created at a frequency of 2Hz. These data were processed with various machine learning methods and sand, silt and clay predictions were made. In this study, soils with 3 or more samples of the same class in the dataset were selected to avoid uninterpretable results during the training phase. In total, dataset consists of 66 observations and 14400 columns were used.

2.2. Mutual Information (MI)

MI is a statistical measurement method used to measure the amount of information shared between two variables. The basic idea is to evaluate how much knowing the value of a particular attribute reduces uncertainty about the target variable. Entropy for a single variable is calculated using the probability distribution of the values of that variable and its formula is as in Equation 1.

$$H(X) = - \sum p(x) \log_2^{p(x)} \quad (1)$$

Here $p(x)$ refers to the marginal probability distribution. Then MI for each variable is calculated using Equation 2.

$$MI(X; Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y) \quad (2)$$

MI refers to the shared information between two variables, and $H(X, Y)$ refers to the calculated common entropy value. Features with higher MI scores are considered to have a stronger relationship with the target variable.

2.3. Principal Component Analysis (PCA)

PCA aims to transform the original features into a new set of uncorrelated features that capture the maximum variance in the data. The steps are as follows;

- Data is centered by subtracting the mean of each feature
- Covariance matrix of the centered data is calculated.
- Eigenvalue decomposition of the covariance matrix is performed
- The principal components are ranked according to their corresponding eigenvalues.
- Original data is projected onto the selected principal components.

The biggest advantage of PCA is its ability to reduce dimensionality while minimizing information loss. A big disadvantage of PCA is that, being a linear method, it may perform poorly with datasets that have complex, non-linear relationships. However, its applicability extends to non-linear problems to capture non-linear relationships in data by mapping it into a higher-dimensional feature space where linear separability can be achieved [17].

2.4. Chi-square Test

Chi-square test is used to determine whether there is a significant relationship between two categorical variables. One being the feature, the other is the target. It is calculated as in Equation 3.

$$X^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (3)$$

Here O_i represents the observed frequency for a category, and E_i represents the expected frequency assuming independence. Features with higher Chi-square scores have a stronger relationship with the target class.

2.5. Information Gain (IG)

The origin of IG is based on the concept of entropy. In this aspect, it is similar to the MI method. In the context of feature extraction, entropy represents the uncertainty of the target variable. The IG of a feature indicates how much knowing that feature reduces the entropy of the target variable. Steps are as follows;

- Entropy of the target variable is calculated to measure the overall uncertainty in the dataset.
- For each feature, conditional entropy of target is calculated.
- To obtain the IG for each feature, conditional entropy is subtracted from the original entropy.
- Features are ranked based on their IG scores.
- The top-ranking features are used.

It is an effective feature extraction method that can be used quickly and practically. The disadvantage is that if the data set consists of continuous features, the data set must be discretized.

2.6. Variance Thresholding (VT)

Variance thresholding works with the assumption that features with low variance across samples do not carry much information about the target variable. The variance of the dataset with m samples and n features is found mathematically as in Equation 4.

$$Var(X_j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \mu_j)^2 \quad (4)$$

Here, j represents the feature index and x_{ij} represents the value of the j^{th} feature for the i^{th} sample. μ_j is the mean of the j^{th} feature across all samples. In variance thresholding, a threshold value (t) is set, and only features with variance greater than t are considered.

2.7. Evaluation Metrics

In this study, R-square (R^2) and Mean Absolute Error (MAE) performance metrics were used to see the effect of 5 different feature extraction methods on prediction success.

The R^2 metric is used to determine the proportion of variance in the dependent variables. In mathematics, its expression is as in Equation 5.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{5}$$

Here y_i represents the real values, \bar{y} is the average of the real values, and n is the number of samples. R^2 value is between 0 and 1. A higher value indicates that the model is more successful.

MAE value is used to measure the absolute difference between actual values and predicted values. Its mathematical expression is as in Equation 6.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \tag{6}$$

Here, y_i represents the actual values, \hat{y}_i represents the predicted value, and n indicates the number of samples. A lower MAE value means a better model.

3. EXPERIMENTS AND RESULTS

After the time series data of 66 soil samples in the data set were subjected to the MI feature extraction method, the target variables and features were divided into bins for entropy calculation. MI was calculated separately for each feature based on sand, silt and clay ratios. MI scores were then averaged to obtain a joint MI score for each feature. For regression analysis, the best 50 features were selected according to the combined MI scores, and 65 soil sample data were given to the Random Forest (RF) method with the leave-one-out cross validation method. The prediction results made with the RF model with 100 random trees, were recorded, and the R^2 values and prediction successes are given in Figure 1.

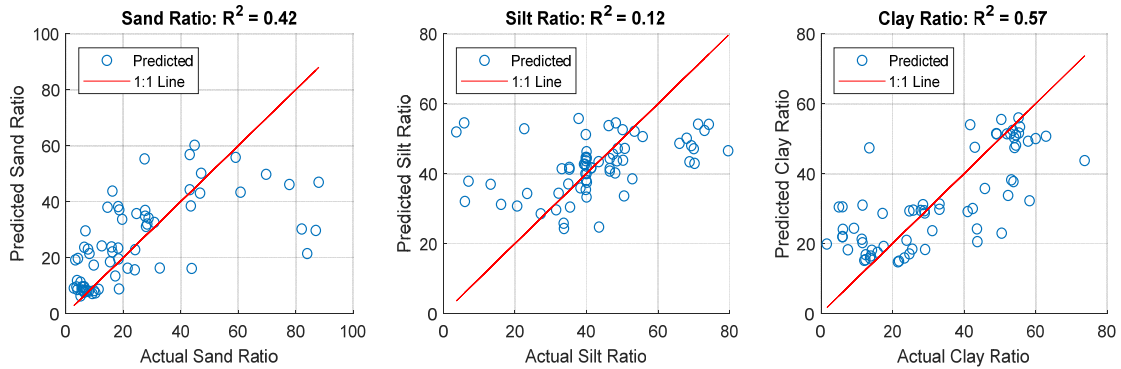


Figure 1. Sand, silt and clay estimation results using the MI feature extraction method on 66 soil samples

As can be seen in Figure 1, R^2 values were found to be 0.42 for sand, 0.12 for silt and 0.57 for clay. Success rates in terms of R^2 and MAE are given in the table below.

Table 1. R^2 and MAE values of the prediction results using the features obtained with the MI method

	Sand	Silt	Clay
R^2	0.42	0.12	0.57
MAE	11.57	10.74	9.2

R^2 and MAE values are given comparatively in Table 1. In addition to R^2 values, MAE values are around 10% and are within acceptable limits, just like in the traditional hydrometer method.

3.2. Experiments with Principal Component Analysis (PCA)

PCA was performed on the normalized time series data and principal components explaining 95% of the variance were selected. Then, predictions were made using the leave-one-out cross-validation method with these selected principal components. The comparative estimation results are provided in Table 2.

Table 2. R^2 and MAE values of the prediction results using the features obtained with the PCA method

	Sand	Silt	Clay
R^2	0.14	0.10	0.13
MAE	12.02	14.06	12.52

As seen in the Table 2, R^2 values for sand, silt and clay were found to be 0.14, 0.10 and 0.13, respectively. On the other hand, MAE values are well above the 10% margin of error. It appears that PCA produces worse results than MI when using such a data set.

3.3. Experiments with Chi-square

Both the features and the target variables (sand, silt, clay ratios) were decomposed into bins to apply the Chi-square test, which works with categorical data. For each feature, contingency tables were created to examine the relationship between the discretized feature and the target variable. The chi-square statistic is calculated separately for each feature based on sand, silt, and clay ratios. A combined Chi-square score is obtained by averaging the Chi-square scores for each feature. Then, the best 50 features were selected according to these combined scores, and the selected features were given as input to the RF with the leave-one-out cross validation method. The prediction rates obtained are given in Table 3.

Table 3. R^2 and MAE values of the prediction results using the features obtained with the Chi-square method

	Sand	Silt	Clay
R^2	0.30	0.17	0.51
MAE	13.63	10.22	10.24

When Table 3 is examined, although the R^2 values seem to be low, when we look at the MAE values, it can be seen that mediocre estimates are obtained for silt and clay. Although not as good as the results obtained with MI, it can be seen that better results are obtained than PCA analysis.

3.4. Experiments with Information Gain (IG)

First, the target variables (sand, silt, clay ratios) and time series features are divided into bins to implement the IG calculation. Then, by calculating the entropy value for each target variable and each discretized feature, the common entropy between each target and feature was determined. The IG for each feature was calculated by subtracting the joint entropy from the target's entropy. Finally, the determined features were given to the RF method with the leave-one-out method and predictions were made. Table 4 shows these estimation results.

Table 4. R^2 and MAE values of the prediction results using the features obtained with the IG method.

	Sand	Silt	Clay
R^2	0.44	0.13	0.57
MAE	10.18	10.68	9.11

Table 4 shows the prediction success achieved when the IG feature extraction method was used. The IG feature extraction method yielded the best results for predicting sand, silt, and clay. Especially when we look at the MAE values, it can be seen that all predictions are within acceptable limits.

3.5. Experiments with Variance Thresholding (VT)

As a first step, the variance of each feature in the normalized time series data was calculated. Features that were above a predefined variance threshold (threshold = 0.01 in this case) were selected and other features were eliminated. These selected features were given as input to the RF method and predictions were made.

The estimation results obtained with the Variance Thresholding feature extraction method are given in Table 5.

Table 5. R² and MAE values of the prediction results using the features obtained with the VT method.

	Sand	Silt	Clay
R ²	0.41	0.11	0.61
MAE	10.1	12.06	8.64

When Table 5 is examined, the MAE values obtained are at an acceptable level except for silt estimation. It produced the best results compared to other methods, in terms of clay estimation. The success rates obtained by all methods are presented comparatively in Table 6.

Table 6. R² and MAE values of prediction results using features obtained by MI, PCA, Chi-square, IG and VT methods.

		Sand	Silt	Clay	Average
MI	R ²	0.42	0.12	0.57	0.37
	MAE	11.57	10.74	9.2	10.5
PCA	R ²	0.14	0.10	0.13	0.12
	MAE	12.02	14.06	12.52	12.86
Chi-square	R ²	0.30	0.17	0.51	0.33
	MAE	13.63	10.22	10.24	11.37
IG	R ²	0.44	0.13	0.57	0.38
	MAE	10.18	10.68	9.11	9.9
VT	R ²	0.41	0.11	0.61	0.37
	MAE	10.1	12.06	8.64	10.2

Table 6 shows the success rates of sand, silt and clay predictions obtained with 5 different feature extraction methods. The highest success rates were obtained with IG for sand (R² = 0.44, MAE = 10.18), with Chi-square for silt (R² = 0.17, MAE = 10.22) and with VT for clay (R² = 0.61, MAE = 8.64). The best results can be achieved by using these three methods in combination. However, if a single method that gives the optimum result is to be chosen, the best option seems to be the IG method. As noted in the “Average” column of Table 6, IG already produces the best results for sand estimation, and comes close to the best results for silt and clay estimations with very small compromises. Using a single feature extraction method will also reduce the workload and complexity of the prediction system to be developed.

4. CONCLUSIONS

In large-scale data (especially time series), it is very important to select the most meaningful signals instead of all signals. In this way, the dataset can be used more effectively in machine learning methods by reducing its size. The aim here is to work faster with less data, compromising the prediction success as little as possible. In this study, 5 feature extraction methods frequently used in the literature were applied on a 14400-column (feature) time series dataset of 66 soil samples obtained with the previously introduced USTA device. A key strength of this research lies in its focus on evaluating feature extraction methods within the context of high-dimensional soil data rather than aiming solely for predictive accuracy. By employing the Random Forest algorithm as a benchmarking tool, the study provided a controlled environment to compare the effectiveness of each method. This approach ensures that the reported results are robust and generalizable, offering practical guidance for future research and applications. First, future work could explore integrating feature extraction methods with ensemble machine learning models to enhance accuracy without notably increasing computational costs. Second, future research could investigate the applicability of these methods to other types of soil data, potentially incorporating spatial or environmental factors to broaden the scope of their utility. Third, leveraging advanced optimization techniques, such as evolutionary algorithms or neural architecture search, may further enhance feature selection, tailoring the process to specific datasets or applications.

5. REFERENCES

1. Wangni, J., Chen, N., 2016. Nonlinear feature extraction with max-margin data shifting. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 30(1), 10299.
2. Guyon, I., Elisseeff, A., 2003. An introduction to variable and feature selection. Journal of Machine Learning Research, 3, 1157-1182.
3. Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J., 2009. The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction (2nd ed.). Springer Series in Statistics. Springer, New York, NY, 745.
4. Ren, S., Zhang, X., Li, H., Chu, G., Chen, D., Bai, H., Hu, C., 2022. Interpretable feature extraction for the numerical particle system. In B.H.V. Topping, & P. Iványi (Eds.), Proceedings of the Eleventh International Conference on Engineering Computational Technology. Civil-Comp Press, Edinburgh, UK.
5. Alegeh, N., Thottoli, M., Mian, N.S., Longstaff, A.P., Fletcher, S., 2021. Feature extraction of time-series data using DWT and FFT for ballscrew condition monitoring. Advances in Transdisciplinary Engineering.
6. Wang, Y., 2022. Malicious URL detection: An evaluation of feature extraction and machine learning algorithm. Highlights in Science, Engineering and Technology, 23, 117-123.
7. Qian, X., Zhang, H., Yang, C., Wu, Y., He, Z., Wu, Q.-E., Zhang, H., 2018. Micro-cracks detection of multicrystalline solar cell surface based on self-learning features and low-rank matrix recovery. Sensor Review, 38(3), 360-368.
8. Xu, Y., Yin, K., Zhang, J., Yao, L., 2008. A spatiotemporal approach to N170 detection with application to brain-computer interfaces. 2008 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics.
9. Doraikannan, S., Selvaraj, P., Burugari, V.K., 2019. Principal component analysis for dimensionality reduction for animal classification based on LR. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 8(10), 1118-1123.
10. Lin, J., Li, H., Zhou, C., Li, W., Shao, X., 2023. Autoencoder-based feature extraction for power time series data considering social information. Eighth International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2023).
11. Liu, H., Motoda, H., 1998. Feature selection for knowledge discovery and data mining. The Springer International Series in Engineering and Computer Science. Springer, US.
12. Liu, S., Tang, B., Chen, Q., Wang, X., Fan, X., 2015. Feature engineering for drug name recognition in biomedical texts: Feature conjunction and feature selection. Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2015, 1-9.
13. Bishop, C.M., 2006. Pattern recognition and machine learning. Information Science and Statistics. Springer, New York, NY, 778.
14. Venkatesh, R., Anantharajan, S., Gunasekaran, S., 2023. Multi-gradient boosted adaptive SVM-based prediction of heart disease. International Journal of Computers Communications & Control, 18(5), 4994.
15. Yusliani, N., Aruda, S.A.Q., Marieska, M.D., Saputra, D.M., Abdiansah, A., 2022. The effect of chi-square feature selection on question classification using multinomial naïve Bayes. Sinkron, 7(4), 2430-2436.
16. Orhan, U., Kilinc, E., Albayrak, F., Aydin, A., Torun, A., 2022. Ultrasound penetration-based digital soil texture analyzer. Arabian Journal for Science and Engineering, 47(8), 10751-10767.
17. Schölkopf, B., Smola, A.J., Müller, K., 1998. Nonlinear component analysis as a kernel eigenvalue problem. Neural Computation, 10(5), 1299-1319.



The Utilization of Single-Counter Systems Featuring Final Terminals with Non-Zero Counter Values

Mehmet KURUCAN^{1,a}, Dominik WOJTCZAK^{2,b}

¹Ardahan University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Ardahan, Türkiye,

²University of Liverpool, Faculty of Engineering, Department of Computer Science, Liverpool, UK

^aORCID: 0000-0003-4359-3726; ^bORCID 0000-0001-5560-0546

Article Info

Received : 31.05.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606100

Corresponding Author

Mehmet KURUCAN

mehmetkurucan@ardahan.edu.tr

Keywords

Hidden Markov models

Probabilistic Context-free Grammars

Probabilistic one counter automata

Probabilistic pushdown automata

Natural language processing

How to cite: KURUCAN, M., WOJTCZAK, D., (2024). The Utilization of Single-Counter Systems Featuring Final Terminals with Non-Zero Counter Values. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 999-1014.

ABSTRACT

Hidden probabilistic one counter models (HPOCA) that are a specific model where spotting between hidden Markov models (HMMs) and probabilistic context-free grammars (PCFGs) which is a subclass of probabilistic pushdown automata contains only one stack symbol. In this study, we propose a new model in which the final terminal counter value is different from zero. With this proposed model, we enhance the existing HPOCA, making it more complex. Consequently, as there will be a greater number of paths to reach the final terminal, we also evaluate the probability of reaching the target through alternative routes based on the given observation sequence. It makes the model more expressive than default HPOCA due to providing alternative final terminals. However, the inference of the final counter value could easily go to an infinite number without any threshold. A boundary is applied to prevent the occurrence of this unexpected condition. By applying this threshold value, we ensured that the computational complexity of the model is quadratic rather than cubic.

Sıfırdan Farklı Sayaç Değerlerine Sahip Final Terminalleri İçeren Tek Sayaçlı Sistemlerin Kullanımı

Makale Bilgileri

Geliş : 31.05.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606100

Sorumlu Yazar

Mehmet KURUCAN

mehmetkurucan@ardahan.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Gizli Markov modelleri

Olasılıksal bağlamdan bağımsız gramerler

Olasılıksal tek sayaç otomatları

Olasılıksal itme otomatları

Doğal dil işleme

Öz: KURUCAN, M., WOJTCZAK, D., (2024). The Utilization of Single-Counter Systems Featuring Final Terminals with Non-Zero Counter Values. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 999-1014.

ÖZ

Gizli olasılıklı bir sayaç modeli (HPOCA), gizli Markov modelleri (HMMs) ile olasılıklı bağlamdan bağımsız gramerler (PCFGs) arasında tespitinin yalnızca bir yığın sembolü içerdiği belirli bir modeldir. Bu çalışmada, son terminal sayaç değerinin sıfırdan farklı olduğu yeni bir model öneriyoruz. Önerilen bu modelle, mevcut HPOCA'yı geliştirerek daha karmaşık hale getiriyoruz. Sonuç olarak, son terminale ulaşmak için daha fazla yol olacağından, verilen gözlem dizisine göre alternatif yollar aracılığıyla hedefe ulaşma olasılığını da değerlendiriyoruz. Alternatif son terminaller sağladığı için modeli varsayılan HPOCA'dan daha anlamlı hale getiriyor. Ancak, son sayaç değerinin çıkarımı herhangi bir eşik olmaksızın kolayca sonsuz bir sayıya gidebilir. Bu beklenmeyen durumun oluşmasını önlemek için bir sınır uygulanır. Bu eşik değerini uygulayarak, modelin hesaplama karmaşıklığının kübik değil, ikinci dereceden olmasını sağlamış oluyoruz.

1. INTRODUCTION

Complex nested hierarchical structures are a major issue for modelling sequential data. They might be found in many different fields such as natural language, gene modelling, and queuing systems. There are two major types of models to challenge this issue: Hidden Markov Models (HMMs) and probabilistic context-free grammars (PCFGs). It is known that HMMs are commonly used for both their computational complexity and simplicity, however, it is not sufficient while facing more complex problems. On the other hand, PCFGs are a sufficient model to be used for complex problems but they are slow learners (i.e. higher computational complexity than HMMs).

In the light of this consideration, we propose a model that has an attractive spot in between standard HMM and PCFG. This model is more suitable to face more complex problems than HMMs provide, and it has less computational complexity than PCFGs have. In this paper, we introduce the characteristic feature of the final terminal, which is substantially formed with zero counter value in the default HPOCA model. Probabilistic one counter automata (POCA) is a trending known model that is used to recognize the subclass language of probabilistic context-free languages. This aspect is used as a comprehensible model for queuing systems [1] or epidemic modelling [2]. In these systems the counter value is used as a key role when tracking the number of clients in the queue or figure out the number of infected patients. POCAs are also commonly used in the analysis of software such as [3] and [4].

The language recognition of this model is a subclass of probabilistic context-free languages as HPOCA recognises. It is called probabilistic one-counter languages. The parsing of these languages is notably expensive due the parsing algorithm used for these languages (i.e. known as CYK algorithm) has a cubic computational complexity. Reducing this computational complexity, the structure of HMM which has quadratic algorithms and recognizes the probabilistic regular languages encompassed by probabilistic context-free languages is adapted to HPOCA as mentioned in [6].

In systems with queues, the counter value is constrained as much as possible, despite the system potentially presenting an infinite appearance. In order to further approach the potential of an infinite system and to develop a more impactful model, a modification was made to the final terminal feature of the existing HPOCA [5]. In this update, even if a process ends at a final terminal and the counter value is different from zero, it still indicates that the process was accepted, unlike in the present HPOCA where the counter value should always be zero. This new HPOCA model renders the current model more complex. This augmented feature places the model into the spot where it challenges more complex problems than the current model does. Along with this enables it to parse the recognized language more accurately.

1.1. Related Work

The definition of deterministic one-counter automata (OCA) and its structure that accepts the languages are represented in [7]. According to this definition, we see that one-counter automatas, which has only one stack symbol, accept the subclass of context-free languages which is called one-counter languages. POCA is augmented by adding probability values to the transition functions of the OCA. It is extensively discussed in [8] and [9]. According to the definitions, the proposed model also sits between two distinct models which are Markov chains (MCs) and probabilistic pushdown automata (PPDA) [10,11] as the model discussed in this work.

When examining the applications used by OCA, there are several purposes. For instance, it is employed in parsing bracketed arithmetic expressions [12]. Additionally, OCA is utilized for validating XML documents [13]. The work presented in [14] adapts only the Viterbi algorithm for POCA decoding. However, it is less concise than [5]. Because, [5] studies adapt all algorithms of HMM to enable the updating of parameters and yielding more favourable results.

On the other hand, HMM is widely utilized in various fields. For instance, in natural language processing [15]. In other instances, some other extensions are applied to create HMM models of different structures. Lexicon free-HMMs [16] has been employed for handwriting recognition and Weighted features in HMM [17] model has been used in removing spam from SMS. The other extension applied to HMM is called hierarchical hidden Markov model. It is applied to detect the resistance gene in biology [18] and inferring behaviour [19].

None of the models under consideration in this study are capable of simulating the model proposed here. The reason is that these models have finite states. However, the proposed model contains infinite states and thus this makes it a more complex structure and being applicable to more intricate problems.

1.2. Structure of the Paper

This article is adapted from the thesis discussed in [6]. Unlike [5], it allows final terminals to have non-zero counter value. The structure of the article proceeds as follows: In Section 2, the definition of the model and its constraints are discussed. Adapted algorithms are addressed in Section 3. The results of the comparison with HMM and [5] are examined in Section 4. The last section, Section 5, contains the conclusion part.

2.2. MODEL DEFINITION

In [5], the distinctive feature of the final terminal of the model is produced with zero counter value. In this new model, we do, however, slightly strengthen the traditional acceptance rule of the counter machines by accepting that the counter value of the final terminal is non-zero. To accommodate non-zero counter values, we will introduce an appropriate notation for the final terminal of this model by defining as (Equation 1):

$$Q_F = \{(q_F, c) | c \geq 0\} \quad (1)$$

where $q_F \in Q$.

The formal definition of this proposed model is quite similar as defined in [5]. The model has tuple $H = (Q, \Sigma, A^0, A^+, B, q_0, q_F)$ where

- Q is a finite set of hidden states
- Σ is finite set of observations
- A^0 is transition function and it is enabled when the counter value equals to zero where $A^0: Q \times \Delta_0 \times Q \rightarrow [0,1]$
- A^+ is transition function and it is enabled when the counter value is non-zero where $A^+: Q \times \Delta_+ \times Q \rightarrow [0,1]$
- B is emission function where $B: Q \times \Sigma \rightarrow [0,1]$
- $q_0 \in Q$ is initial terminal
- $q_F \in Q$ is designated the final terminal

The Δ_0 and Δ_+ are possible changes for the counter value. They are enabled depending on the current counter value. If the current counter value is zero then $\Delta_0 = \{0,1\}$ is enabled. According to the possible changes, at the next step, the counter ought to be still zero or increase one. If the counter value is non-zero then $\Delta_+ = \{-1,0,1\}$ is enabled and at the next step the counter might be still zero, increase one or decrease one.

The probability distribution of every state $q \in Q$ we have;

- $\sum_{\Delta \in \Delta_0, q' \in Q} A^0(q, \Delta, q') = 1$
- $\sum_{\Delta \in \Delta_+, q' \in Q} A^+(q, \Delta, q') = 1$
- $\sum_{o \in \Sigma} B(q, o) = 1$

The form of the proposed model is shown as a pair (q, c) . Here, $q \in Q$ is a hidden state, and $c \in \mathbb{N}_0$ is a non-negative integer. The initial state, it is unique, is formed as $(q_0, 0)$ and the final terminal is configured as (q_F, c) . We will show these configurations by S_t where t is a time step. When we run this configurations at time t and counter value equals to zero, we will get a probabilistic value as (Equation 2).

$$Pr(S_{t+1} = (q', \Delta) | S_t = (q, 0)) = A^0(q, \Delta, q') \quad (2)$$

If the counter value is non-zero at time t , then the configuration is formed as (Equation 3)

$$Pr(S_{t+1} = (q', c + \Delta) | S_t = (q, c)) = A^+(q, \Delta, q') \quad (3)$$

Here, q is the current hidden state at time t . q' is the next hidden state at time step $t+1$. Δ is the difference of the counter values between states. If counter value equals to zero $\Delta \in \Delta_0$ and if counter value is non-zero $\Delta \in \Delta_+$.

A processing (i.e. run) of T (i.e. length of given observation sequence) in this model is a finite trace as shown in Figure 1. It starts at initial terminal $(q_0, 0)$ at time $t=0$. It is terminated (i.e. accepted) if $(q_T, c_T) = (q_F, c)$, $c \geq 0$.



Figure 1. A simple trace of the model

The inference of the counter value in this model may potentially escalate to infinity without a predefined threshold. It is necessary to include a boundary to mitigate the occurrence of this unexpected condition during model running. The threshold for the counter value boundary is actually determined by the length of the given observation sequence. The running terminates at the final terminal with a non-zero counter value upon emitting the last output symbol of the given output sequence. For example, Figure 2, let T denote the length of the given observation sequence. A potential worst-case scenario related to this aspect is that the counter value in the model arises when the model terminates at a different hidden variable. On the other hand, the counter value is non-zero at time step $t=T$, yet. It is illustrated by the red line in Figure 2. In such a scenario, the probability of the processed output sequence becomes zero.

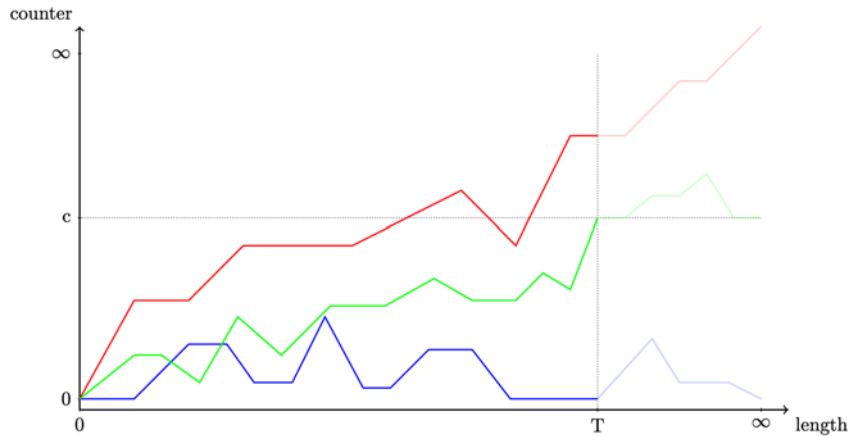


Figure 2. Three examples for counter threshold

2.1. Motivation Example

To enhance the comprehensibility of the proposed model from the reader's perspective, it would be beneficial to illustrate it using a simple motivating example. For this purpose, let us assume that we have a model with a single state (e.g., q) and a single observation symbol (e.g., a). The model parameters are defined as follows:

- Initial state distribution: $\pi(q) = 1$
- Transition probabilities:
 - $A^0(q, 0, q) = 0.4$; $A^0(q, 1, q) = 0.6$
 - $A^+(q, -1, q) = 0.4$; $A^+(q, 0, q) = 0.2$; $A^+(q, 1, q) = 0.4$
- Emission probabilities: $B(q, a) = 1$

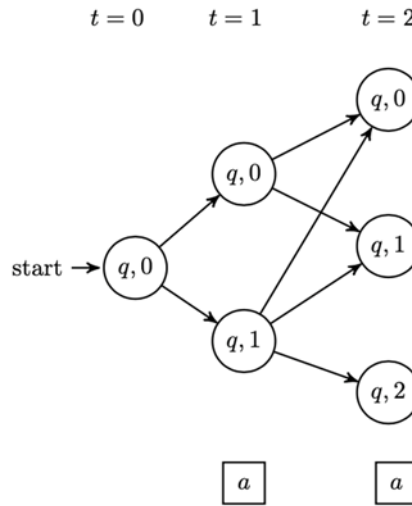


Figure 3. The trellis diagram of motivation example

Let us assume that the given observation sequence is "aa." The model will calculate the probabilistic value of this observation sequence (i.e., the forward likelihood value) by constructing a trellis diagram, as depicted in Figure 2. Since the model initiates at time $t=0$, the computation involves the initial probability of the state, the transition probabilities to possible state configurations at time $t=1$, and the emission probabilities for the symbol produced at time $t=1$. These probabilities are dynamically maintained as the product of the initial state probability, the transition probabilities, and the emission probabilities for the observed symbols.

The activation of the state transition matrices is contingent upon the counter value at time $t-1$. At $t=0$, the counter value is 0, thus A^0 is activated. Consequently, the probability of producing the first symbol "a" in the given observation sequence at $t=1$ is calculated as follows: $\pi(q) \cdot A^0(q, 0, q) \cdot B(q, a)$ and $\pi(q) \cdot A^0(q, 1, q) \cdot B(q, a)$. The reason for performing these two calculations is that during the transition from $t=0$ to $t=1$, the counter value may either remain 0 or increase by 1.

During the transition from $t=1$ to $t=2$, it is essential to consider the transitions from $(q, 0)$ and $(q, 1)$, as the appropriate transition matrix is activated based on the counter value (where the tuple indicates the state q alongside the counter value). The calculations are then aggregated and continued according to the length of the given observation sequence.

The main of this work, which is also mentioned in [5], is given a set of observation sequences \mathcal{O} to find a proper model \mathcal{H} with a set of hidden states \mathcal{Q} that produces \mathcal{O} . In simple terms, processing such calculations would require the multiplication of all possible hidden states with counter values. This would result in exponential computation. To avoid this extensive computation and bring it to a polynomial time we will adapt classic HMM algorithms in the next section.

3. ADAPTATION OF HMM ALGORITHMS

The learning problem in HMMs, there are three fundamental algorithms (i.e. Forward, Backward, and Baum-Welch) used to deal with it. In our proposed model, we consider the counter value that evolves the calculation of learning problems while adapting those algorithms.

When adapting the forward and backward algorithms, which are the first stage of the learning algorithm, we divided them into two separate phases. They are called preliminary and normalization, respectively. Here, the preliminary phase is similar to the calculations in the original algorithms. However, with this adaptation, considering the counter value results in a change in the calculation values. In the normalization phase, unnecessary paths are discarded to construct a complete trellis diagram connecting specific initial and final terminals.

The last adapted algorithm is the Baum-Welch algorithm. In the original version of this algorithm there are two distinct calculation functions. We use the same functions but also consider counter configuration. Among these functions, γ calculates the probability of being in a hidden state at time t based on the given observation sequence. The other function, ξ , calculates the transition probabilities between states based on the given observation sequence.

3.1. The Adaptation of Forward Algorithm

This algorithm is used to compute the probability value of a given observation sequence. This computation is obtained by summing the calculations of all possible paths that can generate the given observation sequence.

First Phase: Preliminary Forward Calculation

Let $o_{i:j} = o_i \dots o_j$ is the part of the given observation sequence from i to j . In this calculation, we consider the joint probability distribution of the given observation sequence $o_{1:t}$, the hidden state-counter pair $S_t = (q, c)$ and all these are conditioned on initial terminal $S_0 = (q_0, 0)$. The calculation formally shown as (Equation 4);

$$\hat{\alpha}_t(q, c) = \Pr(o_{1:t}, S_t | S_0) \tag{4}$$

Here, $\hat{\alpha}$ represents the preliminary Forward calculation.

The calculation start initial state at $t=0$ as shown in Figure 4. It continues the calculation by summing all over the paths until reaches the hidden state S_t . The calculation is performed into two steps: Base step and Recursion step.

At Base step (i.e. $t=0$):

$$\hat{\alpha}_0(q, c) = \begin{cases} 1 & \text{if } q = q_0 \text{ and } c = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

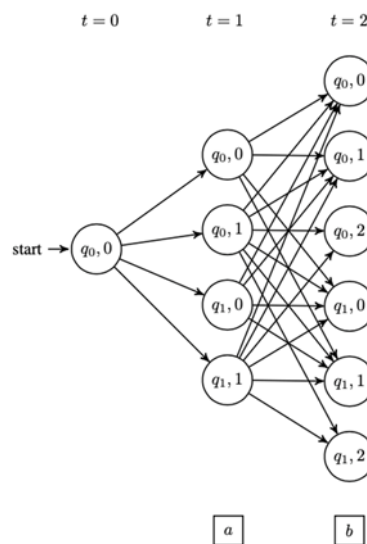


Figure 4. Trellis diagram of preliminary Forward calculation

At the Recursion step (i.e. $t > 0$):

If $c - \Delta = 0$:

$$\hat{\alpha}_t(q, c) = \sum_{q' \in Q} \sum_{\Delta=0}^1 \hat{\alpha}_{t-1}(q', c - \Delta) A^0(q', \Delta, q) B(q, o_t) \tag{6}$$

If $c - \Delta > 0$:

$$\hat{\alpha}_t(q, c) = \sum_{q' \in Q} \sum_{\Delta=-1}^1 \hat{\alpha}_{t-1}(q', c - \Delta) A^+(q', \Delta, q) B(q, o_t) \quad (7)$$

Theorem-1: $\hat{\alpha}_t(q, c)$ calculates $\Pr(o_{1:t}, S_t | S_0)$.

Proof-1: The calculation start $t=0$, thus the function calculates $\Pr(o_{1:0}, S_0 | S_0)$. Here $o_{1:0}$ is irrelevant. $\Pr(S_0 | S_0) = \Pr(S_0) = 1$ and at the base step if $q = q_0$ and $c = 0$, then $\hat{\alpha}_0(q, c) = 1$ otherwise it is equal to zero. Let assume that $t=k$ is correct. Then we need to prove that $t=k+1$. If we put the t into calculation formulae, we get: $\hat{\alpha}_{k+1}(q, c) = \Pr(o_{1:k+1}, S_{k+1} | S_0)$. If we apply chain rule, then we get: $\hat{\alpha}_{k+1}(q, c) = \Pr(o_{1:k+1} | S_0, S_{k+1}) \Pr(S_{k+1} | S_0)$. Here o_{k+1} is conditionally independent from S_0 according to the d -separation rule. We get, $\hat{\alpha}_{k+1}(q, c) = \Pr(o_{1:k} | S_0, S_{k+1}) \Pr(S_{k+1} | S_0) \Pr(o_{k+1} | S_{k+1})$. If we apply first chain rule, then apply sum rule over on S_k , and then again apply chain rule, then the calculation becomes $\hat{\alpha}_{k+1}(q, c) = \sum_{S_k} \Pr(o_{1:k}, S_{k+1} | S_k, S_0) \Pr(S_k | S_0) \Pr(o_{k+1} | S_{k+1})$. According to the d -separation rule, S_{k+1} is independent from S_0 condition on S_k . Thus we got the proof if apply again chain rule $\hat{\alpha}_{k+1}(q, c) = \sum_{S_k} \Pr(o_{1:k}, S_k | S_0) \Pr(S_{k+1} | S_k) \Pr(o_{k+1} | S_{k+1})$. Here $\Pr(o_{1:k}, S_k | S_0)$ is previous calculation $\hat{\alpha}_k(q, c)$, $\Pr(S_{k+1} | S_k)$ is state transition and $\Pr(o_{k+1} | S_{k+1})$ is an observation transition. ■

Second Phase: Normalization of Forward Calculation

This second phase of the adapted algorithm is based on discarding the irrelevant path between initial and final terminals. Thus, this part calculates the joint probability distribution of the given observation sequence $o_{1:t}$ and being in hidden state S_t condition on initial terminal S_0 and final terminals $S_T \in Q_F$.

The formal definition of this phase is shown as follow (Equation 8):

$$\alpha_t(q, c) = \Pr(o_{1:t}, S_t | S_0, S_T \in Q_F) \quad (8)$$

The calculation of this phase starts at the end of the trellis diagram (i.e. designated final terminal with non-zero counter value) $S_T \in Q_F$ as shown in Figure 5.

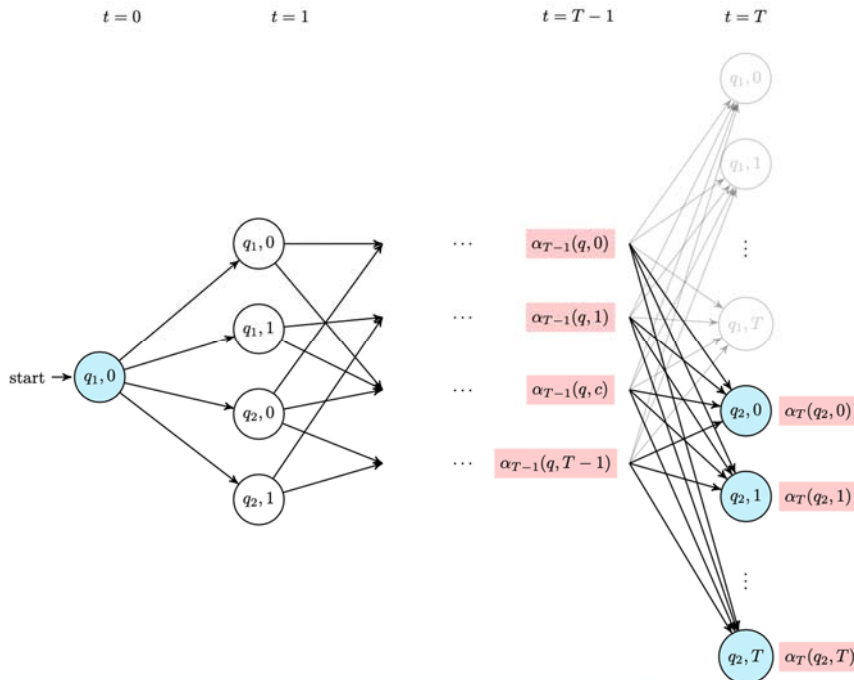


Figure 5. Trellis diagram of normalization phase of the Forward flow

As mentioned above, this model has a unique final terminal but the counter value can be non-zero depending on the length of the given observation sequence. Consequently, a run is terminated in the corresponding final terminal with non-zero counter value which is ranging from $0 \leq c \leq T$, where T denotes the length of the output sequence. The computation of this phase starts at time $t=T$. It is called Base step (Equation 9):

$$\alpha_T(q, c) = \frac{\hat{\alpha}_T(q, c)}{\sum_{c'=0}^T \Pr(S_T = (q, c') | S_0)} \quad (9)$$

where $q = q_F$ and c is non-zero counter value: $0 \leq c \leq T$. The computation continues to the first terminal at the recursion step (i.e. $t < T$), taking into account whether the counter value is zero or non-zero due to enable the transition matrices:

- if $c=0$:

$$\alpha_t(q, c) = \sum_{q' \in Q} \sum_{\Delta=0}^1 \frac{\alpha_{t+1}(q', c+\Delta) A^0(q, \Delta, q') \hat{\alpha}_t(q, c)}{\hat{\alpha}_{t+1}(q', c+\Delta)} \quad (10)$$

- if $c>0$:

$$\alpha_t(q, c) = \sum_{q' \in Q} \sum_{\Delta=-1}^1 \frac{\alpha_{t+1}(q', c+\Delta) A^+(q, \Delta, q') \hat{\alpha}_t(q, c)}{\hat{\alpha}_{t+1}(q', c+\Delta)}$$

Theorem-2: $\alpha_t(q, c)$ calculates the joint probability of $\Pr(o_{1:t}, S_t | S_0, S_T \in Q_F)$.

Proof-2: At the base step $t=T$: $\alpha_T(q, c) = \Pr(o_{1:T}, S_T = (q, c) | S_0, S_T \in Q_F)$. If we apply production rule then we get $\alpha_T(q, c) = \frac{\Pr(o_{1:T}, S_T=(q,c), S_T \in Q_F | S_0)}{\Pr(S_T \in Q_F | S_0)}$. Here, if the hidden state q is the final state and the counter value is $0 \leq c \leq T$, then $\alpha_T(q, c) = \frac{\Pr(o_{1:T}, S_T=(q,c) | S_0)}{\Pr(S_T \in Q_F | S_0)}$. The nominator of this fraction equals to preliminary calculation of forward flow at time $t=T$, and the denominator equals the sum of the probability of whole paths from initial state to final states. Thus, we get $\alpha_T(q, c) = \frac{\hat{\alpha}_T(q, c)}{\sum_{c'=0}^T \Pr(S_T=(q, c') | S_0)}$. At the recursion part, we again assume that the calculation is true for $t=k$ where $\alpha_k(q, c) = \frac{\Pr(o_{1:k+1}, S_{k+1} | S_0, S_T \in Q_F) \Pr(S_{k+1} | S_k) \Pr(o_{1:k}, S_k | S_0)}{\Pr(o_{1:k+1}, S_{k+1} | S_0)}$ and we would like to proof the calculation is also correct for $t=k-1$ and equals to $\alpha_{k-1}(q, c) = \Pr(o_{1:k-1}, S_{k-1} | S_0, S_T \in Q_F)$. We apply two production rules separately. First we apply to $\Pr(o_{1:k}, S_k | S_0, S_T \in Q_F)$ and get $\frac{\Pr(o_{1:k}, S_k, S_0, S_T \in Q_F)}{\Pr(S_0, S_T \in Q_F)}$, then the second production rule is applied to $\Pr(o_{1:k}, S_k, S_0, S_T \in Q_F)$ as $\Pr(o_{1:k}, S_0, S_T \in Q_F | S_k) \Pr(S_k)$. According to the *d-separation* rule o_k is independent from S_0 and S_T depending on S_k . Thus we get $\Pr(o_{1:k-1}, S_0, S_T \in Q_F | S_k) \Pr(o_k | S_k)$. If we apply chain rule to $\Pr(o_{1:k-1}, S_{k-1} | S_0)$ then we get $\Pr(o_{1:k-1} | S_0, S_{k-1}) \Pr(S_{k-1} | S_0)$. We can merge $\Pr(S_k | S_{k-1})$ with $\Pr(o_{1:k-1} | S_0, S_{k-1})$ according to the *d-separation* rule. We get here $\Pr(o_{1:k-1}, S_k | S_0, S_{k-1})$. We can again merge $\Pr(S_{k-1} | S_0)$ with $\Pr(o_{1:k-1}, S_k | S_0, S_{k-1})$ and we get $\Pr(o_{1:k-1}, S_k, S_{k-1} | S_0)$. If we apply chain rule to denominator item $\Pr(o_{1:k}, S_k | S_0)$ then we get $\Pr(o_{1:k} | S_0, S_k) \Pr(S_k | S_0)$. According to *d-separation* rule o_k is independent from S_0 depending on S_k . Then we get $\Pr(o_{1:k-1} | S_0, S_k) \Pr(o_k | S_k)$. We can eliminate each $\Pr(o_k | S_k)$ from both numerator and denominator. In $\Pr(o_{1:k-1}, S_0, S_T \in Q_F | S_k)$, $S_T \in Q_F$ is independent from both $o_{1:k-1}$ and S_0 depending on S_k according to the *d-separation* rule. We can get $\Pr(o_{1:k-1}, S_0 | S_k) \Pr(S_T \in Q_F | S_k)$. We can merge both $\Pr(S_k)$ and $\Pr(o_{1:k-1}, S_0 | S_k)$ in the numerator section. Then we get $\Pr(o_{1:k-1}, S_0, S_k)$. If we apply product rule to $\Pr(o_{1:k-1} | S_0, S_k)$ and $\Pr(S_k | S_0)$ then we get $\Pr(o_{1:k-1}, S_k | S_0)$. After that we can apply again chain rule to $\Pr(o_{1:k-1}, S_0, S_k)$ as $\Pr(o_{1:k-1}, S_k | S_0) \Pr(S_0)$. Now, we can eliminate $\Pr(o_{1:k-1}, S_k | S_0)$ from both numerator and denominator. We can apply production rule to merge $\Pr(o_{1:k-1}, S_k, S_{k-1} | S_0)$ and $\Pr(S_0)$ in the numerator, then we get $\Pr(o_{1:k-1}, S_k, S_{k-1}, S_0)$. If we apply chain rule depending on S_k , we get $\Pr(o_{1:k-1}, S_{k-1}, S_0 | S_k) \Pr(S_k)$. According to the *d-separation* rule, $\Pr(S_T \in Q_F | S_k)$ can be merged with $\Pr(o_{1:k-1}, S_{k-1}, S_0 | S_k)$ depending on S_k . Thus, we can get $\Pr(o_{1:k-1}, S_{k-1}, S_0, S_T \in Q_F | S_k)$. After that, we can merge $\Pr(S_k)$ with it, then we get $\Pr(o_{1:k-1}, S_{k-1}, S_0, S_T \in Q_F, S_k)$. In here, actually we have $\sum_{S_k} \frac{\Pr(o_{1:k-1}, S_{k-1}, S_0, S_T \in Q_F, S_k)}{\Pr(S_0, S_T \in Q_F)}$. If we look at this fraction carefully, it is actually equals to $\sum_{S_k} \Pr(o_{1:k-1}, S_{k-1}, S_k | S_0, S_T \in Q_F)$. In here we can remove sum rule production over S_k variable, then we have $\Pr(o_{1:k-1}, S_{k-1}, S_k | S_0, S_T \in Q_F)$ where it is equivalent to $\alpha_{k-1}(q, c)$. ■

3.2. The Adaptation of Backward Algorithm

This suggested model might be implemented using the second modified dynamic programming method backward algorithm, which consists of two primary computing phases again: preliminary backward calculation and normalisation of backward flow. The probability of the future observation sequence $o_{t+1:T}$ condition hidden variable S_t is being computed in this calculation.

First Phase: Preliminary Backward Calculation

In this phase, the calculation begins from the final terminal. Therefore, if we consider the length of a given observation sequence as T , and since this computation also calculates the probability of future observation sequences, the calculation starts from the final terminal would be appropriate.

In the proposed model, since the counter value at the final terminal will be non-zero. Thus, the counter value of the final terminal in the range $0 \leq c \leq T$ might be considered. Therefore, the computation will take into account all counter values, as illustrated in Figure 6.

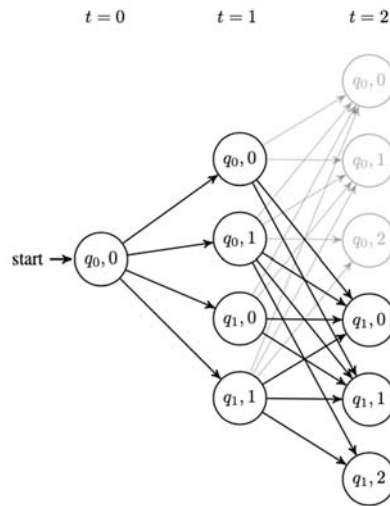


Figure 6. Trellis diagram of preliminary calculation of adapted Backward algorithm

This calculation is denoted as $\hat{\beta}_t(q, c)$. It starts from the final terminal towards the initial terminal. At time $t=T$, the preliminary Backward calculation value of the final terminal, considering all designated counter values, is set to one. This knowledge is obtained from the initiation of the calculation at the final terminal, whose location is also known. It differs from Forward flow normalisation in that there is no additional symbol probability added to the computation.

The calculation can be shown formally as follow (Equation 11):

$$\hat{\beta}_t(q, c) = Pr(S_T \in Q_F | S_t = (q, c), S_0)$$

At Base Step ($t=T$):

$$\hat{\beta}_t(q, c) = 1 \text{ If } q = q_F \text{ and } c: 0 \leq c \leq T \tag{11}$$

At Recursion Step ($t < T$):

- If $c = 0$:

$$\hat{\beta}_t(q, c) = \sum_{q' \in Q} \sum_{\Delta=0}^1 \hat{\beta}_{t+1}(q', c + \Delta) A^0(q, \Delta, q') \tag{12}$$

- If $c > 0$:

$$\hat{\beta}_t(q, c) = \sum_{q' \in Q} \sum_{\Delta=-1}^1 \hat{\beta}_{t+1}(q', c + \Delta) A^+(q, \Delta, q')$$

Theorem-3: $\hat{\beta}_t(q, c)$ computes the probability of $Pr(S_T \in Q_F | S_t = (q, c), S_0)$ correctly.

Proof-3: We can start with the base step of the calculation. For $t=T$, the calculation becomes as $\hat{\beta}_T(q, c) = Pr(S_T \in Q_F | S_T = (q, c), S_0)$. Here, $S_T \in Q_F$ is conditionally independent from initial terminal S_0 . Thus, we get $Pr(S_T \in Q_F | S_T = (q, c))$. Here, if the hidden variable $q = q_F$ and the counter value $0 \leq c \leq T$ then $Pr(S_T \in Q_F | S_T \in Q_F)$. Thus the probability equals 1. At the recursion part (i.e. $0 < t < T$), we assume that the calculation is correct for $t=k$, and now we need to prove that the same equation also provides the correct calculation for $t=k-1$. We can start the proof of this part by adding sum rule over hidden state S_k as $\sum_{S_k} Pr(S_T \in Q_F, S_k | S_{k-1}, S_0)$. Then we can apply chain rule as $\sum_{S_k} Pr(S_T \in Q_F | S_{k-1}, S_k, S_0) Pr(S_k | S_{k-1}, S_0)$. The first order of the Markov assumption: the future state only depends on the current state. Thus, $Pr(S_k | S_{k-1}, S_0)$ becomes to $Pr(S_k | S_{k-1})$. According to the d -separation rule, any $S_T \in Q_F$ is conditionally independent from S_{k-1} condition on S_k and we get $\sum_{S_k} Pr(S_T \in Q_F | S_k, S_0) Pr(S_k | S_{k-1})$. Here, $Pr(S_T \in Q_F | S_k, S_0)$ is $\hat{\beta}_k(q, c)$ and $Pr(S_k | S_{k-1})$ is state transition probability distribution which depends on whether the counter value is zero or non-zero. If counter equals to zero then A^0 is enabled and $\Delta = \{0, 1\}$. If counter is non-zero then A^+ is enabled and $\Delta = \{-1, 0, 1\}$. ■

Second Phase: Normalization of Backward Calculation

In this computation phase, the probability value of the future observation sequence is calculated both with respect to the current hidden variable and conditionally with respect to the terminals (i.e., initial and final) as shown in Figure 7. It is shown formally as (Equation 13)

$$\beta_t(q, c) = Pr(o_{t+1:T} | S_t = (q, c), S_T \in Q_F, S_0) \tag{13}$$

In the recursion part of the above formulae is used as follows:

$$\beta_t(q, c) = \sum_{S_{t+1}} Pr(o_{t+2:T} | S_{t+1}, S_T \in Q_F, S_0) Pr(S_{t+1} | S_t) Pr(o_{t+1} | S_{t+1}) \frac{Pr(S_T \in Q_F | S_{t+1}, S_0)}{Pr(S_T \in Q_F | S_t, S_0)} \tag{14}$$

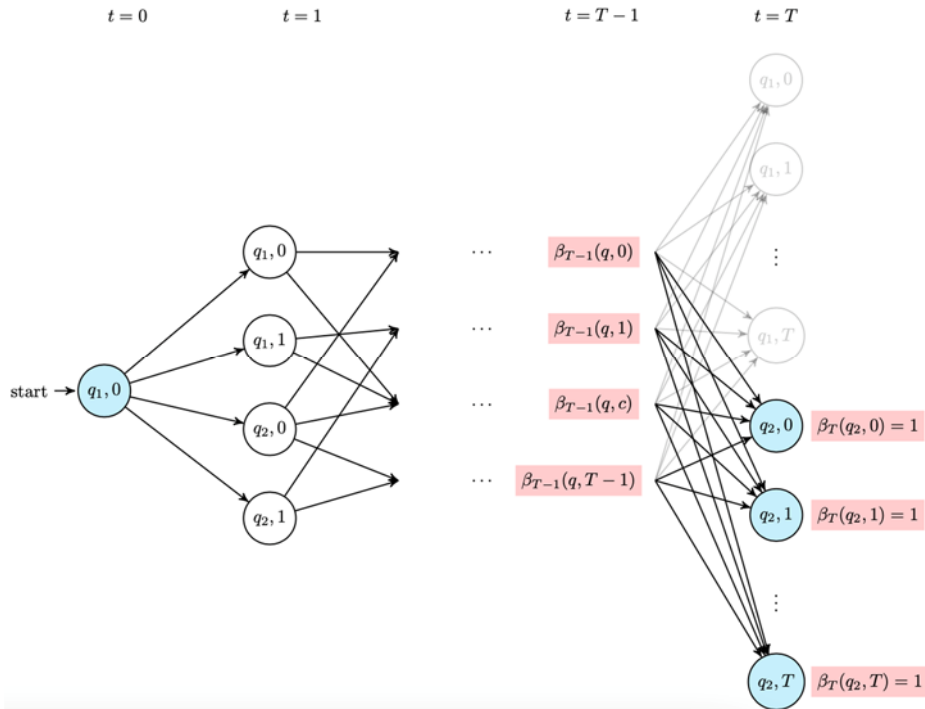


Figure 7. The calculation of Backward normalization

The normalization part of Backward flow also initiates at the end of the time scale of $t=T$ as preliminary Backward flow does.

At Base Step ($t=T$):

$$\beta_t(q, c) = 1 \text{ If } q = q_F \text{ and } c: 0 \leq c \leq T.$$

At Recursion Step ($t < T$):

- If $c = 0$:

$$\beta_t(q, c) = \sum_{q' \in Q} \sum_{\Delta=0}^1 \frac{\beta_{t+1}(q', \Delta) A^{\circ}(q, \Delta, q') B(q', o_{t+1}) \beta_{t+1}^{\wedge}(q', \Delta)}{\hat{\beta}_t(q, c)} \quad (15)$$

- If $c > 0$:

$$\beta_t(q, c) = \sum_{q' \in Q} \sum_{\Delta=-1}^1 \frac{\beta_{t+1}(q', c+\Delta) A^{\wedge}(q, \Delta, q') B(q', o_{t+1}) \beta_{t+1}^{\wedge}(q', c+\Delta)}{\hat{\beta}_t(q, c)}$$

Theorem-4: $\beta_t(q, c)$ calculates the joint probability of the future observation sequence $Pr(o_{t+1:T} | S_t = (q, c), S_T \in Q_F, S_0)$ correctly.

Proof-4: First at $t=T$ the calculation becomes $\beta_T(q, c) = Pr(o_{T+1:T} | S_T = (q, c), S_T \in Q_F, S_0)$. Here, $o_{T+1:T}$ is trivial and $S_T = (q, c)$ is one if the hidden variable is final terminal otherwise, it is zero. Let assume that the calculation is correct at $t=k$ and we need to proof that it is also correct for $t=k-1$. If we put to time value to Equation 9 and applying the product rule to $Pr(o_{k+1:T} | S_k, S_T \in Q_F, S_0)$ then we get $\frac{Pr(o_{k+1:T}, S_k, S_T \in Q_F, S_0)}{Pr(S_k, S_T \in Q_F, S_0)}$. Again applying second time production rule to $Pr(o_{k+1:T}, S_k, S_T \in Q_F, S_0)$ and we get $Pr(o_{k+1:T}, S_T \in Q_F, S_0 | S_k) Pr(S_k)$. We can merge these two arguments depending on S_k : $Pr(o_{k+1:T}, S_T \in Q_F, S_0 | S_k)$ and $Pr(o_k | S_k)$ then we get $Pr(o_{k:T}, S_T \in Q_F, S_0 | S_k)$. If we merge $Pr(S_k)$ with it then it becomes $Pr(o_{k:T}, S_T \in Q_F, S_0, S_k)$. If we apply product rule to $Pr(S_T \in Q_F | S_k, S_0)$ then it becomes $\frac{Pr(S_T \in Q_F, S_k, S_0)}{Pr(S_k, S_0)}$. We can eliminate $Pr(S_T \in Q_F, S_k, S_0)$ argument from both numerator and denominator. Again we can apply chain rule to $Pr(o_{k:T}, S_T \in Q_F, S_0, S_k)$ then it becomes $Pr(o_{k:T}, S_T \in Q_F | S_0, S_k) Pr(S_0, S_k)$. We can again eliminate the same argument $Pr(S_0, S_k)$ from both numerator and denominator. If we use chain rule for the argument of denominator $Pr(S_T \in Q_F | S_0, S_{k-1})$ then we get $\frac{Pr(S_0, S_{k-1})}{Pr(S_T \in Q_F, S_0, S_{k-1})}$. Here, if we can apply chain rule to $Pr(S_0, S_{k-1})$ as $Pr(S_0 | S_{k-1}) Pr(S_{k-1})$. The following arguments $Pr(S_0 | S_{k-1})$ and $Pr(S_k | S_{k-1})$ can be merged according to *d-separation* rule conditionally S_{k-1} . Thus, we can get $Pr(S_0, S_k | S_{k-1})$. Now we can convert the conditional distribution to joint distribution by merging $Pr(S_0, S_k | S_{k-1})$ and $Pr(S_{k-1})$. Then we get $Pr(S_0, S_k, S_{k-1})$. If we again apply the chain rule this last argument as $Pr(S_{k-1} | S_0, S_k) Pr(S_0, S_k)$ and then we can merge $Pr(S_{k-1} | S_0, S_k)$ with $Pr(o_{k:T}, S_T \in Q_F | S_0, S_k)$ depending on the same conditional states. Then we can get $Pr(o_{k:T}, S_{k-1}, S_T \in Q_F | S_0, S_k)$. After this, we can merge again $Pr(o_{k:T}, S_{k-1}, S_T \in Q_F | S_0, S_k)$ with $Pr(S_0, S_k)$ to handle the joint probability as $Pr(o_{k:T}, S_{k-1}, S_T \in Q_F, S_0, S_k)$. Now we can again use chain rule to get rid of the denominator part $Pr(S_T \in Q_F, S_0, S_{k-1})$. Here we get the numerator arguments as $Pr(o_{k:T}, S_k | S_{k-1}, S_T \in Q_F, S_0) Pr(S_{k-1}, S_T \in Q_F, S_0)$ after applying chain rule. Now we can eliminate the same argument, $Pr(S_{k-1}, S_T \in Q_F, S_0)$, from both numerator and denominator. Here, we have $\sum_{S_k} Pr(o_{k:T}, S_k | S_{k-1}, S_T \in Q_F, S_0)$ and we can remove the sum rule then we will get $Pr(o_{k:T}, S_k | S_{k-1}, S_T \in Q_F, S_0)$ which is equal to $\beta_{k-1}(q, c)$ calculation at time $t=k-1$. ■

3.3. The Adaptation of Baum-Welch Algorithm

The original form of the Baum-Welch algorithm, which is a special case of the EM algorithm, is used to update the model's parameters in HMMs. The parameters are made to converge to their respective values by applying a certain number of iterations. In our proposed model, we will use the adapted version that takes counter values into account to update the parameters.

The algorithm consists of two steps as its original version has. The first step, called the E-step, involves two distinct calculations: the probabilities of being in hidden states and the transition probabilities between hidden states. The second step, known as the M-step, involves updating the parameters.

E-step

In this step, the two different calculations used are denoted as $\gamma_t(q, c)$ and $\xi_t((q', c'), (q, c))$, respectively. The $\gamma_t(q, c)$ calculation provides the probabilities of being in the current hidden states for a given observation sequence. Formally (Equation 16),

$$\gamma_t(q, c) = \Pr(S_t = (q, c) | O, S_0, S_T \in Q_F) \quad (16)$$

here O is the given observation sequence. The consideration of the non-zero counter value of the final terminal is proceed in this model, then there need to be sum over the counter value at time $t=T$. Thus, the formula is represented as follow (Equation 17):

$$\gamma_t(q, c) = \frac{\hat{\alpha}_t(q, c)\beta_t(q, c)\hat{\beta}_t(q, c)}{\sum_{c'=0}^T \hat{\alpha}_T(q_F, c')} \quad (17)$$

Theorem-5: $\gamma_t(q, c)$ calculates correctly the marginal posterior distribution of S_t where $\Pr(S_t = (q, c) | O, S_0, S_T \in Q_F)$.

Proof-5: The proof can start by applying the production rule to Equation 10. We can get $\frac{\Pr(S_t, O, S_T \in Q_F | S_0)}{\Pr(O, S_T \in Q_F | S_0)}$.

The observation sequence can be expended into two separated parts as $o_{1:t}$ and $o_{t+1:T}$. We can apply this separated parts into numerator as arguments: $\Pr(S_t, o_{1:t}, o_{t+1:T}, S_T \in Q_F | S_0)$. After this adding if we apply production rule again, we get $\Pr(o_{1:t}, o_{t+1:T}, S_T \in Q_F | S_0, S_t)Pr(S_t | S_0)$. According to d -separation rule, $o_{1:t}$ is conditionally independent from both $o_{t+1:T}$ and $S_T \in Q_F$ condition on S_t . Thus, we have $\Pr(o_{1:t} | S_0, S_t)Pr(o_{t+1:T}, S_T \in Q_F | S_0, S_t)Pr(S_t | S_0)$. If we apply chain rule to $\Pr(o_{t+1:T}, S_T \in Q_F | S_0, S_t)$, then it becomes $\Pr(o_{t+1:T} | S_0, S_t, S_T \in Q_F)Pr(S_T \in Q_F | S_0, S_t)$. We can merge $\Pr(o_{1:t} | S_0, S_t)$ and $\Pr(S_t | S_0)$ depending on initial terminal S_0 , then we get $\Pr(o_{1:t}, S_t | S_0)$. At last, here, $\Pr(o_{1:t}, S_t | S_0)$ is equivalent calculation of preliminary Forward algorithm $\hat{\alpha}_t(S_t)$ (i.e. equation 4), $\Pr(o_{t+1:T} | S_0, S_t, S_T \in Q_F)$ is equivalently equal to the normalization of Backward algorithm $\beta_t(S_t)$ (i.e. equation 8), and $Pr(S_T \in Q_F | S_0, S_t)$ is equivalent to preliminary Backward flow $\hat{\beta}_t(S_t)$ (i.e. equation 7). The denominator part of the proof (i.e. $Pr(O, S_T \in Q_F | S_0)$) is a preliminary Forward flow by summing over all the counter values of the final terminal. ■

The $\xi_t((q', c'), (q, c))$ calculation, on the other hand, computes the transition probabilities between hidden states for the given observation sequence. Formally (Equation 18),

$$\xi_t((q', c'), (q, c)) = \Pr(S_{t-1}, S_t | O, S_0, S_T \in Q_F) \quad (18)$$

here O is the given observation sequence, $S_{t-1} = (q', c')$ previous hidden state and counter pair, $S_t = (q, c)$ current hidden state and counter pair. The multiple counter values of the final terminal is also considered in this calculation. Therefore, the formula becomes as follow (Equation 19) :

$$\xi_t((q', c'), (q, c)) = \frac{\hat{\alpha}_t(q', c')A^{\delta(c')}(q', \Delta, q)B(q, o)\hat{\beta}_t(q, c)\beta_t(q, c)}{\sum_{c'=0}^T \hat{\alpha}_T(q_F, c')} \quad (19)$$

Here, $\delta(c')=0$ if $c'=0$ and $\delta(c')=+$ if $c'>0$. Also, $\Delta=\{0,1\}$ if $c'=0$ and $\Delta=\{-1,0,1\}$ if $c'>0$.

Theorem-6: $\xi_t((q', c'), (q, c))$ correctly calculates the joint posterior distribution of two hidden states $S_{t-1} = (q', c')$ and $S_t = (q, c)$ where $\Pr(S_{t-1}, S_t | O, S_0, S_T \in Q_F)$.

Proof-6: The proof can start by applying the production rule to equation 12. We can get $\frac{\Pr(S_{t-1}, S_t, O, S_T \in Q_F | S_0)}{\Pr(O, S_T \in Q_F | S_0)}$.

We can expand the given observation sequence as we already did in proof-5 as $o_{1:t}$ and $o_{t+1:T}$. The numerator part becomes $\Pr(S_{t-1}, S_t, o_{1:t}, o_{t+1:T}, S_T \in Q_F | S_0)$. After that we can apply chain rule as $\Pr(o_{1:t}, o_{t+1:T}, S_T \in Q_F | S_0, S_{t-1}, S_t)Pr(S_{t-1}, S_t | S_0)$. According to the d -separation rule, o_t is conditionally independent from $o_{1:t-1}$, $o_{t+1:T}$, $S_T \in Q_F$, S_{t-1} , and S_0 condition on S_t . Thus, we have

$\Pr(o_{1:t-1}, o_{t+1:T}, S_T \in Q_F | S_0, S_{t-1}, S_t) \Pr(S_{t-1}, S_t | S_0) \Pr(o_t | S_t)$. According to the *d-separation* rule, the previous observation sequence part $o_{1:t-1}$ is conditionally independent from $o_{t+1:T}, S_T \in Q_F$, and S_t condition on S_{t-1} . Thus, we have $\Pr(o_{1:t-1} | S_{t-1}, S_0) \Pr(o_{t+1:T}, S_T \in Q_F | S_0, S_{t-1}, S_t) \Pr(S_{t-1}, S_t | S_0) \Pr(o_t | S_t)$. Here, S_{t-1} is irrelevant in $\Pr(o_{t+1:T}, S_T \in Q_F | S_0, S_{t-1}, S_t)$ due to the future observation sequence part and the set of final terminals are conditionally independent with it. Thus, we have $\Pr(o_{t+1:T}, S_T \in Q_F | S_0, S_t)$. Now, we can apply chain rule it and we get $\Pr(o_{t+1:T} | S_0, S_t, S_T \in Q_F) \Pr(S_T \in Q_F | S_0, S_t)$. We can apply chain rule to $\Pr(S_{t-1}, S_t | S_0)$ as $\Pr(S_t | S_0, S_{t-1}) \Pr(S_{t-1} | S_0)$. Then, we can merge $\Pr(o_{1:t-1} | S_{t-1}, S_0)$ and $\Pr(S_{t-1} | S_0)$ to handle $\Pr(o_{1:t-1}, S_{t-1} | S_0)$. According to Markov property S_0 is irrelevant in $\Pr(S_t | S_0, S_{t-1})$. We can remove it and this argument becomes $\Pr(S_t | S_{t-1})$. At the end of this proof, $\Pr(o_{1:t-1}, S_{t-1} | S_0)$ is preliminary Forward calculation at time $t-1$: $\hat{\alpha}_{t-1}(S_{t-1})$, $\Pr(o_{t+1:T} | S_0, S_t, S_T \in Q_F)$ is normalization of Backward flow at time t : $\beta_t(S_t)$, $\Pr(S_T \in Q_F | S_0, S_t)$ is preliminary Backward calculation at time t : $\hat{\beta}_t(S_t)$, $\Pr(S_t | S_{t-1})$ is the probability of state transition $A^{\delta(c')}(S_{t-1}, \Delta, S_t)$ where $\delta(c')=0$ if $c'=0$ and $\delta(c')=+$ if $c'>0$. Also, $\Delta=\{0,1\}$ if $c'=0$ and $\Delta=\{-1,0,1\}$ if $c'>0$. The last argument $\Pr(o_t | S_t)$ is symbol emitting probability where is equivalent to $B(S_t, o_t)$. The denominator part of the proof (i.e. $\Pr(O, S_T \in Q_F | S_0)$) is a preliminary Forward flow by summing over all the counter values of the final terminal. ■

M-step

In the M-step, the model's parameters (θ) are updated using the previous parameters (θ'). This process is similar to the approach in [5]. Multiple observation sequences are used to ensure convergence of the parameters when updating them. Here, D represents the observation sequence number. This calculation proceeds through the joint probability distribution over the hidden variables, counter values and the set of given observation sequences (Equation 20):

$$\Pr(S, C, O | \theta) = \prod_{d=1}^D \prod_{t=1}^T B(S_t^{(d)}, o_t^{(d)}) A^{\delta(c_t^{(d)})}(S_t^{(d)}, C_{t+1}^{(d)} - C_t^{(d)}, S_{t+1}^{(d)}) \quad (20)$$

where $\delta(C_t^{(d)})=0$ if $C_t^{(d)}=0$ and $\delta(C_t^{(d)})=+$ if $C_t^{(d)}>0$. The Lagrange Multipliers is used in equation 14 to get the converged parameters of the model. The update formulas of the parameters are shown as follows, respectively:

$$\hat{B}(q, o) = \frac{\sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T \gamma_t^{(d)}(S_t^{(d)}) I(o_t^{(d)}=o)}{\sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T \gamma_t^{(d)}(S_t^{(d)})} \quad (21)$$

$$\hat{A}^0(q, \Delta, q') = \frac{\sum_{d=1}^D \sum_{\{t|C_t^{(d)}=0\}} \xi_t^{(d)}(S_t^{(d)}, S_{t+1}^{(d)})}{\sum_{d=1}^D \sum_{S_{t+1}^{(d)}} \sum_{\{t|C_t^{(d)}=0\}} \xi_t^{(d)}(S_t^{(d)}, S_{t+1}^{(d)})} \quad (22)$$

$$\hat{A}^+(q, \Delta, q') = \frac{\sum_{d=1}^D \sum_{\{t|C_t^{(d)}>0\}} \xi_t^{(d)}(S_t^{(d)}, S_{t+1}^{(d)})}{\sum_{d=1}^D \sum_{S_{t+1}^{(d)}} \sum_{\{t|C_t^{(d)}>0\}} \xi_t^{(d)}(S_t^{(d)}, S_{t+1}^{(d)})} \quad (23)$$

4. IMPLEMENTATION AND RESULTS

The proposed model is compared with the HMM. The original algorithms and adapted algorithms were implemented in Python. 10 different models were created in this work and they are illustrated as \mathcal{H} to represent all models. $\mathcal{H}_k = (Q_k, \Sigma_k, A_k^0, A_k^+, B_k, q_0, q_F)$ where $k=1, \dots, 10$. Here, A_k^0 , A_k^+ , and B_k are used as parameters in the models were generated randomly. q_0 and q_F were selected manually.

Subsequently, each model generated 30,000 observation sequences. Since each run is terminated at a final terminal with multiple counter values. Thus, we kept the length of each observation sequence fixed at 14. As mentioned in [5], to have a fair and quality comparison, the HMM must have an equal number of parameters (i.e., according to the Bayesian Information Criterion) as the proposed model has. Therefore, we set the number of states in the HMM to be 2.24 times the number of states in the proposed model. We used the technique which was applied in [5] during the training models. In the first step, 100 different

models were randomly used. Then, in each iteration, 25% of these models were discarded as measured by the probability value. This process continued until convergence, leaving only one model at the end. Thus, we prevent the local minima issue using this method.

Table 1. KL scores of the models after testing step

Model	$\mathcal{H}1$	$\mathcal{H}2$	$\mathcal{H}3$	$\mathcal{H}4$	$\mathcal{H}5$	$\mathcal{H}6$	$\mathcal{H}7$	$\mathcal{H}8$	$\mathcal{H}9$	$\mathcal{H}10$
Proposed Model	0.000693	0.001459	0.002913	0.003941	0.010453	0.009671	0.011952	0.016158	0.013957	0.010571
H1MM	0.01047	0.02183	0.03021	0.04023	0.12098	0.10879	0.12103	0.15941	0.14184	0.11210
HMM	3.4107	4.1067	4.5739	5.0137	4.7218	5.2167	5.7846	6.1146	6.0478	5.8362

In terms of time consumption, times used in the learning process can be shown as evidence that considering the counter value in models has higher time consumption compared to HMM.

In terms of the efficiency of the comparison, the learning durations for each of the three models were evaluated on the same task, taking into account the counter value. As shown in Table 2, for models that include a counter, the learning process was manually initialized by the user (as shown “---” in the table) after a certain threshold, due to the extended duration of learning beyond that point.

Table 2. The comparison of time consumption in learning phase

Model	$\mathcal{H}1$	$\mathcal{H}2$	$\mathcal{H}3$	$\mathcal{H}4$	$\mathcal{H}5$	$\mathcal{H}6$	$\mathcal{H}7$	$\mathcal{H}8$	$\mathcal{H}9$	$\mathcal{H}10$
Proposed Model	1h 5m	7h 17m	26h 51m	84h 48m	236h 57m	---	---	---	---	---
H1MM	58m	5h 43m	23h 7m	79h 21m	218h 36m	---	---	---	---	---
HMM	9m	28m	1h 5m	4h 11m	7h 3m	9h 47m	13h 17m	16h 28m	21h 3m	27h 23m

It should also be noted that since the counter value of the final terminal is non-zero, it can approach the length of the given observation sequence. This will lead to an increase in computational complexity (though it will still remain quadratic). We set a boundary to prevent this issue: the feasible maximum counter values will be equal to or less than half the length of the given observation sequence.

The adapted Baum-Welch algorithm used as the learning algorithm consists of multiple iterations. When we consider the length of the observation sequence as T , the feasible counter M value will approach T since we determine the counter value of the final terminal to be non-zero. In the proposed model, as noted in Section 2, we can constrain this approach using a threshold. In light of this information, considering an observation sequence of length T and $n = |Q|$ states with n state transitions, the computational complexity of the proposed model will be $O(n^2TM)$ where the counter value can exceed half of the length of the given observation sequence.

In the testing phase, the Kullback-Leibler (KL) divergence was used as the metric to compare the performance values of the trained models (Equation 24).

$$KL(P||Q) = P(x) \log \frac{P(x)}{Q(x)} \tag{24}$$

Here, the trained models calculate the probability values $Q(x)$ of the observation sequences (i.e. for each x) of the test set. Then, these values are compared logarithmically with the original probability values $P(x)$ to generate a score. If this score is close to zero, it indicates that the trained model is closely similar to the original model.

As shown in Table-1, the KL-scores of the 10 different models indicate that the proposed model is quite similar to the original model, while the HMM is significantly distant from the original model. The trade-off in our model comparison is time consumption. However, we are confident that our model is still faster

than PCFG. Additionally, the fact that it is more complex than HMM. Thus, it addresses the research question of this study.

5. CONCLUSIONS

In this study, we propose a new model with a final terminal counter value that is non-zero, similar to a hidden one-counter automaton, which reduces the computational cost of the learning algorithm for probabilistic one-counter languages—a subclass of stochastic context-free languages—from cubic to quadratic. The presence of a final terminal with a non-zero counter value enables the creation of alternative final terminals. This not only renders the existing model more complex but also allows for the evaluation of non-zero counter values with a higher likelihood through various alternative paths leading to the final terminal. The learning and testing algorithms of the model have been adapted from the forward, backward, Baum-Welch, and Viterbi algorithms used in hidden Markov models. This adaptation allows us to benefit from the quadratic computational complexity of these algorithms. Although the proposed model achieves better results in practical applications compared to hidden Markov models (HMMs), it has been observed that the time required for learning is longer than that of HMMs. Additionally, due to the final terminal having a non-zero counter value, the counter value can increase significantly depending on the length of the given observation sequence. To address this issue, a threshold has been implemented, thus maintaining the computational complexity at a quadratic level.

6. REFERENCES

1. Etessami, K., Wojtczak, D., Yannakakis, M., 2010. Quasi-birth-death processes, tree-like qbds, probabilistic 1-counter automata, and pushdown systems. *Perform. Eval.*, 67(9), 837-857.
2. Peng, L., Xie, P., Tang, Z., Liu, F., 2021. Modeling and analyzing transmission of infectious diseases using generalized stochastic petri nets. *Applied Sciences*, 11(18), 8400.
3. Ouaknine, J., Sousa-Pinto, J., Worrell, J., 2014. On termination of integer linear loops. *Proceedings of the Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, 957-969.
4. Ben-Amram, A.M., Genaim, S., 2013. On the linear ranking problem for integer linear-constraint loops. In *Proceedings of the 40th Annual ACM Symposium on Principles of programming languages*, Rome, Italy, 51-62.
5. Kurucan, M., Özbaltan, M., Schewe, S., Wojtczak, D., 2022. Hidden 1-counter Markov models and how to learn them. *International Joint Conferences on Artificial Intelligence Organization*, Wien Austria, 4857-4863.
6. Kurucan, M., 2020. Hidden probabilistic one-counter automata. PhD Thesis, University of Liverpool, 157.
7. Valiant, L.G., Paterson, M.S., 1975. Deterministic one-counter automata. *Journal of Computer and System Sciences*, 10(3), 340-350.
8. Etessami, K., Wojtczak, D., Yannakakis, M., 2010. Quasi-birth-death processes, tree-like qbds, probabilistic 1-counter automata, and pushdown systems. *Perform. Eval.*, 67(9), 37-857.
9. Wojtczak, D., 2009. Recursive probabilistic models: efficient analysis and implementation. PhD Thesis, University of Edinburgh, UK, 201.
10. Dubsiaff, C., Baier, C., Berg, M., 2012. Model checking probabilistic systems against pushdown specifications. *Information Processing Letters*, 112(8-9), 320-328.
11. Brázdil, T., Esparza, J., Kiefer, S., Kucera, A., 2013. Analyzing probabilistic pushdown automata. *Formal Methods in System Design*. 43(2), 1-43.
12. Ford, B., 2003. Parsing expression grammars. *ACM SIGPLAN Notices*, 39(1), 1-12.
13. Tan, Z., 2009. Validating XML constraints using automata. *Proceedings of the 2009 8th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science, ICIS 2009*. 1205-1210.
14. Sakharov, A., Sakharov, T., 2018. The viterbi algorithm for subsets of stochastic context-free languages. *Information Processing Letters*, 135, 68-72.
15. Siddalingappa, R., Hanumanthappa, P., Reddy, M., 2018. Hidden Markov model for speech recognition system-A pilot study and a naive approach for speech-to-text model. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 77-90.
16. Fischer, A., Keller, A., Frinken, V., Bunke, H., 2012. Lexicon-free handwritten word spotting using character HMMs. *Pattern Recogn. Lett.*, 33(7), 934-942.

17. Xia, T., Chen, X., 2021. A weighted feature enhanced hidden Markov model for spam SMS filtering. *Neurocomputing*, 444, 48-58.
18. Lakin, S.M., Kuhnle, A., Alipanahi, B., 2019. Hierarchical hidden Markov models enable accurate and diverse detection of antimicrobial resistance sequences. *Commun Biol.*, 2, 294.
19. Giada, S., Ben, S., 2021. Toward efficient Bayesian approaches to inference in hierarchical hidden Markov models for inferring animal behavior. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 62373.



İzmit Körfezindeki Limanlarda Deprem Yakın Saha Etkilerinin Araştırılması

Aydın MERT^{1,a}

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Bölümü,

^aORCID: 0000-0003-0762-6658

Makale Bilgileri

Geliş : 16.10.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606105

Sorumlu Yazar

Aydın MERT

mertay@itu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Deprem yakın saha etkileri

Olasılıksal yakın saha etkileri

İzmit körfezi

Liman yapıları

Atıf şekli: MERT, A., (2024). İzmit Körfezindeki Limanlarda Deprem Yakın Saha Etkilerinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1015-1026.

ÖZ

Arz ve talep açısından bir kesişme noktası olan Kocaeli ili, körfeze inşa edilmiş onlarca limanı ile bir liman şehridir. Kocaeli aynı zamanda sismik olarak aktif bir bölgede yer almaktadır ve körfezi çevreleyen fayların körfezin iki yakasına inşa edilmiş liman tesislerine mesafesi yaklaşık 1-5 km arasında değişmektedir. Dolayısı ile körfezdeki liman tesislerinin deprem yakın saha etkileri altında kalması kaçınılmaz görünmektedir. Çalışmanın amacı, Kıyı ve Liman Yapıları Tasarımı için Esaslar (KLYTE) yönetmeliğinde yakın saha deprem yer hareketi etkilerinin dikkate alınmadığı göz önünde tutularak İzmit körfezindeki liman tesislerinin maruz kalabilecekleri deprem yakın saha etkilerinin araştırılması ve yaratabileceği yıkıcı etkilerin ortaya konmasıdır. Bu amaçla, Derince Vapur İskelesi için Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi (OSTA) yapılmış ve farklı deprem seviyeleri için Spektrumlar elde edilmiştir. Literatürde mevcut Deprem Yakın saha etkileri ile ilgili çalışmalar gözden geçirilmiş, Ortalama spektral ivmelerin fay yırılma yönelimine bağlı olarak değişimi ortaya konmuştur.

Investigation of the Effects of Near-Field Earthquakes on Marine Ports in the Gulf of Izmit

Article Info

Received : 16.10.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606105

Corresponding Author

Aydın MERT

mertay@itu.edu.tr

Keywords

Earthquake near-field effects

Probabilistic earthquake hazard assesment

İzmit gulf

Marine ports

How to cite: MERT, A., (2024). İzmit Körfezindeki Limanlarda Deprem Yakın Saha Etkilerinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1015-1026.

ABSTRACT

The province of Kocaeli, an intersection of supply and demand, is a port city with dozens of ports on the Gulf. Kocaeli is also located in a seismically active region and the distance from the faults surrounding the gulf to the port facilities built on both sides of the gulf varies between about 1-5 km. Therefore, it seems inevitable that the port facilities in the Gulf are exposed to the effects of near-field earthquakes. The aim of the study is to investigate the effects of near-field earthquakes to which the port facilities in the Gulf of Izmit may be exposed and to show the destructive effects that may occur considering that the effects of near-field earthquake ground motions are not considered in the Regulation on the Principles for the Design of Coastal and Port Structures (KLYTE 2020). To this end, a probabilistic seismic hazard analysis was carried out for the Derince Ferry Pier and spectra for different earthquake levels were determined. Existing studies on the effects of near-field earthquakes in the literature were reviewed and the change in average spectral accelerations as a function of rupture orientation was shown.

1. GİRİŞ

Limanlar, kara ve deniz taşımacılığı arasındaki bağlantı noktaları olarak Christiansen ve arkadaşları [1] belirttiği üzere Küresel Dünya ticaretinin yaklaşık %90'ının gerçekleştirildiği ulaşım sisteminin işlevselliğini ve sürdürülebilirliğini arttıran temel unsurlardır. Bunun yanında, buldukları bölgenin ekonomisi, sosyal ve çevresel koşulları bağlamında doğrudan etki yaratırlar. Bu anlamda, liman yapılarının kullanım amacına uygun ve doğru planlanmaları, tasarımlarının dalga, akıntı, rüzgâr gibi çevresel yüklerin yanı sıra eğer deprem bölgelerinde inşa edilecekler ise deprem yükleri dikkate alınarak gerçekleştirilmesi önemlidir. Aksi takdirde liman yapıları belirli limitlerin üstünde hasar görebilecek ve bu durum ise liman hizmetlerinin aksamasına, büyük onarım maliyetlerine hatta bölgenin sosyo-ekonomik anlamda zarar görmesine sebep olabilecektir.

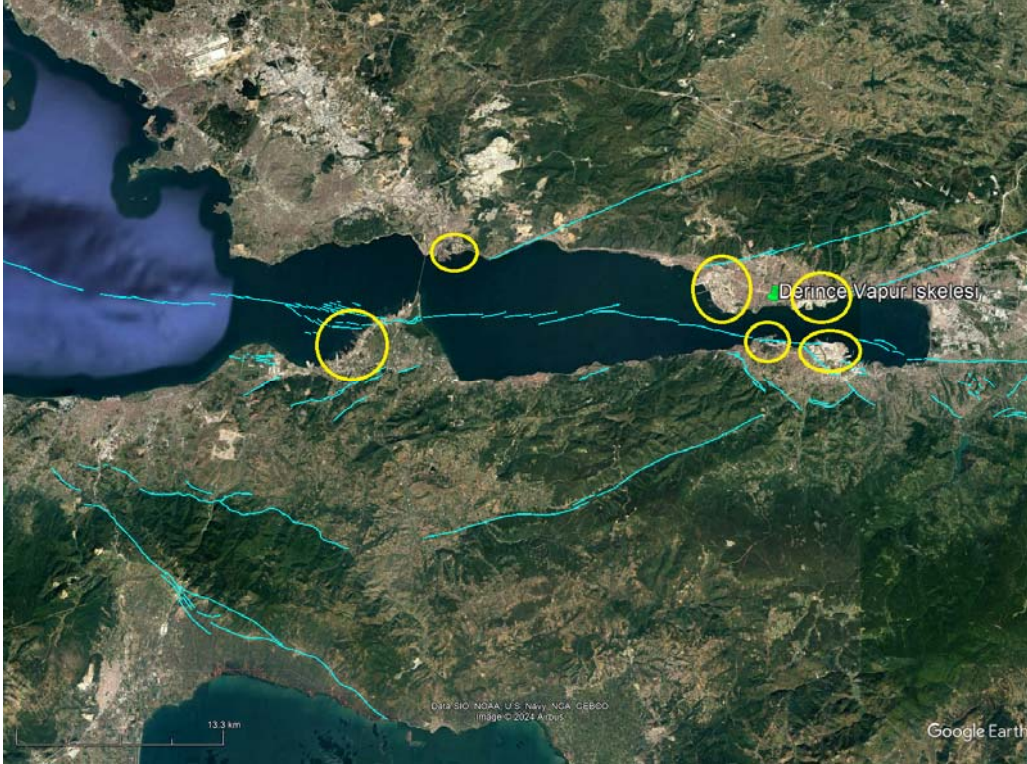
Son birkaç on yılda Türkiye de ve dünyanın farklı coğrafyalarında limanların bulunduğu bölgelerde meydana gelen yıkıcı depremler, aktif fayların yer aldığı bölgelerde inşa edilecek limanların tasarımında deprem etkilerinin dikkate alınmasının zorunluluğunu ortaya koymuştur. Loma Prieta (ABD, 1989), Hyogoken-Nanbu (Japonya, 1995), Gölcük (Türkiye, 1999), Tokachi-Oki (Japonya, 2003), Port-au-Prince (Haiti, 2010), Maule (Şili, 2010), Tohoku depremi (Japonya, 2011), Kaikoura (New Zealand, 2016), Maraş (Türkiye, 2023) gibi çok yıkıcı depremler yalnızca merkez üssü civarında değil, aynı zamanda deprem merkezinden oldukça uzak bölgelerde de zemin deformasyonlarına ve sıvılaşma gibi etkilere neden olarak ciddi hasarlara yol açmışlardır. Türkiye limanlarının çoğu, orta ila yüksek sismisite (deprensellik) ile karakterize edilen bölgelerde yer almaktadır. Sümer ve arkadaşları [2], 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin deniz yapıları üzerindeki etkilerini araştırdıkları çalışmada bölgede mevcut olan 24 kıyı liman yapısına ait hasarlara ilişkin incelemeler yapmışlar ve depremin kıyı yapılarında ne tür hasarlara sebep olduğunu ortaya koymuşlardır. 2023 Maraş depreminde fayın en güney ucunda yer alan ve bir liman şehri olan Hatay-İskenderun da limanlarda zemin göçmesi ve zemin sıvılaşmalarına bağlı kalıcı yer değiştirmeler sonucu hasarlar olduğu belirlenmiştir.

Türkiye’de kıyı yapıları tasarımı konusunda hazırlanmış ilk sismik tasarım yönetmeliği olan Kıyı ve Liman Yapıları Demiryolları, Hava Meydanları İnşaatlarına İlişkin Deprem Teknik Yönetmeliği 18.08.2007 tarihli resmî gazetede yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Daha sonra 2012 yılında Ulaştırma Bakanlığı, 2007 de Resmî Gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren sismik yönetmeliği güncelleme kararı aldı. Kıyı ve liman yapıları için uygulanacak Güncellenen yeni yönetmelik Deprem Etkisi Altında Kıyı ve Liman Yapıları Tasarımı için Esaslar (KLYTE) [3] ismi ile 06.10.2020 tarihli Resmî gazetede yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmelik kapsamında, tasarım spektrumu, maksimum yer ivmesi ve yatay deprem spektral ivme değerleri Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) [4] kapsamında hazırlanan ve www.deprem.gov.tr [5] adlı internet sitesinden erişilebilen Türkiye Deprem Tehlikesi Haritaları kullanılarak aşağıda tanımlanan deprem yer hareketi seviyeleri için elde edilmiştir.

Arz ve talep açısından bir kesişme noktası olan Kocaeli aynı zamanda sismik olarak aktif bir bölgede yer almaktadır. Geçmiş tarihi deprem kayıtları, İzmit ve çevresinde şiddeti depremlerin meydana geldiğini göstermektedir. İzmit Körfezinin, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından koordine edilen Türkiye Sismik Tehlike haritasının Güncellenmesi Projesi kapsamında kullanılan ve Maden Tetkik Arama (MTA) web sayfasında [6] sunulan Yenilenmiş Türkiye Diri Fay Haritasına, göre konumu Şekil 1 de verilmiştir. Buna göre İzmit Körfezini çevreleyen fayların körfezin iki yakasına inşa edilmiş liman tesisi ve iskelelere mesafesi yaklaşık 1-5 km arasında değişmektedir. İzmit körfezindeki liman tesisi ve iskelelerin deprem yakın saha etkileri altında kalması kaçınılmaz görünmektedir. Kocaeli liman başkanlığının verilerine göre körfez boyunca 34 farklı liman tesisi bulunmaktadır [7].

Bu çalışmanın temel amacı, KLYTE yönetmeliğinde yakın saha deprem yer hareketi etkilerinin dikkate alınmadığı göz önünde tutularak İzmit körfezindeki liman tesisi ve iskelelerin maruz kalabilecekleri deprem yakın saha etkilerinin araştırılması ve yaratabileceği yıkıcı etkilerin ortaya konmasıdır. Bu amaçla, Enlem/Boylamı K 40,748686o- D 29,808071o olan Kocaeli İli, Derince İlçesinde Derince Vapur İskelesi çalışma alanı olarak seçilmiştir. Derince Vapur İskelesi için Sahaya Özel Sismik Tehlike Analizleri yapılarak KLYTE yönetmeliğinde belirtilen dört farklı deprem yer hareketi düzeyi için Birleştirilmiş Tehlike Spektrumları (Uniform Hazard Spectrum) elde edilmiştir. Daha sonra, literatürde mevcut Deprem Yakın saha etkileri ile ilgili çalışmalar, Somerville ve arkadaşları [8] ve Abrahamson [9], göz önünde tutularak Ortalama spektral ivmelerin fay yırtılma yönelimine bağlı olarak değişimi dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar DD-1, DD-2, DD2a ve DD-3 deprem seviyeleri için,

yönlenme etkileri dikkate alınarak hesaplanan, fay normal, fay paralel ve ortalama spektrumlar ile Geometrik Ortalama ve Maksimum döndürülmüş spektrumlar karşılaştırılarak sunulmuştur.



Şekil 1. İzmit Körfezinin Yenilenmiş Türkiye Diri Fay Haritasına [6] göre konumu. Şekilde Mavi çizgiler diri fayları Sarı daireler ise Körfezdeki önemli liman tesislerinin yoğun olarak bulunduğu yerleşimleri göstermektedir

2. YÖNTEM

2.1. Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi (OSTA)

İhtimal teorisine bağlı sismik tehlikenin hesaplanmasına ilişkin genel yöntem ilk kez Cornell [10] tarafından önerilmiştir. Yöntem, iki ayrı temel modeli içerir: deprem kaynaklarını ve büyüklüklerinin mekansal ve zamansal dağılımını açıklayan deprem tekraralama modeli ve herhangi bir bölgede deprem büyüklüğüne, mesafeye, zemin koşullarına, fay tipine vs. bağlı olarak yer hareketi parametresinin değişimini tahmin eden yer hareketi tahmin modeli.

McGuire, [11] toplam olasılık yasasını kullanarak birim zamanda yer hareketi parametresi A 'nın a^* eşik değerini aşma olasılığını aşağıdaki şekilde ifade etmiştir (Eşitlik 1). Bu eşitlikte $f_m(m)$ ve $f_r(r|m)$ sırasıyla deprem tekraralama ve deprem büyüklüğüne bağlı mesafenin olasılık yoğunluk fonksiyonlarını, $G_{A|m,r}$ yer hareketi parametresinin deprem büyüklüğü ve mesafeye bağlı olasılık yoğunluk fonksiyonu, ve v_i inci sismik kaynağın aktivitesini göstermektedir. $P[A > a^* \text{ zaman } t]/t$ Sahaya etkiyen tüm sismik kaynaklardan gelen katkının toplanmasıyla hesaplanır.

$$P[A > a^* \text{ zaman } t]/t = \sum_i v_i \iint G_{A|m,r}(a^*) f_m(m) f_r(r|m) dm dr \quad (1)$$

2.2. Deprem Kataloğu

Deprem Kataloğunun oluşturulması amacı ile Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) [12] verileri kullanılmıştır. Bu amaçla, 01 Mayıs 1901 ile 31 Aralık 2022 tarihleri arasında meydana gelmiş depremlerin katalog bilgileri kullanılmıştır. Oluşturulan deprem kataloğunda tamlık (completeness) analizleri yapılmış, aynı depremlerin tekrar kullanılmaması ve depremlerin zaman bağımsızlığı gibi konular göz önünde tutulmuştur. Deprem kataloglarında aletsel dönem içinde kaydedilen

depremlerin kayıtları farklı zamanlarda farklı nedenlerle farklı büyüklük türlerinde kaydedilmiştir. Bu durum deprem kataloglarının homojenliğini bozarak, analizlerde hataya sebep olacağından katalogdaki depremler tek bir büyüklük çeşidine (M_w) göre kategorize edilmişlerdir. Bu amaçla UDAP-Ç-13-06 dokümanından [13] yararlanılmış ve bu dokümanda tanımlanmış olan ampirik eşitlikler kullanılmıştır. Aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak, katalog (M_w) magnitüd ölçeği cinsinden homojen hale getirilmiştir (Eşitlik 2-6).

$$M_w = 0,5716 (\pm 0,024927)M_s + 2,4980 (\pm 0,117197) \quad 3,4 \leq M_s \leq 5,4 \quad (2)$$

$$M_w = 0,8126 (\pm 0,034602)M_s + 1,1723 (\pm 0,208173) \quad M_s \geq 5,5 \quad (3)$$

$$M_w = 1,0319 (\pm 0,025)M_b + 0,0223 (\pm 0,117197) \quad 3,9 \leq M_b \leq 5,8 \quad (4)$$

$$M_w = 0,7947 (\pm 0,033)M_d + 1,3420 (\pm 0,163) \quad 3,5 \leq M_d \leq 5,0 \quad (5)$$

$$M_w = 0,7947 (\pm 0,031)M_l + 1,3003 (\pm 0,154) \quad 3,3 \leq M_d \leq 5,3 \quad (6)$$

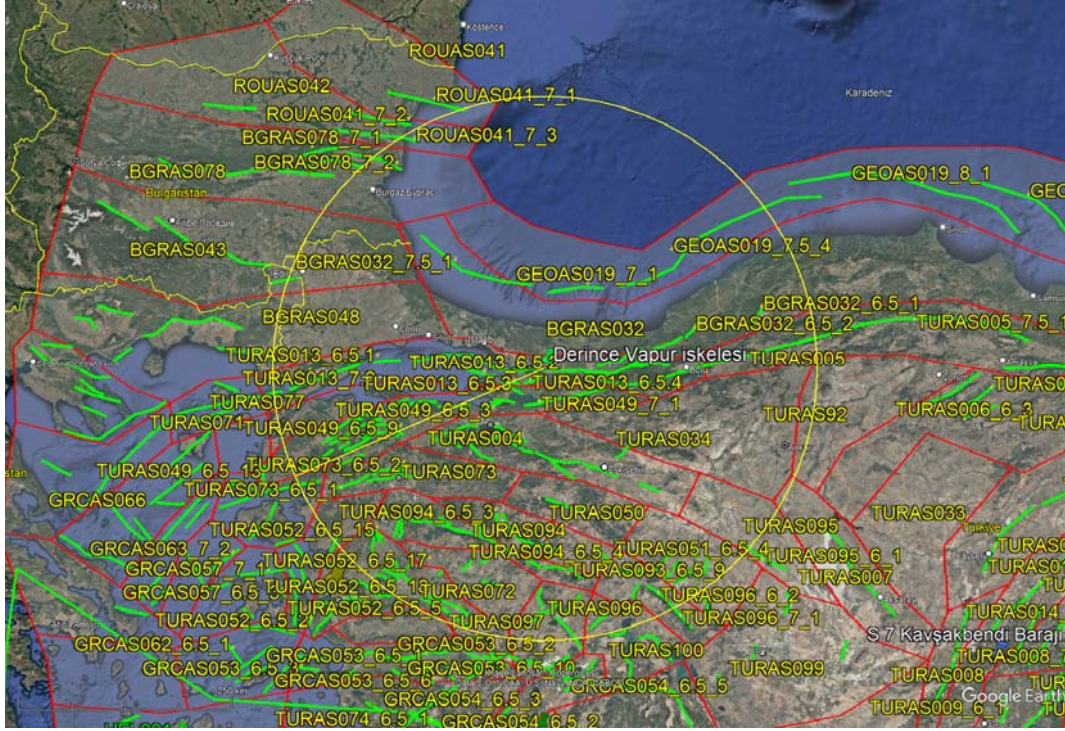
Yukarıda bahsedilen deprem oluşumlarının zamandan bağımsızlığının sağlanması amacıyla kataloglarda yer alan depremlerin öncü deprem ya da artçı deprem gibi diğer depremlerin tetiklemiş olabileceği depremlerden arındırılmış olması gerekir. Bu türden istatistiksel analizlere yeniden kümelendirme (declustering) denir ve bu amaçla geliştirilmiş farklı istatistiksel yöntemler vardır. Deprem katalogunun yeniden kümelendirme işleminde Gardner ve arkadaşları [14] tarafından geliştirilen metodoloji kullanılmıştır.

2.3. Sismik Kaynakların Tanımlanması

Çalışma kapsamında analizler, proje koordinatları merkez olmak üzere 300 km çapında bir çember dikkate alınarak yapılmıştır (Şekil 2). Hesaplamalarda olasılıksal deprem tehlike değerlendirmesi için iki farklı sismik kaynak modeli kullanılmıştır. Her iki model de esasen aynı verilere (tektonik veri ve depremsellik) dayanmasına rağmen modellemede farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Hesaplamalarda kullanılan birinci sismik kaynak modeli alan kaynak (area source) modelidir. Alan kaynak modellerinin, çalışmanın amaçları doğrultusunda oluşturulmasında, UDAP-Ç-13-06 dokümanından yararlanılmıştır. Ayrıca, kaynak zonlarının oluşturulmasında, aletsel dönemde bölgede oluşmuş lokal büyüklüğü 3,0 ve üstü depremler dikkate alınmıştır. Çalışmada kullanılan alan kaynakların geometrisi ve konumları Şekil 2’de alan kaynakların diğer özelliklerine ait bilgiler ise Çizelge 1’de verilmiştir.

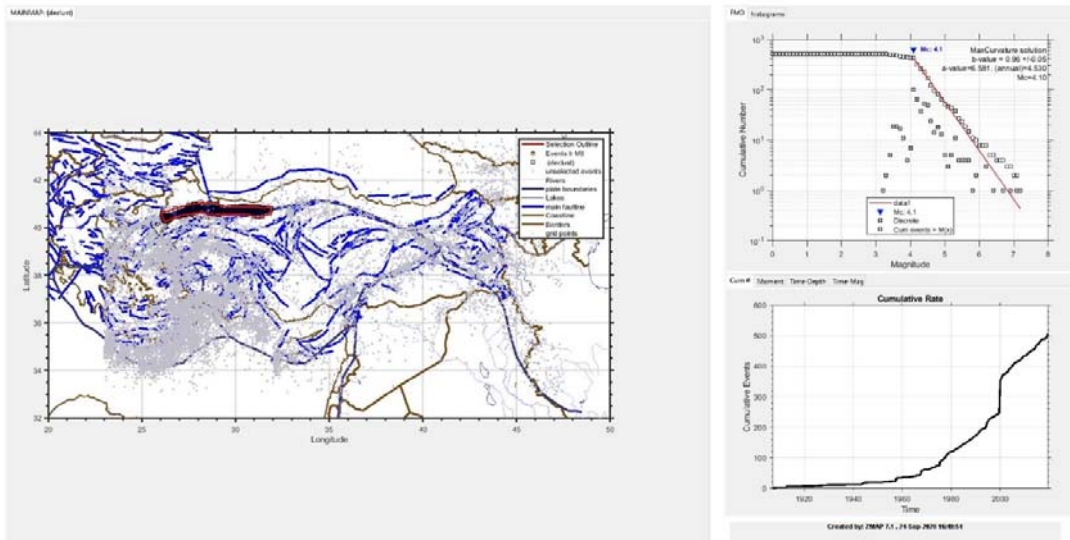
Çizelge 1. Alan sismik zonları için hesaplanmış istatistiksel parametreler (a ve b değeri, M_{\min} - M_{\max})

Sismik Zon	Mekanizma	a değeri	b değeri	M_c	M_{\max}
BGRAS032	COMPRESSION	3,969	0,940	4,2	6,5
BGRAS043	CONTINENTAL_BLOCK	4,395	0,970	4,2	6,5
BGRAS048	STRIKE_SLIP_TRANSFO	4,142	1,060	4,2	6,5
BGRAS078	STRIKE_SLIP_TRANSFO	3,000	0,800	4,2	6,5
GEOAS019	COMPRESSION	3,294	0,890	4,2	6,5
ROUAS042	STRIKE_SLIP_TRANSFO	4,321	0,71	4,5	6,5
ROUAS041	STRIKE_SLIP_TRANSFO	4,910	0,79	4,7	6,5
TURAS004	CONTINENTAL_BLOCK	3,123	0,780	4,2	6,5
TURAS005	STRIKE_SLIP_TRANSFO	3,936	0,840	4,2	6,5
TURAS013	STRIKE_SLIP_TRANSFO	4,530	0,960	4,1	6,5
TURAS034	CONTINENTAL_BLOCK	5,820	1,410	4,2	6,5
TURAS049	CONTINENTAL_BLOCK	4,291	1,000	4,2	6,5
TURAS050	STRIKE_SLIP_TRANSFO	3,190	0,930	4,2	6,5
TURAS052	STRIKE_SLIP_TRANSFO	4,950	1,09	4,1	6,5
TURAS071	STRIKE_SLIP_TRANSFO	4,372	1,16	4,1	6,5
TURAS072	STRIKE_SLIP_TRANSFO	4,000	1,000	4,2	6,6
TURAS073	STRIKE_SLIP_TRANSFO	4,287	1,050	4,2	6,5
TURAS093	COMPRESSION	4,030	0,950	4,2	6,5
TURAS094	COMPRESSION	3,460	0,850	4,2	6,5
TURAS103	COMPRESSION	5,494	1,24	4,1	6,5



Şekil 2. UDAP-Ç-13-06 dokümanı ve son aletsel depremsellik incelenerek elde edilen alansal ve çizgisel kaynaklar

Bu sismik kaynak zonları ile ilgili sismisitenin doğru olarak tanımlanabilmesi amacıyla kullanılan deprem kataloğundan Magnitüd Tamlığı (Magnitude Completeness, M_c), a ve b değerleri gibi çeşitli istatistiksel parametreler hesaplanmıştır. Sismik tehlike analizlerinde kullanılan b değeri, doğrusal regresyonun eğimi a değeri ise doğrunun y eksenini kestiği değer olarak tanımlanır. M_c ise dağılımın lineer kaldığı en küçük değer olarak tanımlanır. Bu sebeple, M_c son derece önemli bir unsurdur. Çalışmada kullanılan Alan kaynaklar için, a ve b değerlerinin hesaplanmasında ve frekans magnitüd dağılımları ile M_c nin belirlenmesinde Wiemer ve arkadaşları [15] tarafından geliştirilen Maksimum eğrilik yöntemi (Maximum Curvature Method) tercih edilmiş, hesaplamalarda Matlab tabanlı olarak geliştirilmiş ZMAP programı [16] kullanılmıştır. Şekil 3'te ZMAP programı kullanılarak hesaplanan çalışma sahasının da içinde yer aldığı TURAS013 sismik alan kaynağına ait Magnitüd-Frekans analizi sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 3. TURAS013 sismik alan kaynağına ait Magnitüd-Frekans analizi sonuçları

Kullanılan ikinci sismik kaynak modeli fay kaynak modelleri (çizgisel kaynaklar) “Exponential Fay Modeli” olarak kullanılmıştır. Çizgisel kaynaklar fay veri tabanına bağlı olarak tanımlanan ve parametreleri, ilgili fay özelliklerine bağlı olarak belirlenen kaynak tipleridir. Fay tipi kaynak modellerinin deprem oluşturma potansiyellerinin hesaplanmasında aletsel dönemde bölgede oluşmuş lokal büyüklüğü 3,0 ve üstü depremler dikkate alınmış ve sismik tehlike hesaplamalarında Faylara ait “Activity Rate” Oranları dikkate alınmıştır. Fay kaynak modelleri, UDAP-Ç-13-06 da ayrıntıları ile açıklanan MTA’nın 2010–2012 yılları arasında yayımladığı “1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritaları Serisi dikkate alınarak hazırlanmıştır. Analizler, alan kaynak zonlar da olduğu gibi, çalışma sahası koordinatları merkez olmak üzere 300 km çapında bir çember dikkate alınarak yapılmıştır (Şekil 2). Bir fay segmentinin oluşturabileceği en büyük depremin (M_w) cinsinden büyüklüğü Wells ve arkadaşları [17] tarafından geliştirilen fay uzunluğu ve fay kırığı ile (M_w) ilişkilerinden yararlanılarak elde edilmiştir. Çalışmada $M_{min}=4,5$ olarak alınmıştır.

2.4. Yer Hareketi Tahmin Denklemleri-YHTD (Ground Motion Prediction Equation-GMPE)

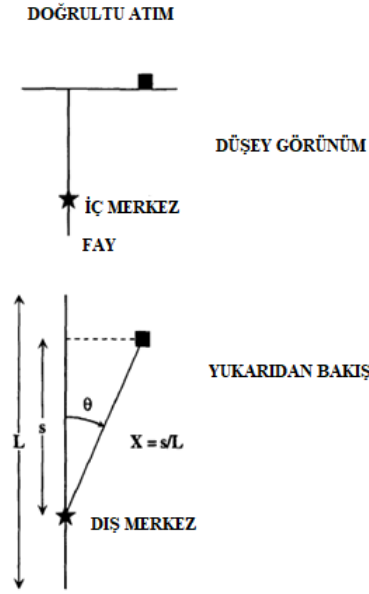
Olasılıksal Sismik tehlike çalışmalarının en önemli aşamalarından bir diğeri Yer Hareketi Tahmin Denklemlerinin seçilmesidir. Bu denklemler, yeryüzünün farklı coğrafyalarında, aletsel dönemde meydana gelmiş depremlerin ivme kayıtları kullanılarak farklı araştırmacılar tarafından belirli istatistiksel yöntemler kullanılarak geliştirilmiştir. Bu konuda literatürde en geniş kabul görmüş, en güncel çalışmalardan biri, sığ kabukta meydana gelmiş depremlerin kullanılması ile geliştirilmiş Yeni Nesil Azalım İlişkileri diye tanımlanan çalışmadır. Bu çalışmada yukarıda bahsedilen Yeni Nesil Azalım İlişkileri kullanılmamıştır. Kullanılan azalım ilişkileri şunlardır; Abrahamson ve arkadaşları [18], Boore ve arkadaşları [19], Campbell ve arkadaşları [20], Chiou ve arkadaşları [21]. Proje kapsamında kullanılan azalım ilişkilerinin Türkiye de yapılacak deprem tehlike hesaplamalarında kullanıma uygunluğu yapılan pek çok bilimsel proje ve makalede incelenmiştir. Bunlar arasında; SHARE projesi [22], EMMÉ Projesi [23], GEM Projesi [24], UDAP-C-13-06 Projesi [13] sayılabilir.

2.5. Deprem Yakın Saha Etkileri

Depreme dayanıklı yapı tasarımında klasik Olasılıksal Sismik Tehlike Analizleri ile elde edilen spektrumlardan yararlanılır. Sismik tehlike analizlerinde kullanılan azalım ilişkileri genellikle uzak depremler dikkate alınarak elde edilmişlerdir. Bu sebeple, örneğin liman yapıları deprem kaynağına yakın ise deprem güvenliği açısından belirli problemler ile karşı karşıya kalmaları söz konusu olabilir. Günümüzde, yer hareketi tahmin denklemlerinin yakın saha deprem hareketinin spesifik özelliklerini yansıtabilecek biçimde güncellenmesi ve tahmin edilebilir doğru spektral değerlere ulaştırılması konusunda pek çok çalışma yapılmakta olsa da henüz uluslararası kabul gören neticelere ulaşılamamıştır. Pek çok araştırma sonucu ve bilimsel makalenin vurguladığı üzere, özellikle yakın saha deprem yer hareketine maruz kalması muhtemel yapıların tasarımında, ülkemizdeki deprem şartnamelerinde olduğu gibi, tasarım şartnamelerinde bu etkiler dikkate alınmadıysa deprem güvenliği açısından eksiklik olduğu söylenebilir.

Bu çalışmada Somerville ve arkadaşları [8] tarafından ortaya atılan ve daha sonra Abrahamson [9] tarafından geliştirilen fay kırılma yönelim modeli kullanılarak yakın saha etkileri (yönelim (directivity), faya paralel bileşen, faya normal bileşen) modellenmiştir. Somerville ve arkadaşları [8] modeli, yatay azalım ilişkilerine uygulanabilecek periyoda bağlı ölçeklendirme faktörlerini içermektedir. Faktörler, yakın saha yönelim etkileri sebebiyle hareketin ortalama yatay bileşenindeki sarsıntı şiddetinin değişimini hesaba katar. İlgilenilen saha fayın yırtılma yönünde ise daha büyük genlikli yer hareketi, fayın yırtılma yönünün tersinde ise daha küçük genlikli yer hareketi oluşması söz konusudur.

Somerville ve arkadaşları [8] Ampirik modeli (X) ve (Θ) olmak üzere iki yönelim parametresi kullanır (Şekil 4). Burada (X), bölgeye doğru yırtılan fay uzunluğunun kesri olarak (s -dış merkezin sahaya uzaklığı ve L -yırtılan fayın uzunluğu) (Θ) ise deprem merkezinin azimutu ile fay yırtılma doğrultusu arasında kalan açı olarak tanımlanır. En kötü durum ($X=1$) ve ($\Theta=0$) olması durumudur. Somerville ve arkadaşları [8] tarafından kullanılan ampirik model (X) in değeri 0 değerinden 1’e doğru arttıkça sürekli bir oranda artar biçime sahipti. Ancak, $X\cos(\Theta)$ değerinin 0.6’dan büyük olduğu çok az gözlemsel veri vardı ve modelin daha büyük $X\cos(\Theta)$ değerlerine entrapolasyonu iyi sınırlandırılmamıştı. Ampirik kayıtların ve sayısal simülasyonların değerlendirilmesine dayanarak Abrahamson [9] modelin biçimini $X\cos(\Theta)=0.4$ ’te maksimuma ulaşacak şekilde değiştirilmesini önerdi.



Şekil 4. Somerville ve arkadaşları [8] ampirik modelinde kullanılan fay geometrisi

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

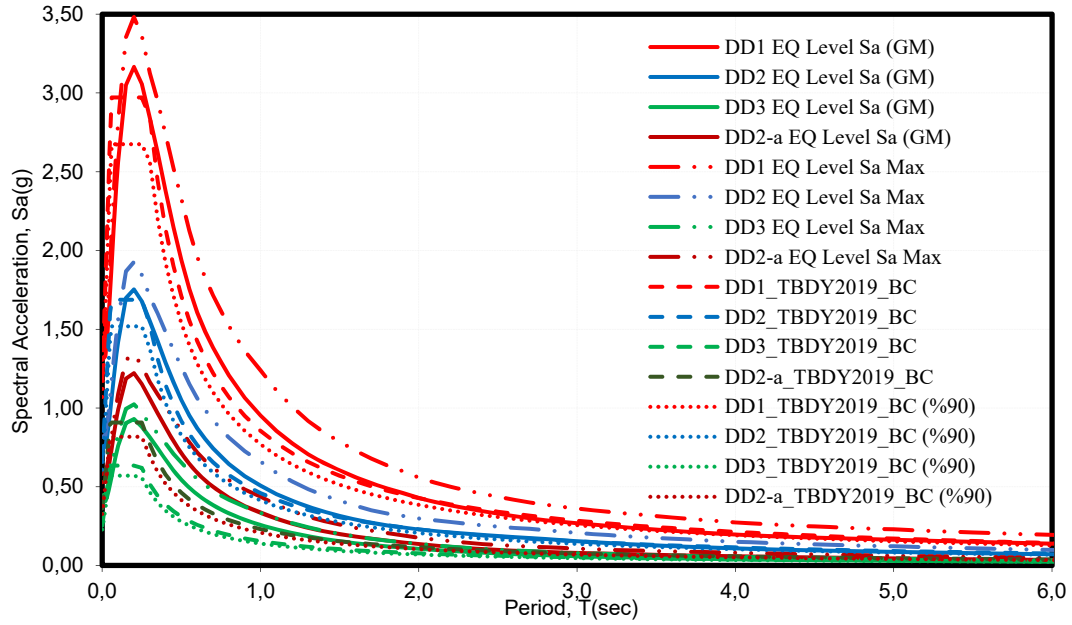
3.1. Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi (OSTA) Sonuçları

Enlem/Boylamı K 40.748686°- D 29.808071° olan Kocaeli İli, Derince İlçesinde Derince Vapur İskelesi için olasılıksal sismik tehlike analizi KLYTE [3] kurallarına göre EZ-FRISK yazılımı [25] kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda zemin sınıfı zemin kaya geçişi (B/C Boundary) olarak kabul edilmiş ve V_{s30} hızı 760 m/s olarak alınmıştır. KLYTE [3] kurallarına göre DD-1, DD-2, DD-2a ve DD-3 deprem seviyeleri için 0,01-8,0 s periyot aralığında %5 sönüm oranına sahip sahaya özgü yatay birleştirilmiş tehlike spektrumu (5%-damped horizontal uniform hazard spectra) hesaplanmıştır. DD-1, DD-2, DD-2a ve DD-3 deprem seviyeleri sırasıyla 50 yılda aşılma olasılığı %2 (tekerrür sıklığı 2475 yıl), %10 (tekerrür sıklığı 475 yıl), %30 (tekerrür sıklığı 140 yıl) ve %50 (tekerrür sıklığı 72 yıl) olan depremleri tanımlamaktadır. Tehlike spektrumunun oluşturulmasında her bir spektral periyot için yıllık aşım oranları alan kaynaklar ve fay kaynakları için ayrı ayrı hesaplanmış ve etkileri toplanmış daha sonra azalım ilişkileri vasıtası ile çalışma sahasında her bir periyoda karşılık gelen spektral ivmeler her bir deprem seviyesi (aşılma olasılığı) için Geometrik ortalama (GeoMean) cinsinden ayrı ayrı elde edilmiştir.

Çizelge 2. Çalışma sahasında hesaplanan yatay spektral ivme değerleri (geo ort, maks doğ)

Tasarım depremi	Aşılma olasılığı	Geometrik ortalama			Maksimum doğrultu		
		PGA	$S_s=0.2$ s	$S_1=1.0$ s	PGA	$S_s=0.2$ s	$S_1=1.0$ s
DD-1 Depremi	2475yıl-50yılıda%2	1.306	3.166	0.953	1.437	3.483	1.238
DD-2 Depremi	475yıl-50yılıda%10	0.742	1.753	0.507	0.816	1.928	0.659
DD-2a Depremi	144yıl-30yılıda%50	0.529	0.930	0.257	0.444	1.023	0.334
DD-3 Depremi	72yıl-50yılıda%50	0.403	1.221	0.336	0.582	1.344	0.437

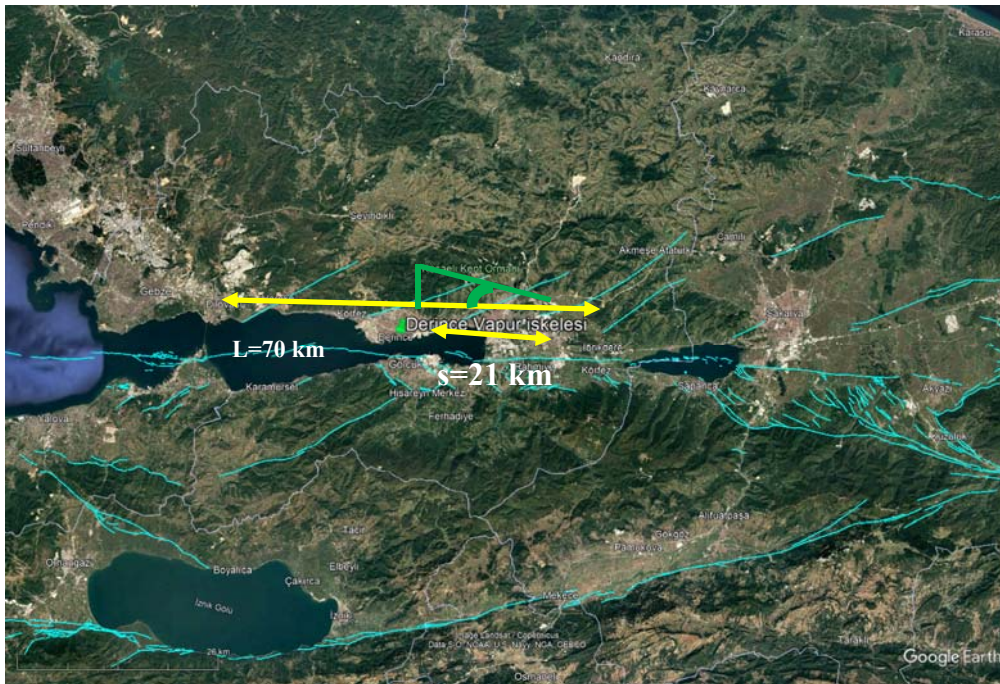
Daha sonra, Geometrik ortalama spektral ivmelerden Huang ve arkadaşları [26] tarafından önerilen periyod bağımlı dönüşüm faktörleri kullanılarak Maksimum doğrultu spektral ivme değerleri hesaplanmıştır. Bu dönüşüm faktörleri Amerikan Yapı Sismik Güvenlik Konseyinin hazırladığı Ulusal Deprem Tehlike Azaltma programı hükümlerinin 2009 versiyonunda ve Amerikan İnşaat Mühendisleri Birliğinin 2010 da hazırladığı ASCE/SEI 7-10 [27] şartnamede önerilmiştir. Çalışma sahasında hesaplanan Yatay birleştirilmiş tehlike spektrumu çizimleri geometrik ortalama ve maksimum doğrultu cinsinden KLYTE [3] ile verilen spektrumlar ile karşılaştırılarak Şekil 5'te sunulmuştur. Çizelge 2'de ise maksimum yer ivmesi ile 0,2 saniye ve 1 saniyedeki spektral ivme değerleri geometrik ortalama ve maksimum doğrultu cinsinden verilmiştir.



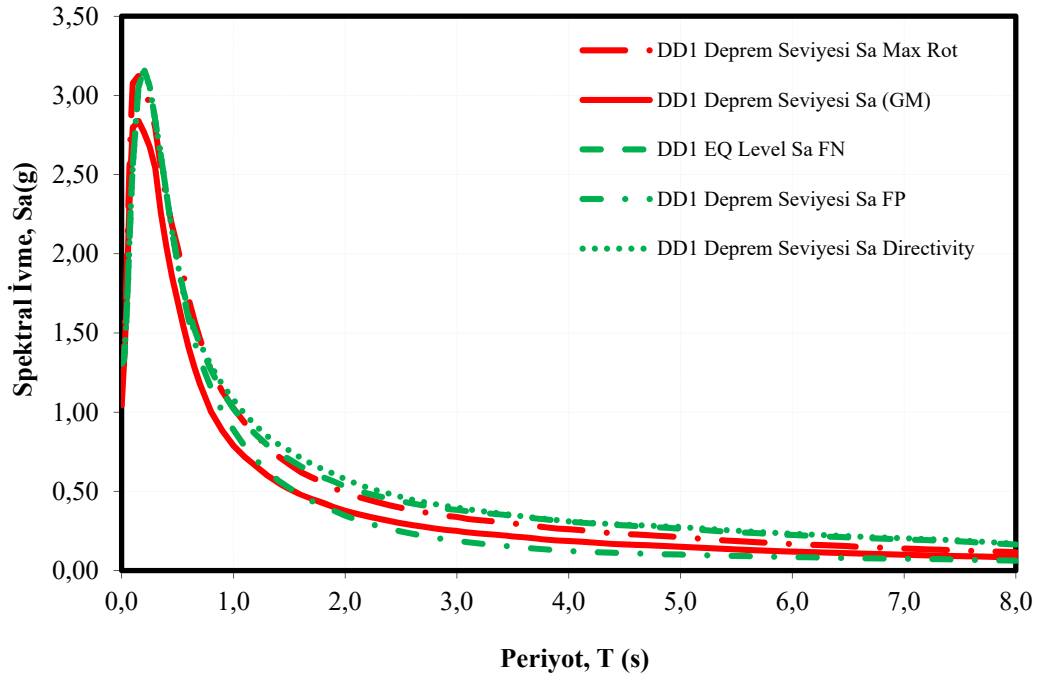
Şekil 5. Çalışma sahasında hesaplanan yatay deprem tasarım spektrumları (geometrik ortalama, maksimum doğrultu ve DEAKLYTE, 2020)

3.2. Deprem Yakın Saha Analizi Sonuçları

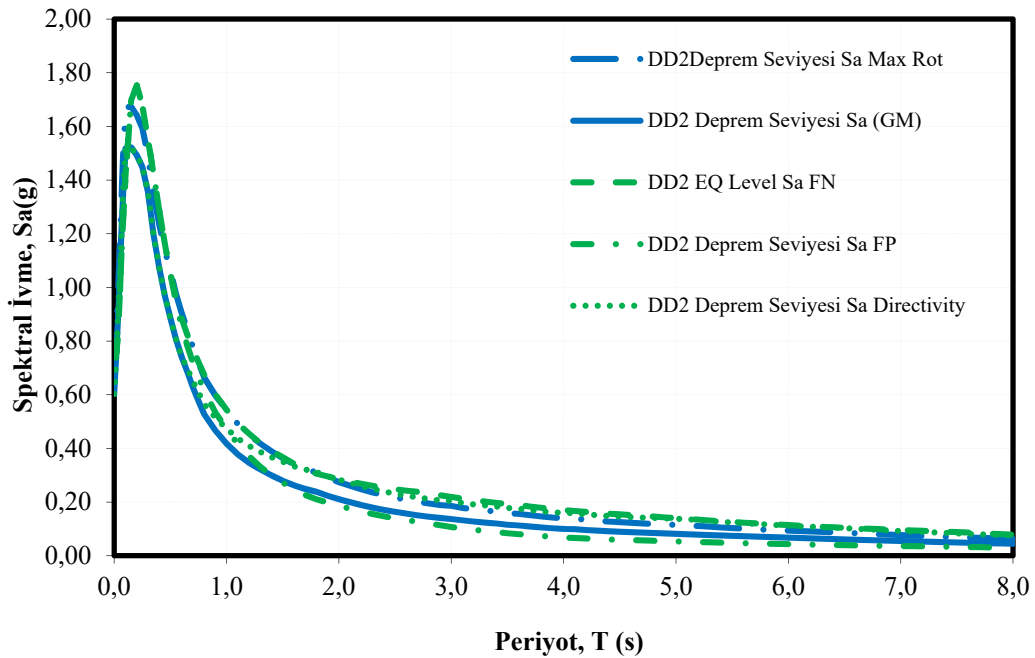
Çalışma sahasının deprem yakın saha etkileri altında kalması mümkün görünmektedir (Şekil 6). Dolayısı ile, Fay yırtılma doğrultusuna ve yönüne bağlı olarak yönlendirme etkisi ve faya paralel ile faya normal bileşenlerde oluşabilecek spektral ivmelerin değişimleri dikkate alınmış ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Bu hususta Somerville ve arkadaşları [8] ve Abrahamson [9] tarafından yapılan çalışmalar dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar DD-1, DD-2 deprem sevipleri için, deprem yakın saha etkileri dikkate alınarak hesaplanan, yönlendirme (directivity) faya normal, faya paralel spektrumlar ile Geometrik Ortalama ve Maksimum döndürülmüş spektrumlar karşılaştırılarak sunulmuştur (Şekil 7 ve Şekil 8).



Şekil 6. Proje sahasında yakın saha etkilerinin hesaplandığı geometri ve Türkiye diri fay haritası verilerine göre proje sahasının konumu



Şekil 7. Someville ve arkadaşları [8] ve Abrahamson [9] dikkate alınarak DD-1 deprem seviyesinde hesaplanan deprem yakın saha etkileri



Şekil 8. Someville ve arkadaşları [8] ve Abrahamson [9] dikkate alınarak DD-2 deprem seviyesinde hesaplanan deprem yakın saha etkileri

4. SONUÇLAR

Çalışma sahasının İzmit körfezinden geçen Kuzey Anadolu Fayının kuzey koluna mesafesi yaklaşık 2,5 km dir. Sahanın yaklaşık 3 km batısında Türkiye'nin en önemli petrokimya tesislerinden biri olan Yarımcı Petrokimya Tesisi ile Türkiye Petrol Rafineri Anonim Şirketine ait İzmit Rafinerisi ve bu işletmelere ait liman tesisleri yer almaktadır. Çalışma sahasının hemen doğusunda yaklaşık 1-3 km mesafede ise Toprak Mahsulleri Ofisi, Petrol Ofisi ve farklı pek çok özel petrol şirketinin dolmuş ve liman tesisleri bulunmaktadır. Çalışma sahasının yaklaşık 4 km güneydoğusunda ise önemli bir otomobil üreticisinin liman tesisleri yer almaktadır. Dolayısı ile çalışma sahası, deprem açısından İzmit körfezindeki en stratejik noktalardan birisidir. Bu özelliği ile körfezde pek çok önemli liman sahası için deprem yakın saha etkilerinin araştırılması hususunda örnek teşkil edebilecek niteliktedir. Çalışmada ilk olarak olası bir deprem sonrasında çalışma alanı olarak seçilen Derince Vapur İskelesi için Olasılıksal sismik tehlike analizi yapılarak tasarım spektrumları KLYTE [3] yönetmeliğine uygun olarak dört farklı deprem yer hareketi düzeyi için elde edilmiştir. Bu amaçla öncelikle sahanın deprenselliği ve sismo-tektonik özellikleri değerlendirilmiş daha sonra literatürde mevcut farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiş azalım ilişkileri kullanılmıştır. Bu tür bağıntılar yerel zemin koşulları incelenerek geliştirilmiş bağıntılar olmadığından, yerel zemin etkilerinin hesaplamaları etkilememesi hususu göz önünde tutularak hesaplamalarda zemin sınıfı zemin kaya geçişi (B/C Boundary) olarak kabul edilmiş ve V_{s30} hızı 760 m/s olarak alınmıştır. Böylelikle hesaplamaların zemin etkisinden bağımsız olarak karşılaştırılması mümkün hale getirilmiştir.

Çizelge 3. Yakın saha yönlenme, fay normal, fay paralel, geometrik ortalama ve maksimum döndürülmüş spektrumların karşılaştırılması

	PGA	$S_5=0.2$ s	$S_1=1.0$ s	$S_2=2.0$ s	$S_3=3.0$ s	$S_4=4.0$ s
Yönlenme	1,306/0,742	3,166/1,753	1,080/0,575	0,577/0,309	0,398/0,228	0,311/0,160
Fay normal	1,306/0,742	3,166/1,753	1,022/0,544	0,531/0,285	0,383/0,219	0,309/0,171
Fay paralel	1,306/0,742	3,166/1,753	0,888/0,473	0,347/0,186	0,188/0,108	0,123/0,068
Geometrik ortalama	1,306/0,742	3,166/1,753	0,953/0,507	0,429/0,230	0,268/0,154	0,195/0,101
Maksimum döndürülmüş	1,148/0,663	3,043/1,642	1,025/0,544	0,490/0,274	0,339/0,186	0,261/0,141

Çalışmanın ikinci aşamasında Somerville ve arkadaşları [8] ve Abrahamson [9] çalışmaları ile ortaya konan fay yırtılma yönelimine bağlı yakın saha deprem etkileri araştırılmıştır. Yönelim etkisi, fay segmentinin kırılma yönü ile doğrudan ilişkilidir. Eğer kırılma yönü değerlendirilen alana giderek yaklaşan doğrultuda ise buna ileri yönelim (forward directivity) etkisi, buna karşın, fayın kırılma yönelimi değerlendirme yaptığımız bölgeden giderek uzaklaşacak biçimde ise buna geri/ters yönelim (back directivity) etkisi denmektedir. Yönelim etkileri, yakın saha bölgesinde uzun periyotlu yüksek genlikli puls tipi yer hareketi bileşenlerinin oluşmasına sebep olabilir. Bu sebeple, yönelim etkilerinin özellikle uzun periyotlu Mühendislik yapılarının (liman, iskele, iskelelerin üzerindeki vinçler) tasarımında dikkate alınması gerektiği vurgulanmalıdır. Şekil 7 ve Şekil 8'de sırası ile DD-1 ve DD-2 deprem seviyeleri için yeşil nokta ile gösterilmiş spektrum, çalışma sahasında yönelim etkisi dikkate alınarak hesaplanmış spektrumdur. Şekillerden kolayca anlaşılacağı üzere özellikle 1 saniye periyodundan sonra en yüksek genlikli spektrumdur. Olasılıksal Tehlike analizlerinde hesaplanan Geometrik ortalama spektrumunun genliklerinden oldukça yüksek genliklere sahiptir. Örneğin, 1 saniye periyodunda %13, 3 saniye periyodunda ise %49 daha yüksek genliklere sahiptir (Çizelge 3). Yakın saha deprem yer hareketinde, sarsıntı şiddetinin yöne bağımlılığını yansıtan ikinci önemli husus: Fay Normal (FN) ve Fay Paralel (FP) bileşenlerin geometrik ortalama bileşenine oranıdır. Bu iki faktör ilgilenilen sahanın, Fay yırtılmasının ileri ve geri yönünde olup olmasına ve Fay yırtılmasının uzunluğuna bağlıdır. Şekil 7 ve Şekil 8'de sırası ile DD-1 ve DD-2 deprem seviyeleri için yeşil kesikli çizgi ile Fay Normal (FN) ve yeşil kesikli çizgi nokta ile Fay Paralel (FP) bileşenler gösterilmiştir. Şekil 7 ve Şekil 8'de görüldüğü gibi ileri yönlenme etkisinde Fay Normal bileşeni özellikle 1 saniye periyodundan sonra oldukça yüksek genliklere ulaşmaktadır (Çizelge 3). Çizelge 3'te farklı periyot değerleri için yönlenme, fay normal, fay paralel, geometrik ortalama ve maksimum döndürülmüş spektrumlar için hesaplanan değerler DD-1/DD-2 deprem seviyeleri için karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Sismik olarak dünyanın en aktif kuşaklarından biri üzerinde yer alan ülkemizde, can kayıplarının ve ekonomik kayıpların en az seviyeye indirilmesinin sağlanması bunun yanında, deprem gibi bir doğal afetten sonra gerekli her türlü yardım ve ihtiyacın bölgeye ulaşımının sağlanması son derece önemli bir husustur.

Bu anlamda, limanların hayati fonksiyonlarının yürütülmesi için, göz önüne alınacak fonksiyonların belirlenmesi, bu alanda gerekli görülen planlamanın yapılması, bu konuda yetki ve sorumluluğu olan kurumların iş birliklerinin nasıl gerçekleştirileceğinin belirlenmesi kritik bir konudur. Bu çalışmanın, deprem sonrasında İzmit körfezindeki limanlarda meydana gelebilecek hasarların seviyesi ve sebepleri hususunda önemli bilgiler ortaya çıkardığı düşünülmektedir. Bu tarz çalışmaların hem İzmit körfezinde hem de ülkemizde farklı deprem bölgelerinde mevcut ya da inşa edilecek limanların deprem güvenliğinin artırılması hususunda faydalı olacağı düşünülmektedir.

5. KAYNAKLAR

- Christiansen, M., Hellsten, E., Pisinger, D., Sacramento, D., Vilhelmsen, C., 2020. Liner shipping network design. *European Journal of Operational Research*, 286(1), 1-20.
- Sümer, B.M., Kaya, A., Hansen, N.-E.O., 2002. Impact of liquefaction on Coastal Structures in the 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake, Proc., 12th Int. Offshore and Polar Eng Conf., Kita Kyushu, Japan, II: 504-511.
- KLYTE, 2020. Deprem etkisi altında kıyı ve liman yapıları tasarımı için esaslar. Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma Bakanlığı Alt Yapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- TBDY, 2018. Türkiye bina deprem yönetmeliği. T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı AFAD, <https://tdth.afad.gov.tr/>, Erişim tarihi: 22.09.2024, Ankara.
- Maden Tetkik Arama Enstitüsü, MTA, <http://www.mta.gov.tr/>, Erişim tarihi: 22.09.2024, Ankara.
- T.C. Kocaeli Valiliği Alt Komisyon Raporu, 2012. Kocaeli limanlarının demiryolu ve karayolu bağlantılarının yapılması, coğrafi ve fiziki imkanları uygun olan limanların birleştirilmeleri ve ihtisas limanların oluşturulması, Kocaeli Valiliği, Kocaeli.
- Sommerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W., Abrahamson, N.A., 1997. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological. Res. Letters*, 68, 199-222.
- Abrahamson N.A., 2000. Near-fault ground motion from the Chi-Chi earthquake. *Proceedings of U.S.-Japan Workshop on the Effect of Near-Field Earthquake Shaking*, San Francisco, CA.
- Cornell, C.A., 1968. Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58,5, 1583-1606.
- McGuire, K.R., 1995. Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: Closing the loop. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(5), 1275-1284.
- Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Ulusal Deprem İzleme Merkezi, www.koeri.boun.edu.tr, Erişim tarihi: 12.09.2024, İstanbul.
- Ulusal Deprem Araştırma Programı, 2014. UDAP-Ç-13-06 Türkiye sismik tehlike haritasının güncellenmesi, Ankara.
- Gardner, J.K., Knopoff, L., 1974. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 64(5), 1363-1367.
- Wiener, S., Wyss, M., 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America* 90(4), 859-869.
- Wiener, S., 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(3), 373-382.
- Wells, D.L., Coppersmith, K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 974-1002.
- Abrahamson, N.A., Silva, W.J., 2008. Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground motion relations. *Earthquake Spectra*, 24, 67-97.
- Boore, D.M., Atkinson, G., 2008. Ground motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24(1), 99-138.
- Campbell, K.W., Bozorgnia Y., 2008. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra*, 24(1), 139-171.
- Chiou, B., Youngs, R.R., 2008. An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra* 24, 173-215.

22. Stucchi, M., Rovida, A., Gomez, A.A., Alexandre, P., Camelbeeck, T., Demircioglu, M.B., Giardini, D., 2013. The SHARE European earthquake catalogue (SHEEC) 1000-1899. *Journal of Seismology*, 17, 523-544.
23. Erdik, M., Sesetyan, K., Demircioglu, M.B., Tuzun, C., Giardini, D., Gulen, L., Zare, M., 2012. Assessment of seismic hazard in the Middle East and Caucasus: EMME (Earthquake Model of Middle East) project. In Proc. of 15th World Conference on Earthquake Engineering.
24. GEM, 2013. GEM Global Historical Earthquake Catalogue, Version 1.0 released on 2013-06-25. <http://www.emidius.eu/GEH/>, Erişim tarihi: 08.10.2024.
25. Risk Engineering, EZ-FRISK-Software for Ground Motion Estimation, Risk Engineering Inc., Boulder, Colorado, 2015.
26. Huang, Y.N., Whittaker, A.S., Luco, N., 2008. Maximum spectral demands in the near-fault region. *Earthquake Spectra*, 24(1), 319-341.
27. ASCE 7-10, 2010. Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers, ASCE Standard No. ASCE/SEI 7-10, Reston, VA.

Elektroegirme Yöntemi ile Üretilen Antimikrobiyal Nanolif Membranlarda *Lycopodium* Özütü Etkisinin İncelenmesi

Ayşe YÜKSEKDAĞ^{1,2,a}

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul

²Prof. Dr. Dincer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

^aORCID: 0000-0002-7751-7556

Makale Bilgileri

Geliş : 03.09.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606113

Sorumlu Yazar

Ayşe YÜKSEKDAĞ

yuksekdaga@itu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Elektroegirme

Nanolif

Lycopodium

Antimikrobiyal

Atf şekli: YÜKSEKDAĞ, A., (2024). Elektroegirme Yöntemi ile Üretilen Antimikrobiyal Nanolif Membranlarda *Lycopodium* Özütü Etkisinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1027-1038.

ÖZ

Bu çalışmada, *Lycopodium* bitkisinden elde edilen fenolik bileşenler kullanılarak çevreci, ekonomik ve büyük ölçekli üretilen antimikrobiyal nanolif membranlar geliştirilmiştir. Bitki özütü, oda sıcaklığında polimer çözücüsü DMF ile karıştırılıp süzülerek elde edilmiştir. %12 PAN polimeri ile farklı konsantrasyonlarda *Lycopodium* özütü içeren çözeltiler hazırlanmış ve elektroegirme yöntemiyle nanolif membranlar üretilmiştir. Üretilen dört farklı membran (%0, %1, %3, %5 oranlarında bitki özütü içeren membranlar) SEM görüntüleriyle incelenmiş, bitki konsantrasyonunun artışıyla boncuksu yapıların azaldığı ve nanolif kalınlıklarının arttığı gözlenmiştir. %5 oranında özüt içeren membranda nanolif kalınlığı 607 nm'ye çıkarak kontrol membranından yaklaşık üç kat daha kalın olmuştur. FT-IR analizinde 5L membranında oksijen bağlarını temsil eden piklerin kaybolduğu ve 3L membranında antimikrobiyal etkinin başarılı bir şekilde elde edildiği tespit edilmiştir.

Investigation of the Effect of *Lycopodium* Extract on Antimicrobial Nanofibrous Membranes Fabricated by Electrospinning Method

Article Info

Received : 03.09.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606113

Corresponding Author

Ayşe YÜKSEKDAĞ

yuksekdaga@itu.edu.tr

Keywords

Electrospinning

Nanofiber

Lycopodium

Antimicrobial

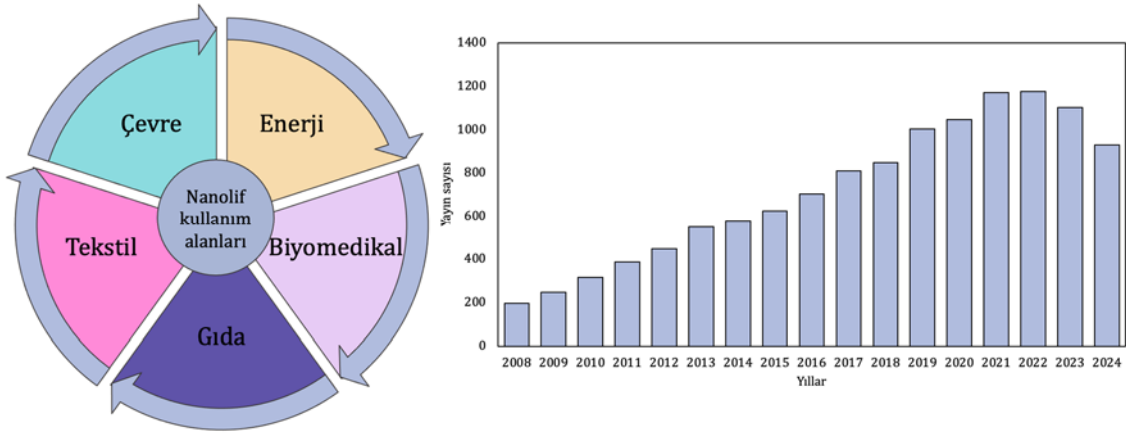
How to cite: YÜKSEKDAĞ, A., (2024). Elektroegirme Yöntemi ile Üretilen Antimikrobiyal Nanolif Membranlarda *Lycopodium* Özütü Etkisinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1027-1038.

ABSTRACT

In this study, antimicrobial nanofiber membranes were developed using phenolic components obtained from the *Lycopodium* plant, which are environmentally friendly, economical, and suitable for large-scale production. The plant extract was mixed with the polymer solvent DMF at room temperature and then filtered to obtain the solution. Solutions containing 12% PAN polymer and varying concentrations of *Lycopodium* extract were prepared, and nanofiber membranes were produced using the electrospinning method. Four different membranes (membranes containing 0%, 1%, 3%, 5% plant extracts) were examined using SEM images, revealing a decrease in bead-like structures and an increase in nanofiber thickness with higher plant concentrations. The nanofiber thickness in the membrane having 5% plant extract increased to 607 nm, making it approximately three times thicker than the control membrane. FT-IR analysis showed that the peaks representing oxygen bonds were absent in the 5L membrane, and the 3L membrane demonstrated successful antimicrobial activity.

1. GİRİŞ

Lifler ve filamentler, örümcek ağı ve ipek lifleri gibi farklı doğal ortamlarda canlılar tarafından üretilmekte ve kullanılmaktadır. Bu doğal kaynaklar, günümüzde kimyasal olarak üretilen (sentetik) lif ve nanoliflerin ilham kaynağını oluşturmaktadır. Nanolifler günümüzde pek çok farklı alanda kullanılmaktadır. Su, atıksu ve hava arıtımı, yakıt hücresi uygulamaları, yapay doku uygulamaları, gıda ambalajları ve giyilebilir teknoloji ürünleri sırasıyla çevre, enerji, biyomedikal, gıda ve tekstil sektörlerindeki kullanımlarına birer örnek olarak gösterilebilir. “Web of Science” veri tabanından 21 Ağustos 2024 tarihinde elektroçirime (electrospinning) ve nanolif (nanofiber) anahtar kelimeleri ile aratıldığında bulunan makale sayıları 2008 yılında günümüze kadar Şekil 1’de grafik olarak gösterilmektedir. Bilhassa 2010’lu yıllarda endüstriyel ölçekte nanolif üretiminin gerçekleştirilmesi ile gerek yayın sayılarında gerekse uygulama alanlarında artış gözlenmiştir [1].



Şekil 1. Nanolif membranların kullanım alanları (sol) ve 21 Ağustos 2024 itibari ile Web of Science internet sitesinden elektroçirime ve nanolif anahtar kelimeleri ile çevrimiçi olarak aratılarak bulunan 2008 – 2024 yılları arası yayın sayısı (sağ)

Yukarıda bahsedilen kullanım alanlarında, özellikle antibakteriyel ve antimikrobiyal özellikler taşıyan nanolifler sıklıkla tercih edilmektedir. Özellikle biyomedikal uygulamalar için antibakteriyel nanoliflerin geliştirilmesi ve üretilmesi ayrı bir önem taşıdığı bilinmektedir [2,3]. Öte yandan su ve atıksu arıtımında kullanılan nanolif membranların da antibakteriyel ve antimikrobiyal özelliklere sahip olması son yıllarda araştırılan konular arasında yer almaktadır [4,5]. Arıtma proseslerinde kullanılan membranların en önemli işletme problemlerinden birisi tıkanmadır [6]. Nanolif membranların su akışı yüksek olması sebebiyle su ve atıksu arıtımında sıklıkla tercih edilmektedir [7,8]. Ancak yüksek akı avantajı ile birlikte membran tıkanmasının hızla gerçekleşmesi, membranlarda geri yıkama sıklığının ve uygulama basıncının artmasına yol açmaktadır. Bu işlemler işletme maliyetini arttırmakla birlikte membran ömrünü de kısalttığı için antimikrobiyal özellikli nanolif membranların üretimi çevresel uygulamalar için de ayrı bir öneme sahiptir [9,10].

Biyomedikal ve çevre uygulamalarında antimikrobiyal ve antibakteriyel nanolif membranların geliştirilmesi için kullanılan en yaygın stratejilerden birisi metal organik çerçeve, nanotüp ve nanopartikül gibi nanomalzemelerin membran matrisinde kullanılmasıdır. Gümüş nanopartikül (AgNP) [11], bakır oksit (CuO) [12], Titanyum dioksit (TiO₂) [13], karbon nanotüp (KNT) [14] ve zeolitik imidazol çerçeve (ZIF-8) [15] antimikrobiyal membran üretiminde yaygın olarak kullanılan nanomalzemelerdir. Yapılan bir çalışmada ağırlıkça %8 ZIF-8 katkılı poliviniliden florür (PVDF) nanolif yağ-su ayırma membranlarından, ZIF-8 katkısı olmayan membrana göre daha iyi antimikrobiyal performans elde edilmiştir [16]. Başka bir çalışmada selüloz nanokristal ve AgNP ile modifiye edilen membranların *Escherichia coli* hücrelerinin yaklaşık %75’ini etkisiz hale getirebildiği, aynı zamanda membran ayırma performansına olumsuz bir etki olmadığı gözlenmiştir [17]. Ancak nanomalzemelerin zamanla membran bünyesinden yıkanarak ortama salınması bu yöntemin dezavantajları arasındadır. Ayrıca nanomalzeme katkılı membranların üretiminin ticari boyutta gerçekleştirilmesi de bir diğer zorluklardandır.

Antimikrobiyal membran üretiminde izlenen bir diğer yöntem de sentetik ya da doğal antibakteriyel ajanların kullanılmasıdır. Bu yöntem daha çok yara örtüsü vb. biyomedikal ürünlerin üretiminde tercih edilmektedir. Antibiyotik yüklü biyopolimerik nanolif membranlar sıklıkla yara örtüsü üretiminde kullanılmaktadır [18]. Siprofloksazin antibiyotik etken maddesinin polivinil alkol (PVA) nanolif membranlarının yüzeyine kaplanmasıyla [19] ve terbinafin etken maddesinin PVA polimer çözeltisine karıştırılmasıyla [20] başarılı bir şekilde antibakteriyel nanolifler üretilmiştir. Doğal antibakteriyel ajanlar olarak ise bitkilerden elde edilen uçucu yağlar ve bal kullanılabilir. Bu maddelerin saf halleri doğrudan elektrodeğirmede kullanılmadığından polimer çözeltilerine karıştırılarak nanolif üretimine entegre edilmektedirler [18]. Uçucu yağların antibakteriyel, antiviral ve antimikrobiyal özellikleri, sahip oldukları fenolik maddelerden kaynaklanmaktadır [21]. Örneğin, tarçın, limon otu ve nane nanolif yara örtüsü üretiminde başarılı bir şekilde kullanılmıştır [22]. Uçucu yağlara alternatif olarak tıbbi bitki özütleri de hem ihmal edilebilir yan etkileri hem de sentetik ilaçlara kıyasla oldukça ekonomik olması sebebiyle son yıllarda oldukça dikkat çekmektedir. Bitkilerin su veya organik çözücü özütleri de yine polimer çözeltisi içerisine karıştırılarak nanolif membran bünyesine tutturulur ve antimikrobiyal özellikleri nanoliflere kazandırılır [23].

Kibrit otu, kurt pençesi ya da tilki kuyruğu olarak da bilinen *Lycopodium*, zengin polifenol içeriği sayesinde antibakteriyel, antimantar, antioksidan ve antikanser özelliklere sahip tıbbi bir bitkidir. Bu bitki, kas ağrısı, karın ağrısı ve Alzheimer gibi çeşitli hastalıkları tedavi etmede kullanılan ilaçların üretiminde kullanılmaktadır [24]. Önceki çalışmalar *Lycopodium* bitkisinde p-hidroksi-benzoik, p-kumarik, vanilik, dihidrokafeik ve ferulik asitler gibi çeşitli fenolik asitlerin varlığını tespit etmiştir. Çeşitli mikroorganizmalara karşı antimikrobiyal özellikleriyle bilinen fenolik asitler, bu bitkinin tıbbi özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır [25].

Bu çalışmanın yeniliği ve amacı daha önce nanolif membran üretiminde kullanılmayan *Lycopodium* bitkisinin özütü ile antimikrobiyal özellikler taşıyan yenilikçi bir nanolif membran geliştirmektir. Bu amaçla atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılan poliakrilonitril (PAN) polimeri ile dimetil formamid (DMF) çözücüsü içinde özütlenmiş *Lycopodium*, polimer çözeltisine farklı oranlarda karıştırılarak çözeltiler hazırlanmıştır. Bu çözeltilerden elektrodeğirme ile nanolif membranlar üretilmiş ve karakterizasyon sonuçlarına göre *Lycopodium* özütünün kullanılabilirliği araştırılmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Bitki Özütlerinin Hazırlanması

Türkiye’de yetiştirilmiş *Lycopodium* bitkisi, kurutulmuş halde temin edilmiştir. Daha sonra laboratuvar ölçekli halkalı değirmen ile öğütülerek Şekil 2’deki gibi toz haline getirilmiştir. Özütleme işleminden önce en az iki saat 103-105°C’de kurutulmuştur. *Lycopodium* özütlerini hazırlamak için polimerik membran üretiminde ve özellikle elektrodeğirme yöntemi ile nanolif membran üretiminde sıklıkla kullanılan dimetilformamid (DMF) (AKSA Akrilik Kimya, Türkiye) çözücüsü kullanılmıştır. Öğütülmüş ve nemi uzaklaştırılmış toz *Lycopodium* bitkisi, ağırlıkça %0, %1, %3 ve %5 karışım oranlarında DMF çözücüsü ile oda sıcaklığında 24 saat boyunca karıştırılmıştır. Bu membranlara sırasıyla 0L, 1L, 3L ve 5L kodları verilmiştir. Karıştırma hızı bitki parçalarının çökmesini engelleyecek ve karıştırma esnasında vorteks oluşacak şekilde 400 devir/dakika olarak seçilmiştir. Bu süre sonunda bitki özütü içerikli çözücü kaba filtre kağıdından hızla süzülerek arta kalan katı faz ayrımı sağlanmıştır. Elde edilen katı çözücüler, Şekil 2’nin 2. adımında görülmektedir. Ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranında üç farklı konsantrasyonda bitki özütü hazırlanmıştır. Bundan sonraki adımda bitki özütü çözücüler ve özüt içermeyen DMF solventi ile polimer çözeltileri hazırlanmıştır. Polimer olarak poliakrilonitril (PAN) (150000 Dalton, AKSA Akrilik Kimya, Türkiye) kullanılmıştır. Dört farklı *Lycopodium* konsantrasyonu içeren DMF çözeltileri ile ağırlıkça %12 PAN polimeri 24 saat boyunca 60°C’de karıştırılarak polimer çözeltileri hazırlanmıştır (Şekil 2 - 3. adım).

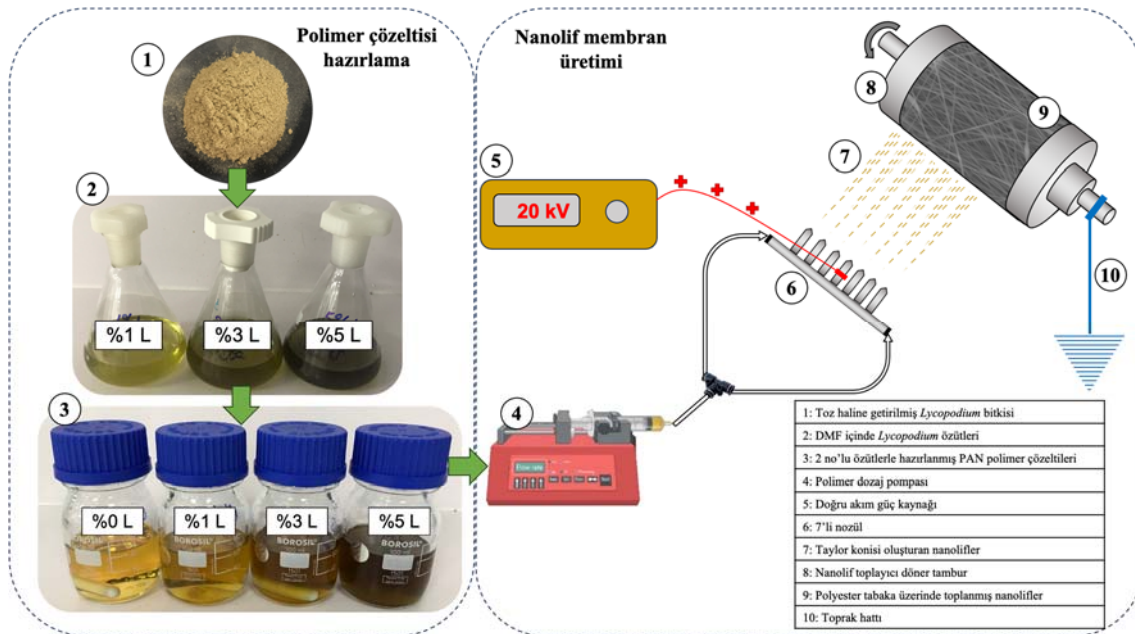
2.2. Nanolif Membran Üretimi

Nanolif membranlar elektrodeğirme yöntemi ile üretilmişlerdir. Bunun için yatay konfigürasyonlu, 7 adet paslanmaz çelik nozüllü ve sıcaklık kontrollü elektrodeğirme cihazı kullanılmıştır (ASENTEK, Türkiye). Üretim öncesinde döner tambur üzerine polyester membran destek tabakası sarılmıştır. Hazırlanan polimer çözeltileri plastik enjektör içine alınarak şırınga pompası ile 0,5 mL/saat debide nozül yatağına

beslenmiştir. Pozitif voltaj, tambur dönme hızı ve nozül-tambur arası mesafe Çizelge 1'deki değerlerde sabit tutularak her bir polimer çözeltisi için saat nanolif üretimi gerçekleştirilmiştir. Tüm üretimlerden önce elektroegirme kabin içi sıcaklığı 30°C'ye sabitlenmiş ve bağıl nem sürekli olarak ölçülerek değişimi takip edilmiştir. Üretimin başlangıcından sonuna kadar bağıl nem %35-40 arasında değişkenlik göstermiştir.

Çizelge 1. Elektroegirme ile nanolif membran üretim parametreleri

Parametre	Değer
Voltaj	20 kV
Polimer dozajı	0,5 mL/saat
Üretim süresi	2 saat
Nozül sayısı/çapı	7 adet/0,8 mm
Tambur dönme hızı	500 devir/dakika
Nozül – tambur arası mesafe	10 cm
Sıcaklık	30°C
Bağıl nem	%35-40



Şekil 2. Polimer çözeltisi hazırlama adımları ve nanolif membran üretim düzeneği şematik görünümü

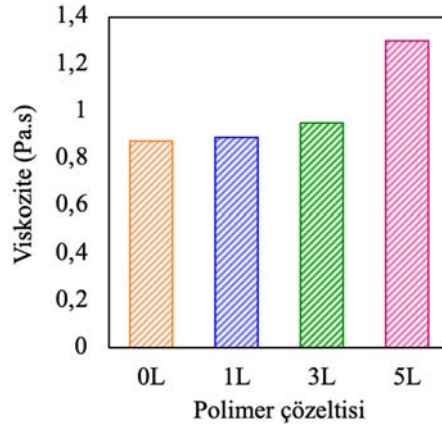
2.3. Karakterizasyon Çalışmaları

Polimer çözeltilerinin akmaya karşı dirençleri titreşim prensibi ile çalışan viskozimetre ile ölçülmüştür (AND, Japonya). Üretilen nanolif membranların fonksiyonel grupları, 650-4000 cm^{-1} aralığında FT-IR (Perkin Elmer, ABD) ölçümleri ile analiz edildi. Nanolif membran morfolojileri, üç farklı ölçekte taramalı elektron mikroskobu (SEM) (FEI, Quanta FEG 250, ABD) ile görüntülenmiştir. Görüntüleme öncesinde membranlar altın paladyum karışımı ile kaplanarak iletken hale getirilmiştir. ImageJ programı kullanılarak 5 μm ölçekli SEM görüntülerinden 100 adet nanolif kalınlığı ölçümü alınmış ve nanoliflerin kalınlık dağılım grafikleri oluşturulmuştur. Membranların antimikrobiyal özelliklerini incelemek için her bir membrandan 47 mm çapında örnekler kesilerek vakum süzme setine yerleştirilmiştir. Ardından, ileri biyolojik atıksu arıtma tesisinden temin edilen ve askıda katı madde konsantrasyonu yaklaşık 8000 mg/L olan aktif çamurdan 10 mL süzümüştür. Süzme işlemi takiben 48 saat inkübasyon süresinden sonra membranlar Syto-9 (canlı hücre görüntülemesi için) ve Propidyum iyodür (ölü hücre görüntülemesi için) içeren karışık floresan ajan ile boyanmıştır. Boyama işleminden sonra en az 30 dk bekletilerek Konfokal Lazer Taramalı Mikroskop (CLSM) (C2, Nikon, Japonya) ile görüntüler alınmıştır. Alınan görüntüler, ImageJ programı ile analiz edilerek canlı ve ölü hücrelerin bulunduğu alanlar ölçülmüştür. Daha sonra canlı/ölü oranları hesaplanarak antimikrobiyal performansları değerlendirilmiştir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Polimer Çözeltisi Karakterizasyonu

Lycopodium ve çeşitli bitkilerin bünyesindeki fenolik bileşiklerin özütlenmesi için su, etanol ve aseton gibi çözücülerin kullanıldığı çalışmalar literatürde mevcuttur [26, 27]. Bahsi geçen çözücülerin kullanılması durumunda, özütleme işleminden sonra çözücünün buharlaştırılarak uzaklaştırılması, geride kalan çözünmüş katı maddelerin polimer çözücüsü içerisine karıştırılması gerekmektedir. Bu işlem de buharlaştırma kaynaklı, proses maliyetini oldukça arttırmakta ve gerçek ölçekte üretimi zorlaştırmaktadır. Bu sebeple, bu çalışma kapsamında, bitki özütlerinin doğrudan membran üretiminde yani polimer çözeltisi hazırlanmasında kullanılması hedeflenmiştir. Dolayısıyla bu çözücüler yerine, polimer çözünürleştirmede kullanılan DMF çözücüsü içerisinde *Lycopodium* bitkisi özütlenmiştir. Diğer çözücülerde olduğu gibi DMF de seçici bir özütleme gerçekleştirememektedir. Ancak polimer çözünürleştirmede kullanılan bir çözücü olduğundan dolayı özütleme kapasitesinin yüksek olacağı ve dolayısıyla solvent içerisinde çözünecek madde miktarının fazla olacağı göz önünde bulundurulmuştur. Her ne kadar polimer konsantrasyonu bu çalışma kapsamında sabit tutulsa da artan *Lycopodium*/DMF oranına bağlı olarak özütleme işleminden gelecek toplam çözünmüş katı madde konsantrasyonunun artması beklenen bir sonuçtur. Artan çözünmüş katı madde konsantrasyonu da polimer çözeltisi viskozitesinin artışına yol açmaktadır. Çözelti viskozitesi ise nanofiber morfolojisini doğrudan etkilemektedir [28]. Bu sebeple, viskozite sonuçlarının değerlendirilmesi önem teşkil etmektedir.



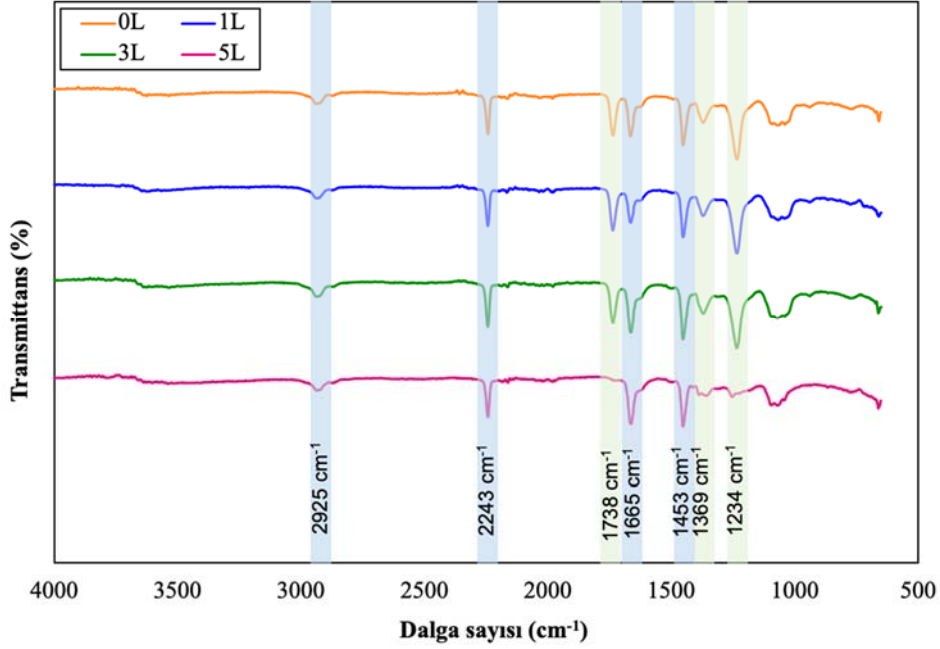
Şekil 3. Farklı oranlarda *Lycopodium* içeren polimer çözeltilerinin viskozite ölçümleri

Şekil 3'te dört farklı polimer çözeltisinin viskoziteleri görülmektedir. Bitki özütü katkısız çözücü ile hazırlanan çözeltinin (0L) viskozitesi 0,87 Pa.s olarak ölçülmüştür. Nasouri vd., %12 PAN polimerini DMF içerisinde çözerek hazırladıkları çözeltide 0,67 Pa.s viskozite değeri ile benzer mertebede sonuç elde etmişlerdir [29]. Bitki özütü katkılı çözücülerin kullanılması ile beraber 1L, 3L ve 5L çözeltileri için viskoziteler sırasıyla 0,89; 0,95 ve 1,3 Pa.s olarak gözlenmiştir. Bu sonuçlar, artan bitki konsantrasyonunun polimer viskozitesini arttırdığını doğrulamaktadır. Buradan çıkan sonuca göre bitki konsantrasyonunun membran morfolojisini etkileyeceğinden, bitki konsantrasyonu optimizasyonu oldukça önem taşıyan bir parametre konumundadır.

3.2. Membran Karakterizasyonu

Saf PAN ve *Lycopodium* özütü katkılı PAN nanolif membranların kızılötesi emilim spektrumlarını karşılaştırmak için FT-IR analizi yapılmıştır. 650 – 4000 cm^{-1} aralığında yapılan analizlerin sonucu Şekil 4'te gösterilmektedir. PAN nanolif membranların düzgün bir şekilde sentezlediğini gösteren karakteristik pik, 2243 cm^{-1} 'de ($\text{C}\equiv\text{N}$) nitril bağı olup 2925 cm^{-1} , 1453 cm^{-1} ve 1369 cm^{-1} 'deki bantlar PAN'in metilen ($-\text{CH}_2$) grubundaki farklı titreşimleri göstermektedir [30, 31]. Üretilen tüm nanolif membranlarda 2243 cm^{-1} nitril piki gözlenmiştir. *Lycopodium* konsantrasyonunun artışına bağlı olarak nitril pikinde bir değişim gözlenmemiştir. 1L ve 3L kodlu membranlar ile saf PAN membranlarında gözlenen pikler aynı olmakla birlikte 5L kodlu membranın yani *Lycopodium* özütünün en yüksek noktada olduğu membranın FT-IR piklerinden 1738 cm^{-1} ve 1234 cm^{-1} de kayıplar gözlenmektedir. Bu pikler sırasıyla C=O (ester) ve C-O (alkil aril eter) yapılarına işaret etmektedir. Stabilizasyon sırasında PAN nanoliflerinin kimyasal yapısına

oksijenin dahil edilerek karbonil, eter ve hidroksil gruplarının oluştuğu kabul edilmektedir [30]. Bu pikler oksijen bağlarını temsil ettiğinden, 5L membranında kaybolmaları, oksijen nanolif kimyasal yapısına giriş yapamadığını göstermektedir. Bu sonuç, bir önceki bölümde açıklanan viskozite artışı ile bağdaştırılmıştır. En yüksek polimer çözeltisi viskozitesinin gözleendiği 5L kodlu nanolif membranında, elektroegirme ile üretim esnasında nanolif bünyesine oksijen girişi engellenmiş ve böylece bahsi geçen piklerin FT-IR da gözlenmemesine yol açmıştır.



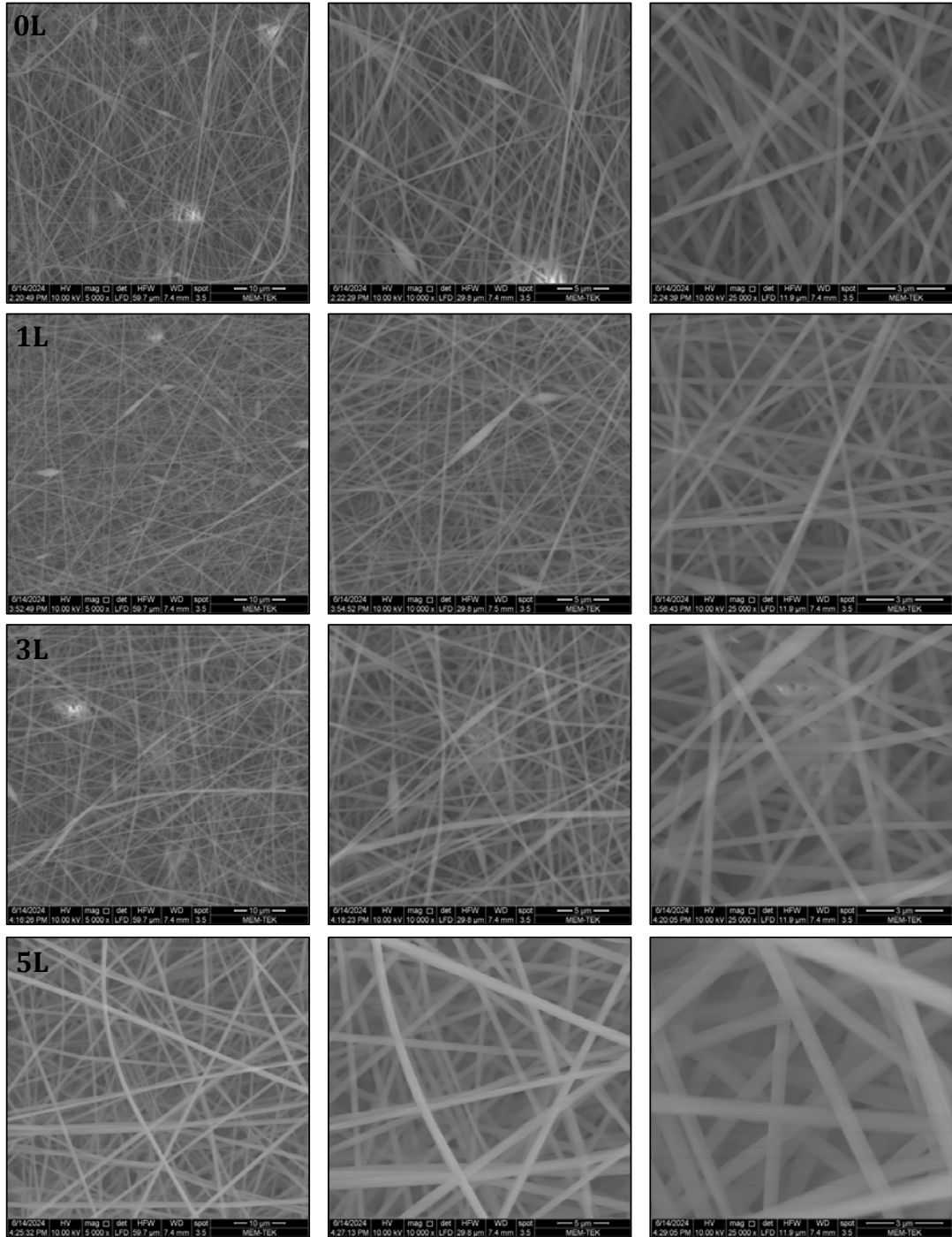
Şekil 4. Farklı oranlarda *Lycopodium* içeren membranlara ait FT-IR spektrumları

Üretilen nanolif membranların yapılarını incelemek ve nanolif kalınlıklarını ölçebilecek görüntü elde etmek için üç farklı büyütme oranında SEM görüntüleri çekilmiştir. Şekil 5'te saf PAN (0L) ve üç farklı konsantrasyonda *Lycopodium* özütü katkılı PAN (1L, 3L ve 5L) nanolif membranların 5000x, 10000x ve 25000x büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri verilmiştir. *Lycopodium* özütleme işlemindeki konsantrasyonun artışına bağlı olarak nanolif kalınlıklarında artış gözlenmiştir. 0L, 1L ve 3L kodlu membranlarda ayrıca baloncuk yapıları gözlemlenirken 5L kodlu membranda bu baloncuk yapıları oluşmamıştır. Bunun sebebi, *Lycopodium* özütlemesi sırasında daha fazla çözünmüş maddenin polimer çözeltisi matrisine dahil olmasıdır. Seçici bir özütleme işlemi olmadığından fenolik maddeler ile beraber bitki bünyesindeki diğer mineraller ve tuzlar da polimer çözeltisine dahil edilmiştir. 2020 yılında yapılan bir çalışmada nanolif membran üretimindeki baloncuk yapılarını bastırmak için, polimer çözeltisine tuz ilave edilmesi gerektiği raporlanmıştır [32].

SEM görüntülerinden, polimer çözeltisi viskozitesinin membran morfolojisini doğrudan etkilediği sonucu net bir şekilde görülmektedir. Özellikle 5L membrana ait elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde nanoliflerin daha bantsı yapıda olduğu görülmektedir. Diğer membranlardaki nanoliflerin yapısı ise silindirik görünümündedir. 5L membranındaki bantsı yapının gözlenmesi de yine artan polimer çözeltisinin başka bir sonucudur. Stepanyan ve çalışma arkadaşlarının 2016 yılında yayınlanan çalışmasında nanoliflerin çapları deneysel çalışmalar ile beraber matematiksel olarak ifade edilmiştir ve elde ettikleri sonuç, bu çalışmanın sonucu ile örtüşmektedir. Çözelti viskozitesinin 3000 mPa ve altında olması durumunda düzgün silindirik yapıda nanolifler elde edilmişken, viskozitenin 3000 mPa değerinin üzerine çıkmasıyla silindirik yapı yerine daha bantsı yapıda nanoliflerin elde edildiği raporlanmıştır [33].

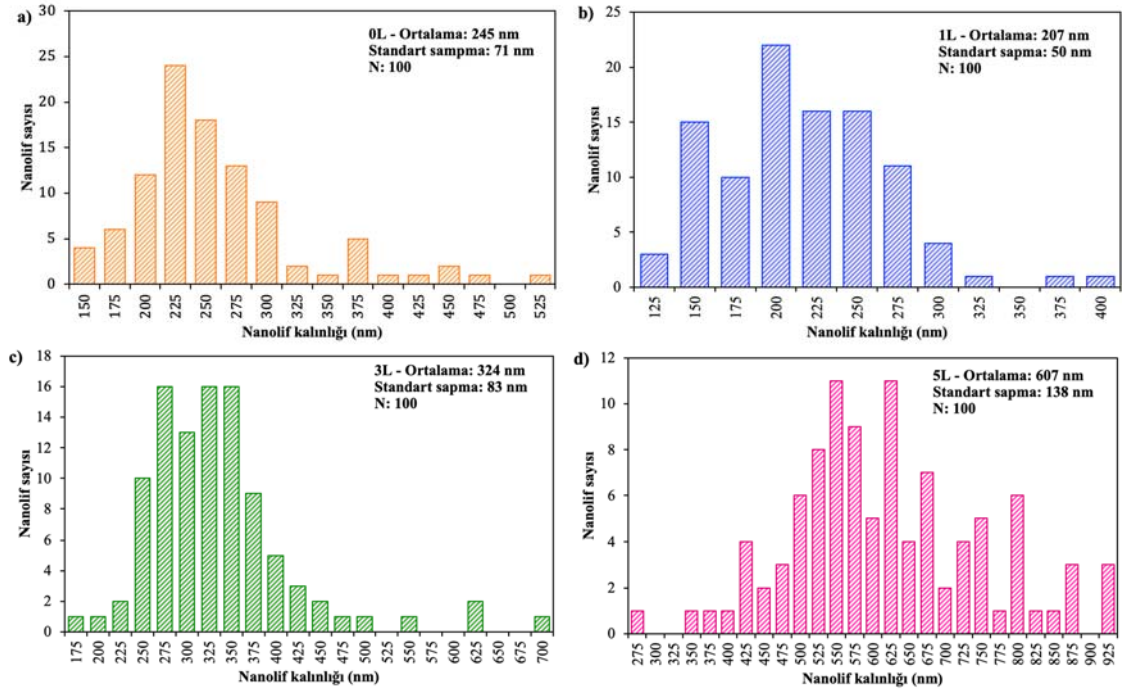
Elektron mikroskobundan elde edilen nanolif yüzey görüntülerini daha detaylı incelemek için ImageJ programı kullanılmıştır. Şekil 5'te orta sütunda yer alan 5 µm ölçekli her bir membrana ait SEM görüntüsünden 100 farklı nanolif kalınlığı ölçülmüş ve nanolif kalınlık dağılım grafikleri hazırlanmıştır. Şekil 6'da dört farklı membrana ait nanolif kalınlık dağılımları, ortalama nanolif kalınlığı ile standart sapma değerleri görülmektedir. 0L, 1L, 3L ve 5L membranları için elde edilen ortalama nanolif kalınlıkları sırası ile 245 ± 71 nm, 207 ± 50 nm, 324 ± 83 nm ve 607 ± 138 nm'dir. 0L ve 1L nanolif kalınlıkları birbirine

oldukça yakın olup, nanolif kalınlıkları arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. 3L membranında ise 0L membranına kıyasla ortalama nanolif kalınlığı %32 artış göstermiş olmakla beraber kabul edilebilir bir kalınlıktır. Öte yandan 5L membranına ait nanolif kalınlığı dağılımına bakıldığında hem nanolif çaplarının daha geniş bir aralığa yayıldığı (275 - 925 nm) hem de ortalama nanolif kalınlığının 0L membranına kıyasla yaklaşık 3 kat arttığı görülmektedir. Bu kalınlık artışı esnasında, silindirik yapıda oluşması gereken nanoliflerin artan viskoziteye bağlı olarak üretim esnasında gerilerek yassılaştırılması ve bantı bir form kazanmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde PAN ile nanolif üreten bir çalışmada polimer konsantrasyonunun %6'dan %12'ye yükselmesiyle elde edilen viskozite artışının bir sonucu olarak ortalama nanolif kalınlığının yaklaşık beş kat arttığı gözlenmiştir [34].



Şekil 5. Farklı oranlarda *Lycopodium* içeren nanolif membranlarına ait yüzey SEM görüntüleri (soldan sağa 5000x, 10000x ve 25000x büyütme)

Buraya kadar yapılan karakterizasyon çalışmalarından elde edilen ortak sonuç, *Lycopodium* bitki özütünün doğrudan polimer çözücü solventinde %3 oranına kadar özütlenmesi ile başarılı bir şekilde nanolif membranlarının elde edilebildiği, ancak bitki konsantrasyonunun %5'e yükselmesi ile hem kimyasal bağlarda hem de membran morfolojisinde ciddi farklılaşmalar gerçekleştiği görülmüştür. Dolayısıyla, *Lycopodium* özütlerinin polimerik nanolif membran üretiminde bitki konsantrasyonunun optimizasyonunun yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Mevcut bitki konsantrasyonu çalışma aralığında (%0 - %5) optimum membranın 3L (%3 *Lycopodium* özütü içeren) olarak seçilmiştir. Konsantrasyonun daha fazla artmasıyla membran morfolojisi bozulmaktadır. Dolayısıyla özütlenme işleminde *Lycopodium* konsantrasyonu daha fazla arttırılmamalıdır.



Şekil 6. Farklı oranlarda *Lycopodium* içeren membranların nanolif kalınlık dağılımları

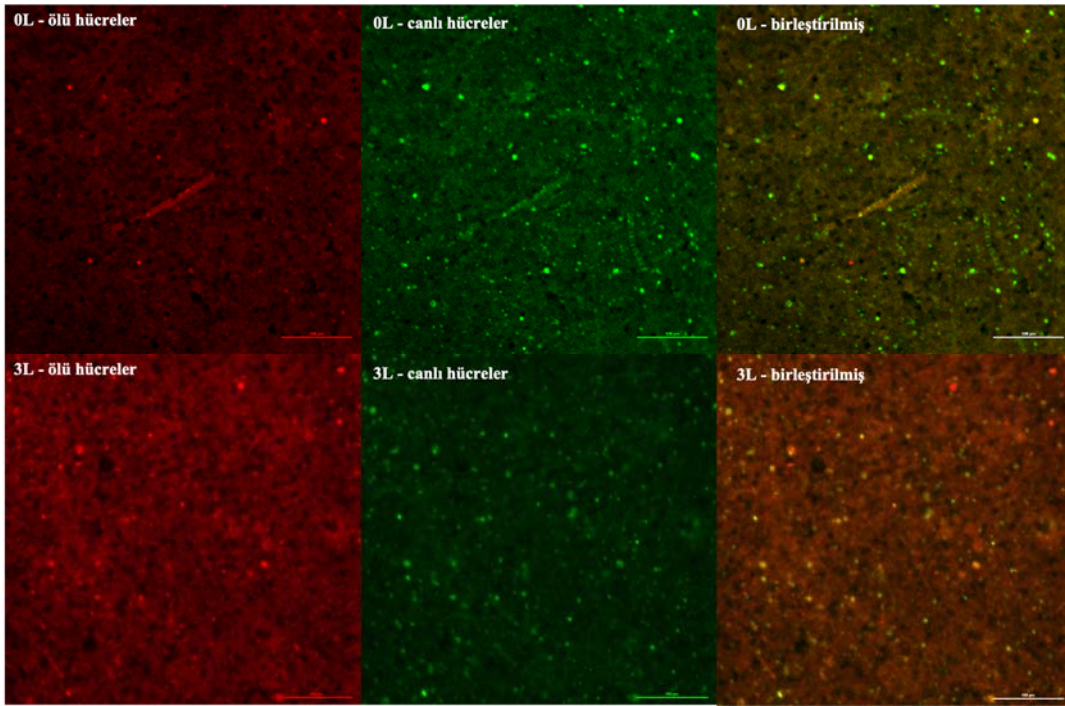
3.3. Antimikrobiyal Performans

Üretilen polimerik nanolif membranların karakterizasyon testlerinden sonra, çalışmanın esas amacı olan antimikrobiyal performansları test edilmiştir. Şekil 7'de saf (0L) ve optimum olarak belirlenen 3L membranlarından 10 mL 8000 mg/L aktif çamur süzölmüş ve 48 saat boyunca inkübe edilmiş membranların CLSM görüntüleri verilmiştir. Kırmızı emisyon veren görüntüler (sol sütun) ölü hücreleri, yeşil emisyon veren görüntüler (orta sütun) canlı hücreleri temsil etmektedir. Sağ sütunda ise ölü ve canlı hücrelerin beraber gösterildiği görüntüler mevcuttur. Membranların antimikrobiyal performanslarını belirlemek üzere CLSM görüntüleri ImageJ programında işlenerek ölü ve canlı hücre sayımları gerçekleştirilmiştir. Daha sonra canlı/ölü hücre oranları hesaplanmıştır. 0L membranı için canlı/ölü hücre oranı 0,9 iken, 3L membranında bu değer dokuz kat düşerek 0,1 olarak hesaplanmıştır. Yani 3L membranında canlı hücre sayısı oldukça azalmış ve ölü hücre sayısı artış göstermiştir. Dolayısıyla, *Lycopodium* bitkisi bünyesinde bulunan fenolik bileşiklerin başarılı bir şekilde nanolif yapısına kazandırıldığı ve antimikrobiyal etkisini gösterdiği kanıtlanmıştır. Bu sonuç, membran biyoreaktör gibi yaygın olarak biyolojik atıksu arıtımında kullanılan membranların tıkanma eğilimini azaltmak için umut vaat etmektedir. Antimikrobiyal etkisi ile membran yüzeyine tutunan mikroorganizmaların canlılığını koruma oranının azalması ile biyofilm oluşumu engellenecek ve sonuç olarak daha az tıkanma gerçekleşecektir. Bu sayede membranlarda geri yıkama ve kimyasal yıkama sıklığı azalacaktır. Başka bir sonucu ise daha az tıkanma sebebiyle membranların işletme maliyeti azalacaktır. Daha az kimyasal yıkama yapılması ile membran ömrünün uzaması da beklenen sonuçlardan bir diğeridir.

Literatürdeki nanopartikül katkılı antimikrobiyal membran performansları incelendiğinde, *Lycopodium* özütünün karşılaştırılabilir antimikrobiyal özellikler gösterdiği gözlemlenmiştir. Örneğin, AgNP katkılı ters

osmoz polimerik membranlarının antimikrobiyal özelliklerinin araştırıldığı bir makalede, katkısız membrana kıyasla yüzeydeki canlı bakteri sayısında %75'lik bir tespit edilmiştir [35]. Benzer şekilde, başka bir çalışmada grafen oksit katkılı ileri osmoz membranlarındaki canlı bakteri sayısının kontrol membranlarına kıyasla %92'den %62'ye düştüğü gözlenmiştir [36].

Bu çalışmada, membran yüzeyi modifikasyonu ve antimikrobiyal nanopartiküllerin sentezi gibi ek kimyasallar ve işlemler ile su bazlı bitki ekstraksiyonu ve ardından buharlaştırma gibi ilave bir şekilde yoğun enerji tüketen işlemlere gerek kalmadan membranlara antimikrobiyal özellikler başarılı bir şekilde kazandırılmıştır. Sonuç olarak *Lycopodium* bitkisinin DMF çözücüsüyle 24 saat boyunca teması ve ardından basit bir katı-sıvı ayrımı işlemi, membranlara antimikrobiyal özellikler kazandırmak için yeterli bulunmuştur. Geliştirilen yöntem hem ekonomik hem de ölçeklenebilir bir membran üretim yöntemi niteliğindedir.



Şekil 7. Aktif çamur filtrelenmiş membranların CLSM görüntüleri

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tıbbi bitkiler arasında yer alan *Lycopodium*'un içerisinde barındırdığı fenolik bileşiklerden faydalanarak doğrudan özütlenme yöntemi ile basit, çevreci, uygulanabilir, büyük ölçekte üretilebilir ve ekonomik bir antimikrobiyal nanolif membran üretimi gerçekleştirilmiştir. Doğrudan özütlenme yöntemi ile tıbbi bitki, polimer çözücüsü ile oda sıcaklığında 24 saat boyunca karıştırılmış ve süzülerek katı kısmı ayrılmıştır. Böylece polimer çözücüsü olarak kullanılan DMF içerisine bitki özütü entegre edilmiştir.

Bitki özütünün kullanıldığı mevcut yöntemlerde, bitki öncelikle su, etanol ya da aseton gibi çözücülerde özütlendikten sonra çözücünün evaporasyonla uçurulması işlemi gerçekleştirilmektedir. Evaporasyon ise oldukça enerji yoğun bir süreçtir ve hem üretim maliyetini artırır hem de büyük ölçekte üretimi daha zor hale getirebilir. Öte yandan antimikrobiyal nanolif üretiminde kullanılan bir diğer strateji, AgNP, ZnO ve ZIF-8 gibi çeşitli nanomalzemelerin kullanılmasıdır. Bu nanomalzemelerin sentezi için birçok ilave kimyasal ve proses gerekmektedir, gerçek ölçekte üretimi de oldukça maliyetlidir. Dahası, bu nanomalzemeler zaman içerisinde membran bünyesinden sıyrılarak çevresel ortama yayılmaktadır. Dolayısıyla hem çevreci hem de gerçek ölçekte üretilebilir yeni bir nanolif membran üretim yönteminin araştırılması ve geliştirilmesi oldukça önemlidir.

Bu makale kapsamında yapılan çalışmada ağırlıkça %12'lik PAN polimeri ile farklı konsantrasyonlarda *Lycopodium* özütü içeren DMF solventi ile polimer çözeltileri hazırlanarak elektroçekim yöntemi ile

nanolif membranlar üretilmiştir. %0 (0L, kontrol membranı), %1 (1L), %3 (3L) ve %5 (5L) olacak şekilde dört farklı membran üretilerek karakterizasyon testleri yürütülmüştür. Bitki özütlemeye konsantrasyon daha fazla arttırılamamıştır çünkü özütleme işleminde bitki konsantrasyonunun artması ile polimer çözeltisi viskozitesinde artış gözlenmiştir. Viskozite artışı nanolif membran üretimini doğrudan etkileyen bir yöntemdir. Nanolif membranların yüzey morfolojileri incelendiği SEM görüntülerinde, bitki konsantrasyonunun artmasına paralel olarak boncuksu yapıların azaldığı, öte yandan nanolif kalınlıklarının arttığı ve en yüksek konsantrasyonda nanoliflerin daha çok bantsı yapılarla sahip olduğu gözlenmiştir. Nanolif kalınlık dağılımları incelendiğinde ise 0L ve 1L membranları arasında anlamlı bir fark tespit edilmemişken, 3L membranında ortalama 245 nm'den 324 nm'ye yükselmiştir. 5L membranında ise 607 nm'ye yükselerek kontrol membranına göre yaklaşık üç katına çıkmıştır. FT-IR sonuçlarına bakıldığında tüm membranlarda PAN karakteristik piki 2243 cm^{-1} 'de ($\text{C}\equiv\text{N}$) nitril bağı gözlemlenirken, 5L membranında 1738 cm^{-1} ve 1234 cm^{-1} pikleri görülmemiştir. Bu pikler oksijen bağlarını temsil ettiğinden, 5L membranında kaybolmaları, oksijenin nanolif kimyasal yapısına giriş yapamadığını göstermektedir.

Buraya kadar yapılan çalışmalarda nanolif morfolojisi bozulmadan *Lycopodium* bitki özütü konsantrasyonunun en fazla %3'e kadar arttırılabildiği sonucuna varılmıştır. Bu noktadan sonra çalışmanın esas amacı olan nanolif membranların antimikrobiyal performansını incelenmiştir. Aktif çamur süzölmüş 0L ve 3L membranlarının CLSM görüntülerinde canlı ve ölü hücre sayımları yapılmıştır. 0L membranında canlı/ölü hücre oranı 0,9 olarak hesaplanmış iken 3L membranında bu değer dokuz kat düşerek 0,1 olmuştur. Bu sonuç 3L membranında başarılı bir şekilde antimikrobiyal etkilerin elde edildiğini göstermektedir. Ayrıca, literatürdeki mevcut antimikrobiyal membranlardan elde edilen performanslar ile karşılaştırılabilir düzeydedir.

Sonuç olarak, daha ekonomik ve çevreci bir yöntem ile antimikrobiyal nanolif membran üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilecek bir diğer fayda, atıksu arıtımında biyofilm oluşumundan kaynaklanan membran tıkanmasının azalması ve dolayısı ile işletme maliyetinin azaltılmasıdır. *Lycopodium* bitkisinin ülkemizde yetişmesi ayrıca bir fırsat niteliğindedir. Sonraki çalışmalarda, membranın antimikrobiyal stabilitesini koruma süresi üzerindeki çalışmalar özellikle membran biyoreaktör uygulamaları ile devam edecektir. Yine antimikrobiyal nanomalzeme katkılı membranların performanslarının karşılaştırılması da planlanan çalışmalar arasındadır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: MAB-2023-44539.

6. KAYNAKLAR

1. Xue, J., Wu, T., Dai, Y., Xia, Y., 2019. Electrospinning and electrospun nanofibers: Methods, materials, and applications. *Chemical Reviews*, 119(8), 5298-5415.
2. Shi, R., Ye, J., Li, W., Zhang, J., Li, J., Wu, C., Zhang, L., 2019. Infection-responsive electrospun nanofiber mat for antibacterial guided tissue regeneration membrane. *Materials Science and Engineering: C*, 100, 523-534.
3. Xue, C., Hsu, K.M., Chiu, C.Y., Chang, Y.K., Ng, I.S., 2021. Fabrication of bio-based polyamide 56 and antibacterial nanofiber membrane from cadaverine. *Chemosphere*, 266, 128967.
4. Mousa, H.M., Hamdy, M., Yassin, M.A., Seleman, M.M.E.S., Abdel-Jaber, G.T., 2022. Characterization of nanofiber composite membrane for high water flux and antibacterial properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 651, 129655.
5. Shalaby, T., Hamad, H., Ibrahim, E., Mahmoud, O., Al-Oufy, A., 2018. Electrospun nanofibers hybrid composites membranes for highly efficient antibacterial activity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 162, 354-364.
6. Meng, F., Chae, S.R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H.S., Yang, F., 2009. Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material. *Water Research*, 43(6), 1489-1512.
7. Li, M., Wang, D., Xiao, R., Sun, G., Zhao, Q., Li, H., 2013. A novel high flux poly (trimethylene terephthalate) nanofiber membrane for microfiltration media. *Separation and Purification Technology*, 116, 199-205.

8. HMTShirazi, R., Mohammadi, T., Asadi, A.A., Tofighy, M.A., 2022. Electrospun nanofiber affinity membranes for water treatment applications: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 47, 102795.
9. Tian, J.Y., Ernst, M., Cui, F., Jekel, M., 2013. Correlations of relevant membrane foulants with UF membrane fouling in different waters. *Water Research*, 47(3), 1218-1228.
10. Gao, Y., Qin, J., Wang, Z., Østerhus, S.W., 2019. Backpulsing technology applied in MF and UF processes for membrane fouling mitigation: A review. *Journal of Membrane Science*, 587, 117136.
11. Yu, Y., Zhou, Z., Huang, G., Cheng, H., Han, L., Zhao, S., Meng, F., 2022. Purifying water with silver nanoparticles (AgNPs)-incorporated membranes: Recent advancements and critical challenges. *Water Research*, 222, 118901.
12. Preda, N., Costas, A., Beregoi, M., Apostol, N., Kuncser, A., Curutiu, C., Enculescu, I., 2020. Functionalization of eggshell membranes with CuO–ZnO based p–n junctions for visible light induced antibacterial activity against *Escherichia coli*. *Scientific Reports*, 10(1), 20960.
13. Padovani, G.S., Sanches, A.O., Moura Aouada, M.R., Malmonge, L.F., de Paula, F.R., 2024. Photocatalytic and antimicrobial efficacy of PVDF/TiO₂ membranes fabricated by solution blow spinning. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(1), e54761.
14. Silva, M.A., Felgueiras, H.P., De Amorim, M.T.P., 2020. Carbon based membranes with modified properties: Thermal, morphological, mechanical and antimicrobial. *Cellulose*, 27, 1497-1516.
15. Luo, D., Wang, C., Tong, Y., Liu, C., Xiao, Y., Zhu, Z., Wang, Y., 2020. An NIF-doped ZIF-8 hybrid membrane for continuous antimicrobial treatment. *RSC Advances*, 10(13), 7360-7367.
16. Geng, Q., Dong, S., Li, Y., Wu, H., Yang, X., Ning, X., Yuan, D., 2022. High-performance photoinduced antimicrobial membrane toward efficient PM_{2.5}-0.3 capture and oil-water separation. *Separation and Purification Technology*, 284, 120267.
17. Jackson, J.C., Camargos, C.H., Liu, C., Martinez, D.S., Paula, A.J., Rezende, C.A., Faria, A.F., 2024. Antimicrobial activity of thin-film composite membranes functionalized with cellulose nanocrystals and silver nanoparticles via one-pot deposition and layer-by-layer assembly. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 10(3), 639-651.
18. Homaeigohar, S., Boccaccini, A.R., 2020. Antibacterial biohybrid nanofibers for wound dressings. *Acta biomaterialia*, 107, 25-49.
19. Chouhan, D., Chakraborty, B., Nandi, S.K., Mandal, B.B., 2017. Role of non-mulberry silk fibroin in deposition and regulation of extracellular matrix towards accelerated wound healing. *Acta biomaterialia*, 48, 157-174.
20. Paskiabi, F.A., Bonakdar, S., Shokrgozar, M.A., Imani, M., Jahanshahi, Z., Shams-Ghahfarokhi, M., Razzaghi-Abyaneh, M., 2017. Terbinafine-loaded wound dressing for chronic superficial fungal infections. *Materials Science and Engineering: C*, 73, 130-136.
21. Bulman, S.E., Tronci, G., Goswami, P., Carr, C., Russell, S.J., 2017. Antibacterial properties of nonwoven wound dressings coated with Manuka honey or methylglyoxal. *Materials*, 10(8), 954.
22. Liakos, I., Rizzello, L., Hajiali, H., Brunetti, V., Carzino, R., Pompa, P.P., Mele, E., 2015. Fibrous wound dressings encapsulating essential oils as natural antimicrobial agents. *Journal of Materials Chemistry B*, 3(8), 1583-1589.
23. Shan, Y.H., Peng, L.H., Liu, X., Chen, X., Xiong, J., Gao, J.Q., 2015. Silk fibroin/gelatin electrospun nanofibrous dressing functionalized with astragaloside IV induces healing and anti-scar effects on burn wound. *International Journal of Pharmaceutics*, 479(2), 291-301.
24. Banerjee, J., Biswas, S., Madhu, N.R., Karmakar, S.R., Biswas, S.J., 2014. A better understanding of pharmacological activities and uses of phytochemicals of *Lycopodium clavatum*: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 3(1), 207-210.
25. Orhan, I., Özçelik, B., Aslan, S., Kartal, M., Karaoglu, T., Şener, B., Choudhary, M.I., 2007. Antioxidant and antimicrobial actions of the clubmoss *Lycopodium clavatum* L.. *Phytochemistry Reviews*, 6, 189-196.
26. Dymek, A., Widelski, J., Wojtanowski, K.K., Płoszaj, P., Zhuravchak, R., Mroczek, T., 2021. Optimization of pressurized liquid extraction of Lycopodiaceae alkaloids obtained from two *Lycopodium* species. *Molecules*, 26(6), 1626.
27. Roby, M.H.H., Sarhan, M.A., Selim, K.A.H., Khalel, K.I., 2013. Evaluation of antioxidant activity, total phenols and phenolic compounds in thyme (*Thymus vulgaris* L.), sage (*Salvia officinalis* L.), and marjoram (*Origanum majorana* L.) extracts. *Industrial Crops and Products*, 43, 827-831.
28. Wang, C., Chien, H.S., Hsu, C.H., Wang, Y.C., Wang, C.T., Lu, H.A., 2007. Electrospinning of polyacrylonitrile solutions at elevated temperatures. *Macromolecules*, 40(22), 7973-7983.

29. Nasouri, K., Shoushtari, A.M., Kafrou, A., 2012. Investigation of polyacrylonitrile electrospun nanofibres morphology as a function of polymer concentration, viscosity and Berry number. *Micro & Nano Letters*, 7(5), 423-426.
30. Wu, M., Wang, Q., Li, K., Wu, Y., Liu, H., 2012. Optimization of stabilization conditions for electrospun polyacrylonitrile nanofibers. *Polymer Degradation and Stability*, 97(8), 1511-1519.
31. Zhang, C., Yang, Q., Zhan, N., Sun, L., Wang, H., Song, Y., Li, Y., 2010. Silver nanoparticles grown on the surface of PAN nanofiber: Preparation, characterization and catalytic performance. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 362(1-3), 58-64.
32. Higashi, S., Hirai, T., Matsubara, M., Yoshida, H., Beniya, A., 2020. Dynamic viscosity recovery of electrospinning solution for stabilizing elongated ultrafine polymer nanofiber by TEMPO-CNF. *Scientific Reports*, 10(1), 13427.
33. Stepanyan, R., Subbotin, A.V., Cuperus, L., Boonen, P., Dorsch, M., Oosterlinck, F., Bulters, M.J.H., 2016. Nanofiber diameter in electrospinning of polymer solutions: Model and experiment. *Polymer*, 97, 428-439.
34. Gu, S.Y., Ren, J., Vancso, G.J., 2005. Process optimization and empirical modeling for electrospun polyacrylonitrile (PAN) nanofiber precursor of carbon nanofibers. *European Polymer Journal*, 41(11), 2559-2568.
35. Ben-Sasson, M., Lu, X., Bar-Zeev, E., Zodrow, K.R., Nejati, S., Qi, G., Elimelech, M., 2014. In situ formation of silver nanoparticles on thin-film composite reverse osmosis membranes for biofouling mitigation. *Water Research*, 62, 260-270.
36. Perreault, F., Jaramillo, H., Xie, M., Ude, M., Nghiem, L.D., Elimelech, M., 2016. Biofouling mitigation in forward osmosis using graphene oxide functionalized thin-film composite membranes. *Environmental Science & Technology*, 50(11), 5840-5848.

Multi-Model Predictive Maintenance: Overview and A Linear System Perspective

Uğur YILDIRIM^{1,a}, Shahin MAMMADOV^{2,b}, Hüseyin AFŞER^{1,c}

¹Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering, Adana, Türkiye

²Tomarok Engineering Incorporated, İstanbul, Türkiye

^aORCID: 0000-0003-1131-8893; ^bORCID: 0000-0002-3112-2188; ^cORCID: 0000-0002-6302-4558

Article Info

Received : 08.07.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606126

Corresponding Author

Uğur YILDIRIM

uyildirim@atu.edu.tr

Keywords

Predictive maintenance

Linear classification

Multi-model approaches

Remaining useful life

How to cite: YILDIRIM, U., MAMMADOV, S., AFŞER, H., (2024) Multi-Model Predictive Maintenance: Overview and a Linear System Perspective. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 1039-1052.

ABSTRACT

Multi-model predictive maintenance is a recently trending approach where information from different inputs and models are processed in a unified fashion in order to provide better failure prognostics. Multi-model systems aim to make clever use of labeled or unlabeled sensor observations, knowledge bases and device specific constraints. In this paper we present an overview for both single and multi-model approaches and provide a linear system perspective. The proposed system leverages linear classification and prediction methods such that the measurement space is partitioned via linear boundaries into nominal and failure operation regions and the distances from boundaries are tracked for providing remaining useful life calculations. The adopted linear approach simplifies the design process and it can efficiently incorporate different modalities in order to enhance the prediction performance. Also, the proposed method is simulated in generated dataset.

Çok Modelli Kestirimci Bakım: Genel Bakış ve Doğrusal Sistem Perspektifi

Makale Bilgileri

Geliş : 08.07.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606126

Sorumlu Yazar

Uğur YILDIRIM

uyildirim@atu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Bakım tahmini

Lineer sınıflandırma

Çoklu-model yaklaşımı

Kalan faydalı ömür

Atıf şekli: YILDIRIM, U., MAMMADOV, S., AFŞER, H., (2024) Multi-Model Predictive Maintenance: Overview and a Linear System Perspective. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 1039-1052.

ÖZ

Çok modelli bakım tahmini, daha iyi arıza öngörülerini sağlamak amacıyla farklı girdilerden ve modellerden gelen bilgilerin birleşik bir şekilde işlendiği, son zamanlarda trend olan bir yaklaşımdır. Çok modelli sistemler, etiketli veya etiketsiz sensör gözlemlerinden, bilgi tabanlarından ve cihaza özgü kısıtlamalardan akıllıca yararlanmayı amaçlamaktadır. Bu yazıda hem tek hem de çoklu model yaklaşımlarına genel bir bakış sunuyoruz ve doğrusal bir sistem perspektifi sunuyoruz. Önerilen sistem, ölçüm alanının doğrusal sınırlar aracılığıyla nominal ve arıza operasyon bölgelerine bölünmesini ve kalan faydalı ömür hesaplamalarını sağlamak için sınırlardan uzaklıkların takip edilmesini sağlayacak şekilde doğrusal sınıflandırma ve tahmin yöntemlerinden yararlanır. Benimsenen doğrusal yaklaşım, tasarım sürecini basitleştirir ve tahmin performansını artırmak için farklı yöntemleri verimli bir şekilde birleştirebilir. Ayrıca, sunulan metot üretilmiş bir veri setinde simüle edildi.

1. INTRODUCTION

Technological progress has initiated the onset of the Fourth Industrial Revolution, often denoted as Industry 4.0, distinguished by the smooth fusion of physical and digital manufacturing systems. [1]. This transformation has given rise to a new era of industrial operations, marked by increased connectivity, data abundance, efficient inventory management, customization, and precision-controlled production processes [2-4]. Industry 4.0, initially coined as "the fourth industrial revolution" in Germany, has fundamentally altered the landscape of industrial processes [5]. It comprises three main dimensions: self-awareness, self-predictive for components; self-prediction, self-comparison for machines; self-configuration, self-maintenance, and self-organization for productive systems [5-6]. A key aspect of Industry 4.0 is the availability of vast amounts of data, which empower humans and machines to make informed, predictive decisions [7].

Effective maintenance practices minimize costs, prevent unplanned production stoppages, and sometimes extend the useful lifetime of industrial devices. As a result of the concerns and efforts of researchers, engineers, technicians, and specialists, maintenance procedures have changed. Figure 1 shows how this development has changed over time. Corrective maintenance (CM), often known as "run-to-failure," is the most basic method and entails only replacing or fixing a part when it is broken. Machinery cannot function without assistance [8].

The substantial expenses associated with unanticipated production pauses led CM to develop proactive strategies. Preventive maintenance (PM), which entails routine inspections by trained experts and replacement of parts before a severe breakdown occurs, was the first to arise. Equipment's manufacturers often offer this replacement at regular intervals or after a certain number of operating cycles. This can force the replacement of the components sooner or later. Whereas the first scenario results in greater maintenance costs by replacing parts that may perform a significantly higher number of operating cycles, the second scenario could have more severe repercussions because CM action is required [9,10].

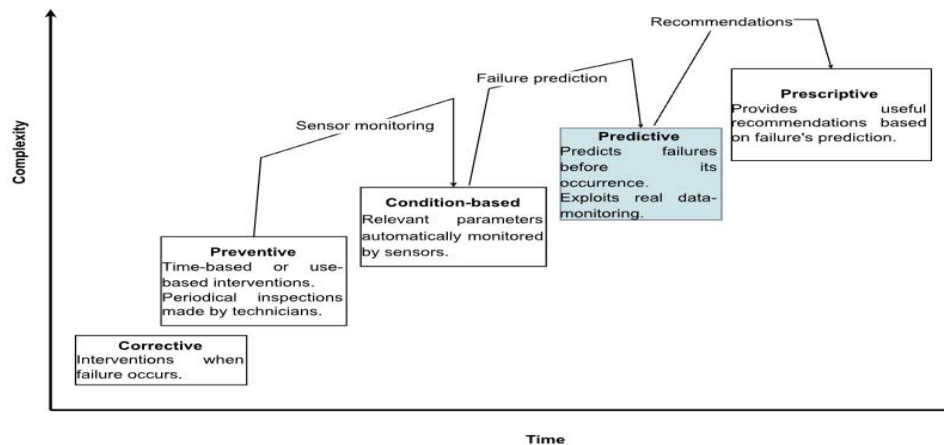


Figure 1. Development of maintenance techniques over time [8]

Condition-based maintenance (CBM) method has evolved with technical advancements within the realm of Industry 4.0, and the evolution of the IoT [11]. By using sensors and devices that can measure, monitor, and process signals that indicate the physical characteristics of industrial equipment, such as acoustic signals, current, voltage, temperatures, forces, vibrations, etc., inspections conducted by technicians and specialists have been automated. With this approach, interventions can be based on sensor values, and when a value deviates from the set bounds, actions can be initiated. Predictive maintenance (PdM) is an advanced and highly effective strategy that has evolved from CBM, seamlessly blending IoT and Cyber-Physical Systems (CPS) principles with expertise spanning automation, engineering, information technology, and data analytics. This integration allows PdM to accurately forecast failures, estimate the remaining useful life (RUL) of industrial assets, and efficiently plan maintenance activities. [12,13]. Conversely, prescriptive maintenance takes things a step further because it uses predictions to provide pertinent recommendations for addressing the failure mode and increasing the RUL [14,15].

This paradigm shift underscores the pivotal role of predictive maintenance (PdM) in optimizing industrial operations. PdM harnesses historical data, models, and domain knowledge to forecast trends, behavior patterns, and correlations. Utilizing statistical or machine learning models, PdM anticipates impending equipment failures, enhances maintenance decision-making, and minimizes downtime [16]. As Industry 4.0 continues to evolve, new concepts such as the Industrial IoT and CPS have emerged. IoT leverages IoT technologies within industrial settings, incorporating Machine Learning (ML) and Big Data to efficiently manage data and enhance decision making [12]. CPS, introduced by the National Science Foundation (NSF) in the United States, focuses on the next generation of engineered systems and relies on detailed information regarding machinery and physical processes [7]. The integration of these concepts forms the foundation of the burgeoning field of PdM, which remains a critical focus of Industry 4.0. PdM is instrumental in identifying equipment faults, reducing maintenance costs, and avoiding production disruptions. However, implementing PdM presents challenges, such as erroneous data measurements, the need for real-time processing of immense data volumes, and adaptation to diverse industrial environments [5,17-19].

2. SINGLE-MODEL APPROACHES TO PREDICTIVE MAINTENANCE

2.1. Physics-Based Methods

In physics-based methods, degradation of the system is observed based on the laws of physics. The closer the physics-based method is to the real-life model, the more accurate the performance of the method. However, it is quite difficult to achieve this goal. In the gyroscope sensor drift problem [20], the physics-based method is more accurate than the data-driven algorithm as a prognostic method. The majority of physics-based methods aim to perform prognostic modelling. The remaining useful life of lithium-ion batteries [21], filter clogging [22], damaged rotor cages [23], industrial robot health [24], solenoid valves [25] and boiler heat exchanger tubes [26] have been prognosticated to date.

2.2. Knowledge-Based Methods

In the context of predictive maintenance, knowledge-based models are related to computer systems that generate diagnoses and forecasts based on a body of experience. These models are derived from guidelines, data, or examples gathered several years of use and preservation of the technical system. Experiences can be shown in a variety of ways, including guidelines, data, or examples that demonstrate the skills and understanding of the maintenance staff. Experiences gathered over time are utilized to pinpoint errors, explain how parts or systems deteriorate, and forecast future problems. Knowledge-based models can estimate the system's present state of health and forecast future maintenance requirements by examining historical data and trends [27,28].

To facilitate care, the inference process in diagnostics and prognostics is automated using computational intelligence approaches. These methods use experience and knowledge stored in knowledge-based models to provide precise forecasts and diagnoses. Computational intelligence can be used to streamline and improve the efficiency of the maintenance process, which will improve system performance and minimize downtime. Research on knowledge-based models is crucial in the care context [27,28]. SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) systems are good examples of such models.

SCADA systems are important technologies used to monitor and control industrial processes and to collect data. These systems generally identify important situations in the processes that use alarm and trip values. Alarm values warn operators if a certain parameter goes out of bounds, whereas trip values automatically shut down the system in cases of danger. This information is critical to the safety and efficiency of these processes. Therefore, the correct setting and use of alarm and trip values in SCADA systems are vital for the safety and performance of industrial facilities. It is widely used in knowledge-based models of alarm and trip values of SCADA systems.

Maintenance decision systems are increasingly used in industrial and healthcare fields. These systems utilize artificial intelligence techniques to maintain and troubleshoot complex equipment. Rule-based reasoning (RBR) and case-based reasoning (CBR) are two of the AI approaches commonly used in this field. While RBR uses rules to determine actions based on specific circumstances, CBR aims to solve new problems by finding similar situations and learning from past cases [29].

The RBR can handle unknown errors by specifying general rules to determine appropriate actions based on specific circumstances. In contrast, CBR identifies similar situations and generates solutions using tacit knowledge from previous experiences [29]. Both methods have advantages: RBR provides a strong structure with easily understandable and independent rules, whereas CBR provides flexibility in problem-solving by contributing to the incremental learning process of previous experiences [30].

These two approaches can be used to improve the effectiveness of maintenance decision systems. The explainability and high efficiency of RBR with specific rules, and the ability of CBR to solve problems with tacit knowledge from previous experience, make systems more intelligent and adaptive. This integration can be applied to a wide range of applications, from predicting equipment failures in industrial plants to disease diagnosis in healthcare organizations [29,30]. An example of a rule-based method is the intelligent fault diagnosis model for power equipment based on case-based reasoning (IFDCBR), which builds a case base of the equipment and uses support vector machine (SVM) regression analysis to generate the equipment condition fingerprint [31]. An example of a case-based method is the integration of case-based reasoning with rule-based reasoning in the design of a care decision system that proposes a care decision intelligent reasoning method based on the health status [29].

2.3. Data-Driven Methods

Owing to technological advances in computational power and enormous amounts of available data from technical systems, data-driven methods have been used for various motives. RUL of components, degradation analysis, the current health state are the examples of some purposes.

Statistical, stochastic, and machine learning methods are the three main data-driven methods classes. Statistical methods investigate the manner in which random variables are based on datasets using the probability theory. Similar to statistical methods, stochastic methods also use the probability theory and investigate the evolution of random variables over time. Machine-learning methods are built models that capture complex relationships from data.

In the area of predictive maintenance, statistical methods are mostly used for prognostic applications. The duties of these methods are degradation analyses and RUL of the components. The first statistical method is regression analysis, which is used to determine the decrease in the observations. Berecibar et al. estimated the health of Graphite/Nickel Manganese Cobalt Oxide cells by using supervised learning and regression [32]. The remaining useful life of aluminium plates was analyzed using the autoregression method, based on its crack growth [33]. Wan-Jui Lee detects air leakage anomaly of breaking pipes on train and calculates the remaining life of pipes with the help of regression analyze [34]. Downey et al. combined regression with physic-based method for prognostics of lithium-ion battery [21]. Xu et al. expanded the use of regression analysis to multi-component systems [35]. Coble and Hines combined regression with a Bayesian model for the degradation of jet engines [36]. As a second statistical method, autoregressive-moving average method (ARMA) forecasts the future values of a data series. ARMA methods are only used for calculating the remaining life of components such as semiconductor switches [37], gear vibration signals [38,39], bearings [40]. The last statistical method is the Bayesian methods, which mostly used as an auxiliary tool along with other data-driven methods to manage uncertainty. Bayesian statistical methods estimate the conditional probabilities of hypothesis-based probabilities. Zhang et al. used Bayesian analysis as a degradation process in a semiconductor manufacturing facility [41]. Fault diagnosis for nonlinear gas turbine engines [42], prognosis of high-voltage circuit breaker failure [43] and remaining useful life of circuit boards [44] are some examples of Bayesian statistical methods. In addition, the Bayesian method can be used to update model coefficients using the autoregressive method [45].

The aim of application of the stochastic methods are diagnostics and prognostics. In predictive maintenance, stochastic methods provide convenient regression capabilities for degradation modelling and RUL estimation. However, these methods have many disadvantages, such as high computational power requirements and uncertainty management. Gaussian processes are a part of stochastic methods that are simple to implement in small or large-dimensional datasets. The fault diagnosis of wind turbines [46] and RUL prediction of slow-speed bearings [47] are two examples of Gaussian processes. In the Markov stochastic process, the present state of the process is independent of past and is dependent on the future. Markov chains and hidden Markov chains are used for RUL [48,49], degradation analyse [41], deterioration forecasting [50] and real-time failure prognosis [51].

Machine learning (ML) methods are used specialized learning algorithms to build models from data [52]. The main advantage of these methods is that they capture unseen relationships among data. In addition, dimension size is not crucially important in the use of these methods. As an important point, choosing ML method depends on the application and the available data [53]. The main disadvantage of ML methods is that the working principle of the model is hidden; therefore, human intervention cannot be applied.

In the area of PdM, there are five most commonly used ML configurations. First, multilayer perceptron neural networks are used for fault identification in wind turbine gearboxes [54], combustion engines [55], nuclear power plants [56] and rotary machines [57]. Second, recurrent neural networks have been applied to fault identification in industrial plants [58], gear boxes [59], and RUL estimation of jet engines [60], rolling bearings [61], and mill fans [62]. As a third configuration, convolutional neural networks are used for RUL estimation in turbofan engines [63], bearings [64] and in the fault diagnosis of bearings [65] and gearboxes [66]. Fourth, self-organizing maps have been applied to qu degradation modelling in railway point machines [67], cyber-physical systems [68], jet engines [69], and lithium-ion batteries [70]. In addition, there is a configuration for high-speed train bogies that aims at both fault detection and degradation modelling [71]. The final configuration is support vector machines, which are used for fault detection in electrical equipment [72], the chemical industry [73], management systems [74], and Tennessee Eastman process data [75]. Also, health estimation was predicted for battery cells with a support vector machine configuration [32].

2.4. Shortcomings of Single-Method Approaches

The advantages and disadvantages of single-method approaches are explained in the previous sections. Each method has different strengths. In general, single-models are mostly applied to simple specialized equipment. In predictive maintenance, combinations of these methods are preferred to increase the performance of more complex systems. Each combined method was analysed in [76].

However, there are a few papers that use all the methods together [77,78]. These multi-method approaches are extremely difficult to apply because of the complexity of the system.

3. MULTI-MODEL APPROACHES TO PREDICTIVE MAINTENANCE

There has been a growing adoption of multi-model predictive maintenance, a sophisticated approach that utilizes various data sources to predict equipment failures before they occur. Some examples of this approach as follows.

The initial example outlines a methodology that merges data-driven techniques with experience-based methods for Prognostics and Health Management (PHM) of roller bearings. The proposed methodology uses time-domain features as health indicators by extracting them from vibration signals. The degradation states in the bearings are detected by artificial ant clustering, which is an unsupervised classification technique. The approximation of the next degradation state is provided by the hidden Markov models. Furthermore, the remaining time before the next degradation state was predicted through multi-stage time-series prediction and an adaptive neuro-fuzzy inference system. The proposed methodology is validated by experimental results based on a set of bearing failure data, and shows that data-driven and experience-based approaches improve the PHM of roller bearings [79].

In the second example, a three-dimensional finite element analysis model of a solenoid valve was created using the ANSYS Workbench software, in which the temperature and mechanical stress fields were accurately calculated. The accuracy of the simulation results was verified through accelerated life tests. Furthermore, an accelerated life test for the solenoid valve was designed based on the finite element simulation results, and a comparison of the average temperature rise between the simulation and the test showed good agreement. In this paper, a prognostic method for the fault detection and diagnosis of solenoid valves based on the electrical resistance of coils and temperature change is proposed. Moreover, an optimized design of the coils is proposed to improve the reliability of the health management of the solenoid valve. Finally, the study used a direct-acting solenoid valve as an example for modeling and analysis and presented information on the temperature and stress distribution of the valve [25].

The third example is that of a practical prognostic tool for effective condition-based maintenance. A proposed prediction model integrates fuzzy sets and Markov Chain to forecast equipment performance degradation. The exhaust gas temperature margin is considered as a performance indicator in a numerical example. The combination of Fuzzy-Markov chain streamlines computational processes, delivering precise prediction outcomes even with limited data samples and incomplete information. The prediction model outperforms linear regression, nonlinear regression, and Gray Model (1,1) in dealing with nonlinear and randomly fluctuating disturbance data. The implementation process involves partitioning the sample into fuzzy states and constructing a subdegree matrix. The model was validated using historical data and effective predictions were obtained [80].

The Fourth example proposes a knowledge-based prognostic framework for railroad track geometry degradation. The methodology was combined with a physics-based model for track degradation within a filtering-based prognostic algorithm for online data for track settlement. The suggested approach was illustrated and examined through a case study utilizing published data from a laboratory simulation of railway track settlement under cyclic loads. The findings indicate that the proposed methodology can offer precise forecasts of the system's RUL following a model training period of around 10% of the process lifetime [81].

As exemplified by these studies, the integration of multimodel predictive maintenance represents a paradigm shift in industrial maintenance practice. By harnessing the wealth of data available from diverse sources, organizations can unlock unprecedented insights into equipment health, enabling proactive interventions, and safeguarding operational continuity. As we venture further into the era of Industry 4.0, embracing such innovative approaches will be pivotal for sustaining competitiveness and driving transformative growth across industries.

4. MULTI-MODEL APPROACHES TO PREDICTIVE MAINTENANCE

4.1. Definition of the Problem

We assume that the equipment for predictive maintenance purposes has D , $D \geq 1$, sensor/s. $X = [x_1, x_2, \dots, x_D] \in R^D$ where X denotes is readings from sensors. These sensors can measure the power, temperature, pressure, density, vibration, flow. For each physical value, more than one sensor was preferred for measurement. In practical predictive maintenance applications, $D \geq 10$ is common. Let us assume that estimation of error can be extracted from sensor readings, and the decent working range in D dimension measurement space is $R_{nom} \in R^D$. The boundaries of the area specified by physical limitations, experience from experts and previous warning/alarm/trip warning data from the past.

Let us consider X_1, X_2, \dots, X_t , for periodic sensor readings as a time series. Under the instantaneous $X_t \in R_{nom}$ condition, the predictive maintenance problem is

$$\hat{T} = \underset{T}{\text{ARGMIN}} X_{t+T} \notin R_{nom}. \tag{1}$$

where \hat{T} denotes the remaining useful life in this estimation.

All different types of equipment failures are assumed in the measurement area R^D / R_{nom} . For this reason, breakdown types could not be identified in this setup. The predictive maintenance problem is addressed in this study. If the failure identification clear in the measure space, different failures, K , $K \geq 1$, can estimate the failures, F_1, F_2, \dots, F_K . The failure regions can be found with the below formula,

$$R_{\{F_1\}}, R_{\{F_2\}}, \dots, R_{\{F_K\}}, i = 1, 2, \dots, K, \bigcup_{i=1}^K R_{Fi} = R^D - R_{nom}'. \tag{2}$$

In this regard, the smallest T_i value which provide the X_{t+T_i} equality presents the remaining useful life until F_i failure occurs.

4.2. Classification

In the described problem, linear classification methods are useful for the labelled data of the system. This is because the complexity of linear classification algorithms is lower than that of nonlinear algorithms. Therefore, linear classification algorithms are preferred for real-time systems. As an example of a classification algorithm, the support vector machine (SVM) determines the optimum boundary between classes. Given a set of failure samples from sensors x_1, x_2, \dots, x_D and their class labels y_1, y_2, \dots, y_K .

In the support vector machine, we calculate the length of vector for D sensors,

$$\|x\| = \sqrt{\{x_1^2 + x_2^2 + \dots, x_D^2\}}. \quad (3)$$

and the direction of the vector is, X ,

$$X = \left(\frac{x_1}{\|x\|}, \frac{x_2}{\|x\|}, \dots, \frac{x_D}{\|x\|} \right). \quad (4)$$

The hyperplane is described as,

$$a_1x_1 + a_2x_2, \dots, a_Dx_D = b, \quad (5)$$

where b is the bias parameter. And we define $w = (a_1, a_2, \dots, a_D)$, we get,

$$w^T X + b = 0. \quad (6)$$

After calculating the hyperplane, we can use it to make predictions for failure classes. And the hypothesis function h is,

$$h(x_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } wx + b \geq 0 \\ -1 & \text{if } wx + b < 0 \end{cases} \quad (7)$$

In the described problem, there are $K + 1$ classes owing to K failure areas and a nominal area. The measurement space was divided into $K + 1$ regions using the One-to-One SVM approach. The number of SVM classifiers is $(K + 1)(K + 2)/2$ in this approach. Each classifier separates only two classes, neglecting the third. After the optimization of the SVM classifiers, the measurement space was described for the nominal and failure areas.

As an alternative to SVM algorithms, multi-class linear discriminant analysis (MCDLA) is used to find differences between classes of data. Although it could be used for dimensionality reduction before classification, linear discriminant analysis was used to classify the failure regions in this study. MCLDA is a generalization of a two-class linear discriminant analysis. For each $K + 1$ region, MCLDA must be used separately to determine the weights, w_K .

MCLDA is based on the analysis of two scatter matrices, a within-class scatter matrix and a between-class scatter matrix. Given a set of failure samples from the sensors $X = [x_1, x_2, \dots, x_D]$ and their class labels y_1, y_2, \dots, y_D .

The within-class matrix is defined as:

$$S_w = \sum_{i=1}^D (X_i - \mu_{y_i})(X_i - \mu_{y_i})^T. \quad (8)$$

And the between-class scatter matrix is defined as:

$$S_b = \frac{1}{K+1} \sum_{k=1}^{K+1} n_k (\mu_k - \mu) (\mu_k - \mu)^T. \quad (9)$$

where, $K + 1$ is the number of failures and nominal areas, μ_k is the sample mean of the K th failure, μ is the overall sample mean, and n_k is the number of samples in K th class. Then, multi-class LDA can be

formulated as an optimization problem to find a set of linear combinations (with coefficients w) that maximizes the ratio of the between-class scattering to the within-class scattering, as

$$\widehat{w}_K = \underset{w_K}{\text{ARGMAX}} \frac{w_K^T S_b w_K}{w_K^T S_w w_K} \tag{10}$$

After finding \widehat{w}_K , decision criterion for i th and j th classes is,

$$\widehat{w}_K^T X > c \text{ where } c = \frac{1}{2} \widehat{w}^T (\mu_i + \mu_j). \tag{11}$$

4.3. Remaining Useful Life Estimation

The remaining useful life of the physical parts in the system decreases with time. The decreasing trend of the performance of the physical parts over time is mostly known in datasheets. The sensor measurements easily check the failure area owing to these limitations. The least-squares lining method is useful for these types of failure.

As a classification problem, it could be solved by statistical and linear classification methods. The measuring space, $X = [x_1, x_2, \dots, x_D] \in R_D$ is divided regions like,

$$a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_D x_D \leq b \text{ where } a_i, b \in R, i = 1, \dots, D, \tag{12}$$

These boundaries are equal to hyper-spaces in measurement space.

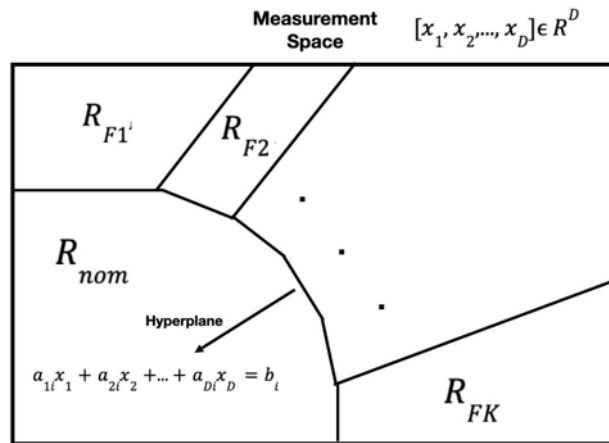


Figure 2. Failure area classification in measurement space

The working point of the system is moving from nominal area, R_{nom} , to failure areas, $R_{F1}, R_{F2}, \dots, R_{FK}$ in the progress of time. The visualization of the failure areas in Figure 2. The boundary between R_{nom} and R_{Fi} regions is described as,

$$a_{1i}x_1 + a_{2i}x_2 + \dots + a_{Di}x_D = b_i. \tag{13}$$

$A_i^t X = b_i$ where

$$A_i = [a_{1i}x_1 + a_{2i}x_2 + \dots + a_{Di}x_D]. \tag{14}$$

The distance between working point X_t and the edge of the boundary is calculated with

$$d_{i(t)} = \frac{|A_i^t X + b_i|}{\|A_i\|}. \tag{15}$$

In the align 15, $\| \cdot \|$ denotes the l_2 norm distance.

Let's assume that failure region R_{FK} for $k, k \geq 1$ regions and $i, i \geq 1$ sensors. For simplifying and fasting the system, let's take start the sampling from $t - N$ through the time t for each sensor. So, our sampling space of observations becomes to N . The slope of the fitting line [82], $\hat{d}_i(t) = c_1 t + c_2$, is

$$c_1 = \frac{N \sum_{j=t-N}^t j d_i(j) - \sum_{j=t-N}^t j \sum_{j=t-N}^t d_i(j)}{N \sum_{j=t-N}^t j^2 - (\sum_{j=t-N}^t j)^2}, \quad (16)$$

and bias parameter is

$$c_2 = \frac{\sum_{j=t-N}^t d_i(j) - c_1 \sum_{j=t-N}^t j}{N}. \quad (17)$$

R_{FK} boundaries can be estimated according to the parameters c_1 and c_2 .

After the calculations of predicted fitting lines, $\hat{d}_i(t)$, the align (15) allows us to estimate distances between failure regions R_{FK} and R_{nom} . And then, the estimation of the remaining times, T_i , can be calculated as $\hat{d}_i(t) = 0$, if and only if $X_t \in R_{FK}$. The failing time estimations of each region, T_i , are predicted according to fitting lines of $\hat{d}_i(t)$.

The proposed system and data processing pipeline is depicted in the Figure 3. In this paper, we have proposed a simple method for remaining useful life prediction based on Least Squares formulation. Alternatively, the evolution of $\hat{d}_i(t)$, $i = 1, \dots, K$, could be modeled as an ARMA series or one can obtain a linear regression for it from $\hat{d}_i(t)$. Finally, the physical and process specifications of critical equipments could be modeled by Wiener or Kalman based approaches via the distances to hyper-planes, $\hat{d}_i(t)$.

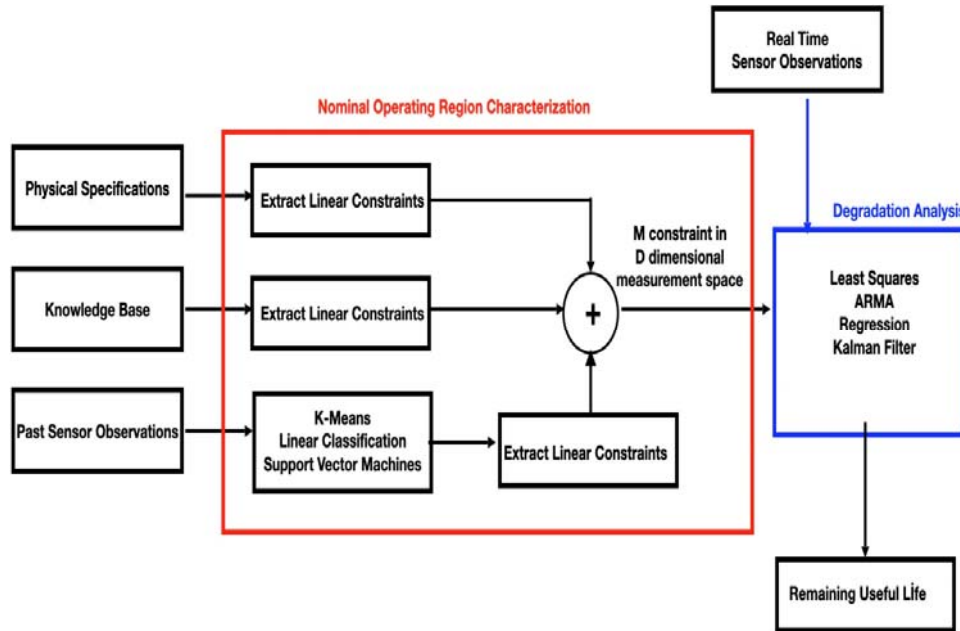


Figure 3. The proposed multi-model system and pipeline

5. SIMULATIONS

To simulate the problem defined in this article, a dataset was generated that is compatible with any device. The dataset simulates the Remaining Useful Life (RUL) value, which decreases over time from 100 to 0. For this simulation, the number of sensors ($D = 10$) used to observe the device was set at 10. The dataset was created by generating 100 different scenarios, resulting in a total of $100 \times 100 \times 10$ data points. Each of these scenarios represents a unique situation or condition that the device might encounter. To introduce randomness into the dataset, normally distributed Gaussian random variables were used. These variables were characterized by a mean (μ) of 0 and a standard deviation (σ) of 1.

Moreover, since all 10 sensors were observing the same device, it was essential to account for the correlation between their readings. To achieve this, Spearman's rho, a measure of rank correlation, was set at 0.9. This high correlation coefficient ensures a significant degree of dependence among the sensors, reflecting realistic scenarios where sensors monitoring the same device often exhibit correlated behavior. This approach provides a robust dataset with realistic and correlated sensor readings, which can be used to simulate the defined problem effectively.

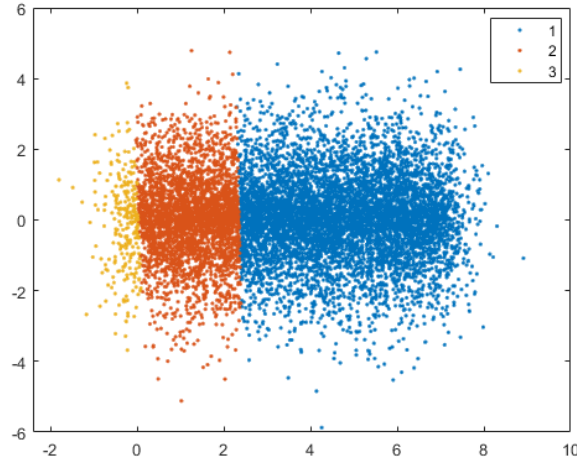


Figure 4. Distribution of generated datas and classes

For label classifications, the data was divided into three classes: nominal, warning, and failure. These classes were determined based on the RUL values as follows: 100-30 for nominal (group 1 in Fig. 4), 30-10 for warning (group 2), and 10-0 for failure (group 3). The distribution of these classes in the measurement space is illustrated in Figure 4.

The entire dataset was first subjected to dimension reduction using linear discriminant analysis and then trained with linear regression analysis. The model was tested in real-time using one of the randomly generated scenarios. The results are presented in Figure 5.

In Figure 5a, the measurement space is shown along with the data progression over time. It is evident that, over time, the data points move closer from the nominal region to the failure region. Figures 5b and 5c illustrate the distances between the working points and the two regions (warning and failure). Figures 5d and 5e display the true Remaining Useful Life (RUL) and the predicted RUL over time. These figures demonstrate the model's performance in predicting the RUL as the device transitions from nominal operation to failure.

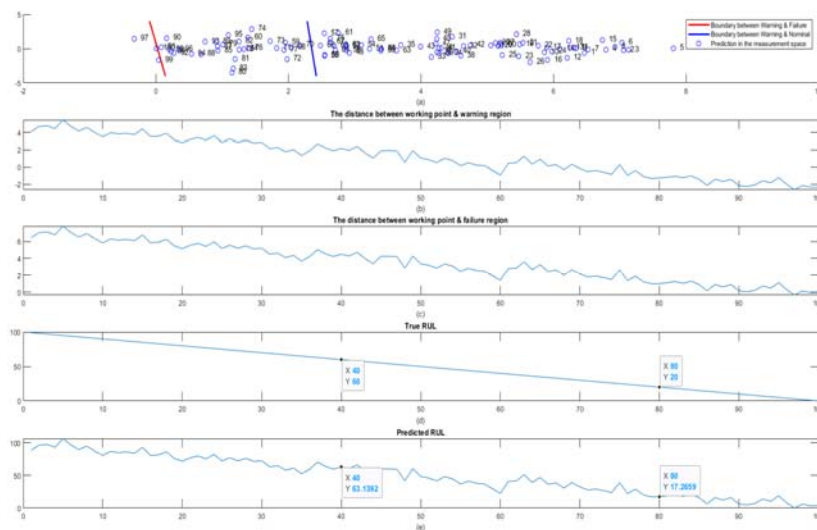


Figure 5. The simulation results for generated dataset

6. CONCLUSIONS

In this paper we have investigated the multi-model predictive maintenance problem. We have presented an overview for the single and multi model approaches and presented a problem formulation. Then, by utilising linear classification methods we have shown that the inputs from different models such as labeled/unlabeled sensor observation and expert rules can be easily incorporated into the proposed system. Finally, we have presented a simple remaining useful life calculation method by using simple least squares approach and simulated in MATLAB. We discussed the applicability of the proposed method and its generalizations.

7. REFERENCES

1. Borgi, T., Hidri, A., Neef, B., Naceur, M.S., 2017. Data analytics for predictive maintenance of industrial robots. 2017 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC_ASET), 412-417. IEEE.
2. Biswal, S., Sabareesh, G.R., 2015. Design and development of a wind turbine test rig for condition monitoring studies. In 2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC), 891-896. IEEE.
3. Peres, R.S., Rocha, A.D., Leitao, P., Barata, J., 2018. IDARTS—towards intelligent data analysis and real-time supervision for industry 4.0. *Computers in Industry*, 101, 138-146.
4. Sezer, E., Romero, D., Guedea, F., Macchi, M., Emmanouilidis, C., 2018. An industry 4.0-enabled low cost predictive maintenance approach for smes. In 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), 1-8. IEEE.
5. Lee, J., Bagheri, B., Kao, H.A., 2014. Recent advances and trends of cyber-physical systems and big data analytics in industrial informatics. In International Proceeding of Int Conference on Industrial Informatics (INDIN), 1-6.
6. Jin, W., Liu, Z., Shi, Z., Jin, C., Lee, J., 2017. CPS-enabled worry-free industrial applications. In 2017 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin), 1-7. IEEE.
7. Gunes, V., Peter, S., Givargis, T., Vahid, F., 2014. A survey on concepts, applications, and challenges in cyber-physical systems. *KSII Trans. Internet Inf. Syst.*, 8(12), 4242-4268.
8. Nunes, P., Santos, J., Rocha, E., 2023. Challenges in predictive maintenance—A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 40, 53-67.
9. Hao, Q., Xue, Y., Shen, W., Jones, B., Zhu, J., 2010. A decision support system for integrating corrective maintenance, preventive maintenance, and condition-based maintenance. In *Construction Research Congress 2010: Innovation for Reshaping Construction Practice*, 470-479.
10. Mobley, R.K., 2002. *An introduction to predictive maintenance*. Elsevier.
11. Lee, J., Kao, H.A., Yang, S., 2014. Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment. *Procedia Cirp*, 16, 3-8.
12. Bagheri, B., Yang, S., Kao, H. A., Lee, J., 2015. Cyber-physical systems architecture for self-aware machines in industry 4.0 environment. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1622-1627.
13. Unnikrishnan, A., 2017. Moving towards industry 4.0: a systematic. *Int. J. Pure Appl. Math.*, 117(20), 929-936.
14. Fox, H., Pillai, A.C., Friedrich, D., Collu, M., Dawood, T., Johanning, L., 2022. A review of predictive and prescriptive offshore wind farm operation and maintenance. *Energies*, 15(2), 504.
15. Lepenioti, K., Bousdekis, A., Apostolou, D., Mentzas, G., 2020. Prescriptive analytics: Literature review and research challenges. *International Journal of Information Management*, 50, 57-70.
16. Carvalho, T.P., Soares, F.A., Vita, R., Francisco, R.D.P., Basto, J.P., Alcalá, S.G., 2019. A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024.
17. Lee, J., Lapira, E., Bagheri, B., Kao, H.A., 2013. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing Letters*, 1(1), 38-41.
18. Muhuri, P.K., Shukla, A.K., Abraham, A., 2019. Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 78, 218-235.
19. O'donovan, P., Leahy, K., Bruton, K., O'Sullivan, D.T., 2015. Big data in manufacturing: A systematic mapping study. *Journal of Big Data*, 2, 1-22.

20. Jin, X., Ni, J., 2019. Physics-based Gaussian process for the health monitoring for a rolling bearing. *Acta Astronautica*, 154, 133-139.
21. Downey, A., Lui, Y.H., Hu, C., Laflamme, S., Hu, S., 2019. Physics-based prognostics of lithium-ion battery using non-linear least squares with dynamic bounds. *Reliability Engineering & System Safety*, 182, 1-12.
22. Eker, O.F., Camci, F., Jennions, I.K., 2016. Physics-based prognostic modelling of filter clogging phenomena. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 75, 395-412.
23. Climente-Alarcon, V., Nair, D., Sundaria, R., Antonino-Daviu, J.A., Arkkio, A., 2017. Combined model for simulating the effect of transients on a damaged rotor cage. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(4), 3528-3537.
24. Qiao, G., Weiss, B.A., 2018. Quick health assessment for industrial robot health degradation and the supporting advanced sensing development. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 51-59.
25. Li, J., Xiao, M., Liang, Y., Tang, X., Li, C., 2018. Three-dimensional simulation and prediction of solenoid valve failure mechanism based on finite element model. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 108(2), 022035. IOP Publishing.
26. Cholette, M.E., Yu, H., Borghesani, P., Ma, L., Kent, G., 2019. Degradation modeling and condition-based maintenance of boiler heat exchangers using gamma processes. *Reliability Engineering & System Safety*, 183, 184-196.
27. Boullart, L., Krijgsman, A., Vingerhoeds, R.A. (Eds.), 2013. *Application of artificial intelligence in process control: Lecture notes Erasmus intensive course*. Elsevier.
28. Freyermuth, B., 1992. Knowledge based incipient fault diagnosis of industrial robots. In *Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes 1991*, 369-375. Pergamon.
29. Li, S., Lv, C., Guo, Z., Wang, M., 2012. Health condition-based maintenance decision intelligent reasoning method. In *2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering*, 405-408. IEEE.
30. Vingerhoeds, R.A., Janssens, P., Netten, B.D., Fernández-Montesinos, M.A., 1995. Enhancing off-line and on-line condition monitoring and fault diagnosis. *Control Engineering Practice*, 3(11), 1515-1528.
31. Ma, G., Jiang, L., Xu, G., Zheng, J., 2015. A model of intelligent fault diagnosis of power equipment based on CBR. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.
32. Berecibar, M., Devriendt, F., Dubarry, M., Villarreal, I., Omar, N., Verbeke, W., Van Mierlo, J., 2016. Online state of health estimation on NMC cells based on predictive analytics. *Journal of Power Sources*, 320, 239-250.
33. Barraza-Barraza, D., Tercero-Gómez, V.G., Beruvides, M.G., Limón-Robles, J., 2017. An adaptive ARX model to estimate the RUL of aluminum plates based on its crack growth. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 82, 519-536.
34. Lee, W.J., 2017. Anomaly detection and severity prediction of air leakage in train braking pipes. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 8(3).
35. Xu, M., Jin, X., Kamarthi, S., Noor-E-Alam, M., 2018. A failure-dependency modeling and state discretization approach for condition-based maintenance optimization of multi-component systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 47, 141-152.
36. Coble, J., Hines, J.W., 2011. Applying the general path model to estimation of remaining useful life. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 2, 71.
37. Haque, M.S., Shaheed, M.N.B., Choi, S., 2018. RUL estimation of power semiconductor switch using evolutionary time series prediction. In *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 564-569. IEEE.
38. Zhan, Y., & Mechefske, C. K. (2007). Robust detection of gearbox deterioration using compromised autoregressive modeling and Kolmogorov–Smirnov test statistic—Part I: Compromised autoregressive modeling with the aid of hypothesis tests and simulation analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(5), 1953-1982.
39. Zhan, Y., Mechefske, C.K., 2007. Robust detection of gearbox deterioration using compromised autoregressive modeling and Kolmogorov–Smirnov test statistic—Part I: Compromised autoregressive modeling with the aid of hypothesis tests and simulation analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(5), 1953-1982.
40. Cheng, C., Yu, L., Chen, L.J., 2012. Structural nonlinear damage detection based on ARMA-GARCH model. *Applied Mechanics and Materials*, 204, 2891-2896.

41. Zhang, D., Bailey, A.D., Djurdjanovic, D., 2016. Bayesian identification of hidden Markov models and their use for condition-based monitoring. *IEEE Transactions on Reliability*, 65(3), 1471-1482.
42. Pourbabae, B., Meskin, N., Khorasani, K., 2013. Multiple-model based sensor fault diagnosis using hybrid Kalman filter approach for nonlinear gas turbine engines. In 2013 American Control Conference, 4717-4723. IEEE.
43. Li, G., Wang, X., Yang, A., Rong, M., Yang, K., 2017. Failure prognosis of high voltage circuit breakers with temporal latent Dirichlet allocation. *Energies*, 10(11), 1913.
44. Dababneh, A., Ozbolat, I.T., 2015. Predictive reliability and lifetime methodologies for circuit boards. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 141-148.
45. Tang, D., Sheng, W., Yu, J., 2018. Dynamic condition-based maintenance policy for degrading systems described by a random-coefficient autoregressive model: A comparative study. *Eksplatacja i Niezawodność*, 20(4), 590-601.
46. Li, Y., Liu, S., Shu, L., 2019. Wind turbine fault diagnosis based on Gaussian process classifiers applied to operational data. *Renewable Energy*, 134, 357-366.
47. Aye, S.A., Heyns, P.S., 2017. An integrated Gaussian process regression for prediction of remaining useful life of slow speed bearings based on acoustic emission. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 84, 485-498.
48. Hu, Y.W., Zhang, H.C., Liu, S.J., Lu, H.T., 2018. Sequential Monte Carlo method toward online RUL assessment with applications. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 31(1), 1-12.
49. Wu, Z., Luo, H., Yang, Y., Lv, P., Zhu, X., Ji, Y., Wu, B., 2018. K-PdM: KPI-oriented machinery deterioration estimation framework for predictive maintenance using cluster-based hidden Markov model. *IEEE Access*, 6, 41676-41687.
50. Kobayashi, K., Kaito, K., Lethanh, N., 2012. A statistical deterioration forecasting method using hidden Markov model for infrastructure management. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(4), 544-561.
51. Zhou, Z.J., Hu, C.H., Xu, D.L., Chen, M.Y., Zhou, D.H., 2010. A model for real-time failure prognosis based on hidden Markov model and belief rule base. *European Journal of Operational Research*, 207(1), 269-283.
52. Javed, K., Gouriveau, R., Zerhouni, N., 2017. State of the art and taxonomy of prognostics approaches, trends of prognostics applications and open issues towards maturity at different technology readiness levels. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 94, 214-236.
53. Russell, S.J., Norvig, P., 2010. *Artificial intelligence a modern approach*. London.
54. Singh, K., Malik, H., Sharma, R., 2017. Condition monitoring of wind turbine gearbox using electrical signatures. In 2017 International conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems (ICMDCS), 1-6. IEEE.
55. Gajewski, J., Vališ, D., 2017. The determination of combustion engine condition and reliability using oil analysis by MLP and RBF neural networks. *Tribology International*, 115, 557-572.
56. Ayo-Imoru, R.M., Cilliers, A.C., 2018. Continuous machine learning for abnormality identification to aid condition-based maintenance in nuclear power plant. *Annals of Nuclear Energy*, 118, 61-70.
57. Luwei, K. C., Yunusa-Kaltungo, A., Sha'aban, Y.A., 2018. Integrated fault detection framework for classifying rotating machine faults using frequency domain data fusion and artificial neural networks. *Machines*, 6(4), 59.
58. Koprinkova-Hristova, P., 2013. Reinforcement learning for predictive maintenance of industrial plants. *Inf. Technol. Control*, 11(1), 21-28.
59. Zhao, R., Wang, D., Yan, R., Mao, K., Shen, F., Wang, J., 2017. Machine health monitoring using local feature-based gated recurrent unit networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(2), 1539-1548.
60. Dong, D., Li, X.Y., Sun, F.Q., 2017. Life prediction of jet engines based on LSTM-recurrent neural networks. In 2017 Prognostics and system health management conference (PHM-Harbin), 1-6. IEEE.
61. Hinch, A.Z., Tkouat, M., 2018. Rolling element bearing remaining useful life estimation based on a convolutional long-short-term memory network. *Procedia Computer Science*, 127, 123-132.
62. Zhang, J., Wang, P., Yan, R., Gao, R.X., 2018. Long short-term memory for machine remaining life prediction. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 78-86.
63. Li, X., Ding, Q., Sun, J.Q., 2018. Remaining useful life estimation in prognostics using deep convolution neural networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 172, 1-11.

64. Ren, L., Sun, Y., Cui, J., Zhang, L., 2018. Bearing remaining useful life prediction based on deep autoencoder and deep neural networks. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 71-77.
65. Huang, W., Cheng, J., Yang, Y., Guo, G., 2019. An improved deep convolutional neural network with multi-scale information for bearing fault diagnosis. *Neurocomputing*, 359, 77-92.
66. Chen, Z., Gryllias, K., Li, W., 2019. Mechanical fault diagnosis using convolutional neural networks and extreme learning machine. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 133, 106272.
67. Jin, W., Shi, Z., Siegel, D., Dersin, P., Douziech, C., Pugnaroni, M., Lee, J., 2015. Development and evaluation of health monitoring techniques for railway point machines. In *2015 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM)*, 1-11. IEEE.
68. Von Birgelen, A., Buratti, D., Mager, J., Niggemann, O., 2018. Self-organizing maps for anomaly localization and predictive maintenance in cyber-physical production systems. *Procedia Cirp*, 72, 480-485.
69. Lu, F., Wu, J., Huang, J., Qiu, X., 2019. Aircraft engine degradation prognostics based on logistic regression and novel OS-ELM algorithm. *Aerospace Science and Technology*, 84, 661-671.
70. Sankararaman, S., Daigle, M.J., Goebel, K., 2014. Uncertainty quantification in remaining useful life prediction using first-order reliability methods. *IEEE Transactions on Reliability*, 63(2), 603-619.
71. Atamuradov, V., Medjaher, K., Dersin, P., Lamoureux, B., Zerhouni, N., 2017. Prognostics and health management for maintenance practitioners-Review, implementation and tools evaluation. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 8(3), 1-31.
72. Leksir, Y.L., Mansour, M., Moussaoui, A., 2018. Localization of thermal anomalies in electrical equipment using infrared thermography and support vector machine. *Infrared Physics & Technology*, 89, 120-128.
73. Duan, C., Deng, C., Li, N., 2019. Reliability assessment for CNC equipment based on degradation data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 421-434.
74. Zhao, Y., Wang, S., Xiao, F., 2013. Pattern recognition-based chillers fault detection method using Support Vector Data Description (SVDD). *Applied Energy*, 112, 1041-1048.
75. Xiao, Y., Wang, H., Xu, W., Zhou, J., 2016. Robust one-class SVM for fault detection. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 151, 15-25.
76. Jimenez, J.J.M., Schwartz, S., Vingerhoeds, R., Grabot, B., Salaün, M., 2020. Towards multi-model approaches to predictive maintenance: A systematic literature survey on diagnostics and prognostics. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 539-557.
77. Hong, J., Miao, X., Han, L., Ma, Y., 2009. Prognostics model for predicting aero-engine bearing grade-life. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 48821, 639-647.
78. Orsagh, R.F., Sheldon, J., Klenke, C.J., 2003. Prognostics/diagnostics for gas turbine engine bearings. *Engineering*, 36843, 159-167.
79. Soualhi, A., Razik, H., Guy, C., Doan, D.D., 2003. Prognosis of bearing failures using hidden Markov models and the adaptive neuro-fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61(6), 2864-2874.
80. Liao, W., Li, D., 2015. An improved prediction model for equipment performance degradation based on Fuzzy-Markov Chain. *2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 6-10. IEEE.
81. Chiachío, J., Chiachío, M., Prescott, D., Andrews, J., 2019. A knowledge-based prognostics framework for railway track geometry degradation. *Reliability Engineering & System Safety*, 181(2019), 127-141.
82. Björck, Å., 1990. Least squares methods. *Handbook of Numerical Analysis*, 1, 465-652.



Zaman Serisinin Kestirimi İçin Uzun-Kısa Süreli Bellek Ağı Yaklaşımı

Cem KORKMAZ^{1,a}, İlyas KACAR^{2,b}

¹Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Adana
²Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Niğde

^aORCID: 0000-0003-1062-4581; ^bORCID: 0000-0002-5887-8807

Makale Bilgileri

Geliş : 15.07.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606138

Sorumlu Yazar

Cem KORKMAZ

ckorkmaz@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Fıstık sınıflandırma

Ayrık eleman yöntemi

Modelleme

Uzun kısa süreli bellek

Kestirim

Öz
Uzun-kısa süreli bellek (LSTM) ağı, zaman içinde bilgileri depolayan ve unutan bellek hücrelerinden oluşmakta, uzun vadeli bağımlılıkları yakalamaktadır. LSTM'de sıralı işleme yeteneği, tekrarlayan bağlantılarla elde edilmektedir. LSTM, zaman serisi analizi, doğal dil işleme ve daha fazlası için uygun hâle getirilmiştir. Makine öğrenimi algoritmaları veri öğrenme ve karmaşık verilerden iç-görüler üretme konusunda etkilidir. Ayrık eleman yöntemi (AEY) ise taneli malzemelerin davranışını simüle etmek için güçlü hesaplama yöntemidir. AEY tarım ve gıda işleme gibi birçok endüstride, tanecikli eleman akış analizi ve optimizasyon amaçlı kullanılmaktadır. Bu çalışmada yer fıstığının sınıflandırılması için AEY esaslı simülasyon yapılmıştır. Zamana bağlı sürtünme kuvveti verisi toplanmıştır. Tane-duvar sürtünme verisi üzerinde LSTM kullanarak simülasyonlardan daha hızlı bir biçimde sürtünme kestirimi ve bu suretle de ekonomik ve kalite kayıplarını azaltmak amaçlanmıştır. Çalışmada modelin R değeri 0,857 olarak bulunmuştur. Ortalama mutlak hatanın yüzdesi ise % 2,326 olarak bulunmuştur. 300 adet iterasyon yapılmış ve hesaplamalar 37,934 saniye sürmüştür. Ağdan elde edilen veri ile seri arasında yüksek doğrulukta bir ilişki görülmüştür. LSTM ağı veriye bir ön işlem gereksinimini ortadan kaldırmıştır. Çalışmada kullanılan ağ, ağı parametreleri ve bu ağı kestirimi çalışmada verilmiştir.

Long-Short Term Memory Network Approach for Time Series Prediction

Article Info

Received : 15.07.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606138

Corresponding Author

Cem KORKMAZ

ckorkmaz@cu.edu.tr

Keywords

Peanut classification

Discrete element method (DEM)

Modelling

Long-short term memory (LSTM)

Prediction

How to cite: KORKMAZ, C., KACAR, İ., (2024). Zaman Serisinin Kestirimi İçin Uzun-Kısa Süreli Bellek Ağı Yaklaşımı. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1053-1066.

ABSTRACT

The long-short-term memory (LSTM) network consists of memory cells that store and forget information over time, capturing long-term dependencies. LSTM sequential processing capabilities are achieved through recurrent connections. LSTM has been made suitable for time series analysis, natural language processing and more. Machine learning algorithms are effective in learning data and generating insights from complex data. The discrete element method (DEM) is a powerful computational method for simulating the behaviour of granular materials. DEM is used in many industries such as agriculture and food processing and is used in particle flow analysis and optimisation. In this study, DEM-based simulation is performed for peanut classification. Time dependent friction force data are collected. By using LSTM on particle-wall friction data, it is aimed to predict friction faster than simulations and thus reduce economic and quality losses. In the study, the R -value of the model is found to be 0,857. The percentage of the average absolute error was found to be 2,326%. 300 iterations were performed and the calculations took 37,934 seconds. A high accuracy relationship was observed between the data obtained from the network and the series. The LSTM network eliminated the need for pre-processing the data. The network used in the study, the parameters of the network and the estimation of this network are given in the study.

1. GİRİŞ

Modelleme, bilim ve endüstride sıklıkla kullanılan kadim araçlardan biridir. Temel olarak, matematikteki fonksiyonların belirli bir amaca yönelik uygulanmasıdır. Modelleme kavramını açıklarken, Türkçe'de "kestirim, tahmin, iç-görü, sanı, zan, sezgi, çıkarım, niyet okuma, kehanet" gibi ifadeler kullanılabilir [1]. Modelleme yapabilmek için eğri uydurma, simülasyon ve yapay zekâ (YZ) esaslı yöntemlerden yararlanılmaktadır. YZ yöntemleri, karmaşık sistemlerin analiz edilmesi, modelleme-kestirim doğruluğunun artırılması ve süreçlerin optimize edilmesi için temel araçlar sağlamaktadır.

Makine öğrenimi (ML, machine learning) çeşitli sektörlerde kullanım potansiyeli nedeniyle önemli bir ilgi ve tanınırlık kazanmıştır. ML, açıkça programlama gerektirmeden, verilerden yüksek performanslı öğrenme sağlayan YZ'nin bir alt kümesidir. ML algoritmaları, istatistiksel teknikler ve algoritmalar kullanarak örüntüleri otomatik olarak tanımlayabilmekte, kestirimlerde bulunabilmekte, karmaşık ve büyük veri kümelerinden iç-görüler üretebilmektedir. Evrişimli sinir ağları (CNN, convolutional neural network) ve tekrarlayan sinir ağları (RNN, recurrent neural network) gibi derin öğrenme yöntemleri, son yıllarda ML alanında kritik bir rol oynamıştır. Bu teknikler, karmaşık veri yapılarının işlenmesi ve anlamlandırılmasında güçlü araçlar olup görsel algıdan doğal dil işlemeye kadar birçok uygulama alanında çığır açan ilerlemelere olanak tanımıştır [2]. Takviyeli öğrenme algoritmaları, deneme-yanılma yaklaşımıyla karmaşık görevleri öğrenerek otonomi alanında önemli başarılar göstermiştir [3]. Bu yöntem, özellikle oyun, robotik ve endüstriyel otomasyon gibi alanlarda geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Transfer öğrenimi ise bir ML görevinden elde edilen bilginin başka bir göreve aktarılmasını mümkün kılarak eğitim sürecini hızlandırmakta ve sonuçların doğruluğunu artırmaktadır. Bu yaklaşımlar, modern YZ araçlarının temelini oluşturmaktadır.

Uzun kısa süreli bellek (LSTM, long-short term memory) ağı, derin öğrenme özelliğine sahip bir ML yöntemidir. LSTM'nin sıralı işleme yetenekleri, bilginin farklı zaman adımları arasında akmasını sağlayacak tekrarlı bağlantılar yoluyla. Bu benzersiz mimari, LSTM'nin bilgileri uzun süreler boyunca etkili bir şekilde işlemesini ve saklamasını sağlayarak onu zaman serisi analizi, doğal dil işleme başta olmak üzere pek çok görevler için uygun hâle getirmektedir. LSTM'nin zaman serisi üzerinde kestirim ve normal olmayan durumların tespitinde etkili olduğu kanıtlanmıştır. Uzun vadeli bağımlılıkları yakalama yeteneği, borsa, enerji tüketimi ve hava durumu gibi alanlarda doğru kestirimlerin yapılmasını sağlamaktadır [4]. Araştırmacılar çeşitli uzantılar ve modifikasyonlar önererek LSTM'nin yeteneklerini geliştirmeye devam etmektedir. Ayrıca, hibrit model yaklaşımlarında, farklı modellerin güçlü yanlarını bir araya getirmek amacıyla LSTM yöntemi, CNN gibi diğer derin öğrenme mimarileriyle birleştirilmektedir. Bu yaklaşım, LSTM'nin zamansal bağımlılıkları yakalama yeteneği ile CNN'lerin uzaysal özellikleri çıkarılabilir kapasitesini bir arada kullanarak daha güçlü ve kapsamlı bir öğrenme modeli oluşturmayı sağlamaktadır.

Ayrık elemanlar yöntemi (AEY), taneli malzemelerin davranışını hesaplamak için güçlü bir yöntemdir. İlk olarak 1979 yılında Cundall ve Strack tarafından geliştirilmiştir [5]. Tanecikli malzemeler; temas kuvvetleri aracılığıyla etkileşime giren ayrık parçacıkların oluşturduğu bir yığın olarak ele alınmaktadır. Parçacık-parçacık, parçacık-duvar, parçacık-akışkan etkileşimlerinin hesaplanmasına olanak tanımakta ve tek tek parçacıkların hareketini takip etmektedir. AEY esaslı simülasyonlar, parçacıklar arasındaki temasları temsil etmek için temaslı-temassız etkileşim modelleri kullanılmaktadır. Doğrusal yay-damper, doğrusal olmayan kuvvet ve Van der Waals kuvveti, sıvı köprü kuvveti ve elektrostatik kuvvet, adheziif-kohezif kuvvet modelleri dâhil olmak üzere çeşitli etkileşim modelleri geliştirilmiştir [6]. Bu modeller parçacık kırılması, kohezyon ve sürtünme gibi gerçek dünya olaylarının simülasyonunu mümkün kılmaktadır. Bilim camiasında bazı kesimler, yapay öğrenme yöntemlerinin sadece deneysel veri üzerinde uygulanması gerektiğini savunsa da, simülasyon ile üretilen veri üzerinde de yapay öğrenme yapılabilir. Böylece çok uzun hesaplama zamanı alan simülasyonlar yerine daha kısa sürede kestirim yapılması mümkün olabilmektedir [7,8].

Yer fıstığı endüstrisi, yer fıstığı ve yer fıstığı bazı ürünlere yönelik artan talebi karşılayarak küresel tarım sektöründe önemli bir rol oynamaktadır [9]. Yer fıstığı sınıflamada AEY esaslı simülasyonlar; fıstık tanelerinin yığın hareketinin dinamik davranışını belirlemektedir. Tanelerin birbirleri ve yüzeyle her türlü etkileşimlerinin belirlenmesinde, tüm gerçek şartları oluşturma imkânı vermektedir. Geleneksel eleme işlemlerinde elekler düzdür ve ağır metal gövdelerine titreşim hareketi verilerek çalıştırılmaktadır. Ancak, bu çalışma yüksek enerji tüketimine neden olmaktadır. Buna rağmen, büyük sınıflandırma yüzeyine sahip oldukları için daha yüksek üretim kapasiteleri ile endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Enerji

kullanımının azaltılması amacıyla, daha az enerji tüketen sınıflandırma yöntemleri üzerine araştırmalar sürdürülmektedir. Bu bağlamda, enerji verimliliği açısından önemli bir alternatif olarak, iç fıstık gibi ürünlerin sınıflandırılması için silindirik eleklerin kullanılması öne çıkmaktadır. Bu elekler, geleneksel elek sistemlerine kıyasla çok daha düşük enerji tüketimi sunarak, hem enerji tasarrufu hem de sınıflandırma işlemlerinin etkinliğini artırmayı hedeflemektedir.

Mevcut çalışmalar ışığında; tarım, gıda, katı atıklar vb. ürünlerin çeşitli davranışlarının modellenmesi ve kestirimi konularında açık literatürde pek çok çalışmanın olduğu, pek çok alanda ML tekniklerinin başarı ile uygulandığı, ancak fıstık sınıflandırmada işlem parametrelerinin modellenmesinde nadiren ML kullanıldığı görülmüştür. Bu konuda bir araştırma boşluğu bulunmaktadır. Böylece ML yöntemlerinin fıstık sınıflandırmada, sürtünme kuvvetinin kestiriminde de kullanım potansiyeline sahip olabileceği hipotezi ortaya atılarak, konunun incelenmesine karar verilmiştir.

Bu çalışmada bir silindirik eleğin gerçek işletme şartlarına uygun olarak Ansys Rocky DEM© ticari programı ile AEY esaslı simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonunda tane-elek arasındaki zamana bağlı sürtünme kuvveti verisi elde edilmiştir. Sürtünme, fıstık tanelerinin duvar yüzeyinden kayması, böylece sınıflama verimi ve elek metalinin aşınması-değişim sıklığı üzerinde temel etkenlerdendir. Zira aşınmış bir elek, deliklerde takılı kalan taneler nedeni ile verimi düşürmekte, tane kırılmalarına neden olmaktadır. Sürtünme kuvvetinin, bir derin öğrenme yöntemi olan LSTM ağı ile modellenmesi ve kestirim performansı araştırılmıştır. LSTM sayesinde birincil olarak tane-duvar sürtünme kuvveti hızlı ve doğru bir biçimde kestirilebilmekte, ikincil olarak da isabetli kestirim sayesinde üretim sürecine erken müdahale için kestirimci-bakım yapılması mümkün olmakta, böylece daha ekonomik bir süreç elde edilmekte ve kalite kayıplarının önüne geçilebilmektedir.

2. YÖNTEM

2.1. Fıstık Sınıflandırma Esnasında Net Kuvvet

Bu çalışmada, Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi'nde bulunan ve Şekil 1'de gösterilen fıstık sınıflandırma (boylama, tasnif, eleme, ayıklama, derecelendirme) makinasının simülasyonu yapılmıştır. Sürtünme kuvvetinin (teğetsel temas kuvveti) oluşmasına yol açan hususlar başta tane-elek duvarı arası sürtünme katsayısı ve dik kuvvettir. Teğetsel doğrultudaki net kuvvetin, verilen makine şekline göre nasıl hesaplanacağı bu bölümde izah edilmiştir. Kuvvetin hesaplanmasıyla birlikte tork, bu tork kullanılarak güç ve güç kullanılarak enerji hesaplanabilecektir.

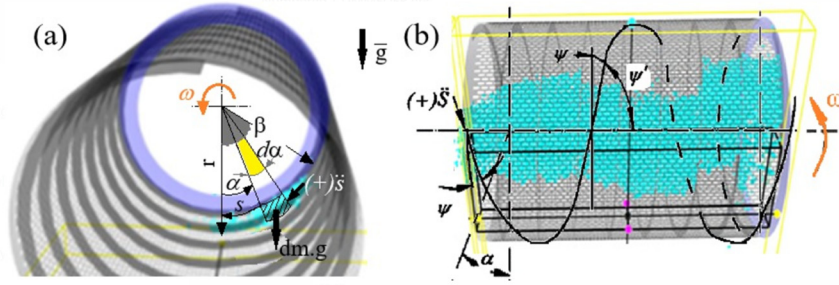


Şekil 1. Simülasyonu yapılan fıstık tasnif makinası

Yüksek verim, tanelerin elek yüzeyi üzerinde tek tabakalı dağılması durumunda elde edilse de, gözlemler, silindirin iç yüzeyindeki tanelerin tek tabakalı akışının, eleğin dönme hareketi esnasında, korunamayacağını göstermektedir. Sürtünme hesabı aşağıdaki varsayımlar ile birlikte yapılmıştır [10].

- Tanecikli malzeme tabakası, iyi tanımlanmış yollar (dairesel veya sarmal) boyunca tane dizilerinden oluşmaktadır.

- Tanecikli malzeme tabakası, silindirin iç yüzeyini sürekli olarak kaplamaktadır.
- Tabaktaki tüm bitişik diziler, ihmal edilebilecek kadar küçük bağıl harekete sahiptir. Bu nedenle, komşu diziler arasındaki tane-tane sürtünme kuvvetleri göz ardı edilebilmektedir.



Şekil 2. Silindirik elek içinde, fıstık kümesinin (a) dairesel ve (b) sarmal hareketine dair serbest cisim diyagramları [11]

İyi tanımlanmış yollardan biri "dairesel", diğeri ise "sarmal" yoldur. Öncelikle dairesel bir yol boyunca hareket incelenecektir. Şekil 2-a'ya bakıldığında, Newton'un ikinci yasası, sonsuz küçük bir dm kütlesi üzerine uygulandığında, kayan bu kütle için aşağı doğru ivmesi, $\ddot{s} = g \sin \alpha - g \mu_d \cos \alpha - \omega^2 r \mu_d$ olacaktır. Burada s silindirin tabanından itibaren yay uzunluğu, ω açısal hız, r silindirik elek yarıçapı, μ_d fıstık-elek arası sürtünme katsayısı, α eleğin dönme açısı ve g ise yerçekimi ivmesidir. Tabaka kalınlığı, eleğin en alt noktasında en büyük ve yukarı doğru en küçük olmak üzere doğrusal olarak değişmektedir ve $h(s) = h_0 - \frac{h_0 - e}{r\beta} s$ denklemi ile hesaplanmaktadır. Burada h_0 ve e sırasıyla elek duvarındaki tabakanın maksimum ve minimum yükseklikleri, β ise bu yayı oluşturan açıdır. Yay uzunluğu s , ve açısal konum α arasındaki ilişki $s = r\alpha$ olup bu durumda tabaka kalınlığı $h(\alpha) = e \left[n - (n-1) \frac{\alpha}{\beta} \right]$ veya $h(s) = e \left[n - \frac{(n-1)}{r\beta} s \right]$ olarak da hesaplanabilmektedir. Burada n , tanecikli malzemenin tabaka sayısı olup $n = \frac{h_0}{e}$ ile hesaplanmaktadır. α açısal konumunda, eleğin birim uzunluğu başına düşen tabakanın sonsuz küçük kütlesi $dm = \rho h r d\alpha$ olarak ifade edilmektedir. Burada ρ tanecik yığınının yoğunluğudur. Eleğin iç yüzeyini kapladığı varsayılan tanecikli malzeme tabakası β açısında dengeye gelecektir, Şekil 2-a'daki serbest cisim diyagramına göre, teğetsel doğrultudaki denge denklemi, $F_{net} = \int_0^\beta \ddot{s} dm = 0$ biçiminde yazılabilecektir. Burada F_{net} teğetsel doğrultudaki toplam kuvvet olup tabakayı teğetsel yörüngede aşağı doğru hareket ettirmektedir. Terimler yerine yazılırsa ve integrasyon 0 ve β açıları arasında yapılırsa $F_{net} = \frac{1}{2} \rho r \left[\left(\frac{h_0 - e}{\beta} \right) (-2g\mu_d + r\omega^2\beta^2\mu_d + 2g(\beta + \mu_d)\cos\beta + 2g(\beta\mu_d - 1)\sin\beta - 2(r\omega^2\beta\mu_d - g + g\cos\beta + g\mu_d h_0 \sin\beta) \right]$ olacaktır. Elde edilen bu denklem, tabaka sayısı n ve β açısının bir fonksiyonu olarak ifade edilirse de $F(\beta) = g[\beta(n - \cos\beta) - (n-1)\sin\beta] - g\mu_d[\beta\sin\beta + (n-1)(1 - \cos\beta)] - \frac{1}{2}r\mu_d\omega^2\beta^2(1+n) = 0$ olacaktır. $F(\beta) = 0$ denkleminin analitik bir çözümü yoktur. Kökünü bulmak için sayısal bir yöntem gerekmektedir. Bununla birlikte, küçük β açısı için yaklaşık bir başlangıç çözümü (kökü) $\beta = 2\mu_d \left[1 + \frac{1}{2}(1+n) \frac{r\omega^2}{g} \right]$ olmaktadır. Tabakanın ağırlık merkezinin konumu θ_* olmak üzere $\int_0^\beta r g \sin \alpha dm = r g \sin \theta_* m$ ifadesi kullanılarak θ_* hesaplanabilmektedir. Tabakanın birim külesinin, elek eksenine etrafında dönerken, $0-\beta$ açıları arasında oluşturduğu moment T_0 olup bu moment $T_0 = \int_0^\beta r g \sin \alpha dm$ ile hesaplanabilmektedir. İfadeler yerlerine yazıldığında tork formülü $T_0 = g e r^2 \left[n(1 - \cos\beta) + (n-1)r\cos\beta - (n-1) \frac{r}{\beta} \sin\beta \right]$ biçiminde olacaktır. Ayrıca, gereken güç $G = T_0 \omega$ ile ve t_0 ile t_n zaman aralığında tüketilen enerji ise $E = \int_{t_0}^{t_n} G dt$ ile hesaplanacaktır.

Tane tabakanın sarmal bir yol boyunca hareket ettiği durum Şekil 2-b'de verilmiştir. Silindir eksenine sarmal yol arasındaki helis açısı φ ve bunun tümler açısı φ' ile gösterilmektedir. Newton'un ikinci yasası, sarmal yüzeyindeki dm kütle üzerine uygulanırsa, kayan elemanın teğetsel doğrultudaki ivmesi $\ddot{s}(\alpha) = g \sin \alpha (\cos \varphi - \mu_h \sin \varphi) - g \mu_d \cos \alpha - \omega^2 r \mu_d$ olacaktır. Burada μ_h ifadesi tanecik ile helison arasındaki sürtünme katsayısıdır. Teğetsel doğrultudaki denge denkleminde yerine yazılırsa, toplam kuvvet $F_{net} =$

$\frac{\rho r e}{\beta} \left[(1 + n(\beta - 1)) \left(g(\cos\varphi - \mu_n \sin\varphi)(\sin\beta - \beta \cos\beta) + \left(g - \frac{1}{2} r \omega^2 \beta^2 - g \cos\beta - g \beta \cos\beta \right) \mu_d \right) \right] = 0$ olacaktır. Bu denklemin analitik bir çözümü yoktur, ancak küçük β açıları için teknik anlamı ile kökü $\beta = \frac{\mu_d(n+1)}{\cos\varphi - \mu_n \sin\varphi} \left[1 + \frac{r\omega^2}{g} \right]$ olacaktır. Tabakanın birim kütesinin, birim zamandaki hareketi sonunda tabakanın akış hızı $\frac{dm}{dt} = \int_0^\beta r \rho h V_z d\alpha$ ile hesaplanmaktadır. İntegrasyon gerçekleştirilirse $\frac{dm}{dt} = e^{\frac{n+1}{2}} r \rho \beta V_z$ olacaktır. Makinenin performansını değerlendirmek için kullanılan önemli bir işletme parametresi verim olup iki boylu bir sınıflandırma hâlinde $\eta = r_K r'_K \eta_K + r_B r'_B \eta_B$ ile hesaplanabilmektedir. Burada $r_B = \frac{K}{T}$ ve $r'_B = \frac{B}{K_B + B}$ ve $\eta_K = \frac{K'}{K}$ ve $\eta_B = \frac{B'}{B} = 1$ olarak verilmiştir. Burada K ve B sırasıyla sınıflandırılacak küçük ve büyük boylu malzeme miktarını temsil etmektedir.

2.2. Ayrık Eleman Yöntemi (AEY)

AEY'nin esası, denge denklemlerini kullanarak parçacığın yörüngesini hesaplamaktır [12]. Bu denklemler Newton'un ikinci hareket yasasına, açısal momentumun korunumuna ve d'Alembert ilkesine dayanmaktadır (Eşitlik 1). Her ikisi de adi diferansiyel denklemlerdir.

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j (F_{n,ij} + F_{t,ij}) + m_i g + F_{f \rightarrow p} \quad (1-a)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j (M_{t,ij} + M_{r,ij}) + M_{f \rightarrow p} \quad (1-b)$$

Burada i, j parçacık numarası, g yerçekimi ivmesi, m kütle, I parçacığın kütle eylemsizlik momentidir. n ve t sırasıyla normal ve teğetsel doğrultulardır. v ve ω sırasıyla parçacığın doğrusal ve açısal hız vektörüdür. $F_{f \rightarrow p}$ ve $M_{f \rightarrow p}$ terimleri ise CFD-AEY müşterek çalışması durumunda parçacık-akışkan etkileşiminden hâsıl olan sırasıyla kuvvet ve momenttir. Bu çalışmada müşterek çalışma olmadığı için $F_{f \rightarrow p}$ ve $M_{f \rightarrow p}$ ifadeleri sıfırdır. F kuvvet iken, $M_{t,ij}$ parçacığın dönmesine neden olan tüm teğetsel kuvvetler (teğetsel kuvvet bileşeninin yanı sıra yerçekimi veya sürüklenme gibi) tarafından üretilen net teğetsel tork, $M_{r,ij}$ terimi j parçacığı veya duvar tarafından i parçacığına etki eden yuvarlanma direnci torkudur. $M_{r,ij}$ torkunun doğrultusu, dönme hızı doğrultusu ile aynı ancak ters yöndedir. Normal kuvvet ise parçacık dönüşüne katkıda bulunmaz.

Bir çarpışma olayı bir dizi temastan oluşmaktadır. Bir temas *yumuşak* veya *sert küre* yaklaşımları kullanılarak modellenilebilmektedir. Sert küre yönteminde, parçacıklar rijittir ve temasta herhangi bir deformasyon görülmemektedir. İkili temas esnasında hareket ve enerji kaybını hesaplamak için, temas kuvvetleri yerine, sıçrama katsayıları ve şok yasaları kullanılmaktadır. Çoklu temasa izin verilmemektedir. Yumuşak küre yönteminde ise temas esnasında parçalıklarda oluşacak deformasyon "üst üste binme" olarak modellenmektedir. Parçacık-parçacık ve parçacık-duvar teması hâlinde etki eden temas kuvvetini hesaplamak için temas modelleri kullanılmaktadır. Buna ek olarak, Van der Waals kuvveti, sıvı köprü kuvveti ve elektrostatik kuvvet gibi temassız kuvvetler de gerekirse her iki yöntemde de tanımlanabilmektedir.


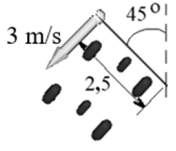
2.3. AEY Esaslı Simülasyon ve Sürtünme Verisi Eldesi

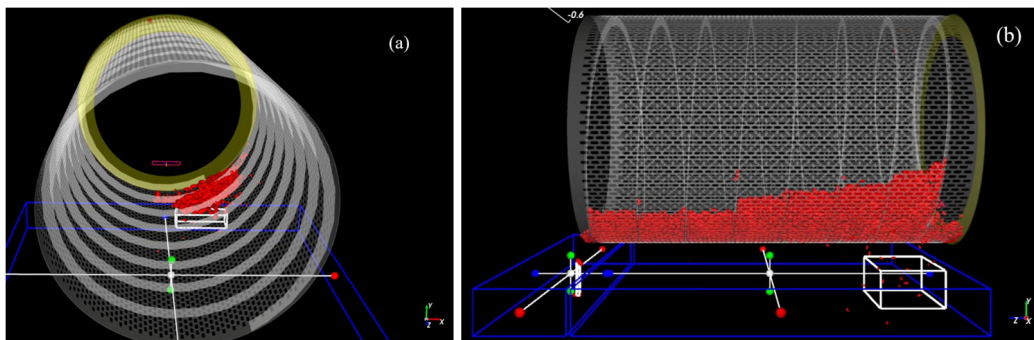
AEY esaslı simülasyon için Ansys Rocky DEM© programı kullanılmıştır [6]. Yazılım; kapsamlı tane şekli kütüphaneleri, gelişmiş temas algılama algoritmaları, gelişmiş tane kırılma modelleri, dinamik ağ oluşturma, tane-akışkan etkileşimleri ve paralel hesaplama imkânları sunmaktadır [13]. Yazılımın bu gibi yetenekleri onu madencilik, ilaç, tarım, gıda, tohum ve tahıl işleme, mahsul kurutma ve toprak mekaniği gibi çok çeşitli uygulamalar için uygun hâle getirmektedir [14].

Çizelge 1'de AEY simülasyonunda kullanılan parametreler verilmiştir. Hesaplamalar ardışık zaman adımları için tekrar edilmektedir. Tane hareketinin her yeni konumu, tek zaman adımına uygulanmaktadır. Hesaplama 60 adımda gerçekleştirilmiş olup, her bir adım 1 saniyelik zaman dilimine sahiptir. Ayrıca her bir zaman dilimi de 0,1 saniyelik alt adımlara bölünmüştür. Dinamik analizlerde "zaman adımı" ve "alt adımlar"ın kullanımı, analizdeki fiziksel olayların doğru şekilde temsil edilmesi ve sayısal stabilitenin sağlanması için temel bir gerekliliktir. Zaman adımı ve alt adımlar, zamana bağlı diferansiyel denklemleri sayısal olarak çözen yöntemlerde, zamansal ayrıklaştırma amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca sistemdeki

hızlı değişimlerin, çözümde gözden kaybolmasını engellemek için ayrıklaştırmanın uygun küçük boyutta olması gerekmektedir. Her bir alt adımda hesaplanan ardışık değerler, zaman içindeki sürekliliği ve doğruluğu korumaya yardımcı olmaktadır.

Çizelge 1. AEY esaslı simülasyonda kullanılan parametreler

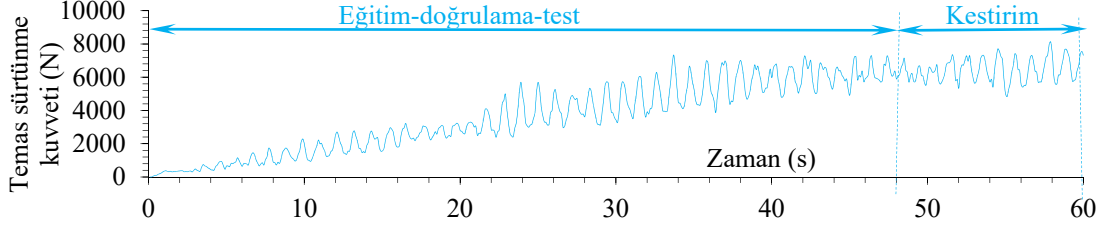
Enjeksiyon özellikleri	Değer	
Tane şekli	216 adet üçgen yüze sahip çok yüzlü, 	
Tane türü, malzeme	Tek bileşenli (Yer fıstığı taneleri)	
Tane malzeme davranışı	Sert küre	
Tane eşdeğeri çap dağılımları, dp (mm)	22 (100%)+7,6 (22%)	
Tane hacmi, (cm ³)	5,56	
Tane kütle akış hızı (kg/saat)	0,169	
Tanelerin enjeksiyon noktasındaki hız vektörü (m/s) ve boyutları	 Giriş yüzeyine normal	
Zaman adımı uzunluğu (s) ve alt adım sayısı (adet)	1 ve 10	
Gerçek zaman süresi (s)	60	
Simülasyon fiziği	Değer	
Normal kuvvet	Lineer yay-damper	
Teğetsel kuvvet	Coulomb sürtünme kanunu	
Yuvarlanma direnci torku	Sabit, $M_{r,ij} = -\mu_r \mathbf{r} \times \mathbf{F}_{cn,ij} \frac{\omega_p}{ \omega_p }$	
Sayısal yumuşama faktörü	1	
Yerçekimi	9,81 m/s ²	
Malzeme özellikleri	Tane (İç fıstık)	Duvar (çelik)
Young modülü, E (MPa)	10,11	200E3
Poisson oranı, ν	0,201	0,3
Katı yoğunluğu, ρ_s (kg/m ³)	416	7850
Yığın yoğunluğu, ρ_b (kg/m ³)	250	--
Tambur dönüş hızı (rpm)	--	10
Temas	Tane-tane	Tane-duvar
Sürtünme katsayısı, $\mu(\dot{s}_t)_{static}, \mu(\dot{s}_t)_{dynamic}$	0,408, 0,318	0,326, 0,326
Yuvarlanma direnci katsayısı, μ_r	0,2	0,2
Sıçrama katsayısı, ϵ	0,224	0,224



Şekil 3. Fıstık sınıflama makinesinin AEY esaslı simülasyonunda (a) $t=5$ s (b) $t=40$ s anında elek içerisindeki fıstık dağılımı ve sınıflandırma kutuları

Şekil 3'te eleğin simülasyonda kullanılan geometrisi ve simülasyonun çeşitli adımlardaki ekran görüntüleri verilmiştir. Şekil üzerinde, fıstık tanelerinin bölgeye aktılma şekli, girişin dikdörtgensel açıklığı ve elek altındaki iki adet biriktirme kutusu, elek içerisindeki helisel sarmallar görülmektedir.

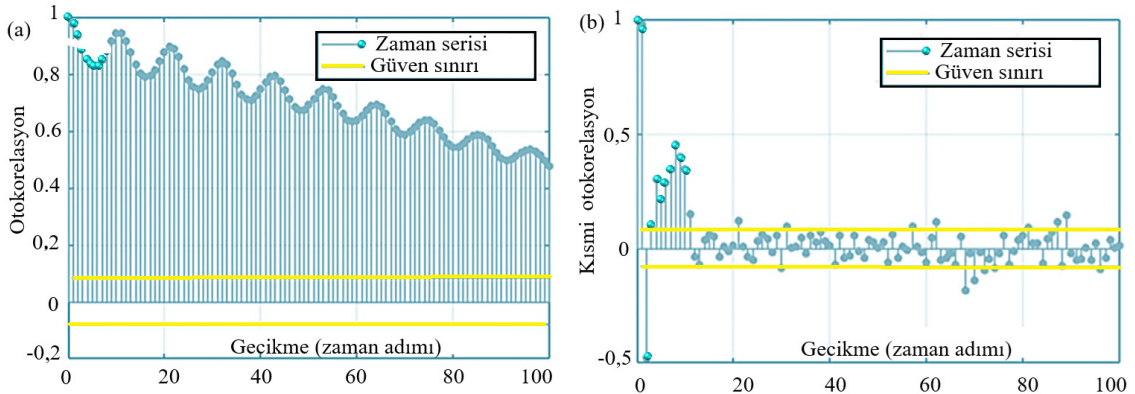
Şekil 4'te ise toplanan sürtünme kuvvetine ait zaman serisi verisi gösterilmiştir. Yatay eksen zaman adımıdır. Toplam veri sayısı 600 adettir. Bu çalışma kapsamında incelenen veri kümesi, tanenin duvarla teması esnasında, sürtünme katsayısı nedeniyle oluşan zamana bağlı sürtünme kuvveti serisidir. Bu veri 60 saniyelik gerçek zamanın simülasyonu olup hesaplama 63 gün 18 saat 27 dakika sürmüştür. Hesaplama 8 GB RAM ve 2,8 GHz dört çekirdekli CPU'ya sahip bir bilgisayar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Simülasyondan elde edilen temas sürtünme kuvvetinin zamanla değişimi verisi ve bölümlendirme oranı

2.4. AEY Simülasyonu ve Sürtünme Verisi Eldesi

Modellemeye başlamadan önce eldeki verinin doğasını anlamak önemlidir. Bu suretle veriye uygun model belirlemek daha kolaydır. Zaman serilerinde sıklıkla uygulanan analiz türü, zaman gecikmelerinin tayini için oto-korelasyon (OKF) ve kısmi oto-korelasyon (KOKF) grafiklerini birlikte değerlendirmek ve hipotez testleri uygulamaktır.



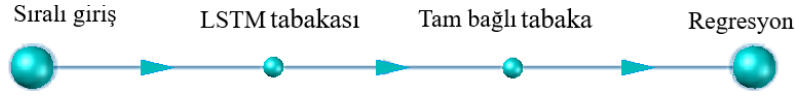
Şekil 5. Veriye ait (a) OKF, (b) KOKF

Zaman gecikmelerini tespit etmek için korelogramlar kullanılmıştır (Şekil 5). OKF veya KOKF değerleri birimsizdir. Geçikme ise "zaman adımı" birimindedir. Her bir pik, bir gecikmeye karşılık gelmektedir. 100 adet gecikme incelenmiş olup tespit için 2 standart sapmalılık güven sınırı esas alınmıştır. Her iki tip grafikten serideki verilerin rastgele olmadığı, kendi gecikmelerine bağlı olduğu görülmüştür. OKF pikleri giderek azalmaktadır. KOKF ise 10'uncu pikten sonra güven sınırının altında kalmaktadır (beyaz gürültü). Beyaz gürültü, gecikme üzerinde etkisiz değerlerdir. OKF'de azalma ve KOKF'de kesilme olması, otomatik gerileyen türde bir seri olduğu anlamına gelmektedir. Eğer OKF'de ani kesilme ve KOKF'de de azalma olsaydı, seri, hareketli ortalama türünde olacaktı. Buradan ilk 10 gecikmeye kadar olan ardışık değerlerin birbirleri ile yüksek ilişkili olduğu ve sonraki değerlerin birbiriyle anlamlı bir ilişkisinin olmadığı görülmüştür. Böylece bu serinin, ilk on gecikmeye bağlı, otomatik gerileyen AR(10) türünde bir seri olduğu anlaşılmıştır [15].

2.5. LSTM ile Modelleme

LSTM bir derin öğrenme yöntemidir. Her ne kadar hangi ağların, hangi verilere uygulanacağı ile ilgili herhangi bir başparmak kuralı yoksa da zaman serileri için LSTM, GRU, NAR yöntemleri kullanılmaktadır [16]. Metin içerisinde yer yer "ağ" yer yer de "model" kelimesi kullanılmıştır. Her ikisi de aynı anlamdadır. Zira bir ağın akasında fonksiyon(lar) bulunmaktadır. Bu da ağın, matematiksel bir fonksiyon olduğunu

göstermektedir. Ağlar Matlab© programı ile oluşturulmuştur [17]. Bu çalışmada oluşturulan LSTM ağıнын mimarisi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Çalışmada kullanılan LSTM ağ topolojisi

Bu çalışmada oluşturulan LSTM ağı dört temel tabakadan oluşmuş ve bunların özellikleri ise Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. LSTM ağ tabakaları ve özellikleri

Tabakalar	Tür, aktivasyon boyutu	Öğrenebilir özellik	Durum
● Bir boyutlu giriş	Sıralı giriş $1(C) \times 1(B) \times 1(T)$	—	—
● 128 adet saklı birim	LSTM $128(C) \times 1(B) \times 1(T)$	Giriş ağırlıkları (512×128), Tekrarlı ağırlıklar (512×128), Bias (512×128)	Saklı (128×1) Hücre (128×1)
● Bağlama	Tam bağlı tabaka $1(C) \times 1(B) \times 1(T)$	Ağırlıklar (1×128), Bias (1×1)	—
● MSE esaslı regresyon	Regresyon $1(C) \times 1(B) \times 1(T)$	—	—

Ağ, bir tabakalı bir derinliğe sahiptir. Ağın öğrenilebilir özelliği, ağırlıkları ve bias'tır. C, B ve T harflerinin anlamı aşağıdaki gibidir:

- C (Channels): Özellik haritasındaki kanalları (features) ifade etmektedir. LSTM'de bu genellikle hücre durumlarının veya gizli durumların boyutunu belirtmektedir. Çizelgede 128 LSTM birimi kullanıldığı için $C = 128$ olacaktır.
- B (Batch Size): Giriş verilerinin bir iterasyonda (seferde) işlendiği örnek sayısını ifade etmektedir. Mini-batch işlem sırasında kullanılan veri örneği sayısını temsil etmektedir. Çizelgede $B = 1$ olduğu gözlemlenmekte, yani her iterasyonda tüm veri işlenmektedir.
- T (Time Steps): Zaman eksenindeki adım sayısını ifade etmektedir. Zaman serisi veya ardışık veri için kullanılan veri noktalarının sayısını belirtmektedir. Çizelgede $T=1$ olup bir adet zaman serisi olduğu anlaşılmaktadır.

Sıralı giriş, $1(C) \times 1(B) \times 1(T)$ boyutlu olup tek boyutlu bir dizinin (1 kanal) işlendiğini ifade etmektedir. LSTM tabakası $128(C) \times 1(B) \times 1(T)$ boyutunda olup bu, 128 birim (hücre) kullanıldığını göstermektedir. Bu tür bir gösterim, derin öğrenme modellerinde zaman serisi veya sıralı verilerle çalışırken yaygın olarak kullanılmaktadır. LSTM ağlarının eğitimi, ağırlık ve/veya bias güncelleme esaslı olduğu için bu ağların öğrenilebilir yeteneği ağırlık ve biaslar sayesinde. LSTM, bilgileri zaman içinde seçici olarak depolayabilen ve gerektiğinde silebilen bellek hücrelerinden oluşmaktadır. Bu yapı, özellikle uzun vadeli bağımlılıkların öğrenilmesinde ve işlenmesinde etkili bir şekilde çalışmaktadır. Her bir gizli birim, dört kapı ile donatılmıştır. Bunlar bilgi akışını düzenleyen giriş kapısı, unutma kapısı, durum kapısı ve çıkış kapısı olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca her gizli birim "saklı" ve "hücre" adında iki adet duruma da sahiptir.

Ağın hiperparametreleri ise şu biçimdedir:

- Veri bölümlenme: Eğitim % 80 (48 saniye), kestirim % 20 (12 saniye)
- Veri, $o(t)^{normalize} = \frac{o(t) - \overline{o(t)}}{\sigma}$ formülü kullanılarak normalize edilmiştir. Burada $o(t)$ veri, $\overline{o(t)}$ değeri ortalama veri ve σ ise standart sapma olup $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{NN} [(p(t) - \overline{o(t)})^2]}{NN}}$ ile hesaplanmaktadır. NN, veri sayısıdır. $p(t)$ ise ağ tarafından kestirilen değerdir. t zaman adıdır.

- Hata kriteri : $MSE = \frac{1}{NN} \sum_{t=1}^{NN} (p(t) - o(t))^2$ burada $p(t)$ değeri, t zaman adımında kestirim yapılan değerdir. $o(t)$ değeri, t zaman adımında zaman serisi verisi ve NN ise toplam veri sayısıdır. RMSE ise MSE'nin kareköküdür. MSE'nin birimi, verinin biriminin karesidir. Burada sürtünme verisi Newton (N) biriminde olduğundan dolayı MSE (N^2) biriminde olacaktır. Bu durumda RMSE ise (N) biriminde olacaktır. MAE mutlak hata ortalamasıdır. Birimi veri birimidir. MAPE, MAE'nin yüzdesidir. MSE (birim²), RMSE (birim), MAE (birim) ve MAPE (%) değerleri model başarısını ölçmede kullanılan hata metrikleridir. Bu kriterler ne kadar sıfıra yakınsa modelde hata değerleri o kadar azdır. R (veya R^2) değerleri de ne kadar 1'e veya -1'e yakın ise model o kadar başarılıdır. Akaike bilgi kriteri (AIC, Akaike Information Criteria) bir başka metriktir, $\log_{10}(f/Hz)$ birimindedir. Daha düşük AIC puanına sahip model, neredeyse aynı hassasiyet seviyesinde tahmin yapmak için daha az bilgi gerektirmektedir. Basitlik ve uyum iyiliği açısından en iyi model, AIC'i en az olan modeldir. Aşırı uyum AIC formülünün ilk terimini daha negatif, ikincisini daha pozitif yapmakta ve bu iki etki arasında bir uzlaşmaya yol açmaktadır. Sıfır en iyi modeli göstermektedir.

- Korelasyon katsayısı, $R = \frac{NN \sum_{t=1}^{NN} p(t)o(t) - (\sum_{t=1}^{NN} p(t))(\sum_{t=1}^{NN} o(t))}{\left(\sqrt{NN \sum_{t=1}^{NN} p(t)^2 - (\sum_{t=1}^{NN} p(t))^2} \sqrt{NN \sum_{t=1}^{NN} o(t)^2 - (\sum_{t=1}^{NN} o(t))^2} \right)}$ olup determinant

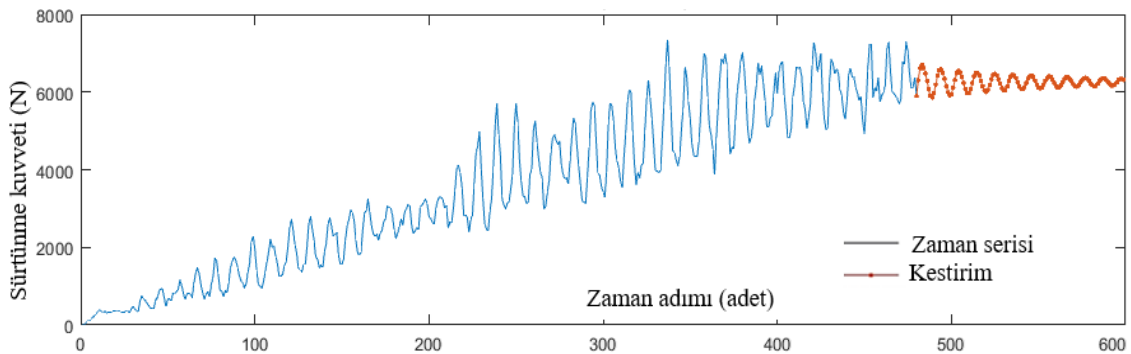
katsayısı ise R^2 'dir.

- Zaman serisindeki gecikme sayısı : 10
- Giriş sayısı : 10
- Çıkış sayısı : 1
- LSTM tabaka sayısı : 1
- Tabakadaki birim sayısı: 128
- Aktivasyon fonksiyonu : Hücre adayında hiperbolik tanjant $\frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$ türünde sigmoid fonksiyon kullanılmışken geri kalan tüm kapılarda lojistik, $(1 + e^{-x})^{-1}$ türünde sigmoid fonksiyon kullanılmıştır.
- Eğitim algoritması: ADAM (Uyarlanabilir moment tahmini, Adaptive moment estimation)
- Maksimum iterasyon sayısı: 300
- Doğrulama frekansı: 1 iterasyon
- Gradyan doyumu: 1
- Başlangıç öğrenme hızı: 0,05
- Öğrenme hızı azalma periyodu: 100 iterasyonda 1 kere
- Öğrenme hızı azalma katsayısı: 0,1
- Gradyan eşiği: 0,8
- L2 düzeltme katsayısı: 0,001

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1. Kestirim Eğrisi

İterasyonlar bittikten sonra elde edilen LSTM ağının, ayrıca %20'lik veri üzerindeki kestirimi, Şekil 7'de verilmiştir.



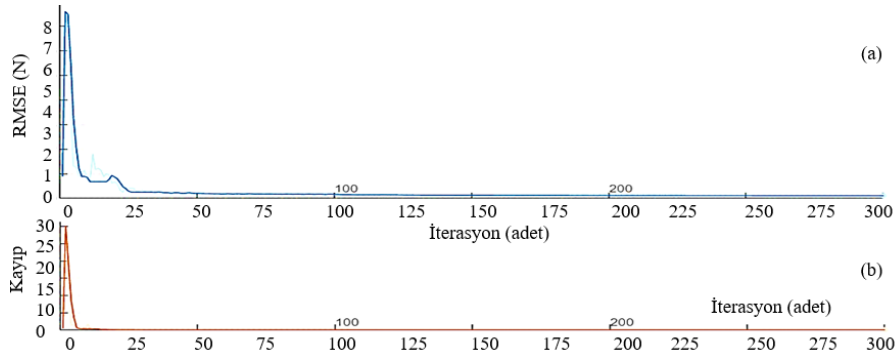
Şekil 7. LSTM ağının kestirimi

Kestirim eğrisi incelendiğinde, modelin genel eğri şeklini yüksek bir doğrulukla temsil ettiği, ayrıca zaman serisindeki yerel pik ve dipleri de başarıyla yakaladığı görülmektedir. LSTM ağı, veriye herhangi bir ön işlem yapılması gereksinimini ortadan kaldırmaktadır.

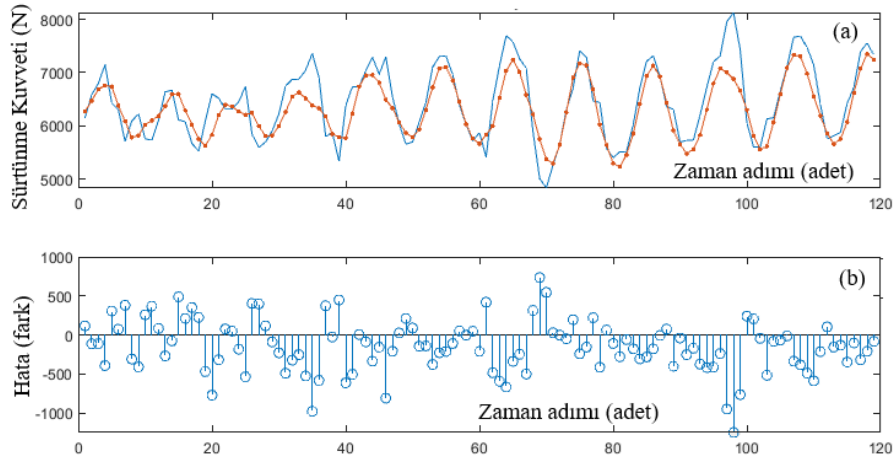
3.2. Doğrulama

Oluşturulan modelin doğrulaması için hata yakınsama grafikleri, kestirim hatası, varyans analizi, hata metrikleri (MSE, RMSE, MAE, MAPE), korelasyon katsayısı R gibi istatistikî araçlar kullanılmıştır.

Ağ eğitimi, iterasyonlar ile yapılmaktadır. Beklenti, her iterasyon sonunda modeldeki hata değerinin azalmış olmasıdır. Bu duruma "hatanın yakınsaması" denmektedir. Hata yakınsama grafiği Şekil 8'de verilmiştir. Eğrilerin sıfıra yaklaştığı görülmektedir. Yakınsama esnasında herhangi ani bir sapma oluşmamıştır. Yakınsama eğrisi kararlı bir biçimde azalmaktadır. Eğrinin kararlılığında bir bozulma oluşmaması, aşırı uyum hatası oluşmadığı sonucunu vermektedir.



Şekil 8. Eğitim esnasında gözlenen; (a) RMSE hata yakınsama grafiği, (b) Kayıp (MSE)

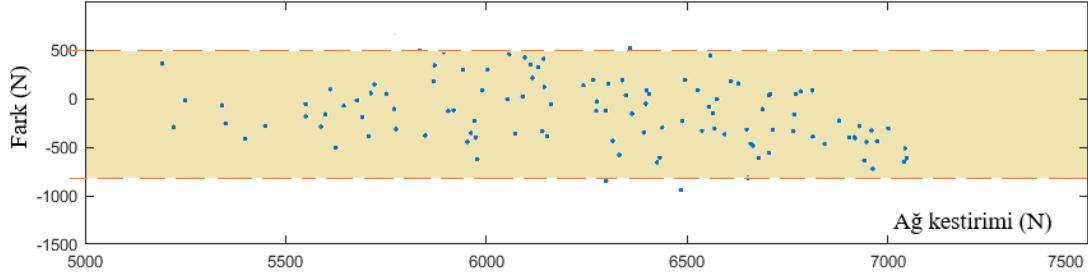


Şekil 9. Test verisi üzerinde (a) zaman serisi cevap eğrisi (b) modelin hatası

Kestirim eğrisi Şekil 9-a'da ve kestirim verisindeki hata ise Şekil 9-b'de gösterilmiştir. Ağın kestirdiği değer ile zaman serisi arasındaki fark, hata olarak adlandırılmaktadır. Zaman serisinin son %20'lik kısmı, kestirim için kullanılmıştır. Şekil 9-b'deki hata değerleri aynı zamanda varyans analizi, hata metrikleri (MSE, RMSE, MAE, MAPE), korelasyon katsayısı R gibi istatistikî araçlarda kullanılacak olan yegâne veridir. Grafiklerden LSTM ağlarının, hem eğri genel şeklini hem de veri doğasından gelen pik ve dipleri temsil edebilme yeteneğinin yüksek olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra kestirim eğrisinde sabit bir kayma olduğu görülmüştür. Bu durumun bias b , terimi ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Bir modeldeki varyansın sabit veya değişken olup-olmadığı, "modelin kestirimi" ve "kestirim hatası" grafiği ile belirlenmektedir. Modellemelerde temel yaklaşım, farkların, her seviyede sabit varyansa sahip olmasıdır. Bu durumda fark dağılımı, tüm kestirim değerlerinde kabaca eşitse, sabit varyans varsayımı karşılanmış olacaktır. Yani, dağılım *eğer iki paralel çizgi arasında kalıyor ise* varyansın sabit olduğu

söylenektir. Aksi takdirde, farkın yayılımı sistematik olarak artar veya azalır, sabit varyans varsayımı büyük olasılıkla ihlal edilmiş demektir. Şekil 10'da verilen varyans dağılımları incelendiğinde dağılımın iki paralel çizgi arasında kaldığı ve rasgele olduğu, bu nedenle de varyansın sabit olduğu anlaşılmıştır [15].



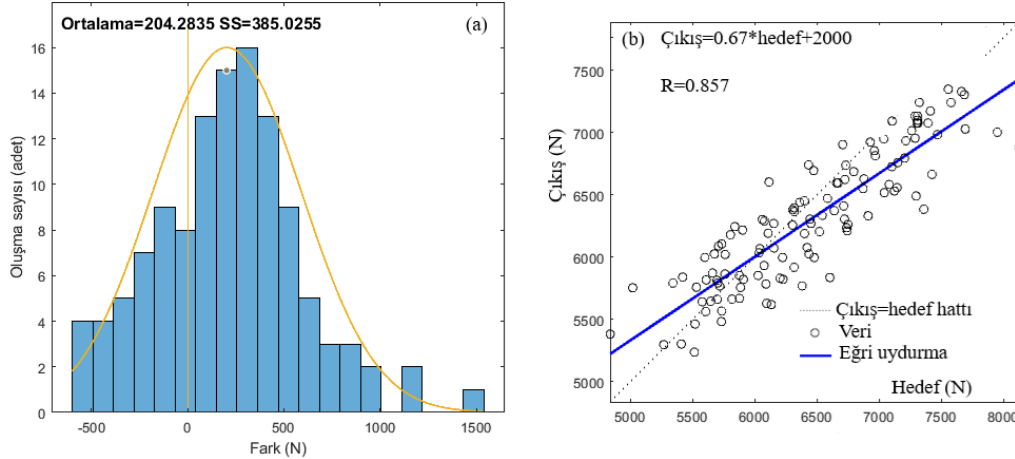
Şekil 10. Varyans analizi

Ağın kestirim performansı ölçümleri Çizelge 3'te gösterilmiştir. Ağ eğitilirken, toplamda 300 iterasyon yapılmış ve hesaplamalar 37,509 saniye sürmüştür. Ağ 0,857 değerinde pozitif korelasyona sahiptir. Bu da ağın kestirimi ile veri seti arasında yüksek doğrulukta bir ilişki olduğu anlamına gelmektedir. Yüksek korelasyon, modelin performansının önemli bir ölçütüdür, ancak tek başına yeterli bir kriter değildir. Bu nedenle hata metrikleri de incelenmelidir.

Çizelge 3. LSTM ağının, eğitim ve test performans metrikleri

Özellik	Eğitim	Kestirim
MAE (birim)*	520,945	379,120
MAPE (%)	3,123	2,326
Ortalama hata (birim)	-137,079	204,2835
MSE (birim ²)	443483,94	223442,778
RMSE (birim)	665,94592	472,697
Hesaplama süresi (s)	37,509	37,934
R	0,608	0,857
İterasyon adedi	300	--

(*) Sürtünme zaman serinin birimi Newton'dur.



Şekil 11. (a) Hata histogramı (b) regresyon analizi

Şekil 11-a'da, 20 çubuklu bir hata histogramı verilmiştir. Bu şekil, kestirim esnasındaki hataların oluşma sayılarını göstermektedir. Yatay eksen hata değeridir. Dikey eksen ise "oluşma sayısı"dır. Hata histogramlarında, ① çan eğrisi biçiminde bir şeklin oluşması, ② eğrinin tepesinin "sıfır hata" çizgisine yakın olması, ③ eğrinin de dar olması istenen bir durumdur. Çan eğrisi oluşmuşsa, rasgele bir hata dağılımı var demektir. Eğrinin darlığı da hatalardaki sapmaların azlığına işaret etmektedir. Eğrinin tepesinin "sıfır hata" çizgisine yakın olması ise sıklıkla, sıfır hataya yakın hata oluştuğu anlamına gelmektedir. Turuncu dikey çizgi "sıfır hata" değerini göstermektedir. Histograma bakıldığında en uzun çubukların "ortalama hata" etrafında toplandığı ancak, ortalamanın "sıfır hata" değerinden bir miktar sağa saptığı görülmüştür.

Şekil 11-b'de ise regresyon analizinin sonuçları gösterilmektedir. Regresyon analizi de model performansının değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan bir başka tekniktir. Bu analiz sayesinde "ağın kestirimi" ile "zaman serisi" arasındaki korelasyon tespit edilmektedir. Grafiklerde "eğri uydurma" doğrusu, (hedef, çıkış) noktalar kümesinin tümünün üzerine birinci dereceden regresyon yapıldığında elde edilen fonksiyonu göstermektedir. Bu fonksiyon $çıkış = a * hedef + b$ türündeki bir doğrudur. Burada a , regresyon doğrusunun eğimi ve b ise doğrunun "çıkış" isimli eksenini kestiği noktadır. Bu doğrunun korelasyonu ise R ile gösterilmektedir. Korelasyon katsayısı R ile gösterilirken R^2 ifadesine determinant katsayısı denmektedir. Her ikisi de birimsizdir. R 'nin 0,01-0,29 arasında değişen değerleri, düşük seviyede bir ilişkiyi gösterirken 0,3-0,7 arasında aldığı değerler orta seviyede bir ilişkiyi, 0,71-0,99 arasındaki değerler ise veriler arasında yüksek seviyede bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Sıfır değeri, ilişki olmadığını gösterirken, negatif değerler, ters bir doğrusal ilişki anlamına gelmektedir. Mutlak değerce R 'nin artması, ilişkinin daha belirgin hâle geldiğini göstermektedir. "Hedef" olarak belirtilen ekseninde, veri setindeki değerler mevcutken, "çıkış" olarak gösterilen ekseninde ise ağın kestirdiği değer verilmiştir. Umulan ise bunların birbirlerine eşit olmasıdır ki bu hâlde $R=1$ olacak ve tüm noktalar 45° doğrusu (----- Çıkış=hedef hattı) üzerinde olacaktır.

Görülebileceği üzere ağ, kestirim verisi üzerinde yüksek korelasyona sahiptir, $R=0,857$. Ağın kestirim esnasındaki ortalama kare hatasının kökü 472,697 N olmaktadır. Ortalama mutlak yüzde hatası ise %3,123 olduğu tespit edilmiştir. Bu durum ağın kestiriminin başarısını göstermektedir.

3.3. Tartışma

Fıstık sınıflandırmada işlem parametrelerinin modellenmesinde ML nadiren kullanılmıştır. Sıklıkla eğri uydurma tekniği kullanılmaktadır [18]. Fakat eğri uydurma yapılacakken işlemi öncesi veriye bazı ön işlemler uygulandığı, bunun da verinin doğallığını bir miktar bozduğu görülmektedir. Ansys Rocky DEM© simülasyonundan elde edilen veri üzerine LSTM ağının oluşturulması, fıstık boyutlandırma konusunda umut verici sonuçlar ortaya koymuştur.

Bir modelin başarısını, diğer modeller ile değerlendirebilmek amacıyla literatürde hata kriterlerinin birbirleri ile kıyaslandığı görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada elde edilen modelin metrikleri, literatürdeki modellerin metrikleri ile kıyaslanmıştır. Bu çalışmada LSTM ağı kullanarak fıstık sınıflandırma sistemine ait işlem parametrelerinin verisine bir ön işlem yapmaya gerek olmadan 0,857 korelasyonla ve 472,697 (N) RMSE ile kestirim yapabilen bir ağ oluşturulmuştur. Ağ kestirimlerindeki varyans sabittir. Kestirim eğrileri incelendiğinde hem genel eğri hem de tepe (pik)-çukur (dip) şekilleri yüksek hassasiyetle kestirebildiği görülmüştür.

AR(4) modeli için AIC değeri 1,5817, ARMA(4,2) modeli için 0,9237, ANFIS yöntemi için 1,3568 ve MLP modeli için 1,4068 olarak rapor edilmiştir [19]. Shi ve arkadaşları (2019), geriye yayılım (BP) algoritması ile RMSE hata değerini 0,0135 °C, SVM yöntemi ile 0,0151 °C ve LSTM yöntemi ile 0,0112 °C olarak belirlemiştir [20]. Wang ve arkadaşları (2022), BP, kapılı tekrarlayan birim (GRU), LSTM ve BILSTM ağlarını kullanarak simülasyon ve deney sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Yapılan analizler, BILSTM ağının kestirim doğruluğunun diğer modellere kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir [21]. Kacar ve Korkmaz (2022), tarımsal kurutma kestiriminde regresyon, NAR ve LSTM modellerini kullanarak, 0,015 g gibi çok düşük bir RMSE değeri elde edebildiklerini rapor etmişlerdir [22]. Ayrıca, N25P5K5 türü organomineral gübre kurutulmasında, çok tabakalı algılayıcı ağı ve LSTM yöntemleriyle 0,99-1,00 arasında bir korelasyon elde edilirken, YSA (Yapay Sinir Ağı) ile 0,201 mg'lık bir RMSE değeri elde edilmiştir [23].

AEY ve LSTM'nin yer fıstığı ayıklama süreçlerine entegrasyonunun güçlü yönleri mevcuttur [24]. Bu teknolojiler, sınıflandırma işlemlerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesini, otomasyonunu sağlayarak verimliliğin, doğruluğun ve ürün kalitesinin artmasını sağlamaktadır [25]. Ayrıca, gelişmiş simülasyonların ve veri odaklı modellerin kullanılması, israfın azaltılmasına, kaynak kullanımının iyileştirilmesine ve yer fıstığı endüstrisinin artan taleplerinin karşılanmasına yardımcı olabilmektedir [26]. Yer fıstığı endüstrisi, küresel gıda üretimi ve ticaretinde önemli bir rol oynamaktadır ve bu da yüksek kalite standartlarının korunması için doğru ve verimli sınıflandırmayı kritik hâle getirmektedir. Geleneksel el ile sınıflandırma süreci zaman, maliyet ve öznellik açısından sınırlamalara sahiptir. AEY esaslı simülasyon ve LSTM yöntemleri, gelecekteki çalışmalar için umut verici çözümler sunmaktadır.

Bununla birlikte, daha fazla araştırma ve geliştirme için hâlâ bazı eksiklikler de mevcuttur. Örneğin zaman serisi verisi üzerinde başarılı olan bir yöntemdir. Gradyan kaybolması ve patlaması problemleri, eğitmenin oldukça zor bir iş olması, aktivasyon fonksiyonu olarak tanh veya relu kullanıldığında çok uzun dizi işleyememeleri de bu yöntemin dezavantajlarıdır. Gelecekteki çalışmalar, bu yöntemlerin doğruluğunu ve hızını iyileştirme, diğer tekniklerle birlikte uygulamalarını keşfetme ve farklı yer fıstığı çeşitlerini ve işleme koşullarını ele alma potansiyellerini araştırmaya odaklanmalıdır. Ayrıca, maliyet etkinliği, uygulama kolaylığı ve mevcut sistemlerle entegrasyonu gibi faktörler de göz önünde bulundurularak bu yöntemlerin yer fıstığı endüstrisinde benimsenmesini teşvik etmek için çaba gösterilmelidir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, bir fıstık sınıflandırma işleminin AEY esaslı simülasyonu yapılarak tane ile elek yüzeyi arasında oluşan sürtünme kuvveti verisinin LSTM ağı ile modellenmesi ve kestirimi yapılmıştır. Tarım ve gıda endüstrilerinde kullanılan silindirik fıstık sınıflandırma makinalarının modellenmesi amaçlanmıştır. Ağın performansı araştırılmıştır. Ağın performansının değerlendirilmesinde istatistiki yöntemler kullanılmıştır. Çalışma sonunda elde edilmiş olan temel çıkarımlar aşağıda maddeler hâlinde sıralanmıştır.

- LSTM ağının, yer fıstığı sınıflandırma kestirimi yapılırken, hem genel eğri şekillerini hem de tepe (pik) ve çukurlarını (dip) başarılı bir şekilde yakalayabildiği gösterilmiştir. Ayrıca, LSTM'nin eğri uydurma yöntemlerinden farklı olarak, herhangi bir veri ön işleme gerektirmemesi de önemli bir avantaj sunmaktadır.
- Elde edilen iç yer fıstığı sınıflandırma modelinin korelasyon değeri 0,857 olup hesaplamaların tamamlanması 300 iterasyon sonrasında 37,934 saniye sürmüştür. Veri seti ve model çıktıları güçlü bir doğrusal ilişkiye sahiptir. Kullanılan ağ, ağın hiperparametreleri ve bu ağ ile elde edilen kestirim performansı çalışma içerisinde sunulmuştur.
- LSTM ağı 1 tabaka derinliğine sahiptir. Tabakada 128 adet gizli birim bulunmaktadır. Eğitim algoritması ADAM olup başlangıç öğrenme hızı 0,05 değerindedir. Bu değer her 100 iterasyonda bir kez azaltılmaktadır. Azalma katsayısı ise 0,1 olup gradyan eşiği 0,8 ve L2 düzeltme katsayısı 0,01 değerindedir.
- Simülasyon 60 saniyelik gerçek zamanı hesaplamak için 63 gün 18 saat 27 dakika sürmüştür. LSTM ağı ise hem eğitim-doğrulama-test hem de 12 saniyelik kestirim işlemi için toplamda 37,934 saniye harcamaktadır. Kıyaslandığında aradaki bariz fark dikkat çekicidir. Tüm hesaplamalar 8 GB RAM ve 2.8 GHz dört çekirdekli CPU'ya sahip aynı bilgisayar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.
- AEY simülasyonundan elde edilen veriye LSTM yönteminin uygulanması, endüstriyel ölçekte üretim hattındaki otomasyonuna dâhil edilebilir bir esneklik sunmaktadır. Sürtünme kuvveti gibi dinamik olarak değişen verilerin, gerçek işletme şartlarında eş zamanlı olarak hızla analiz edilebilmesi, üretim süreçlerinde karşılaşılabilecek sorunların önceden kestirilmesi ve süreci iyileştirmek için üretim optimizasyonuna olanak sağlayabilecektir.

Bu çalışma sonunda oluşturulan ağ, müteakip çalışmalarda, diğer makine öğrenme yöntemleri ile oluşturulabilecek modellerle kıyaslanabilecektir. Ayrıca gelecekteki çalışmalar; bu teknolojilerin doğruluğunu ve hızını iyileştirmeye, yeni uygulamalarını keşfetmeye, farklı iç yer fıstığı sınıflandırma çeşitlerini ve işleme koşullarını araştırmaya odaklanmalıdır. Zaman serisinin gecikmeleri yanı sıra, aynı zamanda harici girişlerin de olabileceği ve bunlarla ağın beslenerek yeni modeller denenmesi müteakip çalışma potansiyeline sahiptir.

5. TEŞEKKÜR

Ayrık eleman yöntemi simülasyonları için kullanılan Ansys Rocky DEM®'in, makine öğrenme yönteminin kodlanmasında yararlanılan Matlab®'in eğitsel amaçlı kullanım imkânını sağlayan sırasıyla, Numesys® Genel Müdürü Sayın Ekin Ersan'a, Sayın Begüm Çifci'ye, Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi'ne, Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne, Dr. Mehmet Seyhan'a teşekkür ederiz. Bu çalışmanın inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları değerli katkılardan dolayı editör, hakem ve emeği geçenlere içten teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G., 2015. Deep learning. Nature, 521(7553), 436-444.

2. Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Rusu, A.A., Veness, J., Bellemare, M.G., Graves, A., Riedmiller, M., Fidjeland, A.K., Ostrovski, G., 2015. Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518(7540), 529-533.
3. Yosinski, J., Clune, J., Bengio, Y., Lipson, H., 2014. How transferable are features in deep neural networks? *Advances in Neural Information Processing Systems*, 27.
4. Zhao, C., Hu, P., Liu, X., Lan, X., Zhang, H., 2023. Stock market analysis using time series relational models for stock price prediction. *Mathematics*, 11(5), 1130.
5. Cundall, P.A., Strack, O.D., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47-65.
6. Ansys Rocky DEM©, 2021. Particle Dynamics Simulation Software. 01.18.2024 [cited 2024 11.29.2024]; Available from: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-rocky>.
7. Deist, T.M., Patti, A., Wang, Z., Krane, D., Sorenson, T., Craft, D., 2019. Simulation-assisted machine learning. *Bioinformatics*, 35(20), 4072-4080.
8. Saadallah, A., Finkeldey, F., Buß, J., Morik, K., Wiederkehr, P., Rhode, W., 2022. Simulation and sensor data fusion for machine learning application. *Advanced Engineering Informatics*, 52, 101600.
9. Ercan, U., 2012. Modeling of cylindrical helical sieve. Master Thesis. Çukurova University, Institute of Science and Technology, Mechanical Engineering, 84.
10. Ugurluay, S., Akcali, İ.D., 2021. Development of a vibrationless sorting system. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 19(1), 204.
11. Akcali, İ.D., Mutlu, H., Ercan, U., 2014. Mathematical model of a sorting machine. *Journal of Agricultural Machinery Science*, 10(3), 229-234.
12. Zhang, C., Chen, Y., Wang, Y., Bai, Q., 2024. Discrete element method simulation of granular materials considering particle breakage in geotechnical and mining engineering: A short review. *Green and Smart Mining Engineering*.
13. Chouhan, K., Chavda, J.T., 2021. A review on numerical simulation of large deformation problems in geotechnical engineering. In *Indian Geotechnical Conference*, Springer.
14. Karaca, S., Uçar, A., 2024. Applications of DEM particle breakage models in mineral industrial. *Scientific Mining Journal*, 62(4), 183-190.
15. Korkmaz, C., Kacar, İ., 2024. Modelleme ve tahmin amaçlı veri ön işleme yöntemlerinin ürün kurutma örneği ile açıklanması. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 21(2), 482-500.
16. Rahman, M.M., Shakeri, M., Khatun, F., Tiong, S.K., Alkahtani, A.A., Samsudin, N.A., Amin, N., Pasupuleti, J., Hasan, M.K., 2023. A comprehensive study and performance analysis of deep neural network-based approaches in wind time-series forecasting. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, 9(2), 183-200.
17. MathWorks, 2023. Long short-term memory (LSTM) layer for recurrent neural network (RNN). 21.05.2024]; Available from: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/nnet.cnn.layer.lstm.html>.
18. Huan, J., Deng, L., Zhu, Y., Jiang, S., Qi, F., 2024. Short-to-medium-term wind power forecasting through enhanced transformer and improved EMD integration. *Energies*, 17(10), 2395.
19. Kacar, İ., 2023. Uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi kullanarak bir mekanik jiroskopun yalpalama kestirimi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(21), 198-209.
20. Shi, H., Hu, S., Zhang, J., 2019. LSTM based prediction algorithm and abnormal change detection for temperature in aerospace gyroscope shell. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 12(2), 274-291.
21. Wang, J., Deng, Z., Shen, K., 2022. Virtual gyros construction and evaluation method based on BILSTM. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1-10.
22. Kacar, İ., Korkmaz, C., 2022. Çok katmanlı algılayıcı ağı, uzun kısa süreli bellek ağı ve regresyon yöntemleri ile tarımsal kurutma tahmini. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(4), 1188-1206.
23. Kacar, İ., Korkmaz, C., 2022. N25P5K5 türü yeni nesil bir bitki besininin kuruma kinetiğinin regresyon ve makine öğrenme yöntemleri ile belirlenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(4), 989-1004.
24. Kacar, İ., 2023. Mekanik tasarım ve analiz bilimsel esasları. Ankara: Akademisyen Kitabevi.
25. Korkmaz, C., 2023. The place of organic and organomineral fertilizer production in sustainable agriculture. In *Sustainable Agriculture Technologies – II*, A. Bayat, Editor. İksad., 184-206.
26. Zhao, X., Chen, J., Du, F., 2012. Potential use of peanut by-products in food processing: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 49, 521-529.

Crime Prediction with DistilBERT-based Feature Extraction and Machine Learning

Emel ÇOLAKOĞLU^{1,a}, Serhat HIZLISOY^{2,b}, Recep Sinan ARSLAN^{2,c}

¹Kayseri University, Rectorate, Kayseri, Türkiye

²Kayseri University, Faculty of Engineering, Architecture and Design, Department of Computer Engineering, Kayseri, Türkiye

^aORCID: 0000-0003-1755-3130; ^bORCID: 0000-0001-8440-5539; ^cORCID: 0000-0002-3028-0416

Article Info

Received : 26.07.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606169

Corresponding Author

Emel ÇOLAKOĞLU

emelcolakoglu@kayseri.edu.tr

Keywords

Google BERT

Natural language processing

Crime analysis

Machine learning

How to cite: ÇOLAKOĞLU, E., HIZLISOY, S., ARSLAN, R.S., (2024). Crime Prediction with DistilBERT-based Feature Extraction and Machine Learning. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 1067-1079.

ABSTRACT

Crime is all actions and behaviors that harm societies and have a legal and criminal counterpart. Although the fight against crime is basically interpreted as the duty of the state, practices similar to this study are important in order to support the struggle. Because it can create situations that can be interpreted with different analyzes made on crime data. From this point of view, additional measures taken will be an auxiliary element in the fight against crime. Being able to predict the crime that may occur ensures that it is prevented before the crime situation occurs. Therefore, the analysis and prediction of crimes is important in identifying and reducing future crimes. In this research, a model in which features are obtained with DistilBERT and 8 different machine learning algorithms are used as classifiers is proposed. The San Francisco crime dataset, which was used for an online competition managed by Kaggle Inc, was used as the dataset. Unlike the literature, all crime categories (39 categories) in the dataset were included in the study. In addition, obtaining features with DistilBERT is another point that differentiates the study. GridSearchCV was preferred for parameter optimization and a general improvement was observed in the range of 1-2% compared to the default parameters. The highest accuracy rate was accomplished with the Support Vector Machine (SVM) with 99.78%. In addition, with 10-fold cross-validation, higher accuracy values were achieved in SVM and Logistic Regression (LR) classifiers.

DistilBERT Tabanlı Özellik Çıkarma ve Makine Öğrenimi ile Suç Tahmini

Makale Bilgileri

Geliş : 26.07.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606169

Sorumlu Yazar

Emel ÇOLAKOĞLU

emelcolakoglu@kayseri.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Google BERT

Doğal dil işleme

Suç analizi

Makine öğrenmesi

Atf şekli: ÇOLAKOĞLU, E., HIZLISOY, S., ARSLAN, R.S., (2024). Crime Prediction with DistilBERT-based Feature Extraction and Machine Learning. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(4), 1067-1079.

ÖZ

Suç toplumlara zarar veren yasal olarak da cezai bir karşılığı da olan tüm eylem ve davranışlardır. Suçla mücadele temelde devletin görevi olarak yorumlanmakla birlikte bu çalışmaya benzer uygulamalar mücadeleyi destekleyebilmek adına önemlidir. Çünkü suç verileri üzerinden yapılan farklı analizler ile yorumlanabilir durumlar ortaya çıkarabilir. Buradan hareketle alınan ek tedbirler suç ile mücadele de yardımcı öge olmuş olur. Oluşabilecek suçun tahmin edilebilmesi suç durumu oluşmadan önlenmesini sağlar. Bu nedenle suçların analizi ve tahmini gelecekteki suçları belirlemede ve azaltmada önemlidir. Bu çalışmada DistilBERT ile özneliklerin elde edildiği ve 8 farklı makine öğrenim algoritmasının sınıflandırıcı olarak kullanıldığı bir model önerilmiştir. Veriseti olarak Kaggle Inc. Tarafından yönetilen çevrimiçi bir yarışma için kullanılan San Francisco suç veriseti kullanılmıştır. Literatürden farklı olarak verisetindeki tüm suç kategorileri (39 kategori) çalışmaya dâhil edilmiştir. Ayrıca DistilBERT ile özneliklerin elde edilmesi de çalışmayı farklılaştıran diğer bir noktadır. Parametre optimizasyonu için GridSearchCV tercih edilmiş ve default parametrelere göre 1-2% aralığında genel iyileşme gözlemlenmiştir. En yüksek doğruluk oranı 99.78% ile Destek Vektör Makinesi (DVM) ile elde edilmiştir. Ayrıca 10 kat çapraz doğrulama ile de yine DVM ve Lojistik Regresyon (LR) sınıflandırıcılarında daha yüksek doğruluk değerlerine ulaşılmıştır.

1. INTRODUCTION

Crime refers to actions defined as legally determined and socially harmful [1]. The most distinctive feature of crime is that it can occur anywhere or at any time. This makes predictability difficult [2].

Crime is one of the most common and worrying situations around the world. The frequency of crime is rising daily and this negatively affects people's lives. Of course, crime analysis and prevention before it occurs is also important in this process [3]. It is fundamentally the responsibility of the security units to manage and mitigate this issue. However, in order to fulfill this task, the crimes committed must be analyzed in detail and the threat levels must be determined. In order to carry out these analyzes, crime data are prepared in many countries and cities and shared for studies [4]. Based on these data, studies have been carried out and continue to be carried out on crime analysis and prediction of crime [3] [5]

Criminology is the scientific study of the scope, causes, management, control, results and prevention of criminal behavior [6]. Criminologists and statisticians conduct studies to analyze crime data and achieve a certain degree of success. However, the increase in the volume of crime and the differences in modern crime make this analysis difficult [7]. In addition, processing this data requires significant human and time resources; since the human being is the controller of the process, it may not be possible to obtain all the relationships/qualities [6]. In this case, it is necessary to involve new techniques in the process in order to analyze the crime [8].

Technological developments in every field have led to analytical approaches to crime [9]. Thus, systematic analysis of crime with approaches such as machine learning, deep learning, and data mining has been included in the process. The introduction of the projects developed in this context will help the security units to use their resources more effectively, to predict crime to some extent, and to fight crime effectively [2]. It is not possible to completely prevent crime with these analyzes. However, additional measures can be taken in sensitive areas and according to the crime group [10].

The use of analytical, especially quantitative techniques, to identify targets, prevent or solve crime is actually the concept of predictive policing. The most important task of this field is to proactively predict criminal activity. In fact, predictive policing is a holistic structure that includes data analysts, developers, and law enforcement [11].

Analysis and prediction of crime is a process that helps to reduce and deter crime [8]. The results of our literature review on crime analysis are as follows:

Khan et al. [2], used San Francisco crime data as a dataset in their research in 2022. They included the top 10 crimes, which make up 97% of the dataset. In their study, they used Gradient Boosting Decision Tree, Naive Bayes (NB) and Random Forest (RF) algorithms to predict and classify crimes into violent and non-violent crimes. A two-class output is intended. They extracted the features from the original dataset. They achieved the best result with Gradient Boosting with 98.5%.

Abouelnaga [12], conducted an analysis on San Francisco crime data in the year 2016. Along with the 3 components of PCA that maintain the highest variance, Hour, Month, County, Day of the Week, Longitude, Latitude, Street No, Block attributes were used. The classifiers were XGBoost (XGB), Bayesian, Decision Tree (DT), RF and K Nearest Neighbor (KNN). The best result was obtained with Random Forest, yielding a log-loss of 2.39031.

Arslan et al. [4], used the San Francisco crime dataset in their 2023 study. The distinguishing feature of this study compared to similar works is the processing of attributes as text and converting them into vectors. Using 10-fold cross-validation, they achieved 99.80% accuracy for the 15 crime categories with the highest incident rates. The study also includes a stacking ensemble model comprising eight machine learning models.

Chandrasekar et al. [13], used Gradient Boosted Decision Trees, NB, SVM and RF classification algorithms in their study. Three different classification analyses were conducted: 39 crime categories, white-collar and blue-collar crimes and non-violent and violent crimes. The dataset was San Francisco crime data. Pre-processing was carried out before classification. United States Census data were also used to develop the

feature set. This data includes demographic data such as the average income level of the neighborhoods and racial diversity. Low recognition values were obtained for 39 classes. The best result for Blue/White Collar Crime was 96.3% (Gradient Boosted Decision Trees) and 75.02% for Severe/Non-Violent Crime classification.

Arslan et al. [14], used the San Francisco dataset and reached an accuracy value of 86.5% with the Random Forest classifier.

Pradhan [15], used the San Francisco crime dataset (2003-2018) in her master's thesis. Data cleaning, data transformation, data reduction pre-operations had been implemented. Five different classifiers were used: Random Forest, Logistic Regression, Naive Bayes, K-Nearest Neighbor and Decision Tree. The best result was obtained in the Decision Tree with 2.3928 log-losses.

Abdulrahman et al. [10], used the San Francisco crime dataset as part of the study. KNN and Naive Bayes were the classifiers whose results were examined. The model was designed using 8 features, including dates, category, description, day of the week, police department area, solution, address, and X&Y coordinates. The best result was obtained with multinomial Naive Bayes using cross validation with 2.611 log-loss.

Bilen et al. [16], examined different regression models in their study in 2022, including Linear, Polynomial, Ridge, and Lasso regression models. The dataset used is the Elaziğ cyber dataset. They achieved 79% success with Polynomial Regression.

Arslan et al. [3], used machine learning algorithms to predict where crimes will occur. The dataset contains 49030 samples, 62 different crime categories, and 12 characteristics related to different crimes that took place in New York State in 2019. 99.9% accuracy was achieved with the decision tree classifier.

Sarzaeim et al. [17], used the Random Forest algorithm on the ML side and BART, GPT-3, and GPT-4 on the LLM side. In all prompting or fine-tuning scenarios, the corresponding OpenAI API for GPT models and the Hugging Face API were used to interact with the BART model. San Francisco and Los Angeles were the datasets used. In both datasets, crime groups were combined and grouped into 10 common classes. Since the datasets were unbalanced, precision, accuracy, recall, and weighted average of the F1 score were taken into account. The best result in the SF dataset was obtained with fine-Tuned GPT3 and the weighted average is 97%. The best result in the LA dataset was obtained with Few-Shot GPT4 and is around 60%.

Selvakumari ve Peter [18], used the real dataset, The DCRB (District Crime Record Bureau) in their study. The dataset consists of six classes. Tokenization, lower casing, lemmatization, stop word removal and stemming preprocessing processes were applied on the dataset. In classification, 1D CNN, GRU and autoencoder techniques were preferred. The highest accuracy value was achieved in the autoencoder technique with 97.4%.

Bharath et al. [19], used more than 6000000 records in the Chicago Police Department's CLEAR (Citizen Law Enforcement Analysis and Reporting) system as crime data. Various pre-processing steps had been applied to the data. 3 different models had been created. These were analysis and time series forecasting according to the type of crime and the location of the crime. The problem was analyzed with four different classifiers including Decision Tree, Random Forest, Logistic Regression and Support Vector Machine. The highest accuracy value was obtained in Random Forest with 98% according to the crime type and 97% KNN according to the location of the crime. The proposed technique went beyond simple annual averages; it had given a deeper understanding of future crime trends. The years 2018 and 2019 were estimated from the model and it was observed that they were close compared to the actual values.

Djon et al. [20] (2023), 86% f-score was obtained with XGB. Only the crime of burglary was analyzed in the Chicago Crime Dataset.

Butt et al. [21] (2024), used six deep learning and statistical methods (LSTM, SMA, EMA, LSTM-CNN, WMA and BiLSTM) to generate accurate predictions in New York (30 categories), the Chicago (28 categories) and Lahore (20 categories) crime datasets. Among the various algorithms, BiLSTM demonstrated the best performance, with minimal MAE, MAD, and MSE values. Additionally, this study

introduced a BiLSTM-based architecture, chosen for its superior accuracy in forecasting weekly and monthly crime trends.

2. METHOD

Figure 1 illustrates the architectural structure of the study. The designed framework essentially consists of obtaining the dataset, applying a series of preprocessing steps on the dataset, extracting features with DistilBERT, performing parameter optimization using GridSearchCV and classification processes with machine learning algorithms.

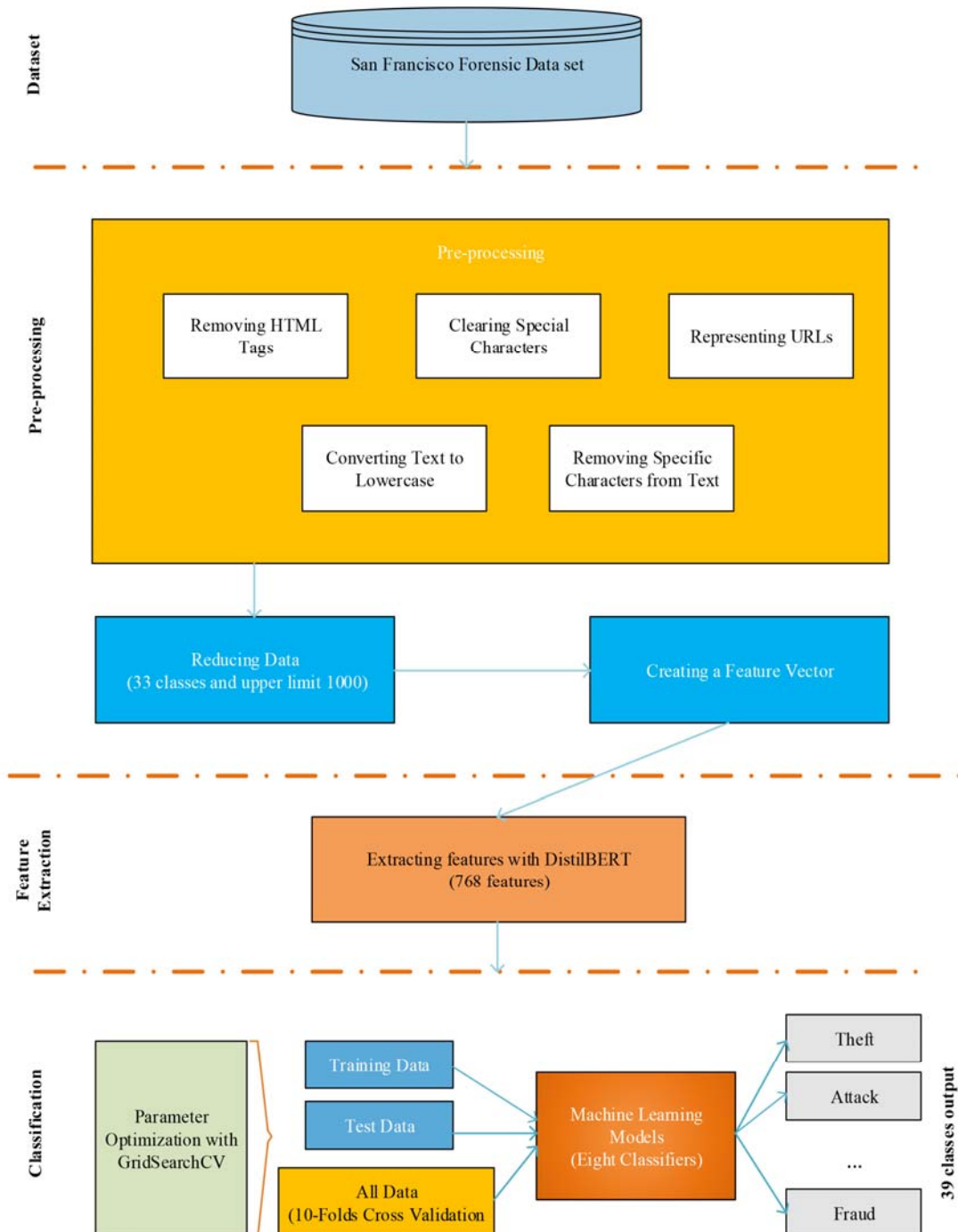


Figure 1. Architectural structure of the model

2.1. Dataset

In this research, the San Francisco crime dataset was used. San Francisco Crime Data is an open-source dataset that can be used for an online competition managed by Kaggle Inc [2]. It consists of 878049 criminal records belonging to 39 different types of crimes that took place between 2003 and 2015 [1]. The dataset includes crime data from all of San Francisco's neighborhoods.

Dataset is partitioned into two parts as training and test data. It consists of nine variables. These are the date of the crime, its day of the week, category, description, how the incident was resolved, the name of the police district, the address of the incident, latitude and longitude [22]. Although the number of samples in all categories does not show a balanced distribution. 39 crime types were added to this study in order to obtain higher recognition rates with more categories compared to similar studies in the literature.

Table 1 shows the distribution of the entire dataset by category.

Table 1. San Francisco crime dataset number of crimes by category

Type of crime	Number of crimes	Type of crime	Number of crimes
Arson	1513	Non-criminal	92304
Assault	76876	Other offenses	126182
Bad checks	406	Pornography/obscene mat	22
Bribery	289	Prostitution	7484
Burglary	36755	Recovered vehicle	3138
Disorderly conduct	4320	Robbery	23000
Driving under the influence	2268	Runaway	1946
Drug/narcotic	53971	Secondary codes	9985
Drunkenness	4280	Sex offenses forcible	4388
Embezzlement	1166	Sex offenses non forcible	148
Extortion	256	Stolen property	4540
Family offenses	491	Suicide	508
Forgery/counterfeiting	10609	Suspicious occ	31414
Fraud	16679	Trea	6
Gambling	146	Trespass	7326
Kidnapping	2341	Vandalism	44725
Larceny/theft	174900	Vehicle theft	53781
Liquor laws	1903	Warrants	42214
Loitering	1225	Weapon laws	8555
Missing person	25989	Total	878049

2.2. Pre-Processing

Before extracting features from the San Francisco crime dataset, a series of preprocessing methods were tested, and the methods that positively contributed to classification were selected. In this context, preliminary operations such as stopwords, snowballstemmer, tokenization, lemmatize, removing HTML tags, clearing special characters, representing URLs, converting text to lowercase and removing certain characters from the text were tested, and those other than stopwords, snowballstemmer, tokenization, lemmatize were used in the study.

Previously, eight variables of the dataset consisting of 9 variables, excluding the crime category, were combined in a single column and determined as Features, while the Crime Category field was used to represent the label part.

When the dataset was examined, it was seen that there were serious numerical differences in the number of samples for 39 different crime groups. When we perform model training without considering these differences, it is possible that there will be a convergence to the groups with a significantly higher sample number. For this reason, it was understood that it was necessary to make a balance between classes in the number of samples. In order to achieve this balancing, it is possible to use (1) Random oversampling or

undersampling methods. (2) It is possible to select a random sample according to a certain number. Oversampling will require a large number of synthetic samples to be produced, which reduces the reliability of the proposed model. When undersampling, there are criminal groups where there are only six samples, as in the case of TREA. For this reason, the number of samples is very low in this case. For these reasons, in order to provide a partial balance in the number of samples, random selection is used in crime groups with 1000 or more samples.

In addition, although 39 crime categories were added to the study, the maximum number of data was determined as 1000 and our dataset consists of 32272 records.

2.3. Extracting Features

After the preprocessing process was completed, the next step was the extraction of features from the crime dataset. Here, DistilBERT was used to obtain the features. 768 features were obtained for 32272 records. While obtaining these features, a partial calculation with 500 records at a time was performed.

Bert Model (Bidirectional Encoder Representations from Transformers)

BERT is an open-source natural language processing model developed by Google [23]. With this model, instead of processing the words individually, the entire sentence was considered as a whole, leading to better results [24].

The most important feature of BERT is that it is bidirectional. Other systems are unidirectional, meaning that words gain meaning by using terms on the left or right side of the text [25]. Google Bert as a two-way it reveals the relationship between words and sentences on the basis of an artificial neural network [24]. In addition, while more data is needed during training in other systems, successful results can be obtained with less data because BERT is bidirectional [23] [25].

In this study, DistilBERT, which is the simplified version of BERT, was used. Although it has a transformer architecture similar to BERT, the transformer layer is 12 in BERT and 6 in DistilBERT. In addition, the token type placement and pooling layers that are included in BERT are also absent in DistilBERT. With this update, the model size has been reduced and the inference speed has increased, while the performance can be deteriorated by 2%-3% [26] [27].

2.4. Parameter Optimization

Afterwards, parameter optimization was performed with GridSearchCV (Grid Search Cross-Validation). In the process, all parameter options were given as input and the combinations with the best results were output. While conducting this analysis, a hundred records were sampled for each category in the dataset. In addition, the best parameter value was determined with 3-fold cross-validation in all classes. All the tested parameters and the list of the best results obtained are presented in Table 2.

Within the scope of the study, the results of 8 machine learning algorithms obtained with default parameters are listed in Table 3.

GridSearchCV is a method for setting parameters that systematically constructs and assesses a model for every combination of algorithm parameters within a specified grid [28]. GridSearchCV is provided by the scikit-learn framework. The instructions typically specify a glossary for storing the initial parameters to be examined, after which GridSearchCV performs all necessary model adjustments and identifies the optimal parameters [29].

2.5. Classification

In the classification process, analyzes were made with 8 different machine learning algorithms. The dataset was divided into 70% training and 30% test data, and accuracy values were obtained. Additionally, results were obtained using 10-fold cross-validation and compared.

Table 2. Tested parameters and best results obtained with GridSearchCV

Classifier	Tested parameter values	Best parameter values
Support Vector Machine (SVM)	C: [10.0, 1.0, 0.1], Coef0: [0.5, 0.0, 0.1], Gamma: ['scale', 'auto'], Degree: [4, 3, 2], class_weight: [None, 'balanced'], kernel: ['linear', 'sigmoid', 'poly', 'rbf']	C: 10.0 Coef0: 0.5, Gamma: scale, Degree: 4, class_weight: None, kernel: poly
K Nearest Neighbor (KNN)	n_neighbors: [7, 5, 3], algorithm: ['ball_tree', 'kd_tree', 'brute', 'auto'], p: [1, 2], metric: ['minkowski', 'manhattan', 'euclidean'] weights: ['distance', 'uniform'] leaf_size: [30, 50]	n_neighbors: 3 algorithm: auto, p: 2, metric: minkowski, weights: distance, leaf_size: 30
Linear Discriminant Analysis (LDA)	solver: ['svd', 'lsqr', 'eigen'], priors: [None, [0.3, 0.4, 0.3]], n_components: [None, 2, 3], tol: [1e-2, 1e-3, 1e-4], shrinkage: [0.1, None, 'auto']	solver: 'svd', priors: None, n_components: None, tol: 0.0001, shrinkage: None
Decision Tree (DT)	min_samples_leaf: [4,2,1], splitter: ['best', 'random'], max_depth: [None, 30,20,10], class_weight: [None, 'balanced'], criterion: ['gini', 'entropy'], min_samples_split: [10,5,2], max_features: ['log2', 'auto', 'sqrt']	min_samples_leaf: 1, splitter: best, max_depth: 20, class_weight: balanced, criterion: entropy, min_samples_split: 5, max_features: sqrt
Extra Tree (ET)	n_estimators: [50, 100, 200], criterion: ['entropy', 'gini'], min_samples_leaf: [4,2,1], bootstrap: [True, False], class_weight: [None, 'balanced'], min_samples_split: [10,5,2], max_features: ['auto', 'sqrt', 'log2'], max_depth: [None, 20,10],	n_estimators: 200, criterion: gini, min_samples_leaf : 1, bootstrap: false, class_weight:balanced, min_samples_split: 2, max_features: sqrt, max_depth : None
Random Forest (RF)	max_depth:[3,5,10,None], n_estimators:[10,100,200], min_samples_split:[3,2,1], min_samples_leaf:[3,2,1], max_features:[7,5,3,1]	max_depth: None, n_estimators: 200, min_samples_split: 2, min_samples_leaf: 1, max_features: 7
Naive Bayes (NB)		Priors: None
Logistic Regression (LR)	penalty: ['l1', 'l2'], C: [10.0, 0.1, 1.0], solver: ['saga', 'liblinear', 'newton-cg', 'lbfgs', 'sag'], multi_class: ['ovr', 'multinomial'], class_weight: [None, 'balanced'] max_iter: [100, 200, 300]	penalty: l2, C: 10.0, solver: newton-cg, multi_class: ovr, class_weight: balanced max_iter: 100

3. RESULTS

In this research, crime category estimation was performed with machine learning (ML) algorithms after extracting the features with BERT. All results are given in Table 3. In this analysis, the dataset is grouped as 70%-30% training and testing data.

The values in Table 3 are the result of all machine-learning algorithms obtained with default parameters. As shown in Table 3, more than 99% accuracy was obtained with Linear Discriminant Analysis.

Additionally, the category classification accuracy rates of all classifiers except Decision Tree and Naive Bayes are also quite high with 97% and above.

After parameter optimization with GridSearchCV, the results are presented in Table 4. It was observed that either there was an increase in the obtained accuracy values or the same values were achieved as those obtained with the default parameters. Here, the best accuracy value was obtained with SVM and is 99.78%.

The fact that such high recognition rates have been achieved may suggest an overfit. In general, k-fold cross-validation is one of the methods used to check for overfitting. During this process, the dataset is split into K parts. During the training process, one layer at a time is used for testing and the remaining K-1 layer is used for training. This process is repeated K times. In other words, the model is tested in all subsets. Finally, all the values obtained are averaged. In this case, the model is tested on different samples.

In this study, 10-fold cross-validation was performed to test for overfitting. The results are given in Table 5. When we examine the results according to Table 5, it is seen that the results obtained in Table 4 are parallel to all classifiers. In addition, the highest recognition rates were obtained by SVM and Logistic Regression, as in the values obtained after parameter optimization. The results obtained in these two tables show that there is no overfitting situation in the model.

Table 3. Overview of all results (before parameter optimization)

Algorithms	Accuracy value	Precision value	Re-call value	F1-measure value
SVM	97.21%	97.19%	97.21%	97.16%
Logistic regression	98.71%	98.70%	98.71%	98.70%
K nearest neighbor	98.07%	98.09%	98.07%	98.06%
Decision tree	79.32%	79.31%	79.32%	79.27%
Extra tree	97.74%	97.75%	97.74%	97.71%
LDA	99.30%	99.31%	99.30%	99.30%
Naive bayes	88.23%	89.00%	88.23%	88.38%
Random forest	97.72%	97.73%	97.72%	97.69%

Table 4. Overview of all results (after parameter optimization)

Algorithms	Accuracy value	Precision value	Re-call value	F1-measure value
SVM	99.78%	99.78%	99.78%	99.78%
Logistic regression	99.70%	99.70%	99.70%	99.70%
K nearest neighbor	98.18%	98.20%	98.18%	98.18%
Decision tree	71.94%	72.29%	71.94%	72.05%
Extra tree	97.97%	97.98%	97.97%	97.94%
LDA	99.30%	99.31%	99.30%	99.30%
Naive bayes	88.23%	89.00%	88.23%	88.38%
Random forest	97.43%	97.45%	97.43%	97.39%

Table 5. 10 fold cross-validation (after parameter optimization)

Algorithm	Accuracy	Algorithm	Accuracy
SVM	99.65%	Extra Tree	97.94%
Logistic Regression	99.65%	LDA	99.27%
K Nearest Neighbor	98.14%	Naive Bayes	87.99%
Decision Tree	73.10%	Random Forest	97.35%

Figure 4 shows the Box Plot curve obtained by 10-fold cross-validation. According to this graph, the highest accuracy value is seen in SVM and Logistic Regression classifiers. The Decision Tree has the lowest accuracy value.

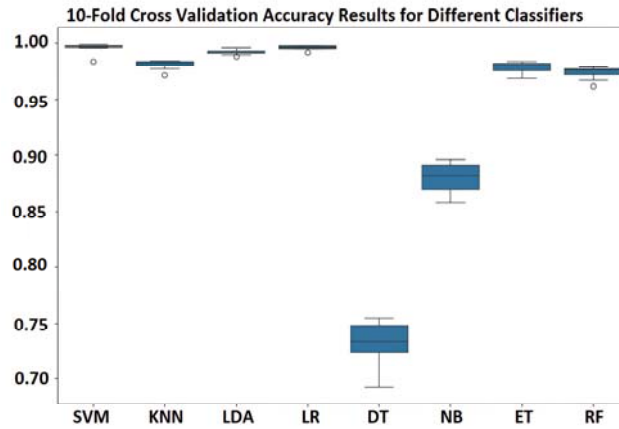


Figure 4. Box plot (for 10 fold cross-validation)

Figure 5 shows the training-test graph obtained with 10-fold cross-validation. According to this graph, the longest training time is seen in Logistic Regression. In other words, it can be called the most costly algorithm in terms of training time. It is also one of the two best algorithms in terms of accuracy value with 99.65%. The test durations are generally so short that they are not perceptible in the graph. SVM, on the other hand, is the longest algorithm in terms of test time. In SVM, training and testing times are close to each other. In fact, according to this graph, the most efficient algorithms can be interpreted as Naive Bayes and Nearest Neighbor. However, in terms of accuracy value, NB lagged behind. The same accuracy values were obtained at 10-fold cross-validation in SVM and LR. If we accept the result of the graph in Figure 5 as input, the best algorithm can be interpreted as SVM.

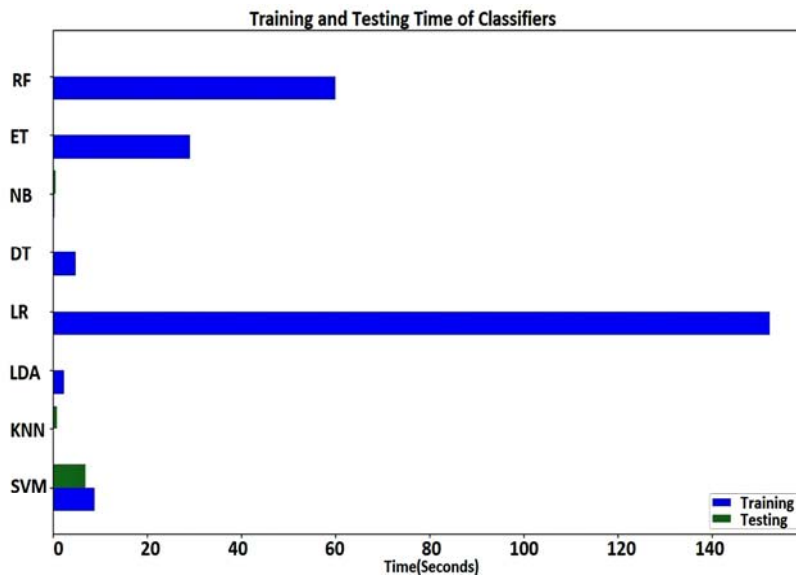


Figure 5. Training-test duration graph (for 10 fold cross-validation)

4. DISCUSSION

In Table 6, we have listed similar studies in the category of crime classification. In this comparison, we generally tried to prefer samples that used the same data set as our study. We have displayed the obtained information in terms of the dataset, the extraction of features, the classifier, and the breakdown of the best results achieved.

When we made a comparison based on the data set, it was seen that the first 10 or 15 categories in which the crime was committed the most were included in the studies in the applications using the same data set as our study. In the study of Chandrasekar et al., it was stated that 39 categories were included [13] and the results were not shared because they were not successful. In addition, in this study, an additional dataset containing demographic data was used to improve the dataset. In the other two studies with 39 classes, [10], and [12] it was seen that 2.611 and 2.39031 log losses were obtained, respectively. The difference in performance criteria in these two studies does not make it possible to compare in the evaluation process.

In the process of obtaining the features, the features from the dataset were generally preferred. Khan et al. [2] and Arslan et al. [4] obtained the features by Exploratory Data Analysis (EDA) and Doc2Vec, respectively. In our study, the features from the dataset were combined and used as input to DistilBERT, thus obtaining 768 features.

There are also studies where pre-processing processes such as data cleaning, data transformation and data reduction are applied. In our study, we tried different pre-processing methods and used the procedures in which we got positive results.

Within the scope of the review, it is seen that machine-learning algorithms are preferred as classifiers. In general, algorithms were used singularly and their results were evaluated. In our previous study [4] we developed a stacking ensemble model that includes eight ML algorithms. In our last study, we used machine-learning algorithms singularly and compared them. In addition, the highest accuracy values were generally obtained with the Random Forest and Decision Tree. In our study, the highest accuracy value was obtained with SVM.

The highest accuracy rate obtained on the same dataset (San Francisco Crime Dataset) within the scope of the review is seen in our previous study with 99.80% [4]. However, in this study, 15 criminal groups were involved in the process. In the last study, the best result was 99.78%, and 39 criminal groups were involved. In this case, it shows that the new model has better performance with more classes.

Table 6. Previous studies on crime analysis

Study	Dataset	Feature extraction	Classifier	Accuracy rate
Khan et al. [2]	San Francisco crime dataset (10 criminal groups selected)	Exploratory Data Analysis (EDA)	Gradient Boosting Decision Tree RF NB,	98.5% (2 classes)
Arslan et al. [4]	San Francisco crime dataset (15 criminal groups selected)	Doc2Vec	Stacking Ensemble (8 machine learning algorithms)	99.80%
Arslan et al. [14]	San Francisco crime dataset (15 criminal groups selected)	Available features in the dataset	Random Forest	86.5%
Arslan et al. [3]	49030 records of different crimes committed in New York State, 62 different categories of crimes, and 12 characteristics	Available features in the dataset	Decision Tree	99.9%
Bilen [16]	Elazig cybercrime dataset(6 criminal groups)	Available features in the dataset	Polynomial Regression	79%
Djon [20]	Chicago Crime Dataset(21 criminal groups)		XGBoost	86,0% (F1 score)
Pradhan [15]	San Francisco crime dataset(30 combined crime classes)	Available features in the dataset	Random Forest Naive Bayes LR KNN Decision Tree	2.3928 (log-lost)

Chandrasekhar et al. [13]	San Francisco crime dataset (39 criminal groups selected) United States Census Data	Available features in the dataset	NB, RF SVC Gradient Boosted Decision Trees	96.3% (Blue/White Collar Crimes) 75.02% (Severe/Non-Violent Crime)
Abdulrahman et al. [10]	San Francisco crime dataset (39 criminal groups selected)	Available features in the dataset	KNN Naive Bayes	2.611 (log-loss)
Abouelnaga [12]	San Francisco crime dataset (39 criminal groups selected)	Available features in the dataset	KNN XGB Decision tree Bayesian Random Forest	2.39031 (log lost)
Recommended Method 2024	San Francisco crime dataset (39 criminal groups selected)	DistilBERT	SVM LR KNN DT ET LDA NB, RF	99.78%

5. CONCLUSIONS

In this study, the San Francisco dataset, managed by Kaggle Inc., was used. The dataset, which includes 39 classes, was utilized for modeling and was limited to a maximum of 1000 records. Different methods were tried in the pre-processing process and those that contributed positively to the process were preferred. Out of the nine variables in the dataset, eight were combined and used as input for DistilBERT. DistilBERT, a customized version of BERT, produced 768 features. Different machine learning algorithms were trained using these features, and their accuracy values were compared. Additionally, GridSearchCV was employed for parameter optimization. Analysis was carried out with the default parameters and the parameters obtained after optimization. Improvement was observed after parameter optimization. Among all the values compared, the SVM achieved the highest accuracy. Again, when we accept the training-test period as an input to the results obtained with 10-fold cross-validation, it is seen that the highest accuracy value is obtained with SVM.

6. REFERENCES

1. Dülgeroğlu, B., 2024. Suç kategori tespiti için istifleme topluluğu modeli kullanan sistem tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Kayseri Üniversitesi, Kayseri.
2. Khan, M., Azmat, A., Alharbi, Y., 2022. Predicting and preventing crime: a crime prediction model using san francisco crime data by classification techniques. Complexity, 2022(1), 4830411.
3. Horoz, A.D., Arslan, H., 2023. Crime analysis and forecasting using machine learning. Journal of Optimization and Decision Making, 2(2), 270-275.
4. Arslan, R.S., Dülgeroğlu, B., 2023. A design of crime category detection framework using stacking ensemble model. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(4), 1035-1048.
5. Butt, U.M., Letchmunan, S., Hassan, F.H., Ali, M., Baqir, A., Sherazi, H.H.R., 2020. Spatio-temporal crime hotspot detection and prediction: a systematic literature review. IEEE Access, 8, 166553-166574.
6. Bharathi, S.T., Indrani, B., Prabakar, M.A., 2017. A supervised learning approach for criminal identification using similarity measures and K-Medoids clustering. In 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT), 646-653. IEEE.
7. Babakura, A., Sulaiman, M.N., Yusuf, M.A., 2014. Improved method of classification algorithms for crime prediction. In 2014 International Symposium on Biometrics and Security Technologies (ISBAST), 250-255. IEEE.

8. Baculo, M.J.C., Marzan, C.S., de Dios Bulos, R., Ruiz, C., 2017. Geospatial-temporal analysis and classification of criminal data in manila. In 2017 2nd IEEE International Conference on Computational Intelligence and Applications (ICCIA), 6-11. IEEE.
9. Borowik, G., Wawrzyniak, Z.M., Cichosz, P., 2018. Time series analysis for crime forecasting. In 2018 26th International Conference on Systems Engineering (ICSEng), 1-10. IEEE.
10. Abdulrahman, N., Abedalkhader, W., 2017. KNN classifier and Naive Bayse classifier for crime prediction in San Francisco context. International Journal of Database Management Systems, 9(4), 1-9.
11. Borges, J., Ziehr, D., Beigl, M., Cacho, N., Martins, A., Araujo, A., Bezerra, L., Geisler, S., 2018. Time-series features for predictive policing. In 2018 IEEE international smart cities conference (ISC2), 1-8. IEEE.
12. Yehya, A., 2016. San francisco crime classification. arXiv Preprint arXiv, 1607.03626.
13. Chandrasekar, A., Sunder, A., Kumar, P., 2015. Crime prediction and classification in San Francisco City.
14. Arslan, R.S., Dülgeroğlu, B., 2023. Crime classification using categorical feature engineering and machine learning. In 2023 International Ankara Congress on Multidisciplinary Studies-VI, 1-8.
15. Pradhan, I., 2018. Exploratory data analysis and crime prediction in San Francisco. San Jose State University, 2018.
16. Bilen, A., Özer, A.B., 2022. Regresyon yöntemlerine dayalı suç tespit analizi karşılaştırması Elazığ ili örneği. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 34(1), 115-121.
17. Sarzaeim, P., Mahmoud, Q.H., Azim, A., 2024. Experimental analysis of large language models in crime classification and prediction. In Proceedings of the Canadian Conference on Artificial Intelligence.
18. Selvakumari, S., Peter, V., 2024. Crime classification using GRU, CNN and autoencoder techniques. Educational Administration: Theory and Practice, 30(5), 2950-2964.
19. Bharath, R.R., Sulthan, H.K., Mingaz, R.M., Kumaravengatesh, S.N.A., 2024. Machine learning approach to crime analysis and forecasting for prediction and prevention. African Journal of Biological Sciences, 1300-1313.
20. Djon, D., Jhavar, J., Drumm, K., Tran, V., 2023. A comparative analysis of multiple methods for predicting a specific type of crime in the city of Chicago. arXiv Preprint arXiv, 2304.13464.
21. Butt, U.M., Letchmunan, S., Hassan, F.H., Koh, T.W., 2024. Leveraging transfer learning with deep learning for crime prediction. Plos One, 19(4), e0296486.
22. Kan, W., 2015. San Francisco crime classification. <https://kaggle.com/competitions/sf-crime>, Kaggle.
23. Özkan, M., Kar, G., 2022. Türkçe dilinde yazılan bilimsel metinlerin derin öğrenme tekniği uygulanarak çoklu sınıflandırılması. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 504-519.
24. Sevlı, O., Kemaloğlu, N., 2021. Olağandışı olaylar hakkındaki tweet'lerin gerçek ve gerçek dışı olarak google BERT modeli ile sınıflandırılması. Veri Bilimi, 4(1), 31-37.
25. Özkömürçü, H., 2021. Google Bert algoritması/Google Bert nedir? [Online]. Available: <https://hozkomurcu.com/google-bert-algoritmasi-google-bert-nedir/>, Access date: 06.2024.
26. Liu, W., Zhang, S., Zhou, L., Luo, N., Xu, M., 2024. A semi-supervised mixture model of visual language multitask for vehicle recognition. Applied Soft Computing, 159, 111619.
27. Sanh, V., Debut, L., Chaumond, J., Wolf, T., 2019. DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter. arXiv Preprint arXiv, 1910.01108.
28. Ranjan, G.S.K., Verma, A.K., Radhika, S., 2019. K-nearest neighbors and grid search cv based real time fault monitoring system for industries. In 2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), 1-5. IEEE.
29. Pirjatullah, Kartini, D., Nugrahadi, D.T., Muliadi, M., Farmadi, A., 2021. Hyperparameter tuning using GridsearchCV on the comparison of the activation function of the ELM method to the classification of pneumonia in toddlers. In 2021 4th International Conference of Computer and Informatics Engineering (IC2IE), 390-395. IEEE.



Şeker Pancarı Atığı Katkılı Kil Zeminin Serbest Basınç ve Konsolidasyon Verilerinin İrdelenmesi

İlkim ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ^{1,a}, Baki BAĞRIAÇIK^{1,b}

¹ Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Adana

^aORCID: 0009-0001-1729-2471; ^bORCID: 0000-0002-1860-2881

Makale Bilgileri

Geliş : 27.03.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606445

Sorumlu Yazar

İlkim ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ

iozbahceci@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Zemin iyileştirme

Atık

Serbest basınç Mukavemeti

Konsolidasyon

Sürdürülebilirlik

Atf şekli: ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ, İ., BAĞRIAÇIK, B., (2024). Şeker Pancarı Atığı Katkılı Kil Zeminin Serbest Basınç ve Konsolidasyon Verilerinin İrdelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1081-1092.

ÖZ

Yapılan bu çalışmada toz şeker üretiminde kullanılan şeker pancarının işleme sonrası arta kalan posaları ile zeminin geoteknik özelliklerine katkısı incelenmiştir. Şeker pancarı posası bol miktarda su içeriğine sahiptir. Suyu uzaklaştırmak amacı ile şeker pancarı 1 gün süre ile etüv yardımı ile kurutulmuştur. Şeker pancarı atığı (ŞPA) öğütülerek elek analizi yapılmıştır. ŞPA katkısının optimum miktarını belirlemek amacı ile doğal kil zemine %0,25, %0,5, %0,75, %0,85 ve %1 oranlarında şeker pancarı atığı içeren serbest basınç numuneleri hazırlanmıştır. Ek olarak zemin iyileştirmeye katkısı bilinen biyopolimerlerin ŞPA ile çalışıp çalışmayacağı belirlenmek için Arabic Gum (AG) kullanılmıştır. Arabic Gum (AG) katkılı numuneler 7 farklı yüzde içeriği ile hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler ile optimum atık ve biyopolimer oranı bulunmuştur. Optimum oranları belirlenen ŞPA + AG karışımı olumlu sonuç vermemiştir. İdeal kür süresini belirlemek için belirlenen oranda ŞPA içeren zemine 1, 3, 5, 7 ve 10 gün kür süresi ile serbest basınç deneyine tabii tutulmuştur. Doğal kil zemin ve ŞPA katkılı optimum oranlarda hazırlanan zemin numunesi dayanım değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuçta optimum oranlarda atık içeriği ile hazırlanan zemin, doğal kil zeminden 3,62 oranında daha fazla dayanıma sahiptir. Biyopolimer katkısı eklenen ŞPA numuneleri olumlu sonuç vermemiştir. Fakat konsolidasyon deneyi aşamasında optimum oranda biyopolimer eklenmiş ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Tüm seri deneyler sonucunda şeker pancarı atığının killi zeminin dayanım ve konsolidasyon parametrelerinde iyileşme sağladığı sonucuna varılmıştır.

Analysis of Unconfined Compression Test and Consolidation Data of Clay Soil Added with Sugar Beet Waste

Article Info

Received : 27.03.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606445

Corresponding Author

İlkim ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ

iozbahceci@cu.edu.tr

Keywords

Soil improvement,

Waste

Unconfined compressive strength

Consolidation

Sustainability

How to cite: ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ, İ., BAĞRIAÇIK, B., (2024). Şeker Pancarı Atığı Katkılı Kil Zeminin Serbest Basınç ve Konsolidasyon Verilerinin İrdelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1081-1092.

ABSTRACT

In this study, the contribution of the remaining pulp of sugar beet used in granulated sugar production to the geotechnical properties of the soil was investigated. Sugar beet pulp has a large amount of water content. In order to remove water, sugar beet was dried with the help of an oven for 1 day. Sugar beet waste (SPA) was ground and sieve analysis was performed. In order to determine the optimum amount of SPA additive, free pressure samples containing sugar beet waste at the rates of 0,25%, 0,5%, 0,75%, 0,85% and 1% were prepared for natural clay soil. In addition, Arabic Gum (AG) was used to determine whether biopolymers known to contribute to soil improvement would work with SPA. Samples with Arabic Gum (AG) additive were prepared with 7 different percentage contents. The optimum waste and biopolymer ratio was found with the prepared samples. The SPA + AG mixture with the optimum ratios determined did not give positive results. In order to determine the ideal cure period, the soil containing the determined amount of SPA was subjected to unconfined compression test with a cure period of 1, 3, 5, 7 and 10 days. The strength values of the soil samples prepared with optimum ratios of natural clay soil and SPA additives were compared. As a result, the soil prepared with optimum ratios of waste content has 3.62 more strength than the natural clay soil. SPA samples with biopolymer additive did not give positive results. However, optimum ratio of biopolymer was added during the consolidation test stage and positive results were obtained. As a result of all series of experiments, it was concluded that sugar beet waste provided improvement in the strength and consolidation parameters of the clay soil.

1. GİRİŞ

Yaşam boyunca hayatımızı devam ettirebilmemiz için farklı ihtiyaçlarımız vardır. İnşaat mühendisliği alanında karşılamamız gereken ihtiyacımız ise barınma ihtiyacıdır. İnsanlar geçmişten günümüze kadar barınma ihtiyacını karşılamak için ağaç dallarından, çamurdan vb. malzemelerden barınak inşa etmişlerdir. Günümüze kadar gelişen ve iyileşen teknolojiyle birlikte betonarme olarak adlandırılan çok katlı binalar yapılmaktadır. Artan nüfusla birlikte yapılan binalar yetersiz gelmekte ve yeni inşaat alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat inşaat için uygun olan alanların azalmasıyla birlikte tarım arazileri imara açılmaya başlanmıştır. İnşaat mühendisliğinin bir dalı olan geoteknik mühendisliği ise yapı yapmaya uygun olmayan bu alanların çeşitli yöntemler aracılığı ile iyileştirerek inşaata uygun hale getirmeye çalışmaktadır. Bu çalışmada da inşaat yapmaya uygun olmayan doğal kil zemini şeker pancarı atığı yardımı ile dayanım ve konsolidasyon özellikleri açısından incelenmiştir.

Şeker pancarı atığı (ŞPA) şeker fabrikalarında toz şeker üretimi esnasında ortaya çıkan bir atık türüdür. Bu atık biyogaz üretiminde ve hayvanların besin ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılmaktadır. Fakat ortaya çıkan bu atık yüksek miktarlarda olduğu için kullanım alanı yetersiz gelmektedir. Kalan atıklar bozulma yaşadığı için görüntü ve koku olarak kirlilik yaratmaktadır. Bu sebep dolayısı ile bu çalışmada ŞPA'nın geoteknik alanında kullanımının yer edip edemeyeceği araştırılmıştır. Hedeflenen amaç kullanılan atığın dayanımı düşük kil zeminin dayanımı artırıp artırmayacağıdır.

Aksoy ve Yıldırım [1] yürüttükleri çalışmada kaolin kilinin mukavemetini Polipropilen Elyaf (PPF) lifleri ve Polietilen Tereftalat (PET) talaşları yardımı ile artırmaya çalışmışlardır. Kaolin kiline ağırlıkça %0, %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 oranlarında PPF lifleri ve PET talaşları eklenerek numuneler hazırlanmıştır. Numunelere serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda katkılı kaolin kilinin mukavemetinde dikkate değer artışlar olduğu tespit edilmiştir. %2,0 PPF eklenen kaolin kilinin serbest basınç mukavemeti, katkısız kaolin kili numunelere göre %116 oranında artış göstermiştir. %2 oranında PET katkısı ile iyileştirilen kaolin kilinde ise serbest basınç mukavemeti %36 artış göstermiştir.

Büyüköflaz [2] tez çalışmasında kireç ve uçucu kül ile stabilize edilmiş yüksek plastisiteli kil zemine atık lastik eklendiğinde meydana gelecek değişimleri incelemiştir. Bu amaç doğrultusunda kireç oranı sabit tutularak farklı oranlarda uçucu kül ve atık lastikler ekleyerek deneyler yapılmıştır. Karışım haline gelen zemine kıvam limit, kompaksiyon, şişme potansiyeli, serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda şişme potansiyelinin azaldığı ve serbest basınç dayanımının arttığı görülmüştür.

Topçuoğlu ve Gürocak [3] çalışmalarında bentonit kilini stabilize etmek amacıyla optimum bazalt fiber oranını bulmaya çalışmışlardır. 6 mm uzunluğunda farklı oranlarda bazalt fiber ekleyerek numuneler hazırlamışlardır. Sonucunda ise 6mm uzunluğunda %4 oranında bazalt fiber içeren numunenin en yüksek dayanıma sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Kabeta [4] çalışmasında zayıf killi bir zemine ağırlıkça %0,2, %0,3 ve %0,4 oranlarında plastik atık içeren numuneler hazırlanmıştır. Numunelere CBR deneyi serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Çalışmanın sonuçları, plastik atıklarla stabilize edilen zeminin mukavemetinde artış meydana gelmiştir. CBR deneyinden elde edilen sonuca göre, CBR değerinde artış yaşanmıştır. Serbest basınç deneyinde ise %0,4 plastik atık içeren numunenin dayanımı %138 oranında artmıştır. Sonuç olarak, çalışmada kullanılan plastik atık maddenin mühendislik özellikleri düşük bir kil zeminde iyileştirme aracı olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

Ibrahim ve arkadaşları [5] çalışmalarında yüksek plastisiteli kil zemine toz cam atığı eklemiştir. %6, %12, %18, %27 VE %36 oranlarında cam tozu eklenen numunelere zemin deneyleri uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda zeminin mukavemeti %27 oranında cam tozu ile beraber 560 kPa'ya yükselmiştir. %36 oranında eklenen cam tozu ise 517 kPa değerine sahiptir. Diğer mühendislik özellikleri ise genel olarak %18 katkı oranına kadar iyileşme sağlamıştır. Bu nedenle %18 cam tozu içeren numunenin en iyi sonucu verdiği söylenebilir.

Kassa ve arkadaşları [6] yaptıkları çalışmada atık plastik şişeleri şeritler halinde parçalar halinde kullanarak kil bir zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmeye çalışmışlardır. Bu amaç ile farklı oranlarda farklı

boyutlarda plastik şişe şeritleri eklenmiştir. En iyi dayanım sonucu ise 10*15 boyutlarında %0,5 oranında plastik şişe atığı içeren numunede elde edilmiştir. Yapılan diğer deneylerde de plastik şişe atığı eklenen numuneler doğal haline göre iyileşme göstermiştir. Bu nedenle sonuç olarak, plastik şişe atığının kil zeminin iyileştirilmesinde olumlu yönde sonuç verdiği söylenebilir.

Syahril ve arkadaşları [7] yürüttükleri çalışmada yumuşak bir kile volkanik kül atığı ve maden atıkları ekleyerek zemin stabilizasyonu çalışması yapmışlardır. Kil zemine %8 oranında volkanik külü sabit tutarak maden atığı miktarını %4, %5 ve %6 oranlarında ekleyerek kür süresine bağlı serbest basınç deneyleri gerçekleştirmişlerdir. En iyi dayanım değeri ise %6 maden atık değeri ile 14 günlük kür süresinde elde edilmiştir. Genel olarak çalışma sonucunda iki atık maddenin kil zeminin taşıma kapasitesinde iyileşme sağladığı sonucuna varılmıştır.

Menezes ve arkadaşları [8] çalışmalarında killi kum zemine Hindistan cevizi lifi ekleyerek zeminin dayanımında meydana gelen değişimleri gözlemlemişlerdir. Farklı miktarlarda Hindistan cevizi lifi içeren numunelere serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Serbest basınç dayanımı, hindistan cevizi lifi eklenmesiyle artış göstermiştir. %0,5 lif içeren karışımı için en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır. Doğal hale kıyasla %50,8 oranında artış meydana gelmiştir

Totiç ve arkadaşları [9] çalışmalarında Bartın ilinden alınan kil zemine ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 oranlarda atık F sınıfı uçucu kül katılarak deney numuneleri hazırlamışlardır. Kül oranlarına bağlı olarak kıvam limitleri bulunmuştur. Plastisite indisi oran arttıkça artış göstermiştir. Tüm katkılı numuneler için serbest basınç deneyi yapılmıştır. %10 katkı oranına kadar değerler artmış sonrasında ise azalmıştır. Sonraki değerler ise mühendislik özelliklerinin düşmesine sebep olmuştur. Sonuç olarak %10 oranında F tipi uçucu kül katkısının kil zeminin mühendislik özelliklerinde iyileşme sağladığı görülmüştür.

Bilge [10] tez çalışmasında yüksek fırın cürufu, uçucu kül, kireç ve zeolit kullanmıştır. Yüksek fırın cürufunun bentonit kilinde iyileştirme malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmada bentonit kiline %10 kireç, %5-10-15 oranlarında yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve zeolit ilave edilmiştir. Numunelere özgül yoğunluk, kıvam limitleri, hidrometre, kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, yüksek plastisiteli kilin özgül ağırlığı katkılar ile artmış, kompaksiyon deneyi ile kuru birim hacim ağırlıkları artmıştır. Serbest basınç deneyinde ise en yüksek dayanım %15 YFC + %15 Zeolit içeren kil karışımında elde edilmiştir.

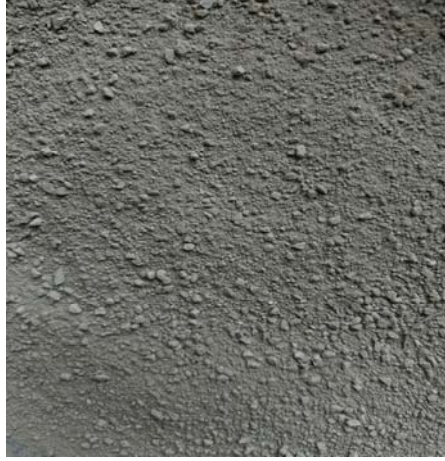
Aysu [11] yüksek plastisiteli killi zeminlere cam lifi katkısının, zeminin mukavemet, permeabilite ve konsolidasyon parametrelerine katkısını araştırmıştır. Uzunluğu 12 mm olan cam lifi, killi zeminler içerisinde belirli oranlarda (0,25, 0,50, 0,75, 1,0, 1,25 ve 1,50) ilave edilmiştir. Zemin mukavemetinde artış %0,75 oranındaki cam lifi katkısında en yüksek olduğu ve daha sonraki karışım oranlarında azalmaya başladığı tespit edilmiştir. Suyu doymuş numunelere yapılan serbest basınç deneylerinin sonucunda; doymuşluğun farklı oranlardaki cam lifi katkılı zeminin mukavemetinde yaklaşık %25-%35 oranlarında azalma olduğu görülmüştür. Optimum su muhtevasında ve doymuş durumda, katkısız zemine kıyasla cam lifi katkısı, zeminin kayma mukavemetini %25 oranında artırdığı belirlenmiştir.

Literatür araştırması sonucunda zemin iyileştirme adına birçok organik ya da inorganik maddenin kullanıldığı görülmüştür. Yapılan bu çalışmada kullanılacak olan şeker pancarı atığının daha önce herhangi bir çalışmada zeminin mühendislik özelliklerine katkısının incelenmediği saptanmıştır. Bu nedenle çalışma kendi alanında özgün bir nitelik taşımaktadır. Çalışmada daha önce kullanılmamış olan şeker pancarı atığı ile zeminin serbest basınç dayanım ve konsolidasyon parametreleri araştırılmıştır.

2. YÖNTEM

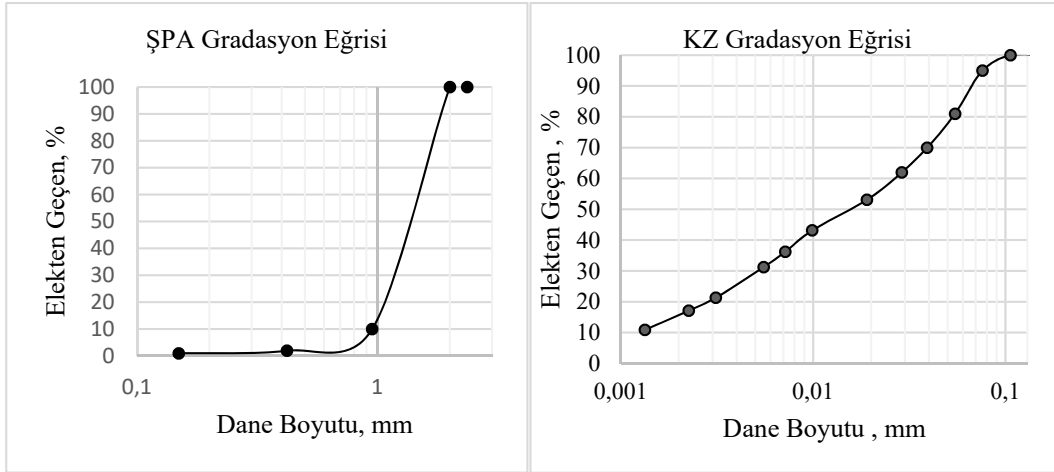
2.1. Materyal

Yürütülen çalışmada kullanılan kil zemin Adana/Sarıçam bölgesinden alınmıştır. Şekil 1'de doğal kil zemine ait öğütme öncesi hali verilmiştir.



Şekil.1 Doğal kil numunesi öğütülmemiş hali

Kil zeminler içerdikleri bağlara, maddelere göre farklı başlıklar altında yer almaktadırlar. Dünyada plastiklik özelliğine sahip tek mineral kil mineralleridir. Plastik özelliğini kazandıran madde ise sudur. Fakat killere içerisinde plastik özelliği barındırmayan minerallerde içerebilirler. Genel olarak plastiklik özelliği gösteren iki kil türü kaolin ve montmorillonit cinsi killerdir. Çalışmada kullanılan kil zeminin cinsi sahip olduğu yüksek kohezyon, su tutma eğilimi ve kıvam limit değerlerine bağlı olarak elek analizi deneyi yardımı ile montmorillonit olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 2. Kil zemin ve ŞPA için dane çapı dağılım eğrisi

Çizelge 1. Plastik limit ve plastisite indisi

Likit Limit (w_L , %)	51
Plastik Limit (w_P , %)	28
Plastisite İndisi (IP, %)	23

Adana ilinden alınan kil zemin numunesinin TS 1900-1 standardına uygun olarak yapılan deneyler ile birim hacim ağırlığı $2,63 \text{ g/cm}^3$, maksimum kuru birim hacim ağırlığı $1,9 \text{ g/cm}^3$, optimum su içeriği %21 olarak bulunmuştur. Numunenin likit limiti %51, plastik limiti %28 olarak bulunmuştur. Zemin sınıfı ise birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi (USCS) ile CH yani yüksek plastisiteli kil olarak belirlenmiştir. Bu değerlere ilişkin değerler şekiller Çizelge 1'de verilmiştir. Şekil 2'de KZ ve ŞPA'ya ait gradasyon eğrisi verilmiştir.

Şeker pancarı atığı (ŞPA) ise şeker fabrikalarında şeker üretimi esnasında pancarların kabuk ve baş kısımlarını içermektedir. ŞPA su içerisinde su çözünürlüğü çok kısıtlı miktarda olan selüloz, hemiselüloz ve pektin gibi karbonhidratlardan oluşmaktadır. Bunun yanında küspenin kendi ağırlığına göre %3-5'inin ekstraksiyon işleminden sonra küspede kalan sakkaroz, %2-4'ünü lignin ve % 8'ini ham protein

oluşturmaktadır. ŞPA'nın içerik tablosu Çizelge 2'de verilmiştir. ŞPA atığı etüvde 100°C 'de 1 gün süre ile kurutulmuştur. Kurutma işlemi sonrasında ŞPA içeriği değişimi Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 2. ŞPA içerik çizelgesi

Çözünmeyen Fraksiyon		Çözünen Fraksiyon		
Bileşen	Selüloz(C ₆ H ₁₀ O ₅)	Hemiselüloz	Pektin(C ₆ H ₁₀ O ₇)	Sakkaroz(C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁)
Ağırlıkça, %	19-23	28-31	15-18	45049
Yapı Birimleri	D-Glikoz	L-Arabinoz	D-Galakturonik	Glukoz, Fruktoz
Ağırlıkça, %		19-20	11-13333	
			L-Ramnoz	
			D-Mamnoz	
			D-Galaktoz	
			D-Ksiloz	
			D-Glikoz	

Çizelge 3. ŞPA'nın kurutma sonrası içeriği

Bileşim maddeleri	% olarak miktar
Ham protein	8-8,63
Ham yağ	0,30-0,60
Ham selüloz	13,56-16,24
Nitrojensiz maddeler	56,44-59,39
Kül	3,42-4
Niştasta değeri	52,10-55,20

Kurutma sonrası ŞPA plastik uçlu tokmak yardımı ile öğütülmüştür. ŞPA'nın uğradığı değişim Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekil 3'te ŞPA'nın üretim sonrası direkt olarak yaş hali verilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5'te ise etüv sonrası kurutulmuş hali ve öğütme sonrası elekten geçirilmiş halleri verilmiştir.



Şekil 3. ŞPA kurutma öncesi yaş hali (bor şeker)



Şekil 4. ŞPA'nın kurutma sonrası hali



Şekil 5. ŞPA'nın öğütme sonrası hali

Çalışmada ek olarak Arabic Gum kullanılmıştır. Arabic Gum polimerlerin alt birimi olan biyopolimerlere aittir. AG ayrıca piyasada farklı isimlerle de anılmaktadır. Ve diğer tüm biyopolimerler gibi bir endüstriyel koda sahiptir. Ağaç üzerinden elde edilen AG kurutulma işlemi ve sonrasında toz hale getirilerek pek çok farklı alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise ŞPA'nın zemin iyileştirmeye etkisini daha net görmek adına yan bir madde olarak kullanılmıştır. Birkaç farklı kullanım yöntemi olan bu malzeme bu çalışmada su ile aktifleştirilerek kullanılmıştır. Su ile jelimsi bir kıvam alan biyopolimer zeminde bulunan boşlukları kapatmaktadır.

2.2. Metot

2.2.1. Mukavemet Deneyleri

Çalışma için kullanılmış olan şeker pancarı atığının, kil zeminin mukavemet parametrelerinde meydana getirdiği değişimleri saptamak için serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Standart serbest basınç deneyi uygulanmış ve TS 1900-2 standartları göz önüne alınmıştır. Yükleme oranı Eşitlik 1'de verilmiştir. Serbest basınç deneylerinde, %0,25, %0,5, %0,75, %0,85, %1 oranlarında şeker pancarı atığı içeren serbest basınç numuneleri hazırlanmıştır. %1 ŞPA içeren numunenin dayanımda düşüş yaşamasından dolayı %2 ve %3 oranında elde edilen deney verilerinin de düşük dayanımından dolayı değerlendirmeye alınmamıştır. Şekil 6'da hazırlanan numunelerden bir tanesi deney öncesi ve sonrası olarak sunulmuştur.

$$q_u = P_{\max} / A_f \quad (1)$$

Eşitlik 1'de:

q_u : Serbest basınç dayanımı

P_{\max} : Yükleme miktarı

A_f : Numunenin düzeltilmiş kesit alanını ifade etmektedir.



Şekil 6. ŞPA numune örneği deney öncesi ve sonrası

Hazırlanmış olan numuneler ile yapılan deney sonucu seri deneylerde kullanılacak optimum atık yüzdesi belirlenmiştir. Optimum atık madde miktarı belirlendikten sonra atık maddenin en uygun kür süresinin

belirlemek için SBD numuneleri hazırlanıp kür süresi verilmiştir. Doğal kil zemin numunesinin optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler, 50 mm çapında, boyu çapının iki katı ve yüzeyleri pürüzsüz olacak şekilde TS 1900 standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır. Zemin numunesi SBD için özel olarak oluşturulmuş mold, başlık ve tokmaktan oluşan düzenek ile deneye uygun hale getirilmiştir. Bu SBD düzeneği Şekil 6'da sunulmuştur. Bu düzenek ile hazırlanan deney numuneleri 5 günlük kür süresi ile desikatörde bekletilmesi sonrasında serbest basınç deneyine tabi tutularak dayanımlar belirlenmiştir. Bu kür süresi sadece başlangıçta optimum oranları belirlemek amacı ile kullanılmıştır. Deneylerde, zemin numunesi, SBD aletinin alt plakasının orta noktasına yerleştirildikten sonra üst başlık numunesinin üst yüzeyine degecek şekilde fakat yük verilmeden yerleştirilmiştir. Bu işlemler ilgili standartta belirtildiği şekilde gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, optimum madde miktarı elde edilmiş ve bu orana bağlı numuneler üstünde test yapılarak optimum kür süresi belirlenmiştir.

2.2.2. Konsolidasyon Deneyleri

Yapılan deney çalışmasında, optimum oranda şeker pancarı atığı içeren deney numunesi ve doğal halde bulunan kil numunesi üzerinde konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 7'de gösterilmiştir. Konsolidasyon deneyi, TS 1900-2' de belirtildiği biçimde gerçekleştirilmiştir. Konsolidasyon deneyi yapılacak iç çapı 50 mm, yüksekliği 20 mm olan ringler kullanılmıştır. 800 kPa gerilme kademesine kadar yüklenmiştir. Deneyler tamamlandıktan sonra, yük-boşluk oranı grafikleri çizilerek parametreler bulunarak gerekli yorumlar ve çıkarımlar yapılmıştır.

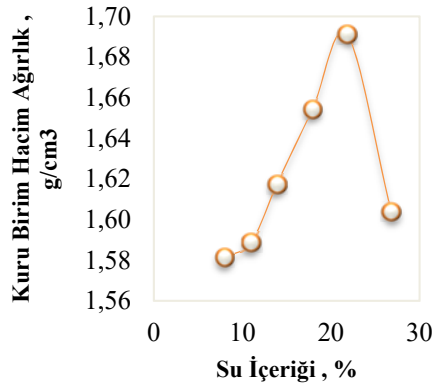


Şekil 7. Konsolidasyon deney düzeneği

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Optimum Su İçeriğinin Belirlenmesi

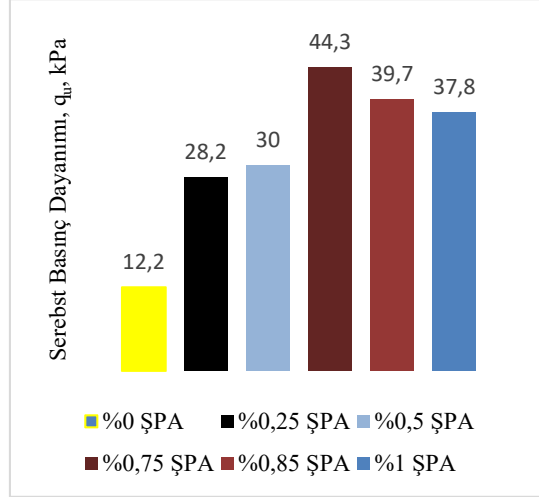
Standart kompaksiyon deneyi (TS1900-2) yardımı ile doğal kil zemin numunesinin optimum su miktarı belirlenmiş ve bu değere bağlı kalınarak gerçek koşul modellemesi esası ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deney ile kil zeminin optimum su muhtevası %21 olarak saptanmıştır. Bulunan optimum su muhtevası emsal teşkil eden kil zemin su muhtevaları ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Optimum su muhtevası grafiği Şekil 8'de verilmiştir.



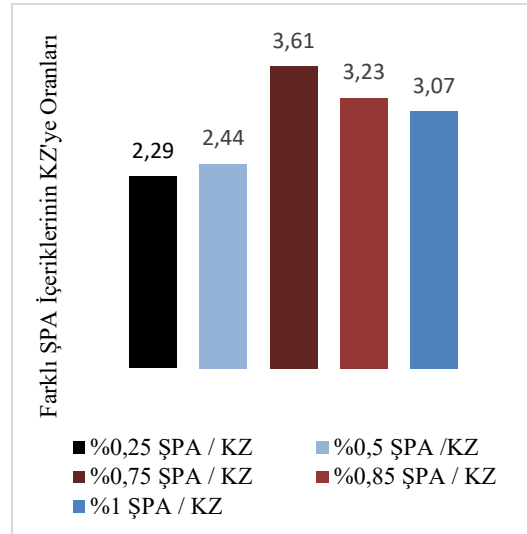
Şekil 8. Kompaksiyon eğrisi

3.2. Karışımların Optimum Atık Oranının Belirlenmesi

Doğal kil zemin içerisine eklenen ŞPA atığı %0,25, %0,5, %0,75, %0,85 ve %1 oranlarında karışımlar haline getirilmiştir. Hazırlanan ŞPA + KZ karışımları için numuneler 5 gün başlangıç bir kür süresi seçilerek desikatörde bekletilmiştir. Kür süresinin sonunda hazırlanan ŞPA katkılı serbest basınç numuneleri deneye tabi tutularak optimum ŞPA miktarı belirlenmiştir. Deney sonucu grafikleri ve oransal grafikler Şekil 9 ve 10'da verilmiştir.



Şekil 9. Farklı ŞPA oranları için serbest basınç mukavemetleri



Şekil 10. Kür süresi doğal kil zemine oransal grafiği

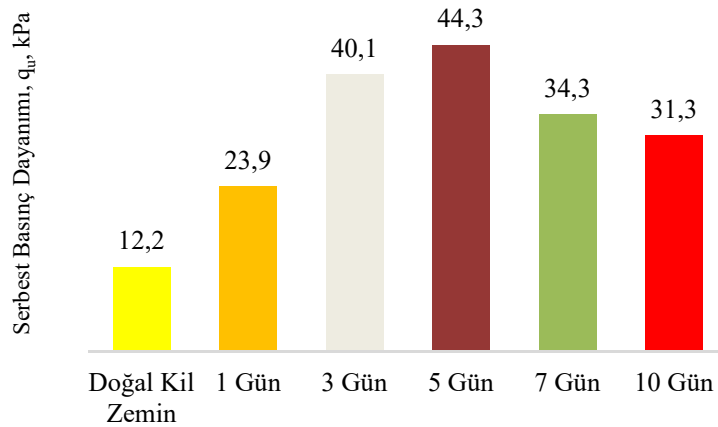
Şekil 9 ve Şekil 10'da görüldüğü üzere doğal kil zemin numunesinin serbest basınç dayanımı, ŞPA katkılı serbest basınç numunelerinin dayanım değerlerinin oldukça altındadır. Sonuçlar değerlendirildiğinde ŞPA içeren numuneler doğal kil zemine oranla yaklaşık %265 serbest basınç dayanımını artırmıştır. Deney verileri neticesinde ŞPA katkılı zeminlerden en iyi verim elde edilebilecek olan numune %0,75 oranında ŞPA içeren numunedir. Eser miktarda eklenen ŞPA dayanımda kayda değer sonuçlar vermiştir. Farklı yüzdelerde numuneler hazırlanmış fakat %3' ve daha fazla ŞPA içeren numuneler kılcal çatlaklar ile silindir numunenin yapısını bozmuştur. Şekil 11'de %3 oranında ŞPA içeren deney numunesi gösterilmiştir. %3 ve daha fazla ŞPA katkısı içeren numunenin kılcal çatlaklar oluşma sebebi şeker pancarının su alma kapasitesi yüksek bir malzeme olmasından dolayı olduğu düşünülmektedir. Çünkü zemin numunesi içerisinde bulunan optimum suyu ŞPA daneleri içerisine hapsederek numune içerisinde sağlanmış olan optimum koşul dengesini bozmaktadır. Bozulan dengeye bağlı olarak hacimde değişimler yaşanmaktadır. Bu sebepten dolayı ŞPA'nın %3'ten fazla kullanımda deneyler gerçekleştirilemeden numuneler çatlamıştır.



Şekil 11. %3 ŞPA içeren serbest basınç deney numunesi

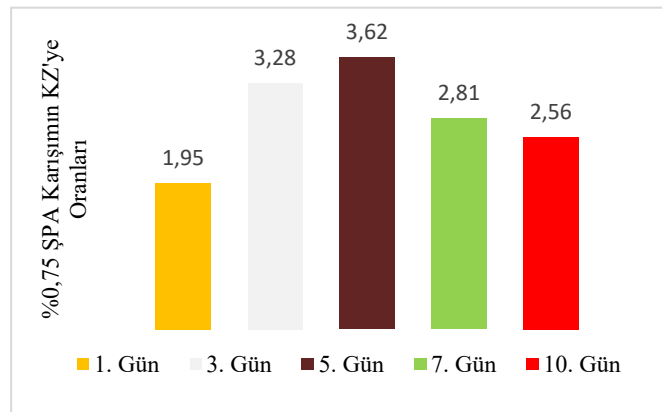
3.3. ŞPA Katkılı Numunenin Optimum Kür Süresinin Belirlenmesi

Doğal kil katkıli karışımın zemin iyileştirmeye yapacağı en iyi katkı oranı olan optimum ŞPA miktarı bulunduğundan sonra bu oran için en uygun kür süresinin belirlenmesi için %0,75 oranında ŞPA içeren doğal kil zemin numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler 1, 3, 5, 7 ve 10 gün boyunca desikatörde bekletilerek serbest basınç deneyine tabii tutulmuştur. Şekil 12 ve 13'te sonuçlar kPa cinsinden sunulmuştur.



Şekil 12. %0,75 ŞPA katkıli numune için optimum kür süresi grafiği

Grafikte görüldüğü üzere ŞPA katkıli zemin için optimum kür süresi 5 gün olarak belirlenmiştir. 1 günlük kür süresinde dahi doğal kil zeminin sahip olduğu serbest basınç mukavemetinden %60 daha fazladır.

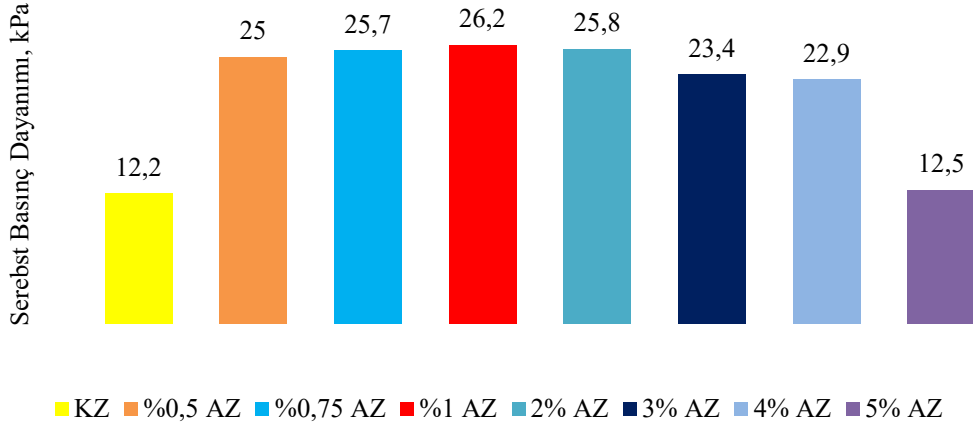


Şekil 13. Optimum kür süresinin KZ'ye oransal grafiği

5. günden sonra ise dayanım büyük oranlarda düşmektedir. Bunun sebebi olarak ŞPA'nın kür süresinin artımı ile ŞPA'nın numune içindeki suyu çekerek çoğunluğunun ŞPA danelerinde hapsolmesinden dolayı optimum şartlar ortadan kalkması olduğu düşünülmektedir.

3.4. Karışımların Optimum Biyopolimer Oranının Belirlenmesi

Tüm bunlara ek olarak biyopolimer olarak Arabic Gum ve ŞPA karıştırılarak numuneler hazırlanmış fakat dayanımda herhangi bir olumlu sonuç alınmamıştır. Biyopolimer içeren numunelere yapılan serbest basınç deneylerinden elde optimum oran %1 olarak belirlenmiş ve konsolidasyon deneyinde kullanılmıştır. Şekil 14'te biyopolimere ait dayanım değerleri verilmiştir.

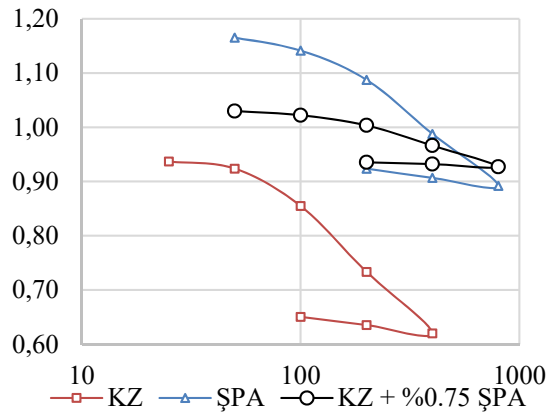


Şekil 14. Arabic Gum'a ait serbest basınç değerleri

Şekil 14'te verilen Arabic Gum'a (AG) ait serbest basınç değerleri 5 gün kür süresi sonrası elde edilen değerlerdir. %1 AG içeren numunenin en yüksek dayanıma sahip olduğu görülmektedir. %5 AG içeren numune ise jelimsi kıvamından dolayı numunenin kompakt yapısını bozmuştur. Bu nedenle dayanımda %50'ye varan düşüşler yaşanmıştır. Sonrasında ise AG biyopolimeri ŞPA ile karıştırılmış, numune hazırlandıktan sonra çeşitli saklama koşulları denenmiş fakat hiçbirinde herhangi bir kür süresinde olumlu sonuç elde edilememiştir. Sebebi araştırılmaya açık bir konudur. Bu nedenle biyopolimerin elde edilen optimum oranı konsolidasyon deneyinde kontrol parametresi olarak kullanılmıştır.

3.5. ŞPA Katkılı Kil Zeminin Konsolidasyon Parametrelerinin Belirlenmesi

Şeker Pancarı Atığının, kilin konsolidasyona olan etkilerinin belirlenmesi amacıyla, laboratuvarında bir seri konsolidasyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Konsolidasyon deneyi yardımı ile doğal kil zemine ait ve ŞPA katkılı numuneye ait konsolidasyon katsayısı ve hacimsel sıkışma katsayıları bulunmuştur. Elde edilen parametreler yardımı ile doğal kil zemin ve ŞPA arasında kıyaslama yapılmıştır. Şekil 15'te KZ, ŞPA ve %1 AG +%0,75 ŞPA'ya ait konsolidasyon eğrileri verilmiştir.



Şekil 15. KZ ve ŞPA konsolidasyon eğrisi (e- log_p)

Çizelge 4'te hacimsel sıkışma katsayıları Çizelge 5'te ise konsolidasyon katsayıları verilmiştir.

Çizelge 4. Doğal kil zemin ve ŞPA katkılı zeminin hacimsel sıkışma katsayıları

Parametre Yük Kademesi (kPa)	Hacimsel Sıkışma Katsayısı (m_v , cm^2/kg)		
	KZ	ŞPA	%1 AG+ %0,75 ŞPA
50-100	0,0580	0,0270	0.0097
100-200	0,0450	0,0260	0.0096
200-400	0,0320	0,0220	0.0077
400-800	0,0300	0,0090	0.0050

Çizelge 5. Doğal kil zemin ve ŞPA katkılı zeminin konsolidasyon katsayıları

Parametre Yük Kademesi (kPa)	Konsolidasyon Katsayısı (C_v , cm^2/dak)		
	KZ	ŞPA	%1 AG + %0,75 ŞPA
50	0,34	0,12	0,56
100	0,10	0,48	0,50
200	0,21	0,46	0,53
400	0,20	0,37	0,40
800	0,26	0,50	0,37

Doğal kil zemin ve ŞPA'nın değerleri birim olarak cm^2/kg cinsinden verilmiştir. Hacimsel sıkışma katsayısı zeminin oturma değerini doğrudan etkileyen bir faktördür. Bu nedenle hacimsel sıkışma katsayısının yük kademesine bağlı olarak arttığı görülmektedir. Fakat başlangıç değerler ve ortalama değerler kıyaslandığında ŞPA ve karışım içeren numunenin hacimsel sıkışma katsayısında iyileşme meydana geldiği görülmektedir. Çizelge 5 incelendiğinde ise doğal kil zemin, ŞPA ve %1 AG + %0,75 ŞPA katkılı numunelerin konsolidasyon katsayıları görülmektedir. Konsolidasyon katsayısı zeminin oturma süresi ile doğrusal olmayan bir ilişkiye sahiptir. Bu nedenle konsolidasyon katsayısının artışıyla beraber oturma süresinin azalacağı söylenebilir. Her yük kademesi ise ayrı olarak hesaplanan katsayılar bakıldığında ŞPA ve karışıma ait konsolidasyon katsayılarının iyileştiği görülmektedir. Karışım içeren numuneye ait katsayılar ise hem KZ'ye hem de ŞPA'ya oranla daha fazla iyileşme sağlamıştır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, şeker pancarı atığı (ŞPA) 'nın killi zeminlerin mukavemet, konsolidasyon ve oturma parametrelerine etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen bilgiler aşağıda verilmiştir.

Doğal kil zeminin zemin sınıfı CH olarak belirlenmiştir.

Yüksek plastisiteli killerin sahip olduğu düşük dayanım ve potansiyel oturma problemleri çözümlenmeye çalışılmıştır.

KZ içerisine, %0,25, %0,5, %0,75, %0,85 ve %1 oranlarında ŞPA eklenmiş numunelere yapılan SBD 'de, serbest basınç mukavemetlerinde, her oran için sırası 2.29 , 2.44 ,3.61 , 3.23 ve 3.07 oranlarında serbest basınç dayanımlarında artış meydana gelmiştir. KZ'ye oranla dayanımda gözle görülür iyileşme meydana gelmiştir.

Kür süresi seçiminde 5 gün kür süresi sonrası maksimum dayanım elde edilmiştir. 10. günden sonra desikatörde bulunan numunelerde çürüme başladığı gözlemlenmiştir.

ŞPA doğal kil zemine göre dayanımda %260 oranında iyileşme sağlamıştır.

KZ ve %1 AG + %0,75 ŞPA'ya yapılan konsolidasyon deneyleri sonucunda her yükleme kademesi için hesaplanan hacimsel sıkışma katsayılarına bakıldığında ŞPA katkılı zeminin m_v değerinde 50-100 kPa kademesi için %83, 100-200 kPa için %78, 200-400 kPa için %75, 400-800 kPa için %83 oranında iyileşme meydana gelmiştir.

Konsolidasyon katsayısında ise ortalama değerlere bakıldığında KZ için 0,22 cm²/dak, ŞPA için 0,39 cm²/dak, karışım içeren numune için ise 0,47 cm²/dak olarak hesaplanmıştır. Karışımın konsolidasyon katsayısında ortalama %55 oranında iyileşme meydana gelmiştir.

Hacimsel sıkışma katsayısı ve konsolidasyon katsayısında meydana gelen iyileşme sonucunda zeminin oturma ve zaman parametrelerinde iyileşme olacağı öngörülmüştür.

Aysu [11] yaptığı çalışmada %0,75 oranında eklediği cam lifi ile zemin iyileştirme çalışmaları yapmış ve sonuç olarak katkısız zemine göre serbest basınç dayanımında yaklaşık %25 oranında artış olmuştur. Çetinkaya [12] ise %1 oranında fibril kullanarak zemin dayanımında katkısız zemine göre serbest basınç değerinde %108 artış sağlamıştır. Devlet [13] %5 gaz beton ve %2 atık lastik katkılı kil zeminin katkısız kil zemine göre serbest basınç dayanımında %19,3 oranında artış göstermiştir. Yapılan bu çalışmada ise zemine eklenen %0,75 oranındaki ŞPA ile zeminin SBD dayanımında %263 oranında artış gözlemlenmiştir. Sonuç olarak her çalışma da kullanılan malzemenin cinsine, kullanım tekniğine, hazırlanma koşullarına göre oran ve dayanımları değişmektedir.

Literatürde var olan çalışmalar ve bu iyileştirme çalışması incelendiğinde zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılan malzemelerin oranlarının ve kür sürelerinin kendine özgü değerler alabileceği bu sebeple her katkı malzemesi için ayrı çalışma yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

5. KAYNAKLAR

1. Aksoy, H.S., Yıldırım, A., 2023. Ppf lifi ve pet talaşı ile güçlendirilmiş kaolin kilinin kayma mukavemetinin incelenmesi. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 13(2), 266-275.
2. Büyükoğuz, M., 2023. Atık lastik parçalarının, kireç ve uçucu kül ile stabilize edilen yüksek plastisiteli kil zemin üzerindeki etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 181.
3. Topçuoğlu, Y., Gürocak, Z., 2023. Zemin güçlendirmede maksimum dayanım için optimum bazalt fiber oranının belirlenmesi. Dümf Mühendislik Dergisi, 3, 479-487.
4. Kabeta, W.F., 2022. Study on some of the strength properties of soft clay stabilized with plastic waste strips. Archives of Civil Engineering, 68(3), 385-395.
5. İbrahim, H.H., Mawlood, Y.I., Alshkane, Y.M., 2021. Using waste glass powder for stabilizing high-plasticity clay in Erbil city-Iraq. International Journal of Geotechnical Engineering, 15(4), 496-503.
6. Kassa, R.B., Workie, T., Abdela, A., Fekade, M., Saleh, M., Dejene, Y., 2020. Soil stabilization using waste plastic materials. Open Journal of Civil Engineering, 10(01), 55-68.
7. Syahril, S., Somantri, A.K., Haziri, A.A., 2020. Study of stabilized soil clay soil characteristics using vulcanic ash and tailing as subgrade layers. Iop Conference Series: Materials Science and Engineering, 830(2), 6-12.
8. Menezes, L.C.P. de, Sousa, D.B. de, Sukar, S.F., Ferreira, S.R. de M., 2019. Analysis of the physical-mechanical behavior of clayey sand soil improved with coir fiber. Soils and Rocks, 42(1), 31-42.
9. Totiç, E., Göktepe, F., Yaşar, M., 2019. Uçucu kül katkısının killi zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi. Dümf Mühendislik Dergisi, 10(2), 769-778.
10. Bilge, T., 2011. Yüksek fırın cürufu katkısının kil zeminlerin stabilizasyonuna etkisinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 122.
11. Aysu, Ş., 2020. Yüksek plastisiteli kil zeminlerde cam lifi katkısının zeminin mukavemet, permeabilite ve konsolidasyon özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 120.
12. Çetinkaya, M., 2012. Polipropilen liflerin uçucu kül zemin karışımlarında geoteknik özelliklere etkisi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 229.
13. Devlet, H., 2020. Killi zeminler üzerinde atık lastik ve gazbetonun etkilerinin değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri, 56.

Çamaş (Ordu) Bölgesi Cu-Pb-Zn Cevherleşmelerinin Petrografik Özellikleri

Burcu KARATAŞ^{1,a}

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

^aORCID: 0000-0003-2705-4319

Makale Bilgileri

Geliş : 29.05.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606447

Sorumlu Yazar

Burcu KARATAŞ

bgoren@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Çamaş

Cevherleşme

Parajenez

Hidrotermal

Atıf şekli: KARATAŞ, B., (2024). Çamaş (Ordu) Bölgesi Cu-Pb-Zn Cevherleşmelerinin Petrografik Özellikleri. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1093-1101.

ÖZ

Çalışma alanı Doğu Karadeniz bölgesi Çamaş (Ordu) yöresinde bulunmakta olup bu bölgedeki cevherler yaklaşık 7100 hektarlık alanda, Üst Kretase yaşlı andezitik kayalar içinde, damar tip bakır, kurşun, çinko cevherleşmeleri şeklinde bulunur. Saitler, Giden, Budak ve Hatipli mahallelerini kapsayan alanda kalınlıkları birkaç cm'den 2m'ye kadar değişen çok sayıda cevher damarı çoğunlukla KD-GB doğrultulu kırıklara yerleşmiştir. Cevherleşme parajenezi; birincil kalkopirit, Sfelarit, ikincil Kalkopirit, Pirit, Galen, Bornit, Kovellin, Malakit ve Azurit olarak belirlenmiştir. Piritler de yapılan analizler sonucunda Co/Ni oranı >1 olması ile cevherleşme hidrotermal yatakları temsil etmektedir. Sfelaritlerde Zn/Cd oranı 328-427 arasında olup ortalama 332,4 tür. Bu oranın yüksek çıkması cevherleşmenin bazaltik-andezitik yankayaçlarla ilişkili olduğunu göstermektedir. Arazi çalışmaları ve yapılan analizlerin değerlendirilmesi sonucunda cevherleşmelerin Geç Kretase yaşlı andezit ve bazaltlar içinde, fay ve kırık zonları boyunca oluşmuş hidrotermal damar tipi cevherleşme olduğu düşünülmektedir.

Petrographic Characteristics of Cu-Pb-Zn Mineralization in Çamaş (Ordu) Region

Article Info

Received : 29.05.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606447

Corresponding Author

Burcu KARATAŞ

bgoren@cu.edu.tr

Keywords

Çamaş,

Mineralization

Paragenesis

Hydrothermal

How to cite: KARATAŞ, B., (2024). Çamaş (Ordu) Bölgesi Cu-Pb-Zn Cevherleşmelerinin Petrografik Özellikleri. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1093-1101.

ABSTRACT

The study area is located in the Çamaş (Ordu) region of the Eastern Black Sea region, and the ores in this region are found in the form of vein-type copper, lead and zinc mineralizations along fault zones, in Upper Cretaceous aged andesitic rocks, in an area of approximately 7100 hectares. In the area covering the Saitler, Giden, Budak and Hatipli neighborhoods, many ore veins with thicknesses ranging from a few cm to 2m are located in NE-SW oriented fractures. Mineralization paragenesis was determined as; chalcopyrite, sphalerite, pyrite, galena, bornite, covellite, malachite and azurite. As a result of the analysis of pyrites, the Co/Ni ratio is >1 and mineralization represents hydrothermal deposits. The Zn/Cd ratio in sphalerites is between 328-427 and the average is 332,4. The fact that this ratio is high indicates that the mineralization is related to basaltic-andesitic host rocks. As a result of the evaluation of field studies, it is thought that the mineralizations are hydrothermal vein type mineralizations formed within Late Cretaceous aged andesites and basalts, along fault and fracture zones.

1. GİRİŞ

Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan maden yatakları D-B yönde birbirine paralel olarak uzanan kuşaklar şeklinde bulunur. Bunlar kuzeyden güneye volkanik masif sülfat yatakları, skarn ve hidrotermal yatakları, Porfiri yataklarıdır (Şekil 1). Bölgenin Kuzeydoğu kesiminde Üst Kretase yaşlı dasitik seviyelerde stockwork, masif ve stratiform cevherleşmeler şeklindeki kuroko tipi yatakları bulunmaktadır. En önemlileri Giresun (Lahanos), Madenköy (Rize) ve Artvin (Murgul) dir. Damar tipi yatakları en önemli örnekleri ise Ordu (Bulancağ), Sivas (Koyulhisar) ve Gümüşhane (Tortul) dur.

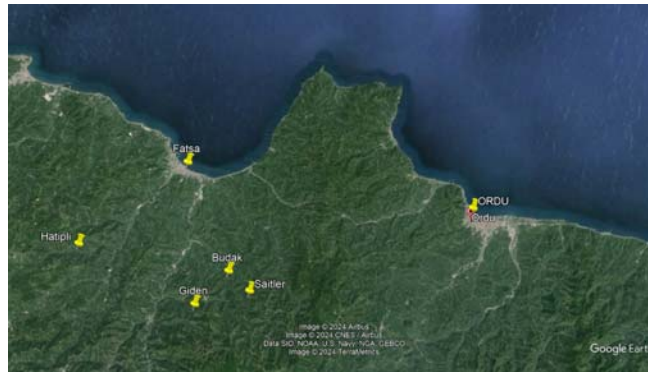
Çalışma alanı (Ordu) Çamaş bölgesi Saitler, Giden, Budak ve Hatıplı bölgelerini kapsamaktadır (Şekil 2). Bu bölgedeki cevherleşmeler Üst Kretase yaşlı andezitik kayalar içinde bulunan damar tipi bakır, kurşun, çinko cevherleşmeleridir. Cevher minerali olarak galen, sfelirit, kalkopirit, azurit, malakit ve pirit bulunmaktadır. Üst Kretase yaşlı andezitik kayalar içinde bulunan damar tipi bakır, kurşun ve çinko cevher minerallerinin petrografik incelemesi ve cevherleşmenin mineral parajenezinin belirlenmesi çalışmanın amacını oluşturmaktadır.



Şekil 1. Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan farklı tiplerdeki maden yatakları [1]

2. YÖNTEM

Çalışma alanının ana materyalini. Saitler, Giden, Budak ve Hatıplı (Ordu-Çamaş) bölgesinde bulunan Pb-Zn-Cu cevher mineralleri oluşturmaktadır. Bu çalışmada cevher mineralleri üzerinde parlak kesit incelemeleri yapabilmek amacıyla bölgeden örnekleme yapılmıştır (Şekil 2). Petrografik çalışmalar yapılabilmesi ve cevher parajenezini belirlemek amacıyla ile cevherli örneklerden amaca uygun olarak belirlenen boyutlarda kesilmiş ve 0,1 mikron alüminyum oksit tozu ile uygun yüzeyleri parlatılmıştır. Hazırlanan parlak kesitler Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Araştırma Laboratuvarı'nda Olympus (BX-51) mikroskopta ayrıntılı olarak incelenmiştir. Cevher örneklerinden hazırlanan parlak kesitler üstten aydınlatmalı mikroskop ile incelenerek mineral parajenezi ve dizilimi belirlenmiştir. Mineral kimyası analizi daha önce yapılan parlak kesitler üzerinden seçilmiş pirit ve sfelirit örnekleri üzerinde ve İstanbul Teknik Üniversitesi Avrasya Yerbilimleri Enstitüsü'nde mineral kimyası için hazırlanmak üzere gönderilmiştir. Mikroprob analizleri için hazırlanan 4 adet cevher örneğinden 101 nokta üzerinde, Ludwig-Maximilian Üniversitesi (Münih, Almanya)'nde Dr. Melanie Kaliwoda danışmanlığında analiz edilmiştir.



Şekil 2. Çalışma alanının Google earth haritası ve örnek alım noktaları

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Bölgenin Genel Jeolojisi

Çalışma alanının da içinde bulunduğu Doğu Karadeniz Bölgesi Alp-Himalaya orojenik kuşağı üzerinde yer almaktadır. Doğu Karadeniz Bölgesi'nin jeolojik yapısı Paleozoyik'ten Senozoyik'e kadar değişen yaşlarda magmatik, metamorfik ve tortul kayaç gruplarını içermektedir.

Ordu ili genelinde Jura'dan Kuvaterner'e kadar değişen yaşlarda volkanik, volkanotortul, tortul, granitik sokulumlar ve güncel çökellerden oluşan kayaçlar yüzeylenmektedir. Bu birimler farklı araştırmacılar [2-7] tarafından farklı isimlerle adlandırılmıştır.

Ordu ili genelindeki Neojen yaşlı kayaçları bazı araştırmacılar Canik Formasyonu ve Erdembaba Volkanitleri olarak adlandırılırken [4,7], Bazı araştırmacılar Neojen ve Kuvaterner yaşlı kayaçları Danişment Grubu adı altında incelemiştir [5]. Ordu, Mesudiye ve Gököy-Aybastı güneyinde ve Canik dağlarında yüzeyleyen ve bazalt ve tüften oluşan birim Canik Formasyonu olarak adlandırılmış olup, Mesudiye, Gököy ve Tekkeköy Formasyonları üzerine uyumsuz olarak gelmektedir [4]. Canik Formasyonu Miyosen-Pliyosen yaşlıdır [8]. Yörede mostra veren en genç birim Yolüstü köyü çevresinde, Reşadiye'nin kuzeybatısındaki Yolcaya ve Bağdatlı köyleri arasında, Çukurtarla tepesi ve Zinav gölü batısında yüzeyleyen koyu gri, siyah, açık gri ve pembe renkli ve bol gözenekli olan andezit ve bazaltlar olup, Yolüstü Bazaltları olarak adlandırılmıştır. Yolüstü bazaltlarının oluşumu, bölgenin faylanma tektoniğiyle ilgili olup Geç Kretase yaşlı Bereketli ve Nebiseyh Kireçtaşı Üyesini, Kuzey Anadolu Fayı'nın güneyinde ise Erken Miyosen yaşlı birimleri uyumsuzlukla örtmesiyle yöredeki en genç birimler olarak kabul edilmiş ve Holosen yaşı verilmiştir [4] (Şekil 3).

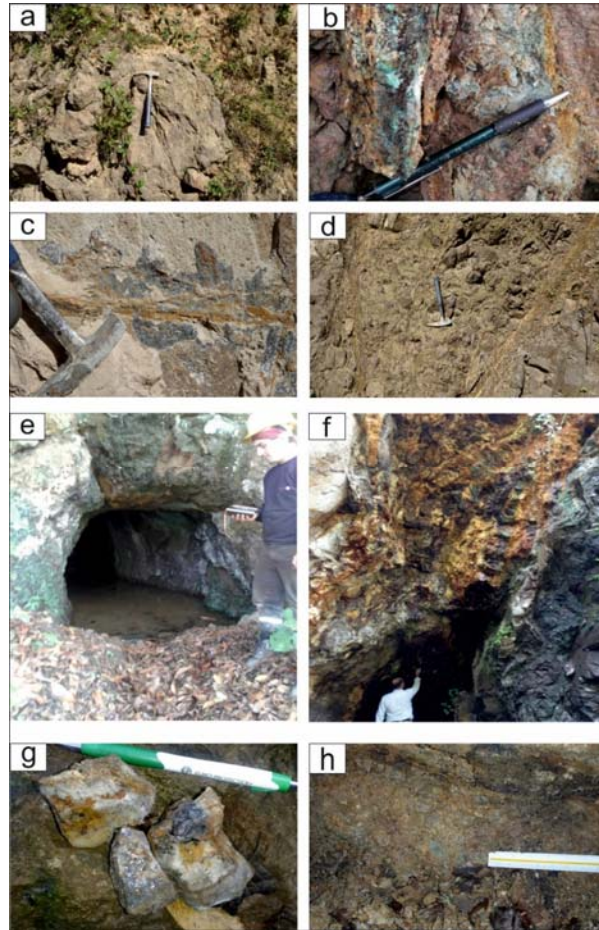
KRETASE	TERTİYER	KUVATERNER	SİSTEM				KAYA TÜRÜ	AÇIKLAMALAR	
			SERİ	KAT	FORMASYON	ÜYE			
KRETASE	TERTİYER	KUVATERNER	MEYDAN	ERDEMBABA	CANIK	CANIK	Bazalt, Tüf	Aglomera ve tüfit ara katkılı andezit ve bazaltlar	
								Tüf ara katkılı bazalt	
								Sert, dayanımlı, sık eklemlili dasitik dayk	
								Çok sert, dayanımlı, yer yer sütünsal eklemlili bazaltik dayk	
								Sert, dayanımlı, sık sütünsal eklemlili andezitik, trakandezitik dayk	
								Tabanı orta-kalın tabakalı kumtaşı, ince-orta tabakalı marın-silttaşı ara düzeyli aglomera, tüf bazalt ve andezit.	
	TERTİYER	EÖSEN	İPRES.-LİTES.-PRİYABO.	TRAKKÖY	CANIK	CANIK	CANIK	Bazalt, Tüf	Tüf ara katkılı aglomera
									İnce-orta tabakalı silttaşı, orta-kalın tabakalı kumtaşı, çamurtaşı ardalanması
									Orta-kalın tabakalı kumlu kireçtaşı, ince-orta tabakalı kilitaşı-killi kireçtaşı ardalanması.
									Orta-kalın tabakalı, sert, erime yüzeyli, kumlu kireçtaşı, kireçtaşı; aglomera-tüfit ara seviyeli killi-tüflü kireçtaşı, tüfit ile orta-kalın tabakalı kumtaşı ardalanması.
									Granit, granodiyorit, kuvarşlı diyorit, monzonit, Sık eklemlili, çatlaklı, sert, dayanımlı siyenit, Sert, dayanımlı, kalın-masif tabakalı, erime boşluklu kireçtaşı-kumlu kireçtaşı ile kilitaşı ardalanması.
									Tüfit, aglomera ara katkılı, erime boşluklu kireçtaşı-kumlu kireçtaşı ile ince-orta tabakalı marın ardalanması.
KRETASE	ÜST KRETASE	Senomanyen - Kampaniyen	KIZIL KAYA	KIZIL KAYA	KIZIL KAYA	KIZIL KAYA	Kızıl Kaya	İnce-orta tabakalı kumtaşı, çamurtaşı, kilitaşı, tüfit ardalanması.	
								Orta-kalın tabakalı, kumlu kireçtaşı-kireçtaşı, aglomera, çakiltası ara düzeyli, kilitaşı-marın, kumtaşı, tüflü kumtaşı, silttaşı, tüfit ardalanması.	
								İnce-orta-kalın tabakalı, eklemlili, çatlaklı, çatlaklar kalsit dolulu, sert, dayanımlı, kumlu-killi kireçtaşı.	
								Trakiandezitik, dasitik, riyodasitik tüf ile trakiandezit ve dasit.	
								Dasitik-riyodasitik, trakiandezit ve tüf.	
								Aglomera, tüfit, andezit-bazalt, kumtaşı ve silttaşı ardalanması.	
KRETASE	ÜST KRETASE	Senomanyen - Kampaniyen	KIZIL KAYA	KIZIL KAYA	KIZIL KAYA	KIZIL KAYA	Kızıl Kaya	Killi kireçtaşı, tüfit, kilitaşı, kumtaşı ile kireçtaşı.	
								Aglomera, tüfit.	
								Kumtaşı, killi kireçtaşı, kireçtaşı, silttaşı, çakiltası, tüfit ve aglomera ardalanması.	
								Andezit-bazalt, tüfit ve aglomera.	
								Aglomera, tüfit, mikritik kireçtaşı, andezitik-bazalt, kumtaşı-silttaşı, kilitaşı, killi kireçtaşı, çakiltası ardalanması.	
								Kilitaşı-killi kireçtaşı ara katkılı, kırmızı renkli, pelajik kireçtaşı.	

Şekil 3. Ordu ilinin genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesiti [7]

3.2. Cevherleşmeler

Çamaş bölgesine ait Hatipli-Giden dolaylarında yüzeyleyen birimler genellikle Üst Kretase yaşlı yüzey kayalarındır (andezit, bazalt) (Şekil 4-a). Genel olarak giden bölgesinde dört adet cevherleşme tespit edilmiştir. Cevherleşmeler genellikle yüzey kayaları içerisinde kuvars damarları boyunca pirit, kalkopirit, azurit ve malakitlerden oluşmaktadır (Şekil 4-b). Giden sahasında farklı bir yarmada ise yüzeyi oksitlenmiş, yer yer limonitleşmiş yine yüzeyinde az mangan sıvamaları ile birlikte bulunan kalkopirit ve galenler gözlenmektedir. Kalkopiritler çoğunlukla saçınımlı şekildedir (Şekil 4-c). Bölgede cevherleşmelerin bulunduğu yan kayalar çoğunlukla altere olmuş, çok fazla bozunmaya uğramış yüzey kayalarındır. Çamaş bölgesinde çok fazla bozunmaya uğramış yamaç molozu şeklinde çapı 5-15 cm arasında değişen, bloklar halinde bulunan bazaltlar bulunmaktadır (Şekil 4-d).

Budakköy bölgesini ise genel olarak sedimanter ve volkanik birimler oluşturmakta olup çoğunlukla sedimanter birimler hakimdir. Sedimander-volkanik birim dokanağı yer yer faylı yer yer diskordanslı gözlenmektedir. Bölge geneli bitki örtüsü ile kaplı olmasından dolayı çalışmalar çoğunlukla yollardan açılan yarmalardan yapılmıştır. Aynı bölgede bulunan tarihsel maden yerlerine ait eski galeride Kurşun-Bakır çıkartılmıştır. Çinko ise ileride ekonomik olacağı düşünülerek galeri içlerine stok yapılmıştır (Şekil 4-e). Bu bölgedeki cevherleşmeler fay zonları boyunca kuvars damarları içerisinde yerleşmiştir. Cevher, D-B doğrultulu ve genelde güneye eğimli olarak gözlenmiştir. Okside zon içerisinde genelde cevherler mostra vermektedir. Çalışma alanında bulunan metalik cevher mineralleri galen, sfelarit, kalkopirit, azurit, malakit, pirit şeklindedir (Şekil 4-f,g). Bölgedeki cevherleşmeler alterasyon zonu içerisinde, kuvars damarı ile birlikte kalkopirit, malakit ve piritler bulunmaktadır (Şekil 4-h).



Şekil 4. a- Yüzey kayaları, b- Kuvars damarı içerisinde Malakit ve Kalkopiritin genel görünümü, c- Oksitlenmiş yüzeyde kalkopirit, galen ve mangan sıvamaları, d- breşik yapılı yüzey kayaları, e- Tarihsel maden yerlerine ait eski galeriden bir görünüm, f- Oksitli zon içerisindeki cevherleşme, g- Oksitlenmiş kuvars damarı ile gelişen galen-kalkopiritler, h- Çamaş bölgesinde bulunan alterasyon zonu içerisinde bulunan malakitler

Araziden derlenen örneklerden petrografik çalışmalar yapmak ve cevher parajenezini belirlemek amacıyla parlak kesitler hazırlanmıştır. Parlak kesitler detaylı bir şekilde incelenmiştir.

GALEN

Çamaş yöresi cevherleşmelerinde sfelaritle birlikte galen en fazla bulunan cevher mineralidir. Galen gri beyaz rengiyle kolaylıkla tanınabilirler (Şekil 5-a). Galenlerin özşekilli olduğu kesitlerde karakteristik üçgen yapıları gelişmiştir (Şekil 5-b). Galenler kendisinden önce oluşan diğer minerallerin tamamını ornatmaktadır. Şekil 5-a'da Sfalorit kalkopiritten daha sonra oluşarak onu ornattığı görülmektedir. Galen ise kalkopirit ve sfaleritten daha sonra oluşmuştur. Şekil 5-b'de ise öz şekilli galen kalkopirit kapanımları içeren sfaleritten daha sonra oluşmuştur. Şekil 5-c' de galenler yine kalkopiritten sonra oluşarak onların kırık ve çatlaklarına dolmuşlardır. Şekil 5-d'de birincil galen ve galen içerisinde görülen birincil kalkopirit, daha sonra oluşan yarı özşekilli ve özşekilsiz piritler ve piritleri ornatarak en son oluşan ikincil kalkopirit görülmektedir.

SFALERİT

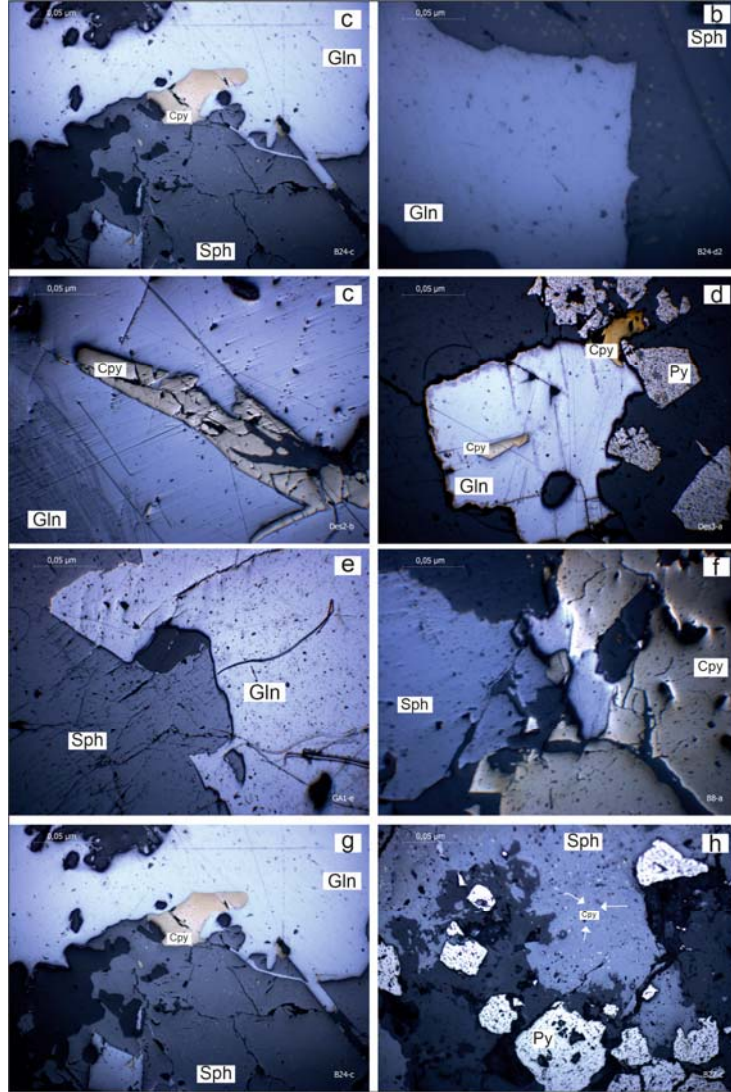
Sfalerit çalışma alanında bulunan yaygın cevher minerallerinden biridir. Kahvems gri renkli olup, çoğunlukla galen minerallerinde eşlik etmekle birlikte (Şekil 5-e) kalkopirit ve piritin bulunduğu örneklerde de görülmektedir (Şekil 5-f). Sfaleritler düzensiz şekilli ve özşekilsiz kristaller halinde oluşurlar. Mikroskopta gri renkte görülen sfaleritler, sarımsı kahverengi iç yansıma gösterirler. İçerdikleri demir miktarına göre renk tonları da değişmektedir. Sfalerit kendisinden sonra oluşan galenleri ornatmıştır (Şekil 5-g). Kesitlerin çoğunda sfaleritler, kalkopirit ayrılımları içermektedirler (Şekil 5-h). Şekil 5-e'de Galenle birlikte bulunan sfalerit görülmektedir. Sfalerit galenden sonra oluşmuştur. Şekil 5-f'de sfalerit kalkopiritten sonra oluşmuştur. Şekil 5-g'de sfaleritin kalkopiritten daha sonra oluşarak onu ornattığı görülmektedir. Galen ise kalkopirit ve sfaleritten daha sonra oluşmuştur. Şekil 5-h'de sfalerit içinde kalkopirit ayrılımları görülmektedir. Daha sonra oluşan piritler ise özşekilli ve yarı özşekilli olarak bulunmaktadırlar.

PİRİT

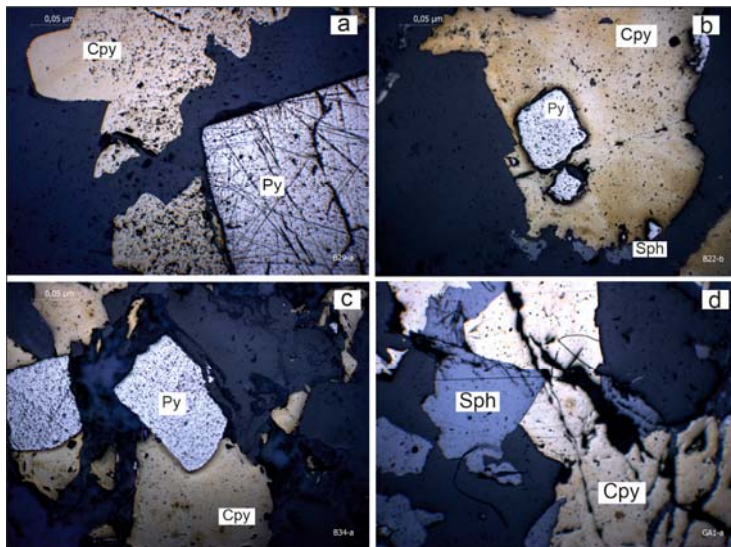
Çalışma alanında galen ve sfaleritten sonra yaygın mineral pirittir. Kesitlerin çoğunda özşekilli ve oldukça büyük boyutlu piritler bulunmaktadır. İncelenen parlak kesitlerde piritler bol kırıklı ve çatlaklıdır (Şekil 6-a). Oldukça büyük boyutlu piritlerde iyi gelişen çatlaklar, kısmen küçük boyutlu piritlerde daha az veya hiç gelişmemiştir (Şekil 6-b). Bundan dolayı mineral boyutu arttıkça deformasyondan etkilenme derecesi artmıştır denebilir. Pirit oldukça sert bir mineral olması nedeniyle, birlikte bulunduğu diğer sülfütlere kıyasla deformasyondan daha fazla etkilenir. Şekil 6-a'da özşekilli ve kırıklı yapıda bulunan piritin kalkopirit ile sınır ilişkisine bakıldığında daha sonra oluştuğu görülmektedir. Şekil 6-b'de ise kalkopirit içerisinde özşekilli ve yarı özşekilli piritler kalkopiritten daha sonra oluşmuş olarak bulunmaktadır.

KALKOPİRİT

Kalkopirit çalışma alanındaki cevher örnekleri arasında galen, sfalerit ve piritten daha az oranda bulunur. Sarımsı renkte olup en çok bulunan bakır mineralidir. Kalkopirit genellikle piritle eşlik etmektedir (Şekil 6-c). Kalkopirit genellikle düzensiz ve şekilsiz taneler halinde izlenmektedir. Mikroskop çalışmalarına göre cevherde, sfalerit içindeki kalkopirit ayrılımlarının dışında farklı evrede oluşmuş kalkopiritler de bulunmaktadır. Birçok pirit örneğinde bulunan kırıklar bazı kalkopirit örneklerinde de görülmektedir. Bu kırıklar bazen birkaç minerali katedecek şekilde devamlıdır (Şekil 6-d). Şekil 6-c'de gang minerali içerisinde bulunan özşekilli pirit kalkopiritten daha sonra oluşmuştur. Şekil 6-d' de ise sfalerit kalkopirit ilişkisi görülmektedir. Sfaleritler kalkopiritten daha sonra oluşmuşlardır.



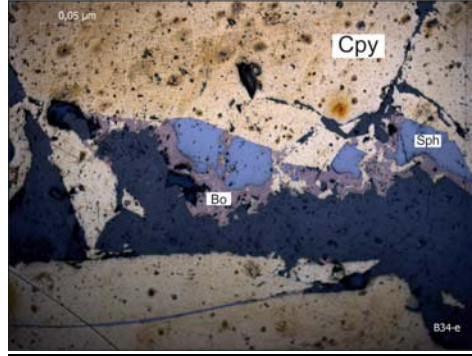
Şekil 5. a-d: Galen örneklerine ait parlak kesit görüntüleri.e-h: Sfalerit mineralinin parlak kesit görüntüleri (Gln:Galen, Cpy: Kalkopirit, Sph: Sfalerit, Py: Pirit)



Şekil 6. a-b: Pirit mineralinin parlak kesit görüntüleri. C-d: Kalkopirit örneklerinin parlak kesit görüntüleri (Py: Pirit, Cpy: Kalkopirit, Sph: Sfalerit)

BORNİT

Genelde çok az oranda kalkopiritlerle kenetli bir şekilde ve bakırca zengin cevherlerde özellikle bornit taneleri yer yer alev şeklinde bulunurlar. Bornit kesitlerde pembemsi gri renkte, şekilsiz ve düzensiz olarak izlenmektedir (Şekil 7). Şekil 7’ de kalkopiritlerin kenarları boyunca gelişmiştir ve sfaleritten sonra oluşarak sfaleritin boşluklarını doldurmaktadır.



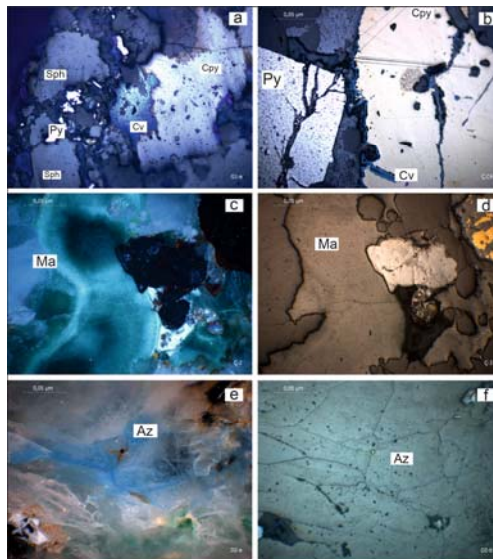
Şekil 7. Bornit mineralinin parlak kesit görüntüsü (Bo: Bornit, Cpy: Kalkopirit, Sph: Sfalerit)

KOVELLİN

Kovellin, kalkopiritlerden itibaren ikincil süreçlerle oluşmuş dönüşüm ürünü bir mineraldir. Kovellin mavi renk tonları ve kuvvetli anizotropi özellikleriyle kolaylıkla tanınır (Şekil 8-a). Kalkopiritlerin çevresinde ve içerisinde zayıf zonlarda, kırık ve çatlaklarda oluşurlar (Şekil 8-b). Cevher seviyelerinin üst kesimlerindeki bakırca zengin kısımlarda bulunurlar. Kesitlerde düzensiz ve şekilsiz olarak bulunmaktadır. Şekil 8-a’ da kalkopiritin kenarları boyunca kovellin dönüşümleri görülmektedir. Şekil 8-b’de ise öz şekilli piritler ile birlikte kalkopirit içerisinde sfalerit kapanımları ve kovellin dönüşümleri görülmektedir.

MALAKİT-AZURİT

Malakitler çalışma alanında daha çok oksitli zonlarda kuvars damarları boyunca gelişmişlerdir. Malakit mikroskopta anizotropisi gri renkli ve açık yeşil iç refleksiyon renginde görülmektedir (Şekil 8-d, (8-c: T.N görüntüsü)). Azuritler de bazı kesimlerde malakitlerle birlikte bulunurlar. Azurit mikroskopta koyu gri renkli, parlak mavi iç refleksiyon renginde bulunur ve anizotropisi yoktur (Şekil 8-f, (8-e: T.N görüntüsü)).



Şekil 8. a-b: Malakit ve azuritlerin parlak kesit görüntüleri. c-f: Kovellin mineralinin parlak kesit görüntüleri (Ma: Malakit, Az: Azurit, Cv: Kovellin, Cpy: Kalkopirit, Sph: Sfalerit, Py: Pirit)

Parlak kesit incelemeleri sonucunda cevherleşmenin parajenezi belirlenmiş ve buna göre cevher minerallerinin oluşum sırası; birincil Kalkopirit, Sfelarit, ikincil Kalkopirit, Pirit, Galen, Bornit, Kovellin, Malakit ve Azurit şeklindedir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Cevherleşme parajenezi

Mineraller	1. Evre	2. Evre	İkincil mineraller
Kuvars			
Kalkopirit (1)			
Sfelarit			
Kalkopirit (2)			
Pirit			
Galen			
Bornit			
Kovellin			
Malakit			
Azurit			

3.2.1. Jeokimya

Cevherleşme parajenezi belirlendikten sonra cevherleşmeyi oluşturan çözeltilerin kaynağını belirlemek amacıyla cevherli örnekler üzerinde yapılan iz element analiz sonuçları incelenmiştir. Cevherleşmenin kökeninin belirlenmesinde bazı iz elementler sıklıkla kullanılmakta ve önem arz etmektedir. Bunlardan piritler de Co/Ni oranı >1 olması; hidrotermal yatakları <1 olması ise sedimenter kökeni işaret eder. Bu çalışmaya ait ortalama Co/Ni oranı 3,2 olup 1'den büyüktür (Çizelge 2).

Çizelge 2. Piritlerde Co, Ni ve Co/Ni oranları

Pirit	Co	Ni	Co/Ni
Bu çalışma	10,4	3,2	3,1
Sedimater	41	65	0,8
Hidrotermal	141	121	2-3
VMS	486	56	3.5

Piritlerden sonra Sfelaritlerde Zn/Cd oranı hidrotermal yataklarda 104-214 arasında olması granitik magmatizmaya ilişkili klasik damar tipi cevherleşmeleri belirtmektedir. Bu oran ortaç-asidik kayalarla ilişkilidir. Zn/Cd oranının 328-427 arasında olması andezitik kaynak kayalarla ilişkili olduğunu göstermektedir [9]. Çalışma alanında ise ortalama bu oran 332.4 dir (Çizelge 3). Bu oranın yüksek çıkması bazaltik-andezitik yan kayalardan kaynaklıdır.

Çizelge 3. Piritlerde Co, Ni, Co/Ni ve sfelaritlerde Zn, Cd, Zn/Cd oranları (D1,D2,D3,D4,B4 ve B8 ortalama sonuçları verilmiştir)

	Co	Ni	Zn	Cd	Co/Ni	Zn/Cd
D1	9,3	2,8	100000	510	3,32	196,08
D2	17	3,2	100000	260	5,31	384,62
D3	6,8	2,9	100000	454	2,34	220,26
B4	10	3,7	16700	31,3	2,70	533,55
B8	9	3,4	100000	305	2,65	327,87
ort.	10,4	3,2	83340	312	3,27	332,47

4. SONUÇLAR

Çalışma alanındaki cevherleşmeler Doğu Karadeniz bölgesinde ve Geç Kretase yaşlı bazaltik-andezitik kayalar içinde bulunur. Cevherleşme galen, sfelarit, kalkopirit, pirit, bornit, azurit, malakit, kovellin şeklindedir. Cevher örnekleri üzerinde yapılan detaylı cevher petrografisi incelemelerinde cevherleşmenin

parajenezi belirlenmiştir. Buna göre cevher minerallerinin oluşum sırası; birincil Kalkopirit, Sfelarit, ikincil. Kalkopirit, Pirit, Galen, Bornit, Kovellin, Malakit ve Azurit şeklindedir.

Piritler de yapılan analizler sonucunda Co/Ni oranı >1 olması ile cevherleşme hidrotermal yatakları temsil etmektedir. Sfelaritlerde Zn/Cd oranı 328-427 arasında olup ortalama 332,4 tür. Bu oranın yüksek çıkması cevherleşmenin bazaltik-andezitik yankayaçlarla ilişkili olduğunu göstermektedir.

Sonuçlara göre inceleme alanındaki cevherleşmeler Geç Kretase yaşlı andezit ve bazaltlar içinde, çoğunlukla KB-GD doğrultulu fay ve kırık zonları boyunca oluşmuş hidrotermal damar tipi cevherlerdir.

Önceki çalışmalarda [10,11], çalışma alanına yakın lokasyon olan Kabadüz yöresi cevherleşmelerinin Geç Kretase dönemindeki açılma rejimi sırasında sokulum yapmış granitik bir intrüzyona bağlı olarak oluşmuş hidrotermal tip yataklar olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çalışma alanında ileri derecede altere vaziyette izlenen asidik sokulumlardan örnekleme yapılamamış olsada benzer durum çalışma alanı içinde geçerlidir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma FBA-2021-13695 proje no'lu Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimi tarafından desteklenmiştir.

6. KAYNAKLAR

1. Güven, İ.H., 1993. Doğu Pontidler'in 1/25.000 ölçekli komplikasyonu. MTA Genel Müdürlüğü, Ankara.
2. Schultze-Westrum, H.H., 1960. Giresun-Aksudere (Doğu Pontos Cevher bölgesi) hinterlandında yapılan prospeksiyon ve jeolojik harita hakkında rapor. MTA, Rapor no, 3184.
3. Seymen, İ., 1975. Kelkit vadisi kesiminde Kuzey Anadolu fay zonunun tektonik özelliği. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 192.
4. Terlemez, İ., Yılmaz, A., 1980. Ünye-Ordu-Koyulhisar-Reşadiye arasında kalan yörenin stratigrafisi. TJK Bülteni, 23, 179-191.
5. Terzioğlu, İ., 1986. Doğu Karadeniz Bölgesi'nde pliyosen yaşlı Erdembaba volkanitlerinin petrolojisi ve kökensele yorumu. TJK Bülteni, 29, 119-132.
6. Boztuğ, D., 2001. Suşehri (Sivas) – Gököy (Ordu) arasında KAFZ'nun kuzey ve güney kesimlerindeki granitoidlerin ve çevre kayaların petrolojik incelenmesi. Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu Projesi, No, YDABÇAG-9, 98.
7. Ateş, S., Keçer, M., Mutlu, G., Bulut, A., Osmançelebioğlu, R., Şule, S., Ekmekçi, M., Özerk, O.C., Özata., A. ve Karakaya, F., 2004. Ordu ilinin yerbilim verileri ve doğal afet özellikleri. MTA, Rapor no, 10667.
8. Keskin, M., Pearce, J.A., Mitchell, J.G., 1998. Volcano-stratigraphy and geochemistry of collision-related volcanism on the Erzurum-Kars plateau, northeastern Turkey. Journal of Volcan. and Geoth. Res., 85, 355-404.
9. Gottesman, W., Kampe, A., 2007. Zn/Cd ratios in calcsilicate-hosted sphalerite ores at Tumurtijn-Ovoo, Mongolia. Chemie Der Erde, 67, 323-328.
10. Demir, Y., 2010. Kabadüz (Ordu-KD-Türkiye) yöresi Pb-Zn-Cu cevherlerinin jeolojik, mineralojik, jeokimyasal ve kökensele incelemesi. Doktora Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
11. Karataş, B., Akyıldız, M., Yıldız, C.E., 2016. Doğu Karadeniz bölgesindeki Cu-Pb-Zn yataklarına Çamaş (Ordu) örneği. 7. Jeokimya Sempozyumu, 16-18 Mayıs, Antalya.



Nanosilika/ *Sansevieria Trifasciata* (Paşa Kılıcı) Doğal Fiber Katkılı Hibrid Epoksi Kompozitlerin Eğilme Performansının İncelenmesi

Bertan BEYLERGİL^{1,a}, Cihat Kerem ERGİN^{2,b}, Sefa YILDIRIM^{1,c}

¹Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Antalya

²Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Antalya

^aORCID: 0000-0002-3204-6746; ^bORCID: 0009-0003-0355-0550; ^cORCID: 0000-0002-9204-5868

Makale Bilgileri

Geliş : 07.08.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606449

Sorumlu Yazar

Sefa YILDIRIM

sefa.yildirim@alanya.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Doğal kompozit

Nanosilika

Enzimatik havuzlama

Mekanik karakterizasyon

Eğilme mukavemeti

Atf şekli: BEYLERGİL, B., ERGİN, C.K., YILDIRIM, S., (2024). Nanosilika/ *Sansevieria Trifasciata* (Paşa Kılıcı) Doğal Fiber Katkılı Hibrid Epoksi Kompozitlerin Eğilme Performansının İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(4), 1103-1112.

ÖZ

Bu çalışmada, *Sansevieria Trifasciata* (Paşa Kılıcı) bitkisinden elde edilen doğal lifler ve nanosilika katkılı hibrid epoksi kompozitlerin eğilme performansı araştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, doğal lifler enzimatik havuzlama yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen lifler, alkali işlemle geçirilerek epoksi bağlanma kapasiteleri artırılmıştır. Bu aşamanın ardından, lifler uzunlamasına yerleştirilerek epoksi matrisine nanosilika tozu ile eklenmiştir. Nanosilika oranı ağırlıkça %3 olarak belirlenmiştir. Ayrıca saf epoksiden referans numuneler üretilmiştir. Çalışma süresince üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri ASTM D790 standartlarına uygun olarak üç nokta eğme testleri ile karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kompozit malzemenin yüksek mukavemet ve elastikiyet özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Ancak homojen olmayan kırılma davranışları, malzemenin üretim sürecindeki varyasyonlardan kaynaklanabilir. Çalışma, çevresel sürdürülebilirlik ve endüstriyel uygulamalarda doğal kompozitlerin potansiyelini ortaya koymuştur.

Investigation of the Flexural Performance of Hybrid Epoxy Composites Reinforced with Nanosilica/*Sansevieria Trifasciata* (Snake Plant) Natural Fiber

Article Info

Received : 07.08.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606449

Corresponding Author

Sefa YILDIRIM

sefa.yildirim@alanya.edu.tr

Keywords

Natural composite

Nanosilica

Enzymatic retting

Mechanical characterization

Flexural strength

How to cite: BEYLERGİL, B., ERGİN, C.K., YILDIRIM, S., (2024). Nanosilika/ *Sansevieria Trifasciata* (Paşa Kılıcı) Doğal Fiber Katkılı Hibrid Epoksi Kompozitlerin Eğilme Performansının İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(4), 1103-1112.

ABSTRACT

In this study, the flexural performance of hybrid epoxy composites reinforced with natural fibers obtained from *Sansevieria Trifasciata* (Snake Plant) and nanosilica was investigated. In the first stage of the study, natural fibers were obtained using enzymatic retting methods. The obtained fibers were treated with an alkali process to enhance their epoxy bonding capacities. Following this stage, the fibers were placed horizontally and added to the epoxy matrix with nanosilica powder. The nanosilica content was set at 3% by weight. Additionally, reference samples were produced from pure epoxy. The mechanical properties of the composites produced during the study were characterized by three-point bending tests in accordance with ASTM D790 standards. The results obtained showed that the composite material possesses high strength and elasticity properties. However, the non-uniform fracture behaviours may be due to variations in the material's production process. The study demonstrated the potential of natural composites in environmental sustainability and industrial applications.

1. GİRİŞ

Doğal fiberler üretilen malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu hakkında literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Burada Sansevieria Trifasciata bitkisinden elde edilen lifler üzerine yapılan bazı güncel çalışmalar verilmiştir. Mardiyati ve arkadaşları [1] Sansevieria Trifasciata bitkisi liflerinin lignin ve pektin içeriği analiz edilip, değişken parametrelerde uygulanan alkali işlem sonrasında mukavemet değişimi incelenmiştir. Bu çalışmada lifin optimum saflıktaki eldesi için gereken değer ağırlıkça %3 NaOH çözeltisi olduğu ve işlem uygulanmamış liflere kıyasla %46 mukavemet artışı sergilediği tespit edilmiştir. Widodo ve arkadaşları [2] Sansevieria Trifasciata liflerinin fizikokimyasal özellikleri alkali işlem öncesi ve sonrası incelenmiş; özellikle lignin ve hemiselüloz içeriğindeki azalma ile çekme dayanımı ve termal stabilitedeki değişimler değerlendirilmiştir. %51,8 selüloz artışı ve %75 kristallik indeksi artışıyla liflerin mekanik özelliklerinde belirgin bir iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir. Sansevieria Trifasciata liflerinden polyester kompozitler üretilerek, lif uzunluğu ve ağırlık yüzdesinin mekanik özelliklere etkisi Raj ve arkadaşları [3] tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada, lif uzunluğunun 40 mm'ye kadar artırılmasıyla çekme ve eğilme dayanımlarında artış sağlanmış, %40 lif oranının optimum değer olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, kompozitin termal stabilitesinin 200 °C olduğu belirlenmiştir. Shieddieque ve arkadaşları [4] Sansevieria Trifasciata lifleri ile güçlendirilmiş Vinyl Ester (STF/VE) biyo-kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri incelemiştir. Alkali işlem ve tek yönlü lif dizilimi ile %15 lif hacmi oranının, çekme dayanımı ve yoğunluk açısından optimum parametreler olduğu tespit edilmiştir. ANOVA analizi, lif hacmi oranının çekme dayanımı üzerinde %50,57, yoğunluk üzerinde %51,34 etkisi olduğunu göstermiştir. Sansevieria Trifasciata lifleriyle güçlendirilmiş epoksi reçine kompozitlerinin mekanik, morfolojik ve su emme özellikleri Mishfa ve arkadaşları [5] tarafından incelenmiştir. %30 lif oranı ile üretilen kompozitlerin çekme dayanımı 6.99 MPa, eğilme dayanımı 10.77 MPa ve darbe direnci 14 J olarak ölçülmüştür. FTIR analizi, lignin ve hemiselüloz içeriğindeki azalma ile lif-reçine arası bağın güçlendiğini göstermiştir. Sansevieria Trifasciata bitkisinden elde edilip örülen ve epoksi kompozit malzemede takviye elemanı olarak kullanılan lifler, muz bitkisinden elde edilen liflere kıyasla daha yüksek mukavemet göstermiştir [6]. Kevlar ve Sansevieria Trifasciata lifleriyle güçlendirilmiş hibrit epoksi kompozitler Ashok Kumar ve arkadaşları [7] tarafından üretilmiş ve özellikleri incelenmiştir. %25 Kevlar ve %75 Sansevieria Trifasciata içeren sistem, çekme ve darbe dayanımında en yüksek performansı göstermiştir. SEM analizi, bu sistemde yüzey bağlarının güçlendiğini ve boşlukların azaldığını ortaya koymuştur.

Genel olarak doğal fiberler üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında yüksek oranda lignin içeren liflerin polimerik matrisle iyi bir arayüzey ilişkisi oluşturmadığı bilinmektedir [8]. Agave bitkisinden lif üretimi sürecinde, lignin gibi istenmeyen bileşenlerden kurtulmak için, lif eldesi sonrasında liflerin alkali işleme tabi tutulması, liflerin kırılgenliğini ve polimerizasyon meyilini azalttığı gözlemlenmiştir [9]. Bu çalışmada Sansevieria Trifasciata bitkisinden elde edilen liflerin yüzey özellikleri NaOH alkali uygulaması iyileştirilmiş ve Nanosilika takviyeli epoksi matris içine elle yatırma yöntemiyle dağıtılmıştır. Alkali işlem takviye liflerini genellikle çeşitli konsantrasyonlarda sodyum hidroksit (NaOH) ile farklı sıcaklık veya sürede muamele etmektir. Bitkisel lifler, yapılarında bulunan hidroksil gruplar (selüloz) nedeniyle polar karakterlidir. Liflerde bulunan pektin, lignin ve vaks gibi safsızlıklar ve yüksek miktarlardaki hidroksil grupları, bu liflerin matris polimerine bağlanmasına engel olup arayüzeyi zayıflatmakta ve nihai kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Alkali işlem ile selüloz liflerinin yüzeyinde bulunan bu maddelerin bir kısmı giderilmekte ve lif yüzeyinde polimer ile etkileşime girebilecek çok sayıda açık selüloz uçları oluşmaktadır. Alkali işlem lifin yüzeydeki serbest enerjisini arttırmaktadır. Aynı zamanda lif yüzeyini pürüzlü hale getirerek lif/polimer arayüzeyinde mekaniksel bağlanmayı geliştirmektedir [10]. Doğal selülozik lif kaynağı olan kenaf bitkisi üzerinde çeşitli lif eldesi yöntemleri uygulanıp, bunun lifin mukavemetine etkileri tartışılmış ve selüloz dışında istenmeyen safsızlıkların liflerin mukavemetine olumsuz etkisi olduğu gözlemlenmiştir [11]. Üretilen numunelerin mekanik özellikleri analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalarda doğal lifler ile üretilmiş polimerik kompozit malzemelerin mekanik özellikleri liflerin akma dayanımı ile doğrudan ilişkili olduğu görülmüştür [12]. Ortega ve arkadaşları [13], Agave americana bitkisinin liflerinin kompozit üretimi konusundaki potansiyelini incelemiş olup eğilme mukavemeti açısından oldukça iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

Doğal fiberlerle üretilen kompozit malzemelerin düşük mekanik performansları, özellikle liflerin mekanik özelliklerinin sentetik liflerle kıyaslandığında sınırlı kalması nedeniyle önemli bir engel teşkil etmektedir. Sansevieria Trifasciata bitkisinden elde edilen liflerin kullanımıyla oluşturulan kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için epoksi matris malzemesine nanosilika katkısı yapılmıştır. Çalışmada, nanosilika partikülleri, kompozitin hem mukavemet hem de elastikiyet özelliklerini artırma potansiyeli

taşıyan bir takviye elemanı olarak tercih edilmiştir. Nanosilikanın, matris malzemesi içerisindeki dağılımı ve kompozit ile arayüz etkileşimleri sayesinde, doğal lif kaynaklı kompozitlerde karşılaşılan kırılma ve homojenlik problemlerinin önemli ölçüde azaltılması hedeflenmiştir. Elde edilen bulgular, bu tür hibrit yapı kompozitlerin çevresel sürdürülebilirlik ve endüstriyel uygulamalardaki rolünü artırabileceğini göstermektedir.

2. YÖNTEM

Bu bölümde, çalışmada kullanılan malzeme bilgileri, havuzlama yönteminin detayları, alkalizasyon işlemi, kompozitlerin üretim yöntemi ve elde edilen numunelerin mekanik karakterizasyon işlemleri hakkında bilgiler verilmiştir.

2.1. Malzemeler

Bu çalışmada, *Sansevieria Trifasciata* (Paşa Kılıcı) bitkisinin yapraklarından elde edilen doğal lifler kullanılmıştır. Bu bitki, liflerin mekanik özelliklerini incelemek için seçilmiş ve enzimatik havuzlama yöntemiyle liflerin saflaştırılması amaçlanmıştır.

Matris malzemesi olarak, piyasadan temin edilen ticari epoksi reçine kullanılmıştır. Epoksi reçineler, düşük büzülme, düşük toksisite, iyi yapışma özellikleri ve yüksek endüstriyel uygulamalar gibi avantajlara sahiptir. Epoksi reçine, doğal liflerle güçlü bir bağ oluşturmak için idealdir. İkincil takviye elemanı olarak, nanosilika partikülleri kullanılmıştır. Nanosilika, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için eklenmiştir. Ağırlıkça %3 oranında nanosilika kullanılarak farklı kompozit numuneler üretilmiştir. Havuzlama işlemi için, ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), sodyum hidroksit (NaOH), asetik asit (CH_3COOH) ile beta-glukanaz, pektinaz, hemiselülaz ve ksilanaz enzim karışımı kullanılmıştır. Bu kimyasallar, doğal liflerin selüloz dışı bileşenlerden arındırılmasını sağlamak amacıyla kullanılmıştır.

2.2. Enzimatik Havuzlama Yöntemi

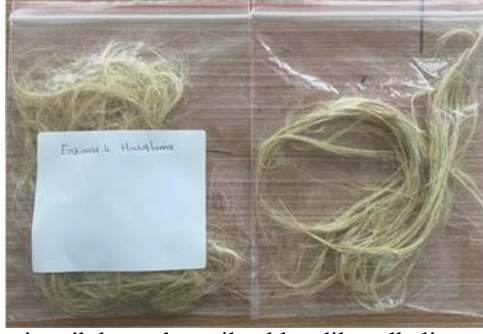
Bu yöntemde selülozu, diğer organik bileşenlerden ayırmak için enzim karışımı ile çeşitli kimyasallar kullanılmaktadır. Bu aşamada kullanılan kimyasalların amacı enzimlerin çalışma koşullarını sağlamaktır. İlk olarak, konteynere doldurulan 4lt suya 25 mM seviyesinde ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) eklenerek karıştırılmıştır. Çözeltiye sodyum hidroksit (NaOH) 1N ve asetik asit (CH_3COOH) eklenip karıştırılarak pH seviyesinin 5 olması sağlanmıştır. Çözeltinin hazırlanmasının son aşaması olarak beta-glukanaz, pektinaz, hemiselülaz ve ksilanaz enzimlerinin ticari karışımı olan Viscozyme L 0.3 (v/v) % seviyesinde çözeltiye eklenerek nihai havuzlama çözeltisi elde edilmiştir. Elde edilen çözelti içerisinde uygun boyutlarda kesilip bir merdane aracılığıyla ezilen bitkiler atılıp, konteyner ağzı kapatılarak 2 dakika boyunca karıştırılmıştır. İlgili görsel Şekil 1'de gösterilmiştir. Daha sonra konteyner içindeki çözelti ve bitkilerle birlikte ağzı kapalı olarak 40°C sıcaklıkta fırında 1 hafta boyunca bekletilmiştir. Bir hafta sonunda fırından çıkarılan konteyner içerisinde çıkarılan lifler artık organik bileşenler elle uzaklaştırıldıktan sonra musluk suyunda 5 dakika yıkandıktan sonra 50°C sıcaklıkta fırında kurutulmuştur.



Şekil 1. Enzim karışımı içerisine atılan uygun boyutlarda kesilmiş bitkiler

2.3. Alkalizasyon İşlemi

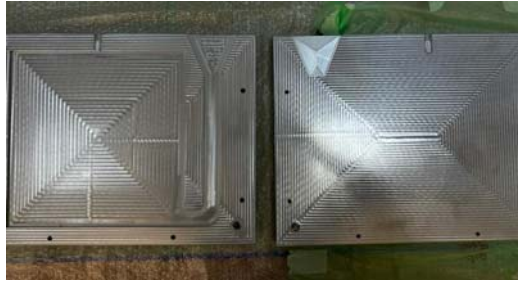
Selülozik liflerin matris ile bağlanma kabiliyetini artırarak kompozit yapının toplam mekanik özelliklerini artırma amacıyla liflere alkalizasyon işlemi yapılmıştır. Su dolu bir konteynere hacimce %5 oranında NaOH 1N eklenerek çözelti hazırlanmış ve lifler bu çözelti içerisinde 30 dakika bekletilmiştir. Süre sonunda, lifler distile su ile yıkanarak atık alkaliler uzaklaştırılmıştır. Enzimatik havuzlama ile elde edilen lifler alkalizasyon işlemi sonrasında 50°C sıcaklıkta fırında kurutulularak kompozit üretimi için hazır hale getirilmiştir. Üretime hazır lifler Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Enzimatik havuzlama ile elde edilen alkalize edilmiş lifler

2.4. Kompozitlerin Üretimi

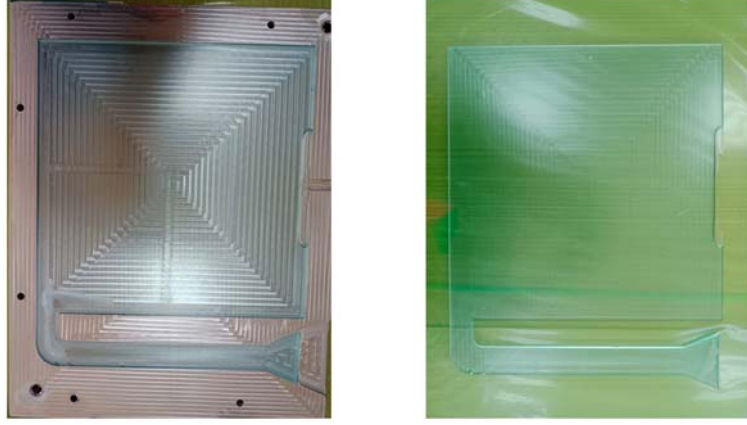
İlk olarak mekanik özelliklerin belirlenmesi kısmında gerekli olan referans numuneler için plaka üretimi kalıp yardımıyla dökülmüştür. Referans numuneler saf epoksi reçineden üretilmişlerdir. Kullanılan kalıp 2 parçadan oluşmakta olup Şekil 3’de gösterilmiştir. Bir kaba kalıbı dolduracak kadar dökülen epoksi reçine vakumlanma işlemi uygulanarak içerisinde bulunan hava kabarcıklarının giderilmesi sağlanmıştır. Vakumlanma işlemi Şekil 4’de verilmiştir. Hava kabarcıklarından arındırılan epoksi reçine plaka üretimi için kalıba dökülmüştür. Referans numune plakası üretiminin son adımı olarak kalıp 80°C’de 8 saat kurlenme işlemine bırakılmıştır. Son adım olarak kurlenme işlemi sonrasında referans numune plakası kalıptan çıkarılmış olup elde edilen plaka Şekil 5’de gösterilmiştir. Daha sonra kompozit deney numuneleri sulu kesim yöntemi ile üretilmiştir(Şekil6).



Şekil 3. Kompozit üretiminde kullanılan kalıp



Şekil 4. Vakumlama işlemi



Şekil 5. Elde edilen referans numune plakası



Şekil 6. Üretimi gerçekleştirilen saf epoksi deney numuneleri

Referans üretimini takriben, nanosilika katkıli hibrit kompozitlerin üretimine geçilmiştir. Elde edilen doğal lifler kalıba yatay olarak yerleştirilmiştir. İkincil takviye elemanı olarak nanosilika partikülleri eklenmiştir. Nanosilika, ağırlıkça %3 oranında kullanılarak nanosilika katkıli hibrit kompozitler elde edilmiştir. Elde edilen numuneler, ASTM D790 standartlarına uygun olarak sulu kesim yöntemi kesilmiştir. Şekil 7'de üretimleri gerçekleştirilen fiber takviyeli epoksi kompozitler gösterilmiştir.

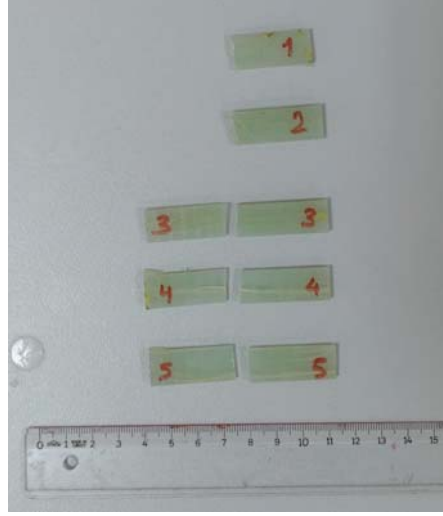


Şekil 7. Üretimi gerçekleştirilen fiber takviyeli deney numuneleri

2.5. Mekanik Karakterizasyon

Elde edilen kompozit numuneler, ALKÜ Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Mekanik Test Cihazında üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Bu test sonucunda, numune gruplarının ortalama eğilme

mukavemeti ve eğilme modülü değerleri belirlenmiştir. Şekil 8’de test edilmiş deney numunelerinin görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8. Hasarlanmış hibrit kompozitlerin deney sonrası görüntüsü

3. MEKANİK TEST SONUÇLARI

3.1. Saf Epoksinin Eğilme Performansı

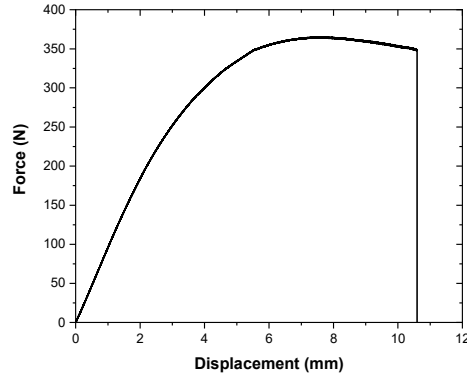
Saf epoksi reçinenin eğilme davranışını incelemek için yapılan testlerde elde edilen yük-deplasman eğrileri, malzemenin farklı deformasyon bölgelerini net bir şekilde göstermektedir. Aşağıda, saf epoksi reçine için elde edilen eğrilerin detaylı bir analizi bulunmaktadır.

Eğrinin başlangıç kısmı, epoksi reçinenin elastik davranışını temsil etmektedir. Örneğin, 0-0.5 mm deplasman aralığında uygulanan yük ile meydana gelen deplasman arasında doğrusal bir ilişki gözlenmiştir. Bu bölgede, yük yaklaşık 0-50 N arasında artış göstermektedir. Elastik bölgede malzeme, uygulanan yük kaldırıldığında başlangıç şekline geri döner.

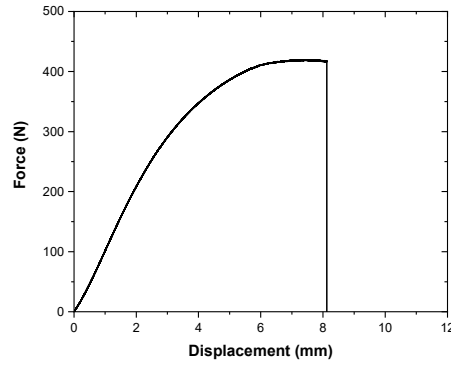
Şekil 9’da (1. numune) ve Şekil 10’da (2. numune) bu başlangıç fazı net bir şekilde görülmektedir. 0.5-1.5 mm deplasman aralığında epoksi reçine elastik deformasyona uğrar. Bu bölgede uygulanan yük yaklaşık 50 N’den 150 N’a kadar artar. Uygulanan yük kaldırıldığında malzeme başlangıç şekline geri döner. Elastik bölgedeki yük-deplasman eğrisi doğrusal bir ilişki sergiler ve bu, malzemenin elastik modülünü belirlemede kullanılır. Elastik bölge, Şekil 11’de (3. numune) ve Şekil 12’de (4. numune) gösterilmiştir.

1.5 mm’den sonraki deplasmanlarda malzeme plastik deformasyona başlar. Örneğin, 1.5-2.5 mm aralığında yük 150 N’dan 250 N’a kadar artar. Bu bölgede epoksi reçinenin moleküler yapısında kalıcı değişiklikler meydana gelir. Plastik bölge, malzemenin dayanıklılığını ve kalıcı deformasyona uğrama kapasitesini değerlendirmek için önemlidir. Plastik bölge, Şekil 13’de (5. numune) detaylandırılmıştır. Eğrinin en yüksek noktası, malzemenin maksimum yük kapasitesine ulaştığı ve kırılma başladığı noktadır. Bu noktada maksimum yük yaklaşık 300 N olarak ölçülmüştür. Kırılma noktası, epoksi reçinenin en yüksek dayanımını temsil eder. Bu noktadan sonra yük hızla düşer ve malzeme kırılır.

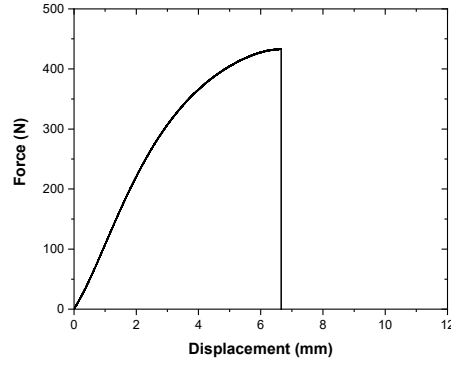
Elde edilen yük-deplasman eğrileri, saf epoksi reçinenin farklı deformasyon bölgelerini ve maksimum yük kapasitesini net bir şekilde ortaya koymuştur. Bu eğriler, malzemenin elastik ve plastik davranışlarını, elastik modülünü ve kırılma noktasını belirlemede kullanılmıştır. Epoksi reçinenin yüksek elastik modülü, malzemenin sert ve dayanıklı olduğunu gösterir. Bununla birlikte, plastik deformasyon bölgesi ve kırılma noktası, epoksi reçinenin belirli bir yükten sonra kalıcı deformasyona uğradığını ve kırılma bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



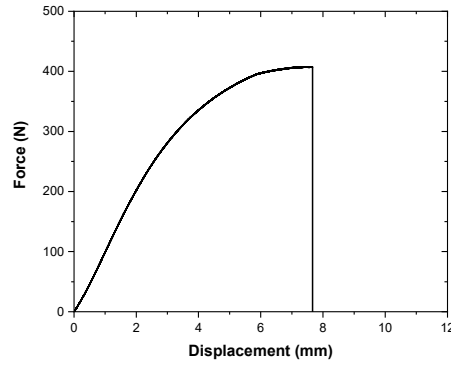
Şekil 9. Saf epoksinin eğme yükü altında davranışı (1.numune)



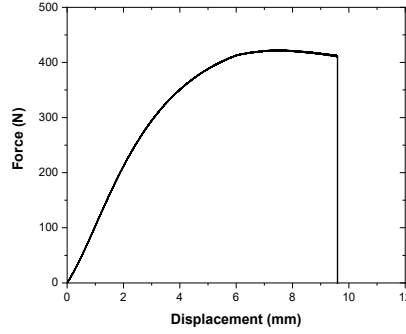
Şekil 10. Saf epoksinin eğme yükü altında davranışı (2.numune)



Şekil 11 Saf epoksinin eğme yükü altında davranışı (3.numune)



Şekil 12. Saf epoksinin eğme yükü altında davranışı (4.numune)



Şekil 13. Saf epoksinin eğme yükü altında davranışı (5. numune)

3.2. Lif ve %3 Nanosilika Takviyeli Kompozitlerin Eğilme Davranışı

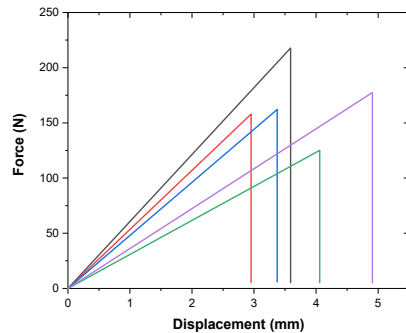
Lif ve nanosilika katkılı hibrit kompozitlerin eğilme performansını incelemek için yapılan testlerde elde edilen yük-deplasman eğrileri, malzemenin elastik ve plastik deformasyon bölgelerini, elastik modülünü ve maksimum yük kapasitesini göstermektedir. Aşağıda, lif ve %3 nanosilika takviyeli kompozitler için elde edilen eğrilerin detaylı bir analizi bulunmaktadır.

Eğrinin başlangıç kısmında, 0-1 mm deplasman aralığında ve 0-50 N yük aralığında doğrusal bir ilişki gözlenmektedir. Bu bölgede kompozit malzeme elastik davranış sergiler. Yani uygulanan yük kaldırıldığında malzeme başlangıç şekline geri döner. Elastik modül, bu doğrusal bölgeden hesaplanabilir ve malzemenin sertliğinin bir göstergesidir. Bu durum, kompozitin başlangıçta iyi bir elastikiyet sergilediğini gösterir.

Şekil 13'te lif ve %3 nanosilika takviyeli kompozitin eğme yükü altındaki davranışı gösterilmektedir. Elastik bölge, 1-2.5 mm deplasman aralığında ve 50-150 N yük aralığında yer alır. Bu bölgede kompozit malzeme hala elastik deformasyona uğrar ve yük kaldırıldığında başlangıç şekline geri döner. Yük ve deplasman arasındaki doğrusal ilişki devam eder ve bu, malzemenin esnekliğini ve mukavemetini gösterir. Bu bölgedeki yük artışı, kompozitin lif ve nanosilika takviyeleri sayesinde yüksek mukavemet ve esneklik kazandığını gösterir. Şekil 14'te bu elastik bölge net bir şekilde görülmektedir.

Plastik bölge, 2.5 mm'den sonraki deplasmanlarda başlar ve malzeme plastik deformasyona uğrar. Bu bölgede, 2.5-5.0 mm aralığında yük 150 N'dan 200 N'a kadar artar. Plastik deformasyon bölgesi, kompozit malzemenin moleküler yapısında kalıcı değişiklikler meydana gelir ve malzeme yük kaldırıldığında başlangıç şekline dönemez. Bu malzemenin dayanıklılığını ve kırılma dayanıklılığını değerlendirmede önemli bir göstergedir. Kompozitin bu bölgede deforme olması, yüksek dayanıklılığa sahip olduğunu gösterir ancak aynı zamanda belirli bir yükten sonra kalıcı deformasyona uğradığını da belirtir. Plastik bölge, Şekil 14'te detaylandırılmıştır.

Eğrinin en yüksek noktası, malzemenin maksimum yük kapasitesine ulaştığı ve kırılma başladığı noktadır. Bu noktada maksimum yük yaklaşık 200 N olarak ölçülmüştür. Kırılma noktası, kompozit malzemenin en yüksek dayanımını temsil eder. Bu noktadan sonra yük hızla düşer ve malzeme kırılır. Kırılma sonrası yük değerinin hızlı bir şekilde düşmesi, malzemenin kırılma yapısını gösterir. Farklı renklerde gösterilen eğrilerin her birinde kırılma noktası farklı yerlerde meydana gelmiştir. Bu, malzemenin homojen olmadığını ve farklı numunelerde farklı kırılma davranışları sergilediğini göstermektedir.



Şekil 14. Lif ve nanosilika takviyeli kompozitin eğme yükü altındaki davranışı

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Sansevieria Trifasciata doğal lifleri ve nanosilika katkılı epoksi matris kompozitlerin mekanik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Enzimatik havuzlama ve alkalizasyon işlemleri, doğal liflerin yüzey özelliklerini iyileştirerek epoksi matrise bağlanma kapasitesini artırmış, aynı zamanda lif-matris arayüzündeki mekanik bağlanmayı güçlendirmiştir. Üç nokta eğme testlerinden elde edilen sonuçlar, nanosilika katkılı kompozitlerin saf epoksi numunelere kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı ve elastikiyet modülü değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. %3 nanosilika katkısı, kompozitin elastik ve plastik deformasyon bölgelerinde mukavemet ve dayanıklılık artışı sağlamış, aynı zamanda lif takviyesiyle birlikte kırılma aniden gerçekleşirken, lif ve nanosilika katkılı kompozitlerde yük taşıma kapasitesi düzenli bir şekilde artmış ve bu durum malzemenin dayanıklılığını artırmıştır. Ancak, farklı numunelerde gözlemlenen kırılma noktalarındaki farklılıkların, üretim sürecindeki varyasyonlardan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Çalışmanın genel sonuçları, doğal lif takviyeli kompozitlerin çevresel sürdürülebilirlik ve endüstriyel uygulamalardaki potansiyelini ortaya koymaktadır. Nanosilika takviyesi, kompozit malzemelerin dayanıklılık ve elastikiyet özelliklerini iyileştirerek bu tür malzemelerin daha geniş bir uygulama alanında kullanılabilirliğini göstermiştir. Bu bulgular, doğal lifler ve nanosilika katkılı hibrit kompozitlerin, çevre dostu ve yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olarak uygulanabilirliğini desteklemektedir. Ancak, üretim parametrelerinin optimize edilmesi ve mikroyapısal analizlerin yapılması, gelecekteki çalışmalar için önem arz etmektedir.

4. GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada elde edilen bulgular, doğal lif takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirme konusundaki potansiyelini göstermiştir. Ancak, daha kapsamlı ve derinlemesine araştırmalar yapılması gerekmektedir. Gelecekteki çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

Ketenden, kenevirde ve jüt gibi diğer doğal lif türlerinden elde edilen kompozit malzemeler üretilebilir ve bu malzemelerin mekanik özellikleri karşılaştırılabilir.

Nanosilika dışında, nanokil, karbon nanotüpler ve grafen gibi farklı nanopartiküller ile takviye edilmiş kompozitler üretilebilir ve bu takviyelerin mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenebilir. Farklı nanopartikül oranları ve dağılım şekilleri kullanılarak optimal kompozisyon belirlenebilir.

Enzimatik havuzlama süresi ve kullanılan enzim/kimyasal oranlarının mekanik özellikler üzerindeki etkisini optimize etmek için detaylı parametre çalışmaları yapılabilir. Farklı havuzlama süreleri ve enzim/kimyasal konsantrasyonları denenerek, liflerin en yüksek saflıkta elde edilmesi sağlanabilir.

Üretilen kompozitlerin mikroyapısal analizleri yapılabilir ve lif-matris arayüzünün incelenmesi sağlanabilir. Bu analizler için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM) gibi ileri görüntüleme teknikleri kullanılabilir. Lif-matris arayüzündeki bağlanma kuvvetleri ve nanopartikül dağılımı detaylı bir şekilde incelenerek, kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirme yolları araştırılabilir.

Kompozitlerin uzun süreli yük altındaki davranışları, sürünme ve yorulma testleri ile incelenebilir. Bu testler, malzemelerin uzun vadeli performansını değerlendirmede kritik öneme sahiptir. Farklı yük ve çevresel koşullar altında yapılan yorulma testleri ile kompozitlerin dayanıklılığı ve ömür tahminleri yapılabilir.

Nem, sıcaklık değişimleri ve UV ışınımı gibi çevresel faktörlerin kompozit malzemelerin performansına etkisi araştırılabilir. Çevresel koşullar altında yapılan testler, kompozitlerin gerçek dünya uygulamalarındaki performansını değerlendirmeye yardımcı olabilir.

Bu öneriler, doğal lif takviyeli kompozitlerin daha geniş bir uygulama yelpazesinde etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayacak ve bu malzemelerin sentetik kompozitlere alternatif olarak kullanılabilirliğini artıracaktır. Gelecekteki araştırmaların, doğal liflerin mekanik özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği de göz önünde bulundurarak daha kapsamlı bir yaklaşım benimsemesi önerilmektedir.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2022-02-06-MAP02 proje numarası ile desteklenmiştir. Sağlanan finansal destek için teşekkür ederiz.

7. KAYNAKLAR

1. Mardiyati, M., Steven, S., Rizkiansyah, R.R., Senoaji, A., Suratman, R., 2016. Effects of alkali treatment on the mechanical and thermal properties of Sansevieria trifasciata fiber. AIP Conference Proceedings. 1725, AIP Publishing.
2. Widodo, E., Pratikto, S., Widodo, T.D., 2024. Comprehensive investigation of raw and NaOH alkalinized sansevieria fiber for enhancing composite reinforcement. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 9(100546).
3. Raj, F.I., Pushparaj, L., Thanu, C., 2023. Mechanical characterization of randomly oriented short Sansevieria Trifasciata natural fibre composites. International Polymer Processing, 38(5), 564-581.
4. Shieddieque, A.D., Widyanto, B., Aminanda, Y., 2022. Multi-objective optimization of sansevieria trifasciata fibre reinforced vinyl ester (STF/VE) bio-composites for the sustainable automotive industry. Automotive Experiences, 5(3), 288-303.
5. Mishfa, K.F., Alim, M.A., Repon, M.R., Habibullah, M.D., Tonmoy, M.A.H., Jurkonienė, S., Shukhratov, S., 2024. Preparation and characterization of snake plant fiber reinforced composite: A sustainable utilization of biowaste. SPE Polymers, 5(1), 35-44.
6. Rwawiire, S., Okello, J., Habbi, G., 2014. Comparative evaluation of dynamic mechanical properties of epoxy composites reinforced with woven fabrics from Sansevieria (Sansevieria trifasciata) fibres and banana (Musa sapientum) fibres. Tekstilec, 57(4), 315-320.
7. Ashok Kumar, M., Mallikarjuna, K., Sanjeev Kumar, P.V., Hari Sankar, P., 2020. An experimental studies on the polymer hybrid composites—effect of fibers on characterization. Smart Innovation, Systems and Technologies, 169, 85-92.
8. Kaddami, H., Dufresne, A., Khelifi, B., Bendahou, A., Taourirte, M., Raihane, M., Issartel, N., Sautereau, H., Gerard, J.-F., Sami, N., 2006. Short palm tree fibers—Thermoset matrices composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 37(9), 1413-1422.
9. Hulle, A., Kadole, P., Katkar, P., 2015. Agave Americana leaf fibers. Fibers, 3(1), 64-75.
10. Bulut, Y., Erdoğan, Ü.H., 2011. Selüloz esaslı doğal liflerin kompozit üretiminde takviye materyali olarak kullanımı. Tekstil ve Mühendis, 18(82), 26-35.
11. Yu, H., Yu, C., 2010. Influence of various retting methods on properties of kenaf fiber. The Journal of The Textile Institute, 101(5), 452-456.
12. Shadrach, J., Palani, K., Pitchandi, K., 2015. Evaluation on mechanical properties of woven Aloe vera and sisal fibre hybrid reinforced epoxy composites. Bulletin of Materials Science, 38, 1183-1193.
13. Ortega, Z., Castellano, J., Suárez, L., Paz, R., Díaz, N., Benítez, A.N., Marrero, M.D., 2019. Characterization of Agave americana L. plant as potential source of fibres for composites obtaining. SN Applied Sciences, 1, 1-9.

Afşin-Elbistan Termik Santrali (Kahramanmaraş) Çevresinin Yüzeysel Sularının Hidrojeokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi

Veli KESKİN^{1,a}, Sedat TÜRKMEN^{2,b}, Ahmet ÖZBEK^{3,c}

¹DSİ 17. Bölge Müdürlüğü, Yeraltı Suları Şubesi, Van

²Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Adana

³Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş

^aORCID: 0000-0003-2769-5044; ^bORCID: 0000-0002-9867-5545; ^cORCID: 0000-0002-6326-4324

Makale Bilgileri

Geliş : 14.06.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606454

Sorumlu Yazar

Sedat TÜRKMEN

sturkmen@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Hidrojeokimya

İçme suyu

Su kalitesi

İz element

Atf şekli: KESKİN, V., TÜRKMEN, S., ÖZBEK, A., (2024). Afşin-Elbistan Termik Santrali (Kahramanmaraş) Çevresinin Yüzeysel Sularının Hidrojeokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1113-1127.

ÖZ

Bu çalışma, Akdeniz bölgesinin kuzeydoğusunda yer alan Kahramanmaraş iline bağlı Afşin-Elbistan çevresindeki yüzeysel sularının kalitesi ve iz element kirlilik derecelerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Bölgedeki yüzeysel suyu kalitesi, Temmuz 2022'de farklı noktalardan alınan 11 su örneği kullanılarak değerlendirilmiştir. Yerinde yapılan sıcaklık (T), pH, elektriksel iletkenlik (Eİ), toplam çözünmüş madde (TÇM) ölçümleri ile birlikte, kalsiyum (Ca²⁺), magnezyum (Mg²⁺), sodyum (Na⁺), potasyum (K⁺), bikarbonat (HCO₃⁻), sülfat (SO₄²⁻), klorür (Cl⁻) ve nitrat (NO₃⁻), fosfat (PO₄³⁻) ve kükürt (S) olmak üzere 14 fiziksel ve jeokimyasal parametre; spektrofotometre, iyon kromatografisi ve titrasyon yöntemleri kullanılarak ölçülmüştür. İz element derişimlerinin belirlenmesi kapsamında alüminyum (Al), baryum (Ba), demir (Fe), manganez (Mn), nikel (Ni), krom (Cr), civa (Hg) ve titanyum (Ti) gibi iz elementler, İndüktif Olarak Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES) kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan su analizleri sonucunda saptanan Al, Fe, Cu, Ba, Mn, Cr, Hg ve Ti gibi elementlere ait yüksek değerlerin, çalışma alanının litolojik özellikleri, tarımsal faaliyetlerin etkisi, yerleşim yerlerinin yakınlığı ve Afşin-Elbistan termik santralının etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla, çalışma alanındaki yüzeysel sularında Al, Fe, Cu, Ba, Zn, Mn, Cr, Hg ve Ti kirliliği mevcut olduğundan bu yüzeysel sularının içilmesinin bölge halkı için sağlık riskleri oluşturma olasılığı mevcuttur.

Investigation of Hydrogeochemical Characteristics of Surface Waters Around Afşin-Elbistan Thermal Power Plant (Kahramanmaraş)

Article Info

Received : 14.06.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606454

Corresponding Author

Sedat TÜRKMEN

sturkmen@cu.edu.tr

Keywords

Hydrogeochemistry

Drinking water

Water quality

Trace element

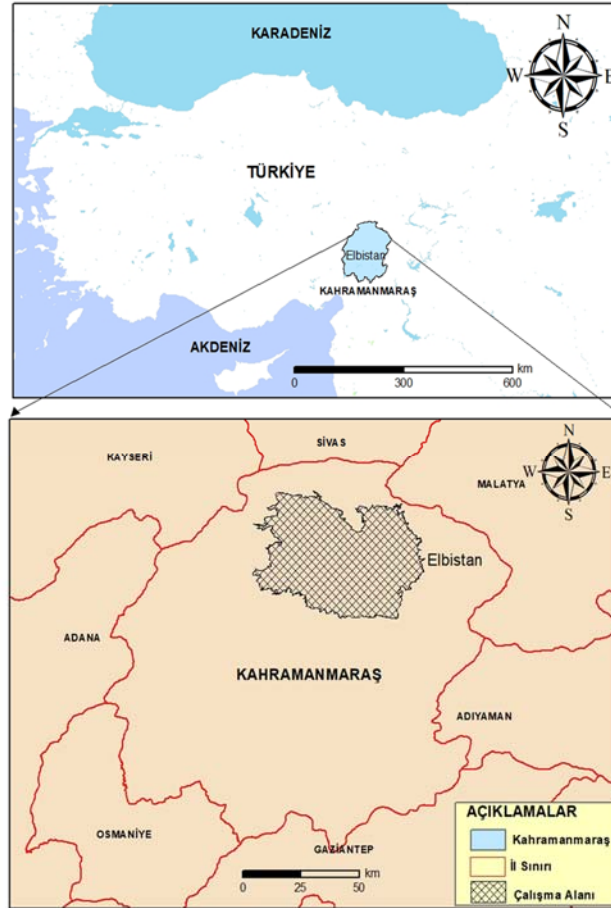
How to cite: KESKİN, V., TÜRKMEN, S., ÖZBEK, A., (2024). Afşin-Elbistan Termik Santrali (Kahramanmaraş) Çevresinin Yüzeysel Sularının Hidrojeokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1113-1127.

ABSTRACT

This study was conducted to determine the quality of surface waters and the degree of trace element pollution in the Afşin-Elbistan region, located in the northeastern part of the Mediterranean region, within the province of Kahramanmaraş. In addition to in situ measurements of temperature (T), pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), 14 physical and geochemical parameters including calcium (Ca²⁺), magnesium (Mg²⁺), sodium (Na⁺), potassium (K⁺), bicarbonate (HCO₃⁻), sulfate (SO₄²⁻), chloride (Cl⁻) and nitrate (NO₃⁻), phosphate (PO₄³⁻) and sulfur (S) were measured using spectrophotometer, ion chromatography, and titration methods. Trace elements such as aluminum (Al), barium (Ba), iron (Fe), manganese (Mn), nickel (Ni), chromium (Cr), mercury (Hg), and titanium (Ti) were analyzed using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) to determine their concentrations. The high levels of elements such as Al, Fe, Cu, Ba, Mn, Cr, Hg, and Ti detected in the water analyses are thought to be due to the lithological characteristics of the study area, the influence of agricultural activities, the proximity of settlements, and the impact of the Afşin-Elbistan thermal power plant. Therefore, since pollution of Al, Fe, Cu, Ba, Zn, Mn, Cr, Hg, and Ti is present in the surface waters of the study area, there is a potential risk of health hazards for the local population if these surface waters are consumed.

1. GİRİŞ

YüzeY suyu; insani tüketim, tarım, hayvancılık ve sanayi gibi çeşitli amaçlar için kullanılan temel kaynaklardan biridir [1]. Aynı zamanda yeraltı sularını besleyen kaynaklar arasında yer alır. YüzeY sularının, temizliği ve güvenliği, insan sağlığı ile doğrudan ilişkilidir [2,3]. Birleşmiş Milletler'in (BM) yayınladığı bir rapora göre, dünya genelinde 2,1 milyardan fazla insan güvenli ve temiz içme suyuna erişememektedir [4]. Bu nedenle, su kalitesinin değerlendirilmesi ekolojik açıdan büyük önem taşımaktadır [2,3]. Genel olarak, nüfus artışına bağlı kentleşme ve sanayileşme hem çevreyi hem de su kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir [4]. Hızla gelişen sanayileşme ve kentleşmeye bağlı meydana gelen atıklar, organik ve inorganik kirleticiler suya kontrolsüz bir şekilde deşarj edilmekte ve böylece su kirliliği sorunu ortaya çıkmaktadır [6]. Bu nedenle su kimyasındaki değişikliklerin büyük bir kısmı, evsel, endüstriyel ve tarımsal deşarjlar yoluyla meydana gelmektedir. Antropojenik kökenli bu kirliliklerin yanı sıra, madencilik ve ilgili faaliyetler de su kirliliğine neden olmakta ve su kaynaklarının kalitesini ve miktarını tehdit etmektedir. Su kaynaklarında yüksek derişimlere ulaşan iz elementlerin varlığı ve sucul sistemlerdeki dağılımı, son yıllarda artış göstermiş ve bu artışlar büyük bir soruna dönüşmüştür. Bu sorunlara genellikle toksik ve doğal ortamda kalıcı olan metaller veya yarı metaller neden olmaktadır. [6]. Su ve çevre kirliliği, ekosistemlerdeki toksikolojik önemi ve halk sağlığı üzerindeki etkileri nedeniyle bölgesel, yerel ve küresel ölçekte en önemli sorunlardan biridir [7]. İçme sularındaki kirleticiler, insan vücudunda biyolojik olarak birikebildikleri için kanser türleri ve diğer sağlık bozucu riskleri tetikleyebilmekte ve dolayısıyla canlıların sağlığı açısından tehdit oluşturmaktadırlar [8]. İz elementler, atom ağırlığı 63,546 ile 200,590 arasında değişen ve özgül ağırlığı 4,0'dan büyük elementlerdir [9]. Suda kolloidal, partikül ve çözünmüş fazlarda bulunabilirler [10]. Bu elementlerin su kaynaklarında bulunma nedenleri doğal ya da antropojenik kökenli olabilmektedir. İz elementlerin canlı vücuduna alınması, metalin niteliğine ve miktarına bağlı olarak çeşitli semptomlara ve ciddi sağlık etkilerine neden olmaktadır [11,12]. Ayrıca, maden ocakları ve maden işleme atıkları, mevcut kirleticilerin sudaki derişimlerini önemli ölçüde değiştirmektedir. Bu nedenle, sudaki iz element kirliliğinin periyodik olarak izlenmesi büyük bir gerekliliktir [13].



Şekil 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası

Çalışma alanı olan Elbistan bölgesindeki yüzey suları gerek madencilik faaliyetleri gerekse de tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan çeşitli toksik atıklara maruz kalmaktadır. Maden işletiminden kaynaklanan atık sular ile yerleşim yerlerinden gelen evsel atık suların büyük bir kısmı herhangi bir arıtma işlemi uygulanmadan yüzeysel akış sistemlerine deşarj edilmektedir. Bölgenin en önemli akarsuyu olan Ceyhan Nehri; Söğütlü, Hurman, Göksun, Mağara Gözü, Fırınz, Tekir, Körsulu ve Aksu çayları tarafından beslenmektedir. Bölgede uzun yıllardır su buharı ile elektrik üretimi yapan Çöllolar Termik Santrali'nin yakıt atıkları, çevredeki cevherleşme alanları ve işletim tesisleri, Ceyhan Nehri ve onu besleyen yan kollarını oluşturan akarsuları olumsuz yönde etkilemektedir. Elbistan bölgesinin en önemli geçim kaynağının tarım ve hayvancılık olduğu düşünülürken, bölgedeki yüzey suları oldukça önem kazanmaktadır. Aynı zamanda, iyi kalitedeki suların tespiti ve korunması hem ekolojik denge hem de bölge halkının sağlığı açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda, Kahramanmaraş ilinin Elbistan ilçesinde yapılan bu çalışmada (Şekil 1), bölge yüzey sularının kalitesi ve iz element derişimlerinin maruziyet sonucunda yaratabileceği olası riskleri araştırmayı amaçlamıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Materyal

2.1. Çalışma Alanı

2.1. Bölgenin Jeolojisi

Çalışma alanı ve yakın çevresinde, Paleozoyik'ten-Kuvaterner'e kadar oluşmuş, birbirinden farklı özellikler gösteren allokon birimler bulunmaktadır. Elbistan bölgesinde yapılan bu çalışmada, bölge jeolojisinin tanımlanmasında [14] tarafından hazırlanan jeoloji raporundan faydalanılmıştır.

Çalışma alanı ve çevresindeki jeolojik yapı, Torid-Anatolid Bloğu'nu oluşturan, neotektonik dönem öncesine ait çökeller ile bu çökellerin üzerinde yer alan havza dolgusundan oluşmaktadır. Çalışma alanının kuzeybatı (KB) bölgesinde, Ahmetçik formasyonu olarak adlandırılan kömür içeren Pliyosen çökeller konumlanmıştır. Bu birimlerin üzerine ise Kuvaterner çökelleri gelmektedir. Geç Jura-Kretase yaşlı Kömürhan Ofiyolitleri, bölgedeki Geç Kretase yaşlı Dağlıca Karışığı üzerinde tektonik dokanakla yer almaktadır. Bu birimlerin üzerine ise yine tektonik dokanakla Bodrum Napı gelmektedir. Çoğunluğunu metamorfik kayaların oluşturduğu Bodrum Napı'nın üzerine Geç Permiyen-Geç Kretase yaşlı çökellerden oluşmuş Gülbahar Napı gelmektedir. Gülbahar Napı'nı ise orta Triyas-Geç Kretase yaşlı çökellerden oluşan Köseyahya Napı üzerlemektedir. Bu napların üzerinde Paleosen-Eosen-Miyosen yaşlı örtü birimleri yer alırken, stratigrafinin üst düzeyinde ise kömür içeren Pliyosen yaşlı Ahmetçik formasyonu yer almaktadır. Akarsu ve göl çökellerinden oluşan bu birimin üzerine ise Kuvaterner yaşlı, farklı boyut ve şekilli yamaç molozları, alüvyon yelpazeleri ve genç alüvyon çökelleri gelmektedir (Şekil 2). Çalışma alanı ve yakın çevresindeki temel kaya birimleri sekiz temel formasyon adı altında incelenmiştir. Bu formasyonlar:

Yonca yolu formasyonu

Rekristalize kireçtaşı, dolomit, kalkşist, şist ve kuvarsit ardalanmasından oluşan Yonca yolu formasyonun tabanında metakirintüliler yer almaktadır. Bu birimler üzerine ise çoğunlukla seyrek şist ara seviyeli dolomit, dolomitik kireçtaşı ve rekristalize kireçtaşları gelmektedir. Şistler koyu yeşil, kurşuni gri, mavimsi, sarımsı ve yeşil renkte olup, oldukça kıvrımlı bir yapıya sahiptir. Ayrıca, bu kayalar ince-orta yapraklanmalı bir doku göstermektedir [14].

Çayderesi formasyonu

İlk olarak Özgül tarafından Çayderesi Kireçtaşı olarak tanımlanan bu birim, bölgede Kuşkayaşı, Karahüyük ve Karagöz dolaylarında yüzeylenmektedir. Çayderesi formasyonu, genel olarak şist, kalkşist ara katmalı dolomitik kireçtaşı, rekristalize kireçtaşı ve mermerlerden meydana gelmiştir [14].

Karaböğürtlen formasyonu

Karagözün güneyinde yüzeyleyen bu formasyonun alt düzeyleri başlıca rekristalize kireçtaşı, çörtlü mermer ve dolomit ardalanmasından oluşurken, üst düzeyleri breşik kireçtaşlarından meydana gelmektedir. Çörtlü

mermerler genellikle gri, beyaz renkli, çok kalın, orta kalınlıkta ve düzenli tabakalanmalı bir yapıya sahiptir. Şekersî dokuları ile dikkat çeken bu kayalar, bol eklemlidir [14].

Köseyahya (Domuzdağ) Napı

Çalışma alanının kuzeydoğusunda, yer alan Köseyahya Formasyonu, genel olarak kireçtaşı ve mermerden (Mzk) oluşmaktadır. Bu formasyon, Küçükkişla ve Kışlaköy arasında kalan bölgelerde ve Kalaycık Köyü'nün kuzeybatısında yüzeilenmektedir. Geç Kampaniyen-Geç Maastrichtiyen yaşlı Kemaliye formasyonu tarafından açılal uyumsuzlukla üzerlenen Köseyahya Napı, ayrıca Pliyo-Kuvaterner yaşlı Ahmetçik Formasyonu tarafından açılal uyumsuz olarak örtülmektedir. Köseyahya Napı, Lütesiyen ve Geç Miyosen hareketleriyle Kemaliye formasyonu üzerine tektonik dokanakla gelmektedir [14].

Kemaliye formasyonu

Munzur Dağları ve çevresinde yapılan çalışmalarla Kemaliye formasyonu olarak tanımlanan bu formasyon, çalışma alanında Kışlaköy'ün kuzeyinde ve Kalaycık'ın doğusunda gözlenmektedir. Formasyonun alt düzeylerinde filiş, üst düzeyleri ise vahşi filiş özelliği gösteren, farklı yaşta ve türde blok ile tektonik dilimler içermektedir [15].

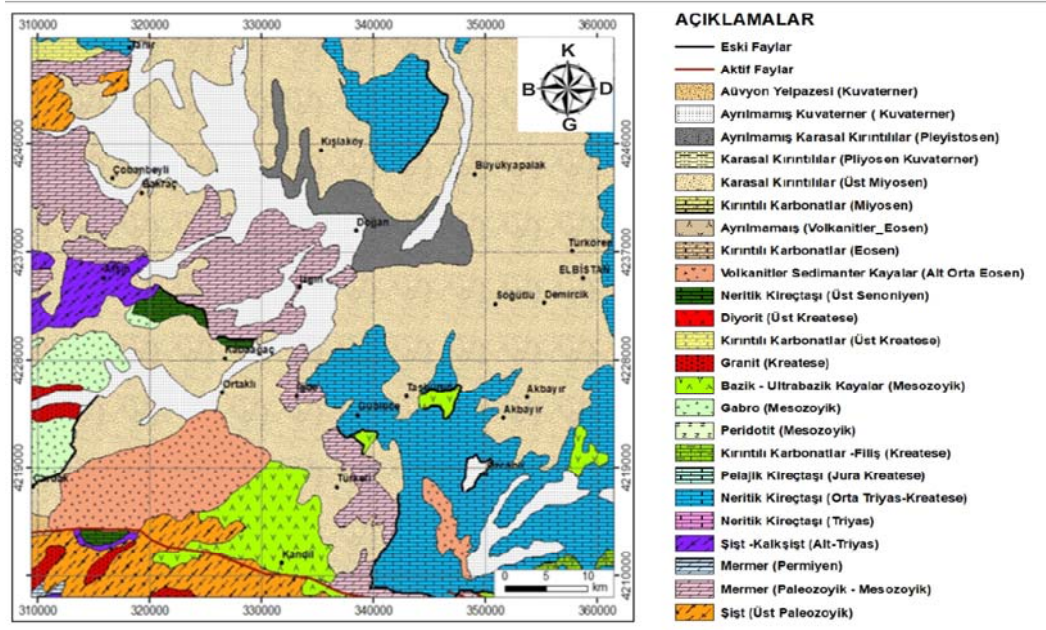
Formasyonun tabanında yer alan filiş istifi her zaman yüzeilenmemektedir. Daha yaşlı birimler üzerine formasyonun daha iri taneli bölümü doğrudan gelmektedir. Kemaliye formasyonu içindeki kiltası, silttaşı, marnlarda bulunan nanoplankton ve planktonik foraminiferler, bu birimin yaşını Geç Kampaniyen-Geç Maastrichtiyen olarak belirlemiştir [14].

Ahmetçik formasyonu

Ahmetçik formasyonunun alt birimlerini, Afşin-Elbistan Havzasındaki kömürlü göl çökelleri oluşturmakta ve bu birimlerin üzerine ise akarsu çökelleri gelmektedir [14]. Formasyonunun alt birimini, linyit içeren göl çökelleri oluşturmaktadır. Çöllolar Termik Santrali için açılal kömür ocağında, taban kiltası, silt, marn, silttaşı ve çamurtaşı ara bantlı kalın bir kömür seviyesi ile başlamaktadır. Daha alt seviyelerde ise Ahmetçik formasyonunun taban konglomeraları görülmektedir [16].

Alüvyon

Çalışma alanında mevsimsel akarsu debilerine bağılı olarak çökelişini sürdüren farklı boyut ve özellikteki alüvyonlar, genellikle tutturulmamış çakıl, kum, silt, kil ve çamurdan oluşmaktadır. Kalın alüvyon birikimlerinin oluşmasında en önemli rolü, bölgenin yüksek kesimlerinden kaynağını alan Hurman Çayı oynamaktadır [14].



Şekil 2. Çalışma alanının jeoloji haritası [17]

2.1.1.2. Bölgenin Hidrolojisi

Karasal iklim özelliği gösteren Elbistan, yazları sıcak ve kurak, kışları ise soğuk ve yağışlı geçmektedir. Bu durum, bölge yüzey sularının debilerinin değişkenlik göstermesine neden olmaktadır. Maraş/Elbistan bulunduğu konum gereği hem Akdeniz hem de karasal iklimin özelliklerini yansıtmaktadır. Bölgenin en önemli akarsuyu Ceyhan Nehri'dir. Bölge akiferini besleyen bu nehrin en önemli kolları Söğütlü, Hurman, Göksun, Mağara Gözü, Fırınz, Tekir, Körsulu ve Aksu çaylarıdır. Bölgedeki su kaynakları, depolama deşarj sistemleri dikkate alındığında akifer türünün serbest akifer özelliği taşıdığı görülmektedir. Çalışma alanının yüksek kesimlerinde yer alan farklı yaş ve özellikteki kireçtaşı formasyonları, yüzey suyu kaynakları ve bölge akiferi için önemli birer hazne kayaları olma özelliği taşımaktadır.

2.2. Metot

Çalışma alanı olarak belirlenen Elbistan ilçesi ve yakın çevresinde bulunan yüzey sularından, 2022 yılı Temmuz ayında uygun görülen kesimlerden toplam 11 adet su örneği alınmıştır. Numune alma işlemi için daha önceden saf su ile yıkanmış iki adet 250 ml'lik polietilen şişe, her örnek noktasında üç kez numune alınacak suyla yıkanmıştır. Alınan su numunelerinin ilki, anyon / katyon analizleri için, ikinci numune ise iz element analizi için kullanılmıştır. Örnekler, Millipore filtrasyon ünitesi ve filtre kâğıdı ile filtrelenmiştir. İz element analizleri için alınan numunelere, pH < 2 olacak şekilde 6 N ultra saf nitrik asit ilave edilmiştir [18]. Sıcaklık (T), elektriksel iletkenlik (EI), Toplam Çözünmüş Madde (TÇM) ve pH parametreleri, Hanna HI 8334 ve Antech PC Testr 35 Eutech cihazları kullanılarak yerinde belirlenmiştir. Anyon/katyon analizleri için alınan su numuneleri, iyon kromatografisi ve spektrofotometre yöntemleriyle, bikarbonat/karbonat ve klorür analizleri titrasyon yöntemleriyle ve iz element (Al, Ba, Cr, Fe, Mn, Ni, Hg, Ti ve S) derişimleri ise ICP-OES (İndüktif Olarak Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometresi) yöntemiyle Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Laboratuvarı ve Çukurova Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda (ÇÜMERLAB) yapılmıştır. Anyon / katyon analizleri sonucu elde edilen veriler kullanılarak, bölge yüzey sularının fiziksel özellikleri belirlenmiştir.

Sertlik

Sertlik, suların en önemli iyon özelliklerinden biri olup, başta kalsiyum, magnezyum ve bikarbonat iyonları olmak üzere, Ca-Mg SO₄, Ca-Mg nitrat ve +2 veya daha yüksek değeriğe sahip metal katyonlarından (Sr²⁺, Mn²⁺, Fe²⁺, Fe³⁺, Al³⁺) ileri gelmektedir. Sertlik ölçümlerinde farklı ölçüm yöntemleri kullanılmaktadır. Genel olarak, suların sertlik derecelerini belirtmek için Fransız Sertlik Derecesi (°F) kullanılmaktadır. Kalsiyumlu ve magnezyum bikarbonattan oluşmuş sertlik, geçici sertlik olarak kabul edilirken, bu özellik dışındaki tuzların etkisi ile meydana gelmiş sertliğe daimî sertlik denir. Geçici sertliğin giderilmesi amacıyla su kaynatılarak, CaCO₃ ve MgCO₃ çökeltilir. Geçici sertlik ve kalıcı sertlik toplamından toplam sertlik değeri elde edilir [19]. Yapılan bu çalışmada, Fransız sertlik sınıflaması kullanılmıştır. 1 Fransız sertliği, 10 mg/L CaCO₃'e karşılık gelen sertlik verici tuz iyonunun meydana getirdiği sertliğe karşılık gelmektedir ve aşağıdaki formül ile hesaplanır [18].

$$F = [(CaO + MgO)]/10 \quad (1)$$

$$CaO = Ca^x(100/56)$$

$$MgO = Mg^x(40/24)$$

Burada, Ca ve Mg analiz sonucu elde edilen derişimlerdir.

Çizelge 1. Fransız sertlik sınıflaması [17]

Sertlik sınıfı (°F)	Referans aralığı
Çok yumuşak	0 – 7,2
Yumuşak	7,2 – 14,5
Az sert	14,5 – 21,5
Oldukça sert	21,5 – 32,5
Sert	32,5 – 54,0
Çok sert sular	> 54

Hidrojen İyon Konsantrasyonu (pH)

Sudaki hidrojen konsantrasyonu, pH değeri ile ifade edilir ve pH, hidrojen iyonu aktivitesinin negatif logaritması olarak tanımlanır [18].

Elektriksel İletkenlik (EI)

Elektriksel İletkenlik, suların elektrik akımını iletebilme kapasitesini ifade eden bir parametre olup, bir çözeltideki çözünmüş iyonların konsantrasyonunun bir göstergesidir. Çoğunlukla mikroSiemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$) birimi kullanılarak ölçümler yapılır [18].

Sodyum İyon Yüzdesi (%Na)

Sodyum iyon yüzdesi %50'den küçük olan yüzeysel suları, tarımsal sulama için uygun sulardır. Sulama suları için kullanılacak sulardaki sodyum yüzdesi, aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmaktadır [18].

$$\%Na = (rNa + rK + rCa + rMg) \times 100 \quad (2)$$

Schoeller İçilebilirlik Sınıflaması

Schoeller içilebilirlik diyagramı, yeraltı ve yüzeysel sularının kalitesini analiz etmek için kullanılan hidrojeokimyasal bir yöntemdir. Bu diyagram, suyun içilebilirliği ve kullanım uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla suların iyonik bileşimlerini görselleştirmek için kullanılır (Şekil 8). Su örneklerinin ana katyon ve anyonlarına ait konsantrasyonlar logaritmik ölçekli bir grafik üzerinde gösterilir. Oluşturulan bu grafik yardımıyla, farklı kökenli suların içerikleri görsel olarak karşılaştırılabilir. Diyagramda sodyum (Na^+), potasyum (K^+), kalsiyum (Ca^{2+}), magnezyum (Mg^{2+}), bikarbonat (HCO_3^-), sülfat (SO_4^{2-}), ve klor (Cl^-) gibi iyonlar kullanılır.

Sodyum Adsorbsiyon Oranı (SAR)

Sodyum Adsorbsiyon Oranı (SAR), sulama suları ve toprak içerisindeki iyon konsantrasyonlarının belirlenmesinde kullanılan önemli bir parametredir. SAR, sodyum iyonunun toprakta değişim reaksiyonlarındaki aktifliğini ifade eder. Bu oran, sodyum iyonlarının toprak yüzeylerine adsorbe olma eğilimini gösterir ve tarımsal sulama için suyun uygunluğunu değerlendirmede kullanılır. SAR, aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\text{SAR} = \text{Na} / \sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg})/2} \quad (3)$$

Belirlenen SAR değerlerine göre sular sulama suyu açısından Çizelge 2'ye göre sınıflandırılır [18].

Çizelge 2. Sodyum adsorbsiyon oranı (SAR) sınıflama sistemi

Sulama Suyu Sınıfı	S1	S2	S3	S4
(SAR)	Çok iyi	İyi	Kullanılabilir	Kullanılmaz
	0-10	10-18	18-26	26

3. BULGULAR

3.1. Hidrojeokimya

Çalışma alanında yapılan hidrojeokimyasal değerlendirmeler sonucunda, su kaynaklarında ölçülen sertlik değerlerinin 9,00-21,75 °F arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu bulgulara göre, genel olarak bölgedeki yüzeysel suları yumuşak su sınıfında yer almaktadır. Bölge sularının yumuşak su sınıfında bulunması, kullanım açısından bazı avantajlar sunmaktadır. Yumuşak sular hem içme suyu hem de tarımsal ve endüstriyel kullanım için genellikle daha uygun olarak değerlendirilmektedir. Ancak, sertlik değerlerinin düşük olması, minerallerin yetersiz olduğu anlamına da gelebilir ve bu, insan tüketimi veya bitki gelişimi açısından dikkatle değerlendirilmelidir [18].

Çalışma alanında yapılan yerinde ölçümler sonucunda, bölgedeki yüzey sularının pH değerlerinin 7'nin üzerinde olduğu ve bu nedenle bazik karakterli sular sınıfına girdiği belirlenmiştir (Şekil 3). Elektriksel iletkenlik (Eİ) değerleri ise 335-688 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişmektedir (Şekil 3). Özellikle kuzeybatı kesiminden ve bölge sularının birleşim noktalarından alınan su örneklerinde (7, 8, 9, 10 ve 11 nolu) Eİ değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Çalışma alanının batısına nispeten doğusunda Eİ değerleri daha düşük değerdedir. Çalışma alanındaki su kaynaklarına ait Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR) değerlerinin 0,04-1,27 arasında değiştiği ve bütün suların sınıfının ise S1 “çok iyi sulama suyu” olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, çalışma alanı yüzey sularında florür (F^-) derişimlerinin oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3). Bu sonuçlar, bölge yüzey sularının fizikokimyasal özelliklerinin hem tarımsal sulama hem de su kalitesi açısından genel olarak iyi durumda olduğunu göstermektedir.

Yüzey sularındaki fosfat derişimlerinin 23,32 ile 83,67 $\mu\text{g}/\text{L}$ (ppb) aralığında değişmekte olup, en yüksek derişim 10 nolu yüzey suyu örneğinde tespit edilmiştir. Bu örnekleme noktasının, bölge sularının birleşim noktası olduğu göz önüne alındığında, yüksek fosfat derişimlerinin tarımsal gübre, yem, gıda, deterjan atıkları ve endüstriyel kimyasalların birikiminden kaynaklanabileceği düşünülmektedir (Şekil 5). Bölgedeki kükürt derişimlerinin ise 5,35 ile 38,15 mg/L arasında değiştiği ve özellikle 1, 4, 6, 7 ve 10 nolu örnekleme noktalarında yüksek değerler gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 5). 1 ve 4 nolu örnekleme noktaları, Ceyhan Nehri'nin kaynak noktası ve Söğütlü Deresi'ni temsil etmekte olup bu bölgelerdeki şehirleşmenin yoğunluğu dikkat çekmektedir. Bu durum, evsel atıklar (örneğin odun, kömür gibi yakıt kalıntıları) ile petrol türevi atıkların, kükürt derişimlerinin artışında önemli bir kökensel etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bölgedeki fosfat ve kükürt kirliliğinin büyük ölçüde insan faaliyetlerinden kaynaklandığı ve yerleşim, tarım, endüstriyel etkilerin su kalitesi üzerinde belirleyici olduğu ortaya konulmuştur. Genel olarak analiz sonuçları değerlendirildiğinde, bölgede üretim yapan ve enerji kaynağı olarak kömür kullanan termik santrale yakın olan, aynı zamanda işletim faaliyetlerinde su kaynağı olarak kullanılan yüzey sularından alınan 7 nolu su örneğinin kükürt (S) derişimlerinin, kömürleşme ortamındaki kükürt oluşumları, kömür külü atıkları ve zirai ilaçlamalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Öte yandan, 10 nolu su örneğinin kükürt derişiminin artışı, bu su kaynağının bölge yüzey sularının büyük bir kısmının birleşim noktasından alınması ile ilişkilendirilmiştir (Şekil 5). Bu derişim artışında yukarıda sayılan kirleticilerin tamamının etkili olduğu düşünülmektedir. Bu bulgular, bölgedeki termik santral ve çevresel insan faaliyetlerinin, yüzey sularındaki kükürt kirliliği üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir.

Çalışma alanındaki yüzey suları, SAR sınıflamasına göre suların sodyum yüzdesi %18,38 - 25,02 arasında değişmekte olup, bu değerlerle sular “çok iyi su” sınıfında yer almaktadır. Analiz edilen yüzey suyu iyon konsantrasyon verileri ve bu veriler ile elde edilen diyagramlar incelendiğinde; anyon sıralamasının genel olarak $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ şeklinde, katyon sıralamasının ise $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Yüzey suyu örneklerinin kalsiyum (Ca^{2+}) değerleri 43,33 ile 96,67 mg/L arasında değişmektedir. Kalsiyum değerlerinin diğer katyonlara göre daha yüksek olduğu ve inceleme alanının kuzey ile kuzeydoğu bölgelerinde yüksek derişimlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Özellikle Söğütlü Deresi ve Ceyhan Nehri'nin kaynak kısmından çıkan su kaynaklarının birleşim noktasından alınan 4 nolu su örneğinde, en yüksek kalsiyum derişimi tespit edilmiştir (Şekil 4). Akarsuyun üzerinden aktığı kayaçların mineralojik/kimyasal etkileşim, suların kalsiyum açısından zenginleşmesine neden olabilmektedir [20]. Bölgedeki karbonat kökenli litolojik birimler ile etkileşim, suların Ca^{2+} açısından zenginleşmesine neden olmuştur.

Magnezyum derişimleri 8,34 ile 26,93 mg/L aralığında değişmektedir. En yüksek Mg derişimi $\text{Mg} + \text{CaCO}_3$ kökenli litolojilerle ilişkilendirilen 4 nolu su örneğinde tespit edilmiştir (Şekil 4). Yüzey suyu örneklerinin sodyum değerleri 2,6 ile 16,17 mg/L , klorür değerleri 3,2 ile 23,81 mg/L arasında değişiklik göstermektedir. Yüksek sodyum (Na^+) ve klorür (Cl^-) derişimlerinde yine 4 nolu su örneğinde gözlenmiştir. Bu su örneğinin (4 nolu) alındığı Söğütlü Deresi ve Ceyhan Nehri'nin kaynak kısımları incelendiğinde litolojik olarak karbonatlı birimlerin baskın olduğu görülmektedir. Sodyum ve klorür iyonlarına ait derişimlerin bölgedeki Orta Triyas-Kretase yaşlı neritik kireçtaşlarının içerisinde oluşmuş eski deniz yatağı tuzlarından kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 4). Ayrıca, bu iyonların derişimleri, tarımsal sulamada kullanılan gübrelerden, yerleşim yerlerindeki evsel atıklardan ve endüstriyel atıklarından da etkilenebilmektedir. Potasyum (K^+) derişimleri ise 0,65 ile 2,76 mg/L arasında değişmekte olup, en yüksek potasyum derişimi 10 nolu su örneğinde tespit edilmiştir. Bu noktanın çevresinde potasyum derişimlerinin, endüstriyel, evsel, tarımsal ve litolojik kökenli etkileşimlere bağlı olarak artış gösterdiği düşünülmektedir (Şekil 4). Bu

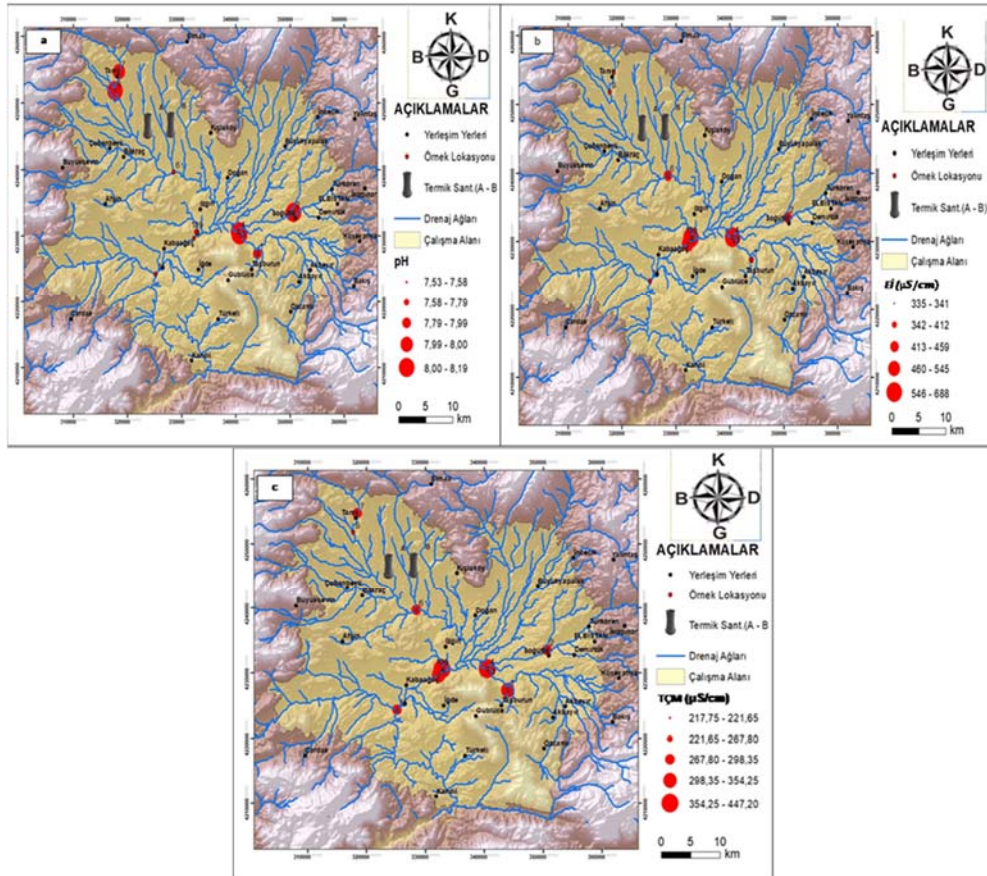
analizler, çalışma alanındaki yüzeysel suların iyonik kompozisyonunun bölgenin jeolojik yapısı ve insan faaliyetlerinden önemli ölçüde etkilendiğini ortaya koymaktadır

Yüzeysel suların bikarbonat değerleri 112,87 ile 269,64 mg/L arasında değişirken, karbonat değerleri 0 ile 48 mg/L arasında değişmektedir (Şekil 4). Çalışma alanının doğu ve güneydoğu kısmında yaygın olarak gözlenen Orta Triyas–Kretase yaşlı neritik kireçtaşları içerisinde bulunan yüzey suyu örneklerinde bikarbonat derişimleri diğer bölgelere göre nispeten daha yüksek bulunmuştur. Yüzeysel suların sülfat derişimleri ise 17 ile 109 mg/L aralığında değiştiği görülmektedir (Şekil 4). Bölgede yüzey sularındaki nitrat derişimleri 17,37-161,33 mg/L arasında, nitrit derişimleri ise 0,14 ile 0,99 mg/L aralığında değişmektedir. Özellikle tarım arazileri ve yerleşim yerleri içerisinde bulunan veya yakın çevresinde yapılan yüzey suyu örneklemelerinde, diğer alanlara göre yüksek derişimlerde sülfat ve nitratın tarımsal gübrelerle evsel ve endüstriyel atıkların yüzey sularına karışmasından kaynaklandığını düşündürmektedir (Şekil 5).

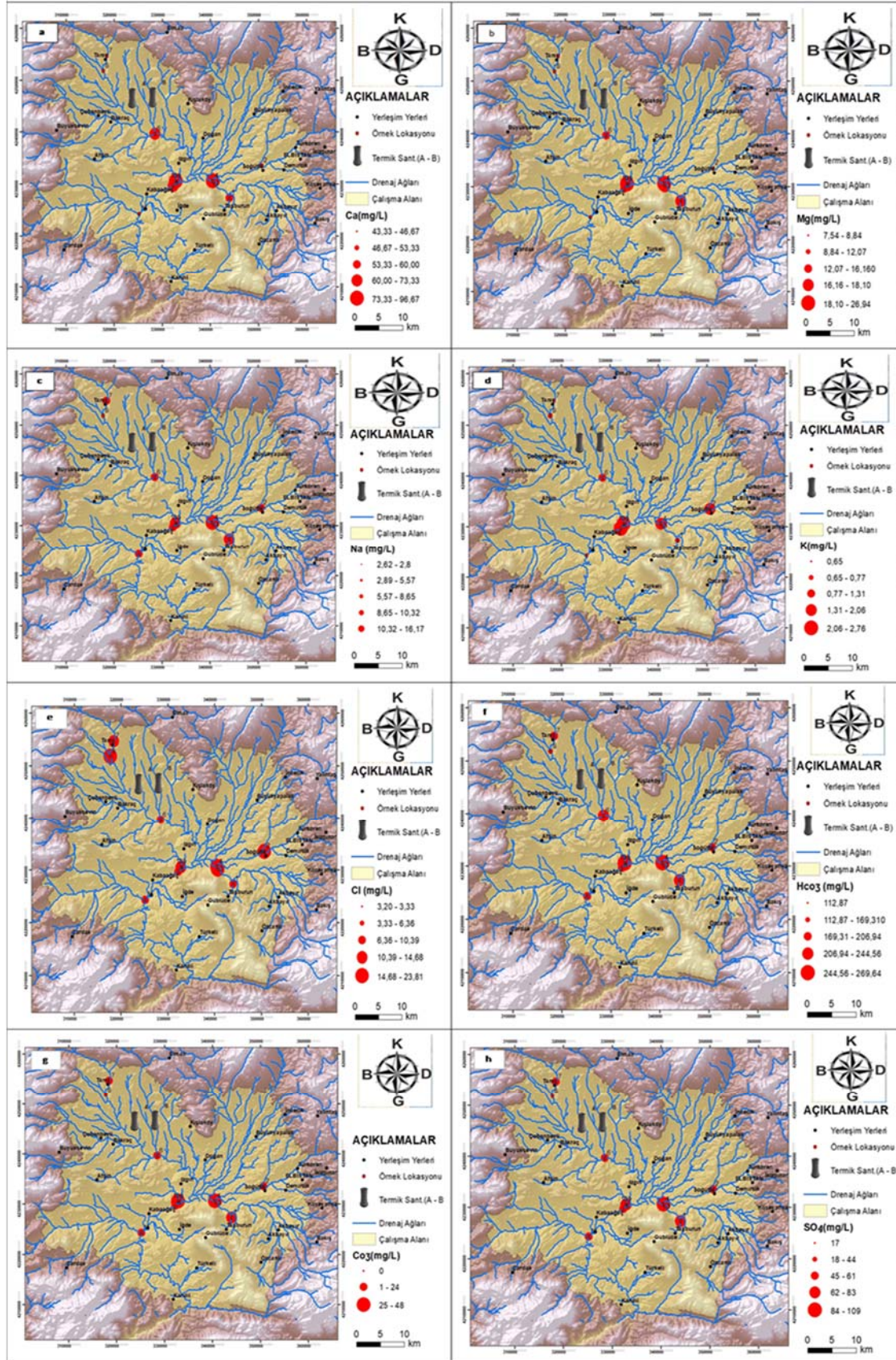
Çizelge 3. Yüzeysel su kaynaklarının fiziksel özellikleri ve iyon derişim değerleri

No	T °C	pH	EC (µS/cm)	TDS (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	Cl (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	S (µg/L)	PO ₄ (µg/L)
1	18,1	7,99	390	253,5	60,00	18,10	2,62	0,75	200,67	3,33	83	52,69	29,05	23,32
2	17,9	8,14	459	298,4	53,33	8,84	8,65	1,60	163,04	8,36	56	65,63	19,6	39,83
3	15,3	8,11	412	267,8	60,00	18,10	2,89	0,71	206,94	3,20	44	53,71	15,4	45,6
4	16,1	8,12	664	431,6	96,67	26,94	16,17	2,06	269,64	23,81	109	161,33	38,15	52,69
5	17,3	7,58	520	338	68,33	14,22	10,32	2,38	150,50	10,39	61	80,51	21,35	83,67
6	13,8	7,53	440	286	73,33	15,09	5,57	1,19	244,56	8,01	57	65,85	19,95	80,6
7	16,4	8	335	217,8	43,33	7,76	4,27	0,65	112,87	6,36	50	20,24	17,5	83,6
8	16,9	8,19	341	221,7	46,67	7,54	4,34	0,73	156,77	5,59	17	17,37	5,95	50,45
9	15,7	7,75	530	344,5	60,00	12,07	6,68	1,31	169,31	8,04	42	65,31	14,7	63,8
10	15,9	7,72	688	447,2	86,67	23,49	7,43	2,76	269,64	14,68	77	119,24	26,95	71,3
11	14,8	7,79	545	354,3	68,33	16,16	8,26	1,80	263,37	9,96	59	80,61	20,65	74,36
*	25	6,5-9,5	2500	-	-	50	200	-	250	250	50	50	-	-
**	-	6,5-9,5	-	-	-	-	200	-	250	250	50	45	-	-

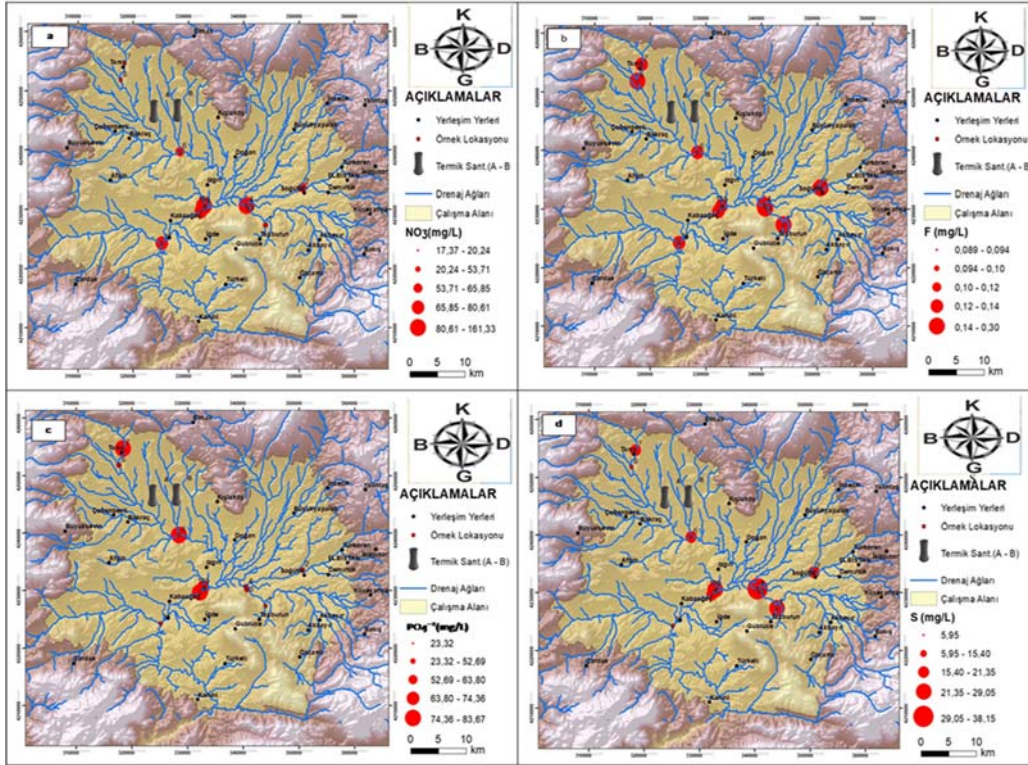
*ITHASY(2005), ** WHO(2008); standart değerleri



Şekil 3. Akarsuların fiziksel parametrelerinin değişimi: (a) pH, (b) elektriksel iletkenlik, (c) toplam çözümlü madde (TÇM)



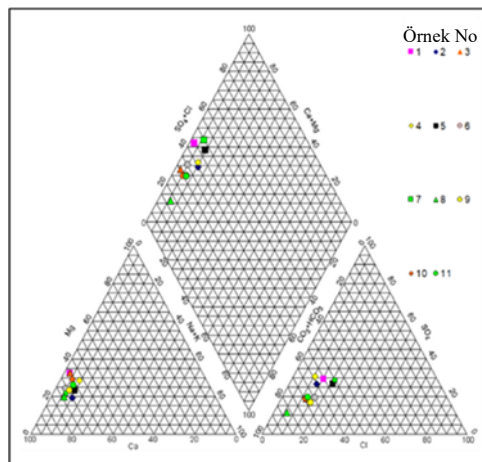
Şekil 4. Akarsuların majör katyon derişimlerinin değişimi: (a) kalsiyum, (b) magnezyum, (c) sodyum, (d) potasyum, (e) klor, (f) bikarbonat, (g) karbonat ve (h) sülfat



Şekil 5. Akarsuların majör anyon derişimlerinin değışimi: (a) nitrat, (b) flor, (c) fosfat ve (d) kükürt

3.1.1. Suların Piper Diyagramına Göre Sınıflandırılması

Piper diyagramında [21] iyon konsantrasyonları, yüzde meq/L cinsinden ifade edilmektedir. Çalışma alanı yüzeY suları, anyon ve katyon içerikleri temel alınarak Piper diyagramında buldukları su fasiyeslerinde belirlenmiştir. Çalışma alanındaki yüzeY sularını temsil eden su örnekleriyle yapılan analiz sonuçları Piper diyagramı üzerinde gösterildiğinde (Şekil 6) hâkim katyonun kalsiyum (Ca^{+2}), hâkim anyonun ise $HCO_3^- + CO_3^{2-}$ olduğu ve su örneklerinin tamamının ($Ca-HCO_3$) su fasiyesinde olduğu tespit edilmiştir. Su kaynaklarındaki Ca^{+2} ve $HCO_3^- + CO_3^{2-}$ kaynağının bölgede konumlanmış farklı yaşlardaki karbonatlı birimler olduğu düşünülmektedir. Özellikle çalışma alanının doğu ve güneydoğusunda konumlanmış neritik kireçtaşları, su fasiyesinin şekillenmesinde etkili olmuştur.



Şekil 6. İncelenen yüzeY sularının Piper diyagramında sınıflandırılması [20]

3.1.2. Suların İçme Suyu Olarak Kullanılabilirliği

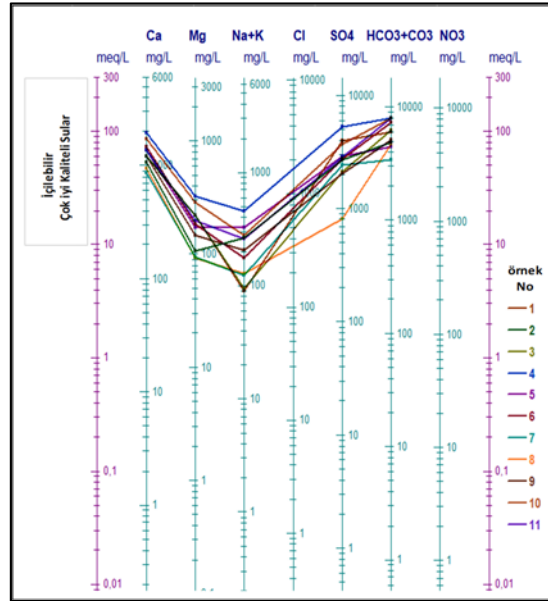
Genel olarak, su kaynaklarının içme suyu olarak kullanılabilirliği için suların berrak, kokusuz, renksiz ve sağlığa zarar verebilecek mikrobiyolojik ve kimyasal kirleticiler içermemesi gerekmektedir. Bunun dışında,

suların insan sağlığı için gerekli olan mineralleri yeterli miktarda barındırması oldukça önemlidir. İçme sularındaki kirleticiler (iz elementler, vb.) kısa ve uzun vadede ciddi sağlık problemlerine yol açabilmektedir. Bu nedenle, içme suyu kriterleri için ulusal ve uluslararası birçok standart hazırlanmıştır. Yapılan bu çalışmada, suların içme suyu olarak kullanılabilirliğini değerlendirmek için İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (İTASHY) [22] ve Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) hazırlamış olduğu [23] limit değerler dikkate alınmıştır. Limit değeri aşan örnek derişimleri, sonuçlar bölümünde detaylandırılmıştır (Çizelge 3 ve 4).

Çalışma alanındaki yüzey sularına ait (2022 yılı) analiz sonuçları bu standartlara göre değerlendirildiğinde, bölge yüzey sularında genel olarak iz element derişim değerlerinin yüksek olduğu ve sağlık açısından risk oluşturabileceği düşünülmektedir. Özellikle civa (Hg), mangan (Mn), nikel (Ni) ve titanyum (Ti) gibi kanserojen etkileri bulunan iz elementlerin insan maruziyeti ve riskleri göz önüne alındığında, analizleri yapılan suların birçoğunun insani tüketim amaçlı kullanıldığında ciddi sorunlar doğuracağı düşünülmektedir (Çizelge 4).

3.1.3. Suların Schoeller Diyagramına Göre İçilebilirlik Özellikleri

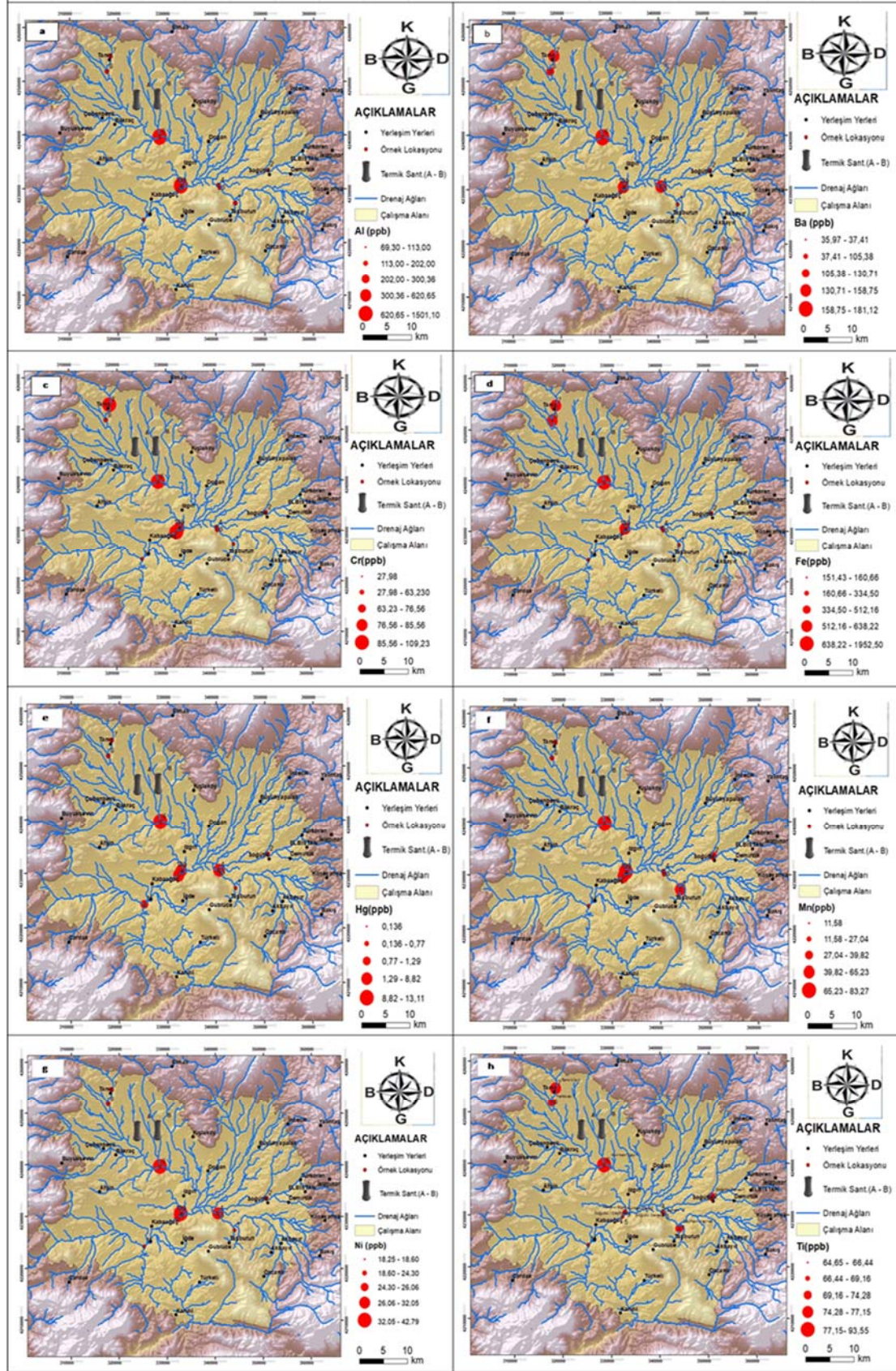
Schoeller diyagramı, suların içilebilirlik özellikleri hakkında sınıflama yapmayı da sağlamaktadır. Diyagramda, sulara ait EI, sertlik, Na^+ , Cl^- ve SO_4^{2-} gibi farklı parametreler kullanılmaktadır. Diyagramda yapılan sınıflamaya göre sular; içilemeyen, zorunlu olmadıkça içilemeyen ve içilebilir sular olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. İçilebilir kalite ve özellikte olan sular ise, kalite özelliklerine göre kötü kaliteli, orta kaliteli, iyi kaliteli ve çok iyi kaliteli sular olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 7). Yapılan bu çalışmada, bölge sularının tamamının, Schoeller İçilebilirlik diyagramına göre “çok iyi kaliteli sular” sınıfında olduğu belirlenmiştir [19].



Şekil 7 Schoeller içilebilirlik diyagramı [19]

3.1.4. Yüzey Sularının İz Element Derişimleri

Elbistan ilçesi Çöllolar termik santrali çevresinde bulunan Ceyhan Nehri, Söğütlü Deresi, Human Çayı, Tanır, Izgın, Karasu dereleri ve bu derelerin birleştiği noktalarından alınan 11 su örneğinde yapılan Al, Ba, Cr, Fe, Mn, Ni, Hg ve Ti analiz sonuçları CBS ortamında haritalanarak Şekil 8'de sunulmuştur. Genel olarak su kaynaklarında iz element derişimlerini etkileyen en önemli fiziksel parametre pH'tır. İz element derişimleri asidik sularda daha yüksek olmaktadır. Bölge yüzey sularında yapılan ölçümlere göre pH değerlerinin 7,5 ile 8,20 arasında değiştiği belirlenmiştir. Bölge yüzey suları, genellikle bazik karakterlidir. İnceleme alanındaki suların iz element derişimleri, bölgedeki termik santral kurulum bölgesine, yerleşim yeri dağılımına, tarım alanlarına, diğer endüstri tesislerine ve bölgenin jeolojisine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Şekil 8, Çizelge 4).



Çizelge 4. İz element derişim değerleri

No	Al	Ba (ppb)	Cr (ppb)	Fe (ppb)	Mn (ppb)	Ni (ppb)	Hg (ppb)	Ti (ppb)
1	140	17,986	27,98	151,43	0,60	18,25	0,136	32,16
2	113	51,325	47,80	310,16	39,81	23,64	0,496	36,32
3	69,3	18,705	54,72	160,66	0,270	18,60	1,185	33,6
4	150	79,373	63,23	328,64	22,43	32,05	7,685	33,6
5	180	52,689	100,41	334,50	65,23	26,06	8,506	33,9
6	1487	90,558	108,98	1952,45	83,27	42,79	13,11	47,63
7	202	74,586	100,32	621,47	19,95	24,30	0,75	38,63
8	172,4	65,353	60,54	579,35	19,63	23,69	0,77	37,9
9	1501,1	76,152	76,56	411,61	11,57	29,30	8,82	32,61
10	620,65	126,884	85,56	638,22	72,37	40,49	8,02	32,38
11	300,36	76,908	109,23	512,16	60,15	30,44	1,29	34,89
*	200	-	50	50	50	20	1	-
⊛	-	-	50	400	50	70	10	-

*ITHASY (2005), ⊛WHO (2008)

Al, Ba, Cr, Fe, Mn, Ni, Hg ve Ti analiz sonuçları ile yapılan derişim dağılım haritaları incelendiğinde, yüksek derişimler genel olarak bölgedeki termik santral çevresinde akış gösteren yüzey sularından alınan örneklerinde (6, 7, 9 ve 10 nolu örnekler) tespit edilmiştir. Yüzey sularında tespit edilen yüksek iz element derişimlerinin, bölgede enerji üretimi yapan termik santral atıkları, enerji kaynağı olarak kullanılan kömürler, kömür içi cevherleşmeler, kömür külü ve gaz emisyonlarının su ile etkileşimine bağılı olarak meydana geldiği düşünülmektedir. Ayrıca, yerleşim yeri yakınından geçen kaynakların antropojenik kökenli olarak kirlendiği, tarım alanları ve çevresindeki derişim yoğunluklarının ise tarımsal verim artırıcı gübreler ve zirai ilaçlamalardan ileri geldiği düşünülmektedir.

4. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışma kapsamında, Kahramanmaraş ilinin Elbistan ilçesinde yer alan 11 farklı yüzey suyu kaynağında pH, elektriksel iletkenlik (EI), toplam çözünmüş madde (TÇM) ve sıcaklık gibi fiziksel parametreler ölçülerek, majör anyon-kasyon ve iz element analizleri ile suların fizikokimyasal özellikleri belirlenmiştir. Yapılan pH sınıflamasına göre, bölge sularının bazik karakterde olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, suların genel olarak alkali özellik gösterdiğini ve pH değerinin 7'nin üzerinde olduğunu göstermektedir. Ayrıca, hidrokimyasal fasiyes tipinin Ca-HCO₃ olduğu belirlenmiştir. Yani bölge suları, kalsiyum iyonları (Ca²⁺) ve bikarbonat iyonları (HCO₃⁻) açısından baskın bir bileşime sahiptir. Bu da, suların kalsiyum ve bikarbonat iyonları bakımından zengin olduğunu ortaya koymaktadır.

Yapılan analizler sonucunda, Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) içme suyu standartlarına göre değerlendirme yapılmıştır. Analizler, bikarbonat iyonunun 4, 10 ve 11 nolu su örneklerinde standart değeri aşarken, 1, 3 ve 6 nolu örneklerde ise ilgili referans değere yakın derişimlere ulaşmıştır. Bu sonuçlar, bazı örneklerde bikarbonat konsantrasyonunun kabul edilebilir sınırların üzerinde olduğunu, ancak diğer örneklerin su kalitesinin referans değerlerine yakın olduğunu göstermektedir.

İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelikte belirtilen sulama suyu sınıflamasına göre, nitratın 7, 8 ve 9 nolu su örneklerinde ilgili standartları aştığı tespit edilmiştir. Bu durum, bu örneklerde nitrat konsantrasyonunun, sulama suyu için kabul edilen maksimum sınırları geçtiğini gösterir. Nitrat seviyelerinin yüksek olması, suyun tarımsal sulama için uygunluğunu etkileyebilir ve toprağa zarar verebilir.

Piper diyagramı kullanılarak yapılan sınıflandırmada, tüm su örneklerinde baskın kationun kalsiyum (Ca²⁺), baskın anyonun ise bikarbonat (HCO₃⁻) olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, bölgedeki yüzey sularının, genellikle "Kalsiyum Bikarbonat tipi" su fasiyesini temsil ettiğini ortaya koymaktadır. Bu tip sular, tarımsal sulama ve içme suyu kullanımı için yaygın olarak karşılaşılan bir su bileşimine sahiptir ve suların pH ve mineral içerik bakımından genellikle daha alkali ve saf olduğu anlamına gelir.

Çalışma alanındaki yüzeysel sularının iz element derişimleri, İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (ITHASY) kapsamında değerlendirildiğinde; alüminyum (Al) derişimleri 6, 7, 9, 10 ve 11 nolu su örneklerinde, krom (Cr) derişimleri 1, 2 ve 3 nolu su örnekleri haricindeki tüm örneklerde, demir (Fe) derişimleri 1 nolu örnek dışındaki tüm örneklerde, mangan (Mn) derişimleri 5, 6 ve 11 nolu örneklerde, nikel (Ni) derişimleri 1 ve 3 nolu örnekler haricindeki tüm örneklerde, civa (Hg) derişimleri ise 3, 4, 5, 6, 9, 10 ve 11 nolu örneklerde sınır değerleri aşmıştır. İz element analiz sonuçları, Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) içme suları için tavsiye ettiği sınır değerlere göre değerlendirildiğinde ise Cr elementi 2 nolu örnek hariç tüm örneklerde, Fe elementi 6, 7, 8, 9, 10 ve 11 nolu örneklerde, Mn elementi 5, 6, 10 ve 11 nolu örneklerde, Hg elementi 4, 5, 6, 9, 10 nolu örneklerde limit değerleri aşmıştır. Nikel derişimlerinin ise 1 ve 3 nolu örnek haricindeki tüm örneklerde sınır değerini aştığı belirlenmiştir.

Bölgedeki iz element derişimlerinde görülen artışların, çeşitli çevresel etmenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. İz element derişimlerinde görülen (Al, Cr, Fe, Mn, Ni ve Hg) artışların; bölgedeki termik santral atıkları, kömür ve kömüre bağlı oluşan atıklar (kül, gaz ve baca partikülleri), bölgede yapılan tarımsal faaliyetlerde kullanılan gübreler, zirai ilaçlar ve kömürle yapılan enerji üretim atıklarından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Çalışma alanının doğu ve güneydoğusunda tespit edilen Al, Cr, Fe, Mn, Ni ve Hg derişimlerinin kökeninin ise yerleşim yerleri içindeki alanlarda, sanayi atıkları, motorlu taşıt ve evsel atıkların, yerleşim yerleri dışındaki alanlarda ise tarımsal atıklarla birlikte litolojik etkileşime bağlı arttığı düşünülmektedir.

Bu sonuçlar, bölgedeki yüzeysel sularının bazı iz elementler açısından aşırı derişimlere sahip olduğunu ve potansiyel olarak suyun içme suyu olarak kullanılabilirliğini etkileyeceğini göstermektedir. Bu tür kirleticilerin uzun vadede sağlık sorunlarına yol açabileceği için, suyun artırılması ve iz elementlerin kontrol edilmesi önemlidir. Analiz yapılan diğer iz elementler (örneğin titanyum (Ti)) içinse WHO ve ITHASY tarafından belirlenen bir sınır değeri bulunmamaktadır.

5. KAYNAKLAR

1. Aghazadeh, N., Moghaddam, A.A., 2011. Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater in the Harzandat aquifer, Northwest of Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 176, 183-195.
2. Famiglietti, J.S., 2014. Groundwater depletion the world over poses a far greater threat to global water security than is currently acknowledged. *Nature Climate Change*, 4, 945-948.
3. Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M.F., Van Beek, L.P., 2012. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488, 197-200.
4. UNICEF Strategic Plan (Annual Results Report), 2017. www.unicef.org/publicpartnerships/66662_66851.html, unicef.org>. Erişim tarihi: 12.12.2020, Ankara.
5. Singh, K.P., Malik, A., Sinha, S., 2005. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti river (India) using multivariate statistical techniques- a case study. *Analytica Chimica Acta*, 538(1-2), 355-374.
6. Wang, Z., Su, Q., Wang, S., Gao, Z., Liu, J., 2021. Spatial distribution and health risk assessment of dissolved heavy metals in groundwater of eastern china coastal zone. *Environmental Pollution*, 290, 118016.
7. Rizwan, U., Riffat, N.M., Quadir, A., 2009. Assessment of groundwater contamination in an industrial city, Sialkot, Pakistan. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 3, 429-446.
8. Chowdhury, S., Jafar Mazunder, M.A., Al-Attas, O., Husain, T., 2016. Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications and future needs in developing countries. *Science of the Total Environment*, 569-570, 476-488.
9. Momodu, M.A., Anyakora, C.A., 2010. Heavy metal contamination of ground water: The Surulere Case study. *Research Journal Environmental and Earth Sciences*, 2, 39-43.
10. Adepoju-Bello, A.A., Ojomolade, O.O., Ayoola, G.A., Coker, H.A.B., 2009. Quantitative analysis of some toxic metals in domestic water obtained from Lagos metropolis. *The Nigeria Journal of Pharmacy*, 42(1), 57-60.
11. Adepoju-Bello, A.A., Alabi, O.M., 2005. Heavy metals: A review. *The Nigeria Journal of Pharmacy*, 37, 41-45.
12. Khoshnam, S.E., William, W., Maryam, F., Yaghoob, F., Hadi, F.M., 2017. Pathogenic mechanisms following ischemic stroke. *Neurological Sciences*, 38(7), 1167-1186.

13. Karmakar, B., Singh, M.K., Choudhary, B.K., Singh, S.K., Egbueri, J.C., Gautam, S.K., Rawat, K.S., 2021. Investigation of the hydrogeochemistry, groundwater quality, and associated health risks in industrialized regions of Tripura, northeast India. *Environmental Forensics*, 24(5-6), 285-306.
14. Maliqi, E., Jusufi, K., Singh, S.K., 2020. Assessment and spatial mapping of groundwater parameters using metal pollution indices, graphical methods, and geoinformatics, with analytical chemistry letters. *Analytical Chemistry Letters*, 10(2),152-180.
15. MTA Genel Müdürlüğü, 2009. Malatya-Elbistan dolayımın tektono-stratigrafik özellikleri. Rapor no, 11150, Ankara
16. Özgül, N., 1976. Toroslar'ın bazı temel jeoloji özellikleri. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 19, 65-78.
17. MTA Genel Müdürlüğü, 2002. 1:100.000 ölçekli, L37 ve L38 paftası jeoloji haritası. Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
18. Şahinci, A., 1991. Doğal suların jeokimyası (1. Baskı). Türkiye, Reform Matbaası, İzmir.
19. Schoeller, H., 1955. *Geochemie des eaux souterraines*. Revue De L'institute Francois Du Petrole, 10, 230-44
20. Hem, J.D., 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water U.S. U.S Geological Survey Water-Supply Paper, 2254.
21. Piper, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions of American Geophysical Union*, 25, 914-923.
22. İTHASY, 2005. İnsani tüketim amaçlı sular hakkında yönetmelik. Resmî Gazete, 17.02.2005 No. 25730, Ankara.
23. World Health Organization (WHO), 2022. Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>. Erişim tarihi: 30.10.2022, Adana.



Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Şarj Uygulamaları için Genetik Algoritma ile Geliştirilmiş Bir Rezonans Dönüştürücü Tasarımı

Birand ERDOĞAN^{1,a}, Adnan TAN^{2,b}, Mehmet TÜMAY^{2,c}

¹Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Bilgisayar ve Bilişim Fakültesi, Yapay Zeka Mühendisliği Bölümü, Adana

²Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Adana

^aORCID: 0000-0003-0784-7776; ^bORCID: 0000-0002-5227-2556; ^cORCID: 0000-0002-6055-3761

Makale Bilgileri

Geliş : 18.04.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606465

Sorumlu Yazar

Birand ERDOĞAN

berdogan@atu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Batarya şarj cihazları

LLC rezonans dönüştürücüler

Optimizasyon

Yüksek verimlilik

Genetik algoritma

Atf şekli: ERDOĞAN, B., TAN, A., TÜMAY, M., (2024). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Şarj Uygulamaları için Genetik Algoritma ile Geliştirilmiş Bir Rezonans Dönüştürücü Tasarımı. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1129-1142.

ÖZ

Bu makale, genetik algoritma kullanarak LLC rezonans dönüştürücülerin optimizasyonu üzerine kapsamlı bir çalışmayı sunmaktadır. L_r , L_m ve C_r rezonans parametrelerinin hassas bir şekilde ayarlanması yüksek güç dönüşüm verimliliği elde etmek için hayati önem taşırken, LLC rezonans dönüştürücülerin etkinliği de büyük ölçüde bu sürece bağlıdır. Dönüştürücünün karmaşık ve doğrusal olmayan işleyişi nedeniyle, geleneksel tasarım teknikleri bu parametreleri optimize etmekte sıklıkla başarısız olur. Bu çalışmada bu zorluğun üstesinden gelmek için, dönüştürücünün etkinliğini en üst düzeye çıkaran ideal çözümlerin arayışında parametre uzayını akıllıca araştıran genetik algoritmalar temelli bir optimizasyon stratejisi uygulanmıştır. Süreç, optimizasyon sorununun formülasyonunu, genetik algoritmanın uygulanmasını ve benzetim sonuçlarının incelenmesini içermektedir. Benzetim sonuçları göstermiştir ki toplamda bu adımlar, optimize edilmiş tasarımların geleneksel seçeneklerden daha üstün olduğunu göstermektedir. Benzetim sonuçlarına göre, sistem verimliliği %96,1 olarak elde edilmiştir. Sonuçlar, genetik algoritmaların LLC rezonans dönüştürücü performansını büyük ölçüde iyileştirebileceğini ve güç elektroniği tasarımcıları için güçlü araçlar sağladığını göstermektedir. Bu araştırmanın, güvenilir ve etkili güç dönüşümü gerektiren çeşitli endüstri uygulamalarında kullanım bulabilecek daha dayanıklı ve verimli güç sistemlerinin oluşturulması için etkileri vardır.

Genetic Algorithm Enhanced Resonant Converter Design for Battery Charging Applications in Electric Vehicles

Article Info

Received : 18.04.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606465

Corresponding Author

Birand ERDOĞAN

berdogan@atu.edu.tr

Keywords

Battery chargers

LLC resonance converters

Optimization

High efficiency

Genetic algorithm

How to cite: ERDOĞAN, B., TAN, A., TÜMAY, M., (2024). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Şarj Uygulamaları için Genetik Algoritma ile Geliştirilmiş Bir Rezonans Dönüştürücü Tasarımı. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1129-1142.

ABSTRACT

This paper presents a comprehensive study on the optimization of LLC resonant converters using genetic algorithm. Precise adjustment of L_r , L_m , and C_r resonant parameters is crucial for achieving high power conversion efficiency, while the effectiveness of LLC resonant converters is greatly dependent on this process. Due to the complex and nonlinear operation of the converter, traditional design techniques often fail to optimize these parameters. To overcome this challenge, an optimization strategy based on genetic algorithms, which intelligently explores the parameter space in search of ideal solutions maximizing the converter's efficiency, has been applied. The process involves formulating the optimization problem, implementing the genetic algorithm, and examining the simulation results. Overall, these steps demonstrate that optimized designs outperform traditional options. According to the simulation results, the system efficiency was achieved as 96.1%. The results indicate that genetic algorithms can significantly enhance the performance of LLC resonant converters and provide powerful tools for power electronics designers. The implications of this research extend to the creation of more durable and efficient power systems that can find applications in various industries requiring reliable and effective power conversion.

1. GİRİŞ

Elektrikli araçlar (EA), içten yanmalı motorlu araçlar tarafından oluşturulan sera gazlarının etkilerine alternatif bir çözüm sunmaktadır. Düşük yakıt maliyeti, yüksek performans ve sessiz çalışma gibi özellikleri ile EA'lara olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Bunun yanı sıra, elektrikli araçlar daha düşük işletme maliyetleri, daha az bakım gereksinimi gibi avantajlar da sunmaktadır. Bu avantajlar, elektrikli araçların hem çevresel hem de ekonomik açıdan üstünlüğünü daha da pekiştirmektedir [1-3]. Yüksek enerji yoğunluğu, uzun döngü ömrü ve yüksek gerilim avantajlarından dolayı, elektrikli araçlarda depolama teknolojisi olarak lityum iyon bataryalar kullanılmaktadır [4-7]. Literatürde lityum iyon batarya performansından daha fazla yararlanabilmek adına batarya şarj cihazı uygulamaları üzerine çeşitli çalışmalar yapılmış ve batarya şarj cihazları, EA'ların talebi karşılama konusunda önemli bir rol oynamaktadır [8-11]. Batarya şarj cihazları AA-DA ve DA-DA aşamalarından oluşmaktadır [12-14]. İlk aşama güç faktörü düzeltme için kullanılırken, ikinci aşama şarj gerilimini kontrol etmek için kullanılmakta ve bu aşama için yüksek verimlilik ve yüksek güç yoğunluğuna sahip LLC rezonans dönüştürücüler güncel uygulamalarda tercih edilmektedir [15-17]. LLC devresi, yumuşak anahtarlama teknolojisine sahiptir ve bu özellik, birincil tarafta sıfır gerilim anahtarlama (SGA) ve ikincil tarafta sıfır akım anahtarlama (SAA) tekniklerinin uygulanmasıyla yüksek verimlilik sağlamaktadır [18-20]. Ayrıca, ayarlanabilir gerilim kazancı ile geniş çıkış gerilim aralığı sağlanabilir. Yukarıda tanımlanan özellikler, lityum iyon batarya şarj için uygundur [21-23]. Batarya şarj uygulamalarında (BŞU) verimliliği artırmak için modifiye edilmiş topolojiler ve kontrol stratejisi uygulayan farklı makaleler bulunsun da rezonans tankın tasarım optimizasyonu üzerine çok fazla araştırma bulunmamaktadır [24-27]. Yıllar içinde, LLC rezonans dönüştürücüler birçok uygulamada kullanılmıştır. Bazı araştırmalarda, ikincil taraftaki kayıplar azaltmak için senkron düzelticiler kullanılmış [28-30] ve bazı yayınlarda dijital olarak kontrol edilen LLC dönüştürücüler üzerine araştırmalar yapılmıştır [31-33]. Ancak, pek çok uygulama sabit bir çıkış gerilimi için tasarlanmıştır ve bu uygulamalar batarya şarj cihazları için uygun değildir çünkü batarya şarj-deşarj işlemi için geniş bir çıkış gerilim aralığı gereklidir. Bir dönüştürücü tasarlarken, verimlilik bazlı optimizasyon yöntemleri de göz önünde bulundurulmalıdır. [34] ve [35]'te kullanılan optimizasyon yöntemleri, temel harmonik yaklaşımı yerine kesin analizi tercih ettiklerinden BŞU için uygun değildir. Geniş çıkış aralığı için optimizasyon yöntemleri [36] ve [37]'de sunulmuştur. Ancak, rezonans tankın tasarım optimizasyonu tek bir verimlilik noktasına dayandığından, LLC dönüştürücüsünü tasarlamak için daha iyi bir yol olacaktır. Ek olarak, BŞU için yüksek verimlilikte bir LLC dönüştürücü tasarlandığında, sabit akım (SA)/sabit gerilim (SG) şarj algoritmaları dikkate alınmalıdır çünkü batarya şarj ünitelerinde (BŞU) çıkış gerilimi değişkenlik gösterir; bu nedenle, çıkış gerilim aralığının maksimum ve minimum değerlerle sınırlanması gerekmektedir. LLC dönüştürücü için zaman ağırlıklı ortalama verimlilik (ZAOV) [38]'de tasarlanmış ve [38], BŞU için ideal bir çözüm sağlamaktadır. Özetle, bu çalışmada LLC dönüştürücülerinin BŞU'larda farklı şarj durumlarına (SOC) göre değişen gerilim ve dönüşüm verimliliği koşullarında, yeni tanımlanan ZAOV endeksi ile yüksek verimlilik elde etmek için dönüştürücü parametreleri nasıl optimize edilebilir sorusuna cevap aranmaktadır.

Geleneksel sabit güçlü uygulamalarıyla karşılaştırıldığında, batarya gerilimi ve akımı şarj profillerine bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değişir. Bu durum, pil şarj cihazının optimal tasarımını daha zor ve karmaşık hale getirir. Bu makalede, sistem verimliliği için tepe gerilim kazancını, geniş çıkış aralığı ile kapalı döngü frekans kontrolünü ve ZAOV'yi dikkate alarak BŞU için geliştirilmiş bir LLC dönüştürücü tasarlanmış olup bu tasarım üzerinde iyileştirmeler yapılmıştır. Bu çalışma beş bölüme ayrılmıştır. İlk bölümde, LLC dönüştürücüler üzerine literatür çalışmaları bahsedilmiştir. İkinci bölümde, dönüştürücünün topolojisi ve işletim modları açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, kayıp analizi, tasarım optimizasyonu ve kontrol şeması verilmiştir. Dördüncü bölümde, uygulanan kontrol algoritması için benzetim sonuçları sunulmuştur. Son bölüm, makalenin sonuç yorumlarını sunmaktadır.

2. LLC REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜ

Bu çalışmada yüksek güç değerleri nedeniyle, tam köprü rezonans LLC dönüştürücü topolojisi BŞU için seçilmiştir. Şekil 1'de genel topoloji gösterilmiş olup V_m sistem giriş gerilimidir. T_1 - T_4 , birincil MOSFET'lerdir ve T_1 , T_4 & T_2 , T_3 ile ilişkilendirilmiştir. Her grup %50 doluluk oranı ile etkinleştirilir. L_r , C_r ve L_m rezonans tankı elemanlarıdır (sırasıyla rezonans indüktörü, rezonans kapasitörü ve mıknatıslama indüktörü). Transformatörün dönüştürme oranı n olarak belirtilmiştir. D_1 - D_4 çıkış doğrultucu diyotlarıdır. C_o ve R_o sırasıyla çıkış kapasitörü ve çıkış yük direncidir. Bu makalede, dönüştürücünün analizi için birinci

harmonik yaklaşımı yöntemi kullanılmış ve rezonans tankının kazanç transfer fonksiyonu sistemin AA eşdeğer devresinden elde edilmiştir. AA eşdeğer devre Şekil 2'de verilmiştir [39]. R_{ac} , yansıtılmış yük direncinin eşdeğeri olup Eşitlik 1'de verilmiştir [21,40].

Normalize edilmiş anahtarlama frekansı, rezonans frekans, ikinci rezonans frekans ve anahtarlama frekansı sırasıyla f_n , f_r , f_{r2} ve f_s olarak belirtilmiştir. Rezonans tank kazancı K olarak ifade edilir. Manyetize edici indüktör ile rezonans indüktörün oranı h olarak belirtilir. Q , yük akımına bağlı olan kalite faktörüdür. Rezonans tank kazancının transfer fonksiyonu ve gerekli parametre tanımları aşağıda verilmiştir [39].

Ayrıca, f_{r2} ve normalize edilmiş giriş empedansı sırasıyla yüksüz çalışma ve yumuşak anahtarlama alanı için belirlenmelidir. Bu parametreler aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$R_{ac} = \frac{8n^2 R_o}{\pi^2} \quad (1)$$

$$K(Q, h, f_n) = \frac{v_o}{v_{in}} = \frac{1}{\sqrt{[1 + \frac{1}{h}(1 - \frac{1}{f_n^2})]^2 + [Q(\frac{f_n}{f_n^2} - 1)]^2}} \quad (2)$$

$$\text{Gerilim Dönüşüm Oranı: } K = \frac{nV_o}{v_{in}} \quad (3)$$

$$\text{Rezonans Frekansı: } f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_r L_r}} \quad (4)$$

$$\text{Endüktans Oranı: } h = \frac{l_m}{L_r} \quad (5)$$

$$\text{Karakteristik Empedans: } Z_o = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (6)$$

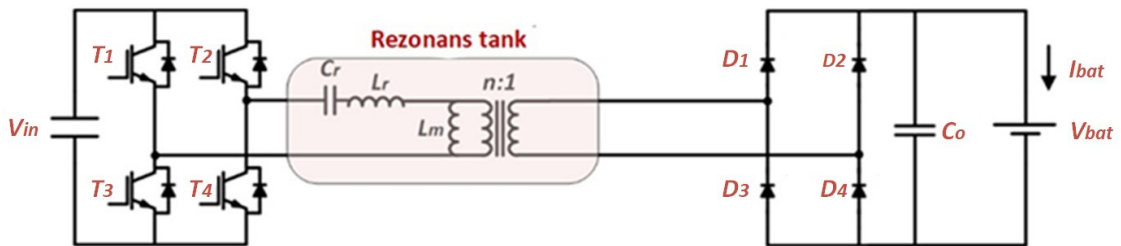
$$\text{Kalite Faktörü: } Q = \frac{Z_o}{R_{ac}} \quad (7)$$

$$\text{Ters Endüktans Oranı: } l = \frac{l_r}{L_m} \quad (8)$$

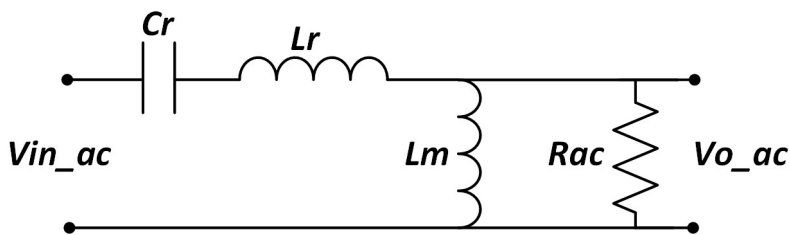
$$\text{Normalize Edilmiş Frekans: } f_n = \frac{f_s}{f_r} \quad (9)$$

$$Z_n(f_n, l, Q) = \frac{Z_{in}(f_n, l, Q)}{Z_o} j \left(\frac{f_n l}{l^2 + f_n^2 Q^2} - \frac{1 - f_n^2}{f_n^2} \right) + \frac{f_n Q}{l^2 + f_n^2 Q^2} \quad (10)$$

$$f_{r2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_r(L_r + l_m)}} = f_r \sqrt{\frac{l}{1 + l}} \quad (11)$$

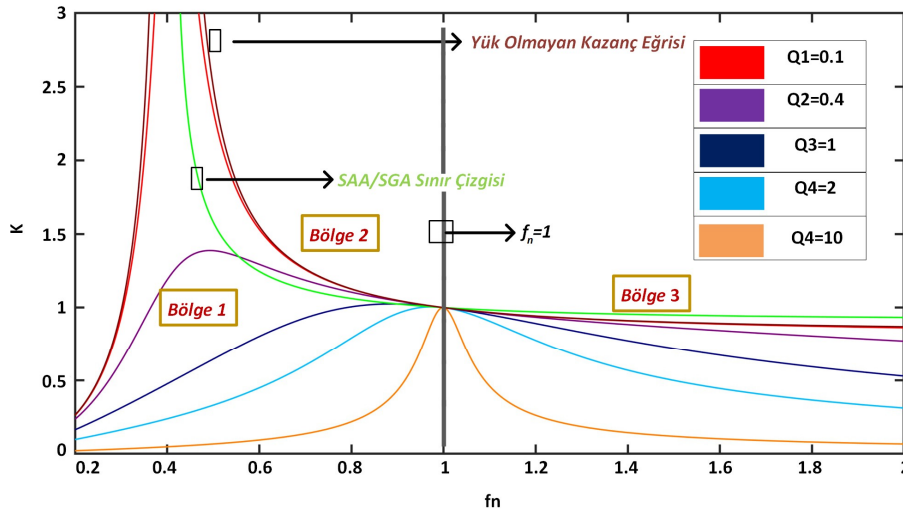


Şekil 1. LLC Dönüştürücü topolojisi



Şekil 2. Eşdeğer rezonans devresi

Farklı yük koşullarında K 'nın f_n üzerindeki değişimi $h=6$ iken Şekil 3'te gösterilmiştir. f_s 'nin f_r 'ye eşit olduğunda tüm eğrilerin birim kazançla sahip olduğu görülmektedir. Şekildeki bir diğer önemli nokta, f_n seçildiğinde, kalite faktörü azaldığında rezonans tankın tepe kazancının arttığıdır. Anahtarlama kayıplarını azaltmak için yumuşak anahtarlama tercih edilmektedir. Bu yüzden birincil anahtarlar için SGA ve ikincil doğrultucular için SAA işletiminin belirlenmesi gereklidir. Bu nedenle, rezonans tank parametrelerini seçerken, SGA (birincil taraf için) ve SAA (ikincil taraf için) koşullarında çalışmak için frekans aralığı, V_{in}/V_o ilişkisi, Kalite faktörü ve h oranı gibi parametreleri belirlemek önemlidir. Şekilden de görüldüğü üzere, üç çalışma alanı bulunmaktadır. Bölge 1, sınır çizgisinin sol tarafını temsil eder ve birincil anahtarlarında SAA gerçekleşir. Bölge 2, normalize edilmiş frekans çizgisi ile sınır çizgisi arasındaki alanı temsil eder. Bu bölgede, birincil anahtarlar için SGA ve doğrultucu diyotu için SAA gerçekleşir. Bölge 3, normalize edilmiş frekans çizgisinin sağ tarafını temsil eder ve birincil anahtarlarında SGA gerçekleşir. Bu nedenle, tasarlanan sistem yüksek verimlilik için bölge 2 ve bölge 3'te işletilmelidir.



Şekil 3. DA-DA dönüştürücünün gerilim kazanç eğrisi

Şekil 1'de verilmiş olan LLC rezonans dönüştürücü çalışma prensibi P, N ve 0 olmak üzere üç aşamada incelenebilir.

Aşama P: Bu aşamada T_1 , T_4 , D_1 ve D_4 iletim durumdadır. Manyetize edici endüktans, nV_o tarafından sınırlanır; burada V_o çıkış gerilimi ve n transformatörün dönüşüm oranıdır. Bu aşamadaki diferansiyel ifadeler Eşitlik 12-14'te sunulmuştur [15].

$$V_{in} - nV_{out} = V_c + L_r \frac{di_{rP}}{dt} \quad (12)$$

$$i_{rP} = C_r \frac{dv_{cP}}{dt} \quad (13)$$

$$L_m \frac{di_{mP}}{dt} = nV_{out} \quad (14)$$

$$\theta = 2\pi f_r t \quad (15)$$

Eşitlik 12-14'ün çözülmesi sonucunda elde edilen rezonans tank parametrelerinin gereken gerilim ve akım değerleri Eşitlik 16-18'de sunulmuştur [15].

$$V_{cPn}(\theta) = \left[V_{cPn}(0) + 1 - \frac{1}{K} \right] \cos(\theta) + i_{rPn}(0) \sin(\theta) - 1 + \frac{1}{K} \quad (16)$$

$$i_{rPn}(\theta) = \left[-V_{cPn}(0) - 1 + \frac{1}{K} \right] \sin(\theta) + i_{rPn}(0) \cos(\theta) \quad (17)$$

$$i_{mPn}(\theta) = \left[I_{mPn} + \frac{\theta}{h} \right] \quad (18)$$

Aşama N: Birincil tarafta, T_1 ve T_4 'ün ters-paralel diyotları iletimdedir. kincil tarafta D_2 ve D_3 iletimdedir. L_m , $-nV_o$ tarafından sınırlanır. Rezonans tank parametrelerinin gerilim ve akım değerlerine ilişkin diferansiyel denklemler bu aşamada aynı olup Eşitlik 19-21'de sunulmuştur [15].

$$V_{cNn}(\theta) = \left[V_{cNn}(0) - 1 - \frac{1}{K} \right] \cos(\theta) + i_{rNn}(0) \sin(\theta) + 1 + \frac{1}{K} \quad (19)$$

$$i_{rNn}(\theta) = \left[-V_{cNn}(0) + 1 + \frac{1}{K} \right] \sin(\theta) + i_{rNn}(0) \cos(\theta) \quad (20)$$

$$i_{mNn}(\theta) = \left[I_{mNn} - \frac{\theta}{h} \right] \quad (21)$$

Aşama 0: Bu aşamada, T_3 ve T_4 iletim durumdadır. İkincil taraftaki tüm anahtarlar kapalıdır. V_{in} 'den aktarılan enerji rezonans tankta depolanır. Rezonans tank parametrelerinin gerilim ve akım değerlerine ilişkin diferansiyel ifadeler Eşitlik 22-24'de verilmiştir [15].

$$i_{rOn}(\theta) = i_{mOn}(\theta) = \left(V_{cOn}(0) + \frac{1}{K} \right) \sin\left(\frac{\theta}{\sqrt{h+1}}\right) + i_{rOn}(0) \cos\left(\frac{\theta}{\sqrt{h+1}}\right) \quad (22)$$

$$V_{cOn}(\theta) = \left(V_{cOn}(0) - \frac{1}{K} \right) \cos\left(\frac{\theta}{\sqrt{h+1}}\right) + \frac{i_{cOn}(0)}{\sqrt{h+1}} \sin\left(\frac{\theta}{\sqrt{h+1}}\right) + \frac{1}{K} \quad (23)$$

$$V_{mOn}(\theta) = -\frac{h(V_{cOn}(\theta) - \frac{1}{K})}{h+1} \quad (24)$$

Son olarak $f_s = f_r$ olduğunda, dönüştürücü P modunda çalışır ve güç kaybı hesaplaması için gerekli akım denklemleri aşağıda gösterilmiştir [41].

$$I_{r,p} = -\frac{\sqrt{4\pi^2 P_O^2 L_m^2 f_{r1}^2 + V_{in}^4}}{4V_{in} L_m f_r} \quad (25)$$

$$I_{r,rms} = \frac{\sqrt{4\pi^2 P_O^2 L_m^2 f_{r1}^2 + V_{in}^4}}{4\sqrt{2} V_{in} L_m f_{r1}} \quad (26)$$

$$I_{s,rms} = \frac{V_{in} \sqrt{5\pi^2 N^4 R^2 - 48N^4 R^2 + 12\pi^4 L_m^2 f_r^2}}{4\sqrt{6} L_m f_r R^2 N} \quad (27)$$

R yük eşdeğer direncini, $I_{r,p}$ tepe rezonans akımını, $I_{r,rms}$ primer rms akımını ve $I_{s,rms}$ sekonder rms akımını temsil etmektedir. Dönüştürücünün yük koşullarına, gerilim kazancına ve sistemin frekansına bağlı olarak farklı işletim modları bulunmaktadır. İşletim modları (P, PO, PON, PN, NP), yukarıda tanımlanan üç aşamaya dayanmaktadır.

P modu: f_s, f_r 'ye eşit olduğunda, rezonans LLC dönüştürücü P modunda çalışır. Rezonans akım ir olarak belirtilmiş ve sinüsoidal bir dalga formuna sahiptir. Birincil anahtarlar SGA'da çalışırken, ikincil anahtarlar SAA'da çalışmaktadır [36].

PO modu: Anahtarlama frekansı rezonans frekansının altında ve hafif yük altında, dönüştürücü PO modunda çalışabilir. Rezonans dönüştürücü, zaman $0 < t \leq t_1$ aralığında iken P aşamasında çalışır. Benzer şekilde, rezonans dönüştürücü, zaman $t_1 \leq t \leq T_s/2$ aralığında iken O aşamasında çalışır. Bu modda dönüştürücü yumuşak anahtarlama yeteneğine sahiptir [36].

PON modu: Anahtarlama frekansı rezonans frekansının altında ve yük önceki moddan daha fazla olduğunda, rezonans dönüştürücü PON modunda çalışır. Rezonans dönüştürücü, zaman $0 < t \leq t_1$ ve $t_1 \leq t \leq t_2$ aralığında sırasıyla P ve O aşamasında çalışır. Benzer şekilde, rezonans dönüştürücü, zaman $t_2 \leq t \leq T_s/2$ aralığında N aşamasında çalışır. Bu modun dezavantajı, yumuşak anahtarlama yeteneğinin kaybolmasıdır [36].

PN modu: Anahtarlama frekansı rezonans frekansının altında ve yük PON modundan daha ağır olduğunda, rezonans dönüştürücü PN modunda çalışır. Rezonans dönüştürücü, zaman $0 < t \leq t_1$ aralığında iken P aşamasında çalışır. Benzer şekilde, rezonans dönüştürücü, zaman $t_1 \leq t \leq T_s/2$ aralığında iken N aşamasında çalışır. Bu modda da yumuşak anahtarlama özelliği kaybolur [36].

NP modu: Anahtarlama frekansı rezonans frekansının üstünde ve ağır yük koşulu olduğunda, rezonans dönüştürücü NP modunda çalışır. Rezonans dönüştürücü, zaman $0 < t \leq t_1$ aralığında N aşamasında çalışır. Benzer şekilde, rezonans dönüştürücü, zaman $t_1 \leq t \leq T_s/2$ aralığında P aşamasında çalışır. Bu modda dönüştürücü yumuşak anahtarlama yeteneğine sahiptir. Yukarıda bahsedilen işletim modlarını göz önünde bulundurarak, verimli bir rezonans transformatorü tasarlarlarken yumuşak anahtarlama koşulunu kaybetmemek gerekmektedir [36].

3. TASARIM SÜRECİ

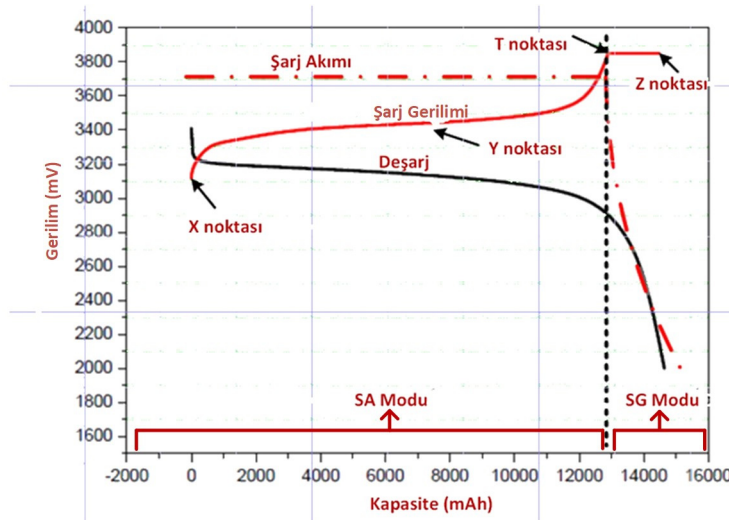
3.1. En Düşük ve En Yüksek Gerilim Kazancı Hesaplama

Dönüştürücüye en kötü durum koşulunda bile istenilen çıkış gerilimini verebilmek için, sistemdeki en düşük ve en yüksek kazançların belirlenmesi gerekmektedir. Verilen nominal V_o ve V_{in} değerlerine göre n seçilir. Çıkışın her zaman kontrol altında olduğundan emin olmak için minimum da gerilim kazancı M_{min} hesaplanmaktadır. Daha sonra verilen bir V_{in} ve V_o aralığı için rezonans tank parametreleri belirlenir ve en kötü durum koşulu (maksimum çıkış gerilimi-minimum giriş gerilimi oranı) için tepe kazanç hesaplanır. Minimum ve Maksimum gerilim kazançlarının gerçekleştiği f_s/f_r oranlarının belirlenmesi, önerilen tasarım sürecinde önemli bir aşamadır. Çünkü bu oranlar rezonans frekansının içinde değilse optimizasyon prosedürü en başa dönmektedir.

3.2. Zaman Ağırlıklı Ortalama Verimlilik

Yük direnci şarj süresiyle değiştiği için, şarj eğrisinde tek bir nokta seçmek söz konusu olduğunda, BŞU'da verimlilik optimizasyonu iyi bir yöntem değildir. Bu nedenle, Li-Ion batarya hücresi için ZAOV denklemi belirlenmiş ve önerilen optimizasyonun amacı bu denklemi maksimize etmektir. Wanxiang Electric Vehicle tarafından sağlanan Batarya Hücresi Şarj Eğrisi Şekil 4'te gösterilmektedir [38]. SA-SG şarj eğrileri kırmızı çizgilerle gösterilmiştir. Dört nokta seçilmiş ve batarya gerilimi, akımı ve kapasitesinin aralığı Tablo 1'de verilmiştir. ZAOV denklemi Tablo 1'den elde edilmiştir (ZAOV'nin hesaplanması hakkında daha fazla detay için referans 38'e bakılabilir). E_x, E_y, E_t, E_z sırasıyla X, Y, T ve Z noktasının ZAOV denklem katsayılarıdır (bkz. Eşitlik 24). BŞU'larındaki gerilim ve akımın değişkenliği nedeniyle, optimizasyon için ZAOV denklemi tercih edilir.

$$ZAOV = 0.033E_x + 0.767E_y + 0.126E_t + 0.074E_z \quad (28)$$



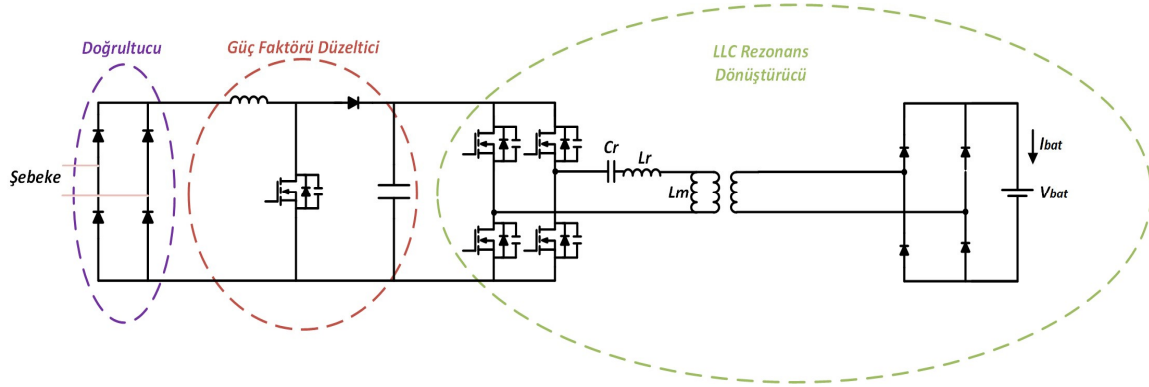
Şekil. 4. Bataryanın şarj profili

Çizelge 1. Zaov'un hücre özellikleri

Örneklemeler	Aralık	Akım (A)	Gerilim (V)	Kapasite (Ah)	Ağırlık katsayısı
X	3.1 V ~ 3.3V 15A	15	3.1	1	0.033
Y	3.3 V ~ 3.5V 15A	15	3.4	10	0.767
T	3.5 V ~ 3.85V 15A	15	3.85	2	0.126
Z	3.85 V 0.45~15A	3	3.85	2	0.074
TOPLAM	-	-	-	15	1

3.3. Güç Kaybı Analizi

Elektrikli araçlarda kullanılan batarya şarj cihazının genel şeması Şekil 5'te gösterilmektedir [41]. Şekilden de görüldüğü üzere, ilk aşamada güç faktörü düzeltilmiş AA-DA dönüştürücü kullanılmaktadır. İlk aşama, AA gerilimini DA gerilime dönüştürmek ve güç faktörünü düzeltmek için kullanılır. Bu nedenle, bu aşamada herhangi bir optimizasyon prosedürüne ihtiyaç yoktur. Dört adet MOSFET, rezonans dönüştürücünün birincil tarafı için bağlanmıştır. Rezonans tank için kare dalga giriş gerilimi sağlanmaktadır. MOSFET'ler %50 görev döngüsünde kontrol edilir (ölü zaman ihmal edilir). İkincil taraf için diyot doğrultucusu kullanılmaktadır. Tam köprü rezonans dönüştürücünün optimizasyonunu tasarlarken, güç kayıplarının genellikle 4 parçadan kaynaklandığı önemlidir. Bunlar, birincil taraf iletken kayıpları anahtar kayıpları, ikincil taraf iletken kayıpları ve transformatör kayıplarıdır. [36].



Şekil 5. Şarj cihazının genel şeması

3.4. Mod Çözücü

Mod çözücü, rezonans dönüştürücünün farklı durumlarda işletim modunu belirlemek için kullanılır. Rezonans dönüştürücünün verimliliğini optimize etmek için, mod çözücüye ihtiyaç vardır. Bunun nedeni ise lityum iyonu şarj eğrisinin dört noktasında farklı işletim modlarının bulunmasıdır. Mod çözücü, rezonans dönüştürücünün işletim modlarını, yük koşullarına, gerilim kazancına ve sistemin frekansına dayanarak hesaplamak için f_s , V_{in} ve V_o gibi giriş değişkenlerini alır [34]. Mod çözücünün yardımıyla, akım ve gerilim dalga formları belirlenir. Daha sonra, bu dalga formları ile güç kaybı analizi yapılır.

$$P_{p,con} = I_{r,rms}^2 (r_{Lr} + r_{t,p} + 2r_{ds,on}) \quad (29)$$

$$P_{s,loss} = 4f_s I_{turnoff} V_{in} t_{fall} \quad (30)$$

$$P_{s,con} = I_{r,rms}^2 r_{t,s} + I_{s,rms} V_F \quad (31)$$

$$P_{Fe} = f_s^\alpha V_{core} k_{core} B_{max}^\beta \quad (32)$$

P_{p_con} birincil taraf iletken kaybını temsil eder. Benzer şekilde, P_{s_con} ikincil taraf iletken kaybını temsil eder. $I_{turnoff}$ MOSFET'lerin kapanma akımını, V_F ikincil taraftaki doğrultucu diyotların gerilim düşüşünü, t_{fall} ise MOSFET'in kapanma süresini temsil etmektedir. Benzer şekilde r_{Lr} ve $r_{ds,on}$ ise sırasıyla rezonans indüktörünün sargılarının eşdeğer seri dirençlerini ve MOSFET direncini temsil etmektedir. V_{core} çekirdeğin hacmidir. K_{core} , α ve β manyetik çekirdeklerin boyutlarıyla ilgili üç parametredir. Bu parametreler üreticilerin veri sayfalarından elde edilebilmektedir. Anahtar kaybı P_{s_loss} olarak temsil edilir ve manyetik kayıp P_{t_mag} olarak temsil edilir. Ancak Matlab/Simulink genel bir güç kaybı analizi için kullanılır. Makalede deneysel bir prosedür olmadığından manyetik kayıp analizi dikkate alınmamış ve optimize edilmemiştir.

3.5. Genetik Algoritma

Genetik algoritmalar (GA'lar), zorlu optimizasyon sorunlarını çözmek için doğal seçimi taklit eden bir algoritma türüdür. GA'lar, bir optimizasyon problemine uygun çözüm popülasyonu oluşturarak ve bu popülasyonu nesiller boyunca adım adım geliştirerek çalışır. Bu süreç, genetik ve doğal seçim kavramlarına dayanmaktadır. Her bir çözüm genellikle bir kromozom olarak adlandırılır, verilen sorun için ne kadar uygun olduğunu belirleyen bir uygunluk fonksiyonuna göre değerlendirilir. Çaprazlama ve mutasyon süreçleri aracılığıyla popülasyona çeşitlilik ve yeni özellikler getirilerek, en umut verici çözümler daha sonra üreme için seçilir. Algoritma, ideal veya tatmin edici bir sonuç bulana kadar bu seçim ve üreme döngüsünü sürdürür. Genetik algoritmalar (GA'lar), olasılığa dayalı geçişler kullanarak geniş bir çözüm alanını keşfedebildikleri için, geleneksel optimizasyon tekniklerinin ele alması zor olan çok boyutlu, karmaşık ve doğrusal olmayan arama alanlarında son derece sağlam ve kullanışlıdır.

Optimum Tasarım

Bu makalenin amacı, belirli bir uygulama için yüksek verimlilik sağlayacak bir rezonans dönüştürücü tasarlamak ve bu amaçla dört noktadaki verimlilik değerlerine ilişkin ZAOV denklemini optimize etmektir. Optimizasyon parametreleri L_r , C_r ve L_m 'dir. Rezonans dönüştürücü davranışları, bu üç rezonans tank parametresi tarafından belirlenir. Optimizasyon prosedürü tek bir amaç fonksiyonuna ve fiziksel kısıtlamalarla sınırlı çoklu değışkene sahiptir. L_r , C_r ve L_m gibi rezonans tank parametreleri, BŞU'lara dayalı olarak dönüştürücü maliyeti ve ağırlığı ile sınırlıdır. Yüksek verimlilik için küçük L_r , büyük L_m ve C_r gibi tank parametreleri seçilmelidir. Ancak, bu parametreler genellikle deneysel prosedürde f_s , M ve maksimum kapasitör gerilimi ile sınırlıdır. Bu makalede deneysel bir sonuç bulunmamakla birlikte, bu kısıtlamaları dikkate alarak uygulanabilir olması için bir optimizasyon çalışması yapılmıştır ve benzetim sonuçları deneysel çalışmanın uygulanabileceğini doğrulamaktadır. Yüksek F_s , güç yoğunluğunu artırabilirken sistem verimliliğini azaltabilir. Makalede sistem için F_r , yumuşak anahtarlama elde etmek için minimum ve maksimum frekans arasında ayarlanmıştır. Ayrıca, sistem, belirli bir giriş gerilimi aralığı için gereksinim duyulan çıkış gerilimi aralığını sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır; zira çıkış gerilimi uygulamalarda değışkenlik göstermekte ve bu nedenle çıkış gerilim aralığı, maksimum ve minimum değerlerle sınırlanmalıdır. Maksimum ve minimum çıkış gerilimleri sırasıyla V_{o_max} ve V_{o_min} olarak belirtilir. Sistemin üst kazancı tam yük altında V_{o_max} ile sınırlıdır. Benzer şekilde, sistemin alt kazancı V_{o_min} ile sınırlıdır. Amaç fonksiyonu ve tüm kısıtlamalar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Amaç:

$$\max(0.033Ex+0.767Ey+0.126Et+0.074Ez) \quad (33)$$

Sınırlamalar:

$$L_{r_min} < L_r < L_{r_max} \quad (34)$$

$$C_{r_min} < C_r < C_{r_max} \quad (35)$$

$$L_{m_min} < L_m < L_{m_max} \quad (36)$$

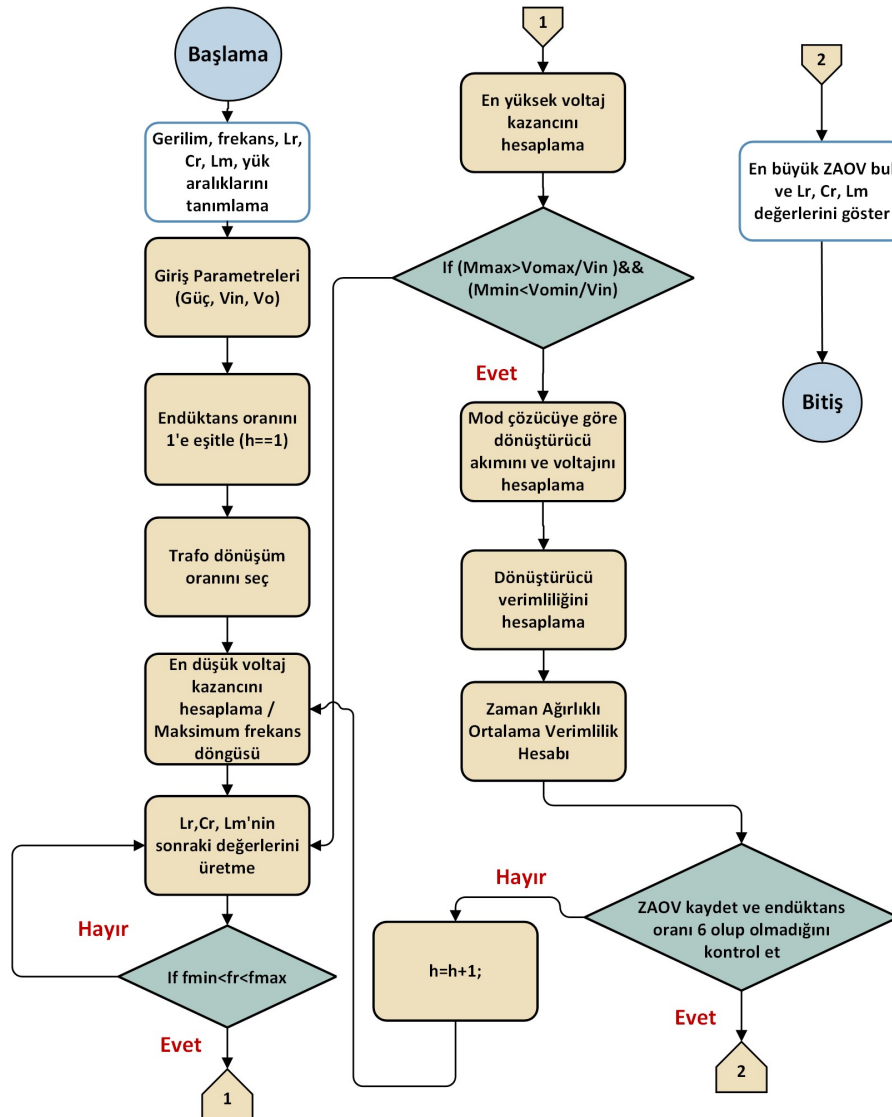
$$f_{min} < f < f_{max} \quad (37)$$

$$f_{min} < f_r < f_{max} \quad (38)$$

$$M_{min} < V_{o\ min} / V_i \quad (39)$$

$$M_{max} > V_{o\ max} / V_i \quad (40)$$

Genetik algoritma, indüktans oranını adım adım artırarak rezonans tank parametrelerini optimize etmek için kullanılmıştır. Verilen nominal V_o ve V_{in} değerlerine göre n seçilir. Çıkışın her zaman kontrol altında olduğundan emin olmak için minimum da gerilim kazancı M_{min} hesaplanmalıdır. Böylece maksimum çalışma frekansı da hesaplanmış olur. Genetik algoritma, rezonans tankı parametrelerinin kısıtlama aralığı dahilinde L_r , C_r ve L_m 'yi belirler. Tank parametreleri belirlendikten sonra rezonans frekansının $f_{s\ max}$ ile $f_{s\ min}$ arasında olup olmadığı kontrol edilir. Rezonans frekansı bu aralıkta ise M_{max} hesaplanır ve üst kazanç ve alt kazanç denklemleri kontrol edilir (Eşitlik 33-36). Bu aşamada, belirlenen parametreler alt ve üst sınırlar içinde ise, mod çözücü, dönüştürücünün batarya şarj profili içinde gösterilen 4 noktadaki modlarını belirler ve bu 4 noktadaki akım ve gerilim dalga formlarını hesaplar. Dört şarj noktasının verimliliği hesaplanır ve sistemin genel verimliliğini hesaplamak için ZAOV'ye aktarılır. Genetik algoritma optimizasyonu, tüm olası senaryolar arasında maksimum ZAOV'yi bulana kadar indüktans oranını artırarak rezonans tank parametrelerinin tasarımına devam eder. Daha iyi bir tasarım optimizasyonunu anlamak için, optimizasyon prosedürünün akış diyagramı Şekil 6'da gösterilmiştir. Ayrıca, amaç fonksiyonu ve kısıtlamalar Çizelge 2'de detaylı olarak verilmiştir.



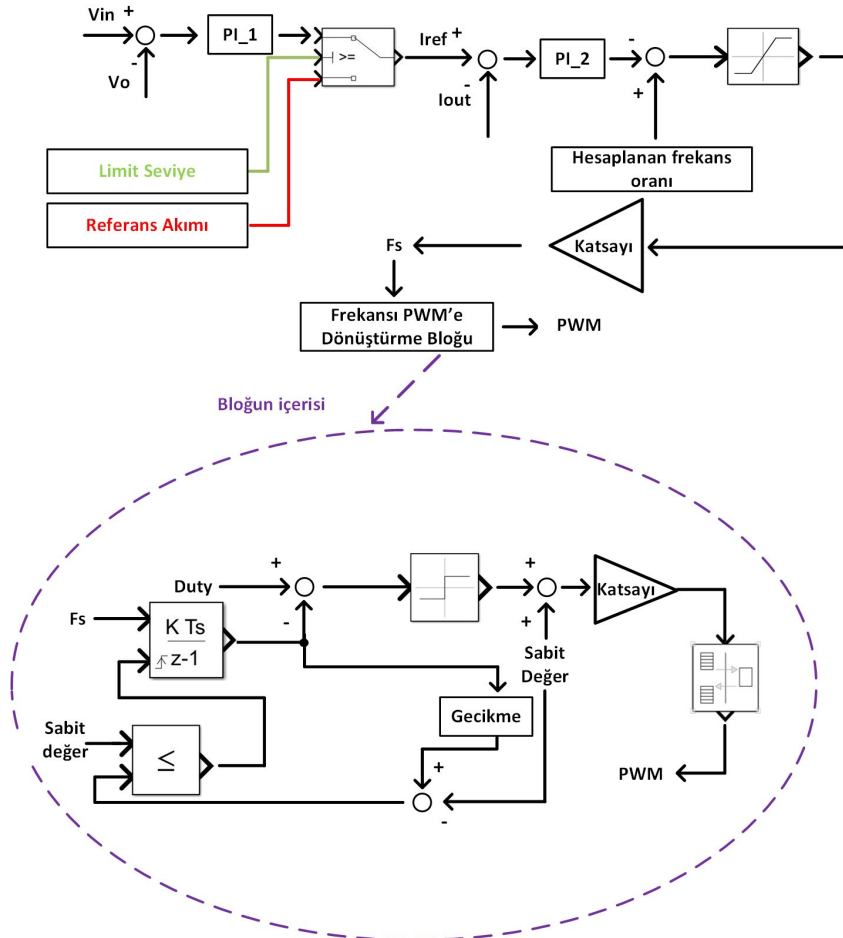
Şekil 6. Optimizasyon yönteminin akış şeması

Çizelge 2. GA Optimizasyonu Parametreleri

Amaç:	$\max (0.033Ex+0.767Ey +0.126Et+0.074Ez)$	
Değişkenler:	Alt sınır	Üst sınır
Giriş gerilimi (V)	550	650
Çıkış gerilimi (V)	85	115
Çıkış akımı (A)	0	120
Frekans (kHz)	20	200
Rezonans indüktör (μ H)	10	100
Rezonans kapasitör (nF)	50	150
Manyetik indüktör (μ H)	20	120

3.6. Kontrol Şeması

BŞU'larda SA-SG şarj algoritmaları için iç akım kontrol döngüsü ve dış gerilim kontrol döngüsünden oluşan kademeli döngü kontrol şeması tasarlanmıştır. Bu kademeli kontrol şeması Şekil 7'de blok diyagram olarak gösterilmiştir. İç ve dış döngüler için K_p ve K_i parametreleri Matlab/Simulink doğrusallaştırma (lineerleştirme) araç kutularından optimize edilir ve f_n, f_{max} sırasıyla normalleştirilmiş frekans ve maksimum normalleştirilmiş frekanstr. İç döngü, batarya gerilimi belirlenen limit seviyenin altında olduğunda SA şarjı için tasarlanmıştır ve aktive edilir. Benzer şekilde, dış döngü, batarya gerilimi belirlenen limit seviyenin üstünde olduğunda SG şarjı için tasarlanmıştır ve aktive edilir. Referans gerilimi ve referans akımı sırasıyla V_{ref} ve I_{ref} olarak gösterilir. SA şarj işlemi sırasında (anahtar kapalı), I_{ref} ile I_o arasındaki fark bir sinyal oluşturur ve bir doluluk oranı D oluşturmak için P_{L2} denetleyicisine girer. P_{L2} denetleyicisinden gelen sinyal, gerekli anahtarlama frekansını oluşturmak için üst/alt sınırlara sahip doygunluk bloğuna girer. SG şarj işlemi sırasında (anahtar açık), V_{ref} ile çıkış gerilimi arasındaki fark bir sinyal oluşturur ve iç döngüde kullanılmak üzere P_{L1} denetleyicisine girer. Geri kalan işlem, SA'dakiyle aynıdır.



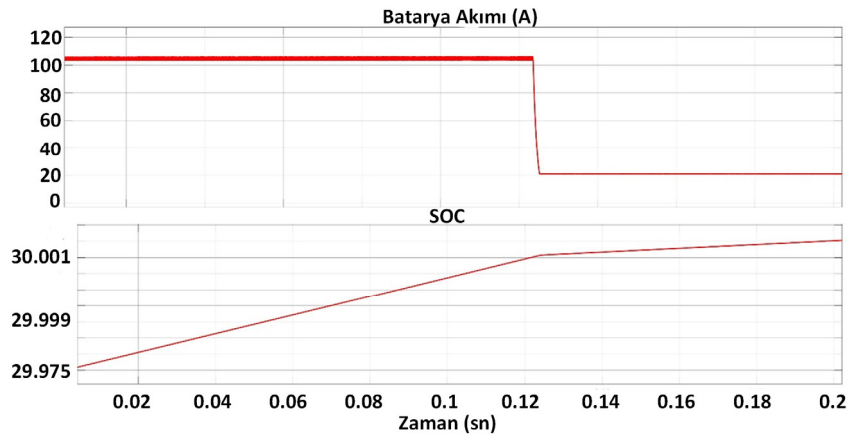
Şekil. 7. LLC dönüştürücü kontrol sistemi blok şeması

4. BENZETİM SONUÇLAR

Önerilen optimize edilmiş rezonans tank parametreleri ile batarya şarj cihazlarının performansı test edilmiştir. BŞU için iyileştirilmiş rezonans dönüştürücü bir durum çalışması ile araştırılmıştır. Durum çalışması için benzetim çalışmasında kullanılan batarya tipi lityum iyon bataryadır. Bu durumda, her biri 29 seri batarya hücresi içeren yedi paralel batarya paketinden oluşan büyük bir lityum iyon batarya paketi (90 V ~ 110 V / 0 A ~ 105 A) kullanılmıştır. Optimizasyon yönteminin performansını araştırırken sınırlamalara özenle dikkat edilmiştir (rezonans tank parametrelerinin tüm alt ve üst sınırları, giriş ve çıkış gerilim aralıkları vb). Performans sonuçları için optimizasyon yöntemi benzetim modelinin tasarım parametreleri Tablo 3'te verilmiştir. Büyük batarya paketi, 7 paralel paketten (her biri 29 hücre içeren) oluştuğundan, 90V/105A, 100V/105A, 110V/105A ve 110V/21A, şekil 4'te gösterilen dört noktayı temsil eder. Rezonans tank parametrelerinin optimize edilmesi sırasında, sistem en kötü koşullarda bile çalışabilir olmalıdır. Bunu yapabilmek için, dört nokta dikkatlice incelenmelidir. Rezonans tank parametrelerinin optimizasyon sonucu, işletme koşulları ve sistem verimliliği Tablo 3'te özetlenmiş olup genel verimlilik %96,91 seviyesindedir. Tablodan da görüldüğü üzere ağırlık katsayısı en yüksek Y bölgesinde olduğundan bu bölgede sistem rezonans frekansında (100 kHz) çalışmaktadır. Şekil 8'de ise kademeli kontrol şemasının doğru çalıştığı gösterilmiştir. Bu şekilde başlangıçta batarya paketi sabit akım olan 105 amper ile şarj edilmekteyken sonradan 21 amper ile şarj edilmiştir. Tüm bu esnada ise batarya paketinin şarj olduğu SOC değerinden görülmektedir. MATLAB/SIMULINK'te tasarlanan benzetim sisteminde verimlilik hesabında manyetik kayıplar ve anahtarlama kayıpları gibi birtakım kayıplar tam olarak yapılamadığından genel sistem PLECS benzetim programında yeniden yapılmıştır. PLECS'te simüle edilen benzetim sonuçlarının kayıp analizine göre, önerilen yöntemin ayrı ayrı 4 bölgedeki durum sonuçları Tablo 4'te gösterilmiştir. Ayrıca anahtarlama kayıpları, MOSFET ve diyotlardaki iletim kayıpları bu durum sonuçlarında detaylı olarak gösterilmiştir. Sonuç olarak sistem ilk önce MATLAB/SIMULINK ortamında tasarlanıp kontrolcüsünün çalıştığı, giriş/çıkış değerleri gibi birçok parametrenin doğrulandığı ve sistemin doğru çalıştığı kontrol edildikten sonra verimlilik hesabı yapabilmek için sistem PLECS ortamında da denenmiştir.

Çizelge 3. GA optimizasyon sonuçları

Parametre	Sembol	Değer
Rezonans kapasitör	C_r	127 nF
Rezonans indüktör	L_r	20 μ H
Manyetik indüktör	L_m	120 μ H
Çalışma durumu	Verimlilik	Ağırlık
90V/105A	95.20%	0.033
100V/105A	97.37%	0.767
110V/105A	96.34%	0.126
110V/21A	93.91%	0.074
ZAOV	96.91%	1



Şekil 8. Batarya akımı ve SOC değeri

Çizelge 4. Benzetim durum sonuçları

Kayıpların genel görünümü				
Anahtarlama kayıpları	İletim kayıpları	Diyot İletimi	Toplam Kayıp	Verimlilik
266.70 W	56.48 W	153.10 W	476.28 W	95.20 %
109.24 W	43.39 W	130.87 W	283.50 W	97.37 %
212.72 W	58.52 W	166.51 W	437.75 W	96.34 %
92.65 W	15.92 W	41.12 W	149.69 W	93.91 %
MOSFET kayıplarının detaylandırılması				
Açma kayıpları	Kesim kayıpları	İletim kayıpları	Geri besleme kayıpları	Diyot iletimi (MOSFET)
0 W	266.70 W	21.58 W	0.55 W	34.35 W
0 W	109.24 W	26.82 W	0.42 W	16.15 W
0 W	212.72 W	27.62 W	0.62 W	30.28 W
0 W	92.65 W	5.10 W	0.14 W	10.68 W

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Özetle, genetik algoritmanın LLC rezonans dönüştürücü optimizasyonunda kullanılması, güç elektroniği alanında dikkate değer bir gelişme olarak ortaya çıkmıştır. Geleneksel tasarımlardan daha yüksek verimlilik ve daha iyi performans sağlayan bir sistem tasarlamak için LLC rezonans dönüştürücüdeki L_r , L_m ve C_r parametrelerini optimize etmek gerekmektedir. Teorik tahminlere dayalı verimlilik hesabı benzetim bulgularıyla doğrulanmaktadır. Dolayısıyla bu teknik, karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde evrimsel algoritmaların potansiyelini vurgulamakta ve güç dönüştürücü tasarımında daha akıllı ve otomatikleştirilmiş tasarım metodolojileri ileriye yönelik yeni olanaklar sunmaktadır. Kısacası yapılan optimizasyon çalışması ile geleneksel yöntemlere göre verimlilik artışı, geniş çalışma aralığı ve daha iyi performansa sahip olma gibi üstünlükler vurgulanmaktadır. Bu çalışma sadece akademik ilgiyle sınırlı kalmayıp, gerçek dünya uygulamalarıyla da uyumlu olması için tasarımda kısıtlanan limitler mantıklı seçilmiştir. Sonuç olarak BŞU'larında daha güçlü, daha güvenilir güç sistemlerinin oluşturulması için bir yol haritası sunulmaktadır.

6. KAYNAKLAR

1. Ding, X., Wang, Z., Zhang L., Wang, C., 2020. Longitudinal vehicle speed estimation for four wheel-independently-actuated electric vehicles based on multi-sensor fusion. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 69(11), 12797-12806.
2. Wang, B., Dehghanian, P., Wang, S., Mitolo, M., 2019. Electrical safety considerations in large-scale electric vehicle charging stations. IEEE Transactions on Industry Applications, 55(6), 6603-6612.
3. Habib, S., Khan, M., Abbas, F., Saqib, M., Saleem, A., 2020. Contemporary trends in power electronics converters for charging solutions of electric vehicles. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 6(4), 911-929.
4. Yilmaz, M., Philip, T.K., 2013. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. IEEE Transactions on Power Electronics, 28(5), 2151-2169.
5. Kim J.S., Choe G.Y., Jung H.M., Lee, B.K., Cho, Y.J., Han K.B., 2010. Design and implementation of a high-efficiency onboard battery charger for electric vehicles with frequency control strategy. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 1-6.
6. Hannan M.A., Hoque, M.M., Hussain, A., Yusof, Y., Ker, P.J., 2018. State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: issues and recommendations. IEEE Access, 6, 19362-19378.
7. Wu, J., Zhang, C., Chen, Z., 2016. An online method for lithium-ion battery remaining useful life estimation using importance sampling and neural networks. Appl. Energy, 173, 134-140.
8. Sack, T.T., Tice J.C., Reynolds R., 2001. Segmented battery charger for high energy 28 V lithium-ion battery. Sixteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances. Proceedings of the Conference (Cat. No.01TH8533), Long Beach, CA, USA, 157-159.

9. Farah, F., Alaoui, M.E., El Khadiri, K., Qjidaa, H., 2018. New analog li-ion battery charger using pulsed charging method. 6th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), Rabat, 1-4.
10. Guo, Z., Huang, S., Tsai, T., 2019. A current-mode control li-ion battery charger with trickle-current mode and built-in aging detection. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Sapporo, 1-4.
11. Tseng, S.-., Shih, T.-., Fan, S.-., Chang, G.-., 2009. Design and implementation of lithium-ion/lithium-polymer battery charger with impedance compensation. International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Taipei, 866-870.
12. Musavi, F., Cracium, M., Gautam, D.S., Eberle, W., Dunford, W.G., 2013. An LLC resonant DC-DC converter for wide output voltage range battery charging applications. IEEE Transactions on Power Electronics, 28(12), 5437-5445.
13. Gu, B., Lin, C.-Y., Chen, B.-F., Dominic, J., Lai, J.-S. (Jason), 2013. Zero-voltage-switching PWM resonant full-bridge converter with minimized circulating losses and minimal voltage stresses of bridge rectifiers for electric vehicle battery chargers. IEEE Transactions on Power Electronics 28(10), 4657-4667.
14. Deng, J., Li, S., Hu, S., Mi, C. C., Ma, R., 2014. Design methodology of LLC resonant converters for electric vehicle battery chargers. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 63(4).
15. Karimi, S., Tahami, F., 2019. A comprehensive time-domain-based optimization of a high-frequency LLC-based li-ion battery charger. 10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), Shiraz, 415-420.
16. Cho, I.-H., Kim, Y.-D., Moon, G.-W., 2014. A half-bridge LLC resonant converter adopting boost PWM control scheme for hold-up state operation. IEEE Transactions on Power Electronics 29(2), 841-850.
17. Hu, S., Deng, J., Mi, C., Zhang, M., 2013. LLC resonant converters for PHEV battery chargers. Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, 3051-3054.
18. Li, Y., Shao, S., Chen, H., Zhang, J., Sheng, K., 2020. High-gain high-efficiency IPOS LLC converter with coupled transformer and current sharing capability. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 5(1), 63-73.
19. Zeng, J., Zhang, G., Yu, S.S., Zhang, B., Zhang, Y., 2020. LLC resonant converter topologies and industrial applications - A review. Chinese Journal of Electrical Engineering 6(3), 73-84.
20. Deng, J., Li, S., Hu, S., Mi, C.C., Ma, R., 2014. Design methodology of LLC resonant converters for electric vehicle battery chargers. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 63(4), 1581-1592.
21. Beiranvand, R., Rashidian, B., Zolghadri, M.R., Mohammad, S., 2012. A design procedure for optimizing the LLC resonant converter as a wide output range voltage source. IEEE Transactions on Power Electronics, 27(8), 3749-3763.
22. Hu, H., Fang, X., Chen, F., Shen, Z.J., Batarseh, I., 2013. A modified high-efficiency LLC converter with two transformers for wide input-voltage range applications. IEEE Transactions on Power Electronics, 28(4), 1946-1960.
23. Lee, I.-O., Moon, G.-W., 2012. Analysis and design of a three-level LLC series resonant converter for high and wide input voltage applications. IEEE Transactions on Power Electronics, 27(6), 2966-2979.
24. Lee, J.Y., Chae, H.J., 2014. 6.6-kW onboard charger design using DCM PFC converter with harmonic modulation technique and two-stage DC/DC converter. IEEE Transactions on Industrial Electronics 61(3), 1243-1252.
25. Gu, D.J., Zhang, Z., Wu, Y., Wang, D., Gui, H., Wang, L., 2016. High-efficiency LLC DCX battery chargers with sinusoidal power decoupling control. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 1-7.
26. Haga, H., Kurokawa, F., 2017. Modulation method of a full-bridge three-level LLC resonant converter for battery charger of electrical vehicles. IEEE Transactions on Power Electronics 32(4), 2498-2507.
27. Han, H.G., Choi, Y.J., Choi, S.Y., Kim, R.Y., 2016. A high efficiency LLC resonant converter with wide ranged output voltage using adaptive turn ratio scheme for a Li-ion battery charger. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 1-6.
28. Kim, J.-W., Moon, G.-W., 2014. A new LLC series resonant converter with a narrow switching frequency variation and reduced conduction losses. IEEE Transactions on Power Electronics 29(8), 4278-4287.

29. Zhou, X., Sheng, B., Liu, W., Chen, Y., Yurek, A., Liu, Y.-F., Fellow, S.L., 2019. Analysis and design of SR driver circuit for LLC DC-DC converter under high load current application. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 1375-1381.
30. Wang, D., Liu, Y.-F., 2014. A zero-crossing noise filter for driving synchronous rectifiers of LLC resonant converter. IEEE Transactions on Power Electronics 29(4), 1953-1965.
31. Murata, K., Kurokawa, F., 2012. Digitally controlled LLC resonant converter using modified FIR filter. 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sapporo, 1-4.
32. Wang, F., McDonald, B.A., Langham, J., Fan, B., 2016. A novel adaptive synchronous rectification method for digitally controlled LLC converters. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, 334-338.
33. Cheng, Y., Chen, J., Liu, Y., Huang, K., Yang, Z., 2013. Design of a digitally controlled LLC resonant converter with synchronous rectification. 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), Tainan, 772-776.
34. Yu, R., Ho, G.K.Y., Pong, B.M.H., Ling, B.W.-K., Lam, J., 2012. Computer-aided design and optimization of high-efficiency LLC series resonant converter. IEEE Transactions on Power Electronics 27(7), 3243-3251.
35. Fang, X., Hu, H., Chen, F., Somani, U., Auadisiyan, E., Shen, J., Batarseh, I., 2013. Efficiency-oriented optimal design of the LLC resonant converter based on peak gain placement. IEEE Transactions on Power Electronics 28(5), 2285-2296.
36. Xu, H., Yin, Z., Zhao, Y., Huang, Y., 2017. Accurate design of high-efficiency LLC resonant converter with wide output voltage. IEEE Access 5, 26653-26665.
37. Beiranvand, R., Rashidian, B., Zolghadri, M.R., Alavi, S.M.H., 2012. A design procedure for optimizing the LLC resonant converter as a wide output range voltage source. IEEE Transactions on Power Electronics 27(8), 3749-3763.
38. Fang, Z., Cai, T., Duan, S., Chen, C., 2015. Optimal design methodology for LLC resonant converter in battery charging applications based on time-weighted average efficiency. IEEE Transactions on Power Electronics 30(10), 5469-5483.
39. Zhang, X., Wei, X., Wu, X., Yu, X., 2018. Design of a digitally controlled full-bridge LLC resonant converter. Proc. National Conference on Electrical and Electronics (NCCE), 165.
40. Wei, G., Hua, B., Szatmari-Voicu, G., Taylor, A., Patterson, J., Kane, J., 2012. A 10 kW 97% efficiency LLC resonant DC/DC converter with wide range of output voltage for the battery chargers in plug-in hybrid electric vehicles. Proc. IEEE ITC Expo, 1-4.
41. Musavi, F., Craciun, M., Gautam, D.S., Eberle, W., Dunford, W.G., 2013. An LLC resonant DC-DC converter for wide output voltage range battery charging applications. IEEE Transactions on Power Electronics 28(12), 5437-5445.

Grafit-Kalsiyum Aljinat Modifiyeli Fungal Biyokompozitlerin Tepki Yüzeyi Metodolojisi ile Cr(VI) Giderim Optimizasyonu

Özgecan MADENLİ^{1,a}, Ceyhan AKARSU^{2,b}, Ece Ümmü DEVECİ^{1,c}

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Niğde
²İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul

^aORCID: 0000-0002-8673-3963; ^bORCID: 0000-0002-0168-9941; ^cORCID: 0000-0002-7551-188X

Makale Bilgileri

Geliş : 29.07.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606470

Sorumlu Yazar

Ece Ümmü DEVECİ

ecedeveci@gmail.com

Anahtar Kelimeler

Adsorpsiyon

Krom (VI) giderimi

Penicillium roqueforti

Grafit

Kalsiyum aljinat boncukları

Atıf şekli: MADENLİ, Ö., AKARSU, C., DEVECİ, E.Ü., (2024). Grafit-Kalsiyum Aljinat Modifiyeli Fungal Biyokompozitlerin Tepki Yüzeyi Metodolojisi ile Cr(VI) Giderim Optimizasyonu. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1143-1150.

ÖZ

Endüstriyel faaliyetler sonucu oluşan atıklarda yüksek konsantrasyonlarda bulunabilen Cr(VI) gibi ağır metaller, doğru yönetilmediği takdirde çevre ve insan sağlığı açısından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada, *Penicillium roqueforti* mantar misellerinin grafit ve kalsiyum aljinat ile modifiye edilerek biyokompozit sentezlenmesi ve bu biyokompozitin Cr(VI) giderim performansının incelenmesi amaçlanmıştır. Biyokompozitlerin adsorpsiyon kapasiteleri, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Sentezlenen biyokompozitin Cr(VI) giderim performansı, Box-Behnken istatistiksel modeli kullanılarak optimize edilmiştir. Optimizasyon sürecinde, grafit konsantrasyonu, adsorpsiyon süresi ve başlangıç Cr(VI) konsantrasyonu gibi bağımsız değişkenlerin etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, en yüksek giderim veriminin grafit konsantrasyonu 0,1 g/L, adsorpsiyon süresi 11 saat ve Cr(VI) konsantrasyonu 30 mg/L koşullarında elde edildiği belirlenmiştir. Bu koşullar altında %93,3 oranında Cr(VI) giderimi sağlanmıştır. Biyokompozitin yüksek giderim verimliliği, düşük maliyeti ve çevre dostu olması, bu materyalin endüstriyel atık su arıtımında kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu çalışma biyosorpsiyon yönteminin, geleneksel ağır metal giderim yöntemlerine kıyasla, kimyasal katkı maddesi kullanımının azlığı, operasyonel kolaylık ve yeniden kullanılabilirlik gibi avantajlarını da vurgulamaktadır. Elde edilen sonuçlar, gelecekteki çalışmalara yön verebilecek nitelikte olup, çevre mühendisliği ve atık su yönetimi alanlarında önemli katkılar sunmaktadır.

Optimization of Cr(VI) Removal Using Response Surface Methodology with Graphite-Calcium Alginate Modified Fungal Biocomposites

Article Info

Received : 29.07.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606470

Corresponding Author

Ece Ümmü DEVECİ

ecedeveci@gmail.com

Keywords

Hemp fiber

Denim fabric

Ozone bleaching

Denim washing

How to cite: MADENLİ, Ö., AKARSU, C., DEVECİ, E.Ü., (2024). Grafit-Kalsiyum Aljinat Modifiyeli Fungal Biyokompozitlerin Tepki Yüzeyi Metodolojisi ile Cr(VI) Giderim Optimizasyonu. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1143-1150.

ABSTRACT

Environmental pollution by heavy metals such as Cr(VI) resulting from industrial activities poses a serious threat to both environmental and human health. This study aims to synthesize a biocomposite by modifying *Penicillium roqueforti* fungal mycelium with graphite and calcium alginate, and to investigate the Cr(VI) removal performance of this biocomposite. The adsorption capacities of biocomposites are of great importance for economic and environmental sustainability. The Cr(VI) removal performance of the synthesized biocomposite was optimized using the Box-Behnken statistical model. The optimization process examined the effects of independent variables such as graphite concentration, adsorption time, and initial Cr(VI) concentration. Experimental results indicated that the highest removal efficiency was achieved at a graphite concentration of 0.1 g/L, an adsorption time of 11 hours, and a Cr(VI) concentration of 30 mg/L. Under these conditions, a Cr(VI) removal efficiency of 93.3% was achieved. The high removal efficiency, low cost, and eco-friendliness of the biocomposite demonstrate its potential for use in industrial wastewater treatment. Furthermore, this study highlights the advantages of the biosorption method compared to conventional heavy metal removal techniques, such as reduced use of chemical additives, operational ease, and reusability. The results obtained provide valuable insights for future studies and contribute significantly to the fields of environmental engineering and wastewater management.

1. GİRİŞ

Küresel ölçekte endüstriyel üretime artan talebin, su kaynaklarının tüketimine ve kirlenmesine yol açması nedeniyle insan tüketimi ve kullanımı için güvenli su kaynakları giderek azaltılmaktadır [1]. Endüstrilerden kaynaklı atıksular içerisinde boyalar, farmasötikler ve ağır metaller başlıca kirleticilerdir. Özellikle çevrede uzun süreli ağır metal maruziyeti hava, su ve toprağın kirlenmesine neden olmaktadır [2]. Dahası ağır metaller yüksek toksisiteleri ve besin zinciri boyunca biyolojik olarak taşınmalarından dolayı arıtım teknolojilerinde daha fazla dikkat çekmektedir [3]. Bu nedenle ağır metallerin atıksulardan giderimi üzerine araştırmalar daha fazla yoğunlaşmıştır.

Krom kirliliği, boyama, deri tabaklama, elektrokaplama vb. gibi endüstrilerde yaygın kullanımı nedeniyle yüksektir [4]. İç sulara deşarj edilen Cr(VI) için maksimum konsantrasyon limiti 0,1 mg/L iken içme sularına deşarj edilen Cr(VI) için maksimum konsantrasyon limiti 0,05 mg/L'dir [5]. Deşarj sınır limitlerini ve çevresel bozulmayı azaltmak için Cr(VI) içeren atık suyun etkili bir şekilde arıtılması gerekmektedir. Cr(VI) giderimi için iyon değişimi, adsorpsiyon, membran ayırma, kimyasal çöktürme, elektrokoagülasyon ve fotokataliz gibi farklı arıtma tekniklerini kullanan çeşitli süreçler ve bu yöntemlerin entegre sistemleri kullanılabilir [6-9]. Ancak bu yöntemlerin yüksek işletme ve bakım maliyetleri, düşük kirleticiler giderimi ve yüksek enerji gereksinimleri gibi çeşitli dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar arasında adsorpsiyon teknolojisi diğer yöntemlere kıyasla daha avantajlı bir yöntemdir [10].

Adsorpsiyon prosesleri, düşük maliyetli, yüksek giderim performansı, kolay işletimi ve yeniden kullanılabilirlik imkanından dolayı ağır metallerin giderilmesini sağlayan etkin bir yöntem olarak araştırılmıştır [11]. Ayrıca adsorban malzeme sentezine bağlı olarak çevre dostu yaklaşımı da dikkat çekicidir [12].

Son yıllarda özellikle karbon bazlı malzemeler kullanılarak kompozit adsorbanların sentezi önemli araştırma konusu haline gelmiştir [13,14]. Grafit, grafen, karbonanotüp, aktif karbon biyokömür ve hidrokömür vb. malzemeler adsorban sentezinde kullanılmıştır [15-17]. Literatür çalışmaları incelendiğinde Staroń ve arkadaşları [3] yaptıkları çalışmada raffia hifleri, Lindnera jadinii ve Fe₃O₄ nanopartiküllerinden elde edilen hidrokömürden kadmiyum (Cd^{II}) iyonlarının adsorpsiyonunda kullanmışlardır. Bali ve Tlili [18] çalışmalarında aktif karbonu kentsel atık sulardan ağır metallerin giderimini incelemişlerdir. Başka bir çalışmada ise Jin ve arkadaşları [19] karbon nanotüp ile modifiye ettikleri kitosan biyokompoziti ile sulu çözümlerden Fe(III), Cu(II), Zn(II) ve Pb(II) ağır metallerin adsorpsiyonunu araştırdıklarında yüksek kapasitede adsorpsiyon kabiliyeti gösterdiğini raporlamışlardır [19]. Diğer bir çalışma kitosan/indirgenmiş grafen oksit/montmorillonit kullanarak sentezledikleri kompoziti atık sudan Cr(VI) adsorpsiyonu için uygulamışlardır ve araştırmacılar sentezlenen kompozitin adsorpsiyon pH'ını önemli ölçüde etkilediğini bildirmişlerdir [20]. Bu çalışmada ise *Penicillium roqueforti* (*P. Roqueforti*) hücreleri ile grafit-kalsiyum aljinat immobilizasyonu ile biyokompozit sentezlenerek Cr(VI) giderimini etkileyen faktörler istatistiksel modelleme yöntemi ile incelenmiştir.

Buna göre, bu çalışma sulu çözümlerden Cr(VI)'yı hızla adsorbe edebilen yeni kalsiyum aljinat boncukları olarak kalsiyum aljinat/grafit mantar hiflerini sentezlemeyi amaçlamıştır. Adsorpsiyon performansı ve Cr(VI)'nın giderimini etkileyen faktörler, gerçek atıksu arıtımında da kullanılan Design Expert 13.0 ile Tepki yüzeyi metodolojisi (RSM) altında Box-Behnken tasarımı (BBD) kullanılarak model uyumu ve önemli varyans analizi araştırılmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Fungal Biyokompozitlerin Hazırlanması

P. roqueforti, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mikrobiyoloji Laboratuvarı'ndan temin edilerek, iki ay boyunca 4 °C'de patates dekstroz agarda (PDA) çoğaltılmıştır. Daha sonra mikroorganizma, 30 °C'de büyümeleri için steril PDA plakasına aktarılmıştır. Yaklaşık 10⁷-10⁸ spor mL⁻¹'e karşılık gelen toplam spor süspansiyonu elde edilmiştir ve bu süspansiyon immobilizasyon yöntemi ile Ca-alginat sentezi için kullanılmıştır. %2 sodyum aljinat çözeltisi elde etmek için, 8 g alginik asit sodyum tuzu 400 mL distile suya eklenmiş ve oda sıcaklığında (25±2 °C) 24 saat boyunca karıştırılmıştır.

P. roqueforti sporları ve grafit, hazırlanan sodyum aljinat çözeltisine eklenmiş ve homojen bir dağılım elde etmek için manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Daha sonra, mikroorganizma sporları ile grafit eklenen sodyum aljinat çözeltisi, bir şırınga kullanılarak kalsiyum klorür çözeltisine damla damla eklenmiştir.

Daha sonra, 15 dakika boyunca kalsiyum klorür çözeltisinde bekletilen kalsiyum aljinat boncukları, Deveci vd. (2019) yöntemine göre hazırlanan suş bazal besiyerinde üç gün inkübe edilmiştir. Kalsiyum aljinat içinde immobilize edilen canlı küf sporları, üç günlük inkübasyonun ardından büyümüş ve boncukların yüzey alanı artmıştır. İnkübasyonun sonunda, PR/G-Ca olarak adlandırılan modifiye aljinat bazlı biyokompozitler elde edilmiştir [23]. PR/G-Ca biyokompoziti steril koşullar altında bazal besiyerinden ayrılarak Cr(VI) çözeltisi içeren erlenlere aktarılmıştır.

2.2. Tepki Yüzey Metodolojisi ile Deneysel Tasarım

RSM, matematiksel ve istatistiksel tasarım araçlarını kullanarak ampirik modeller oluşturmaktadır. pH, başlangıç konsantrasyonu ve süre gibi bağımsız giriş faktörlerinin, sistem yanıtı gibi bağımlı çıktı değişkenleri üzerindeki etkisini göstermek için kullanılmaktadır. Bu strateji, bağımsız faktörler ve yanıt geliştirilip iyileştirilerek, minimum sayıda deney yapılmasını sağlamaktadır. Bu istatistiksel yaklaşım, adsorpsiyon sürecini ve bağımsız faktörlerin yanıt (%-giderim) üzerindeki etkisini açıklamaya yardımcı olmaktadır [22]. Bu çalışmada deneysel tasarım için Design-Expert 12.0 yazılımı kullanılarak BBD yaklaşımı uygulanmıştır. PR/G-Ca için üç farklı seviyede üç bağımsız değişkenle toplam 17 deney modellenmiştir. Modelin doğruluğu ve değişkenlerin anlamlılığı varyans analizi (ANOVA) kullanılarak değerlendirilmiştir. Çizelge 1, bağımsız değişkenlerin seviyelerini ve deneysel aralığını göstermektedir.

Çizelge 1. PR/G-Ca biyokompozitleri ile Cr(VI) giderimi için istatistiksel modelin deneysel tasarımı

Set	Grafit (g/L)	Zaman (sa)	Cr(VI) (mg/L)
1	0,55	6,00	30,00
2	0,55	1,00	50,00
3	1,00	1,00	30,00
4	0,55	6,00	30,00
5	1,00	6,00	50,00
6	0,55	1,00	10,00
7	0,10	6,00	10,00
8	0,10	11,00	30,00
9	0,10	6,00	50,00
10	1,00	6,00	10,00
11	0,55	6,00	30,00
12	1,00	11,00	30,00
13	0,55	11,00	10,00
14	0,55	6,00	30,00
15	0,55	6,00	30,00
16	0,55	11,00	50,00
17	0,10	1,00	30,00

2.3. Adsorpsiyon Deneyleri

Tüm adsorpsiyon deneyleri, 250 mL'lik bir erlenmeyer kullanılarak 100 mL aktif hacimde gerçekleştirilmiştir. Erlenmeyerler, 150 rpm dönüş hızında bir çalkalayıcı (IKA KS 4000i) kullanılarak karıştırılmıştır. Başlangıç Cr(VI) konsantrasyonu (10-50 mg/L), grafit konsantrasyonu (0,1-1,0 g/L) ve zaman (1-11 saat) gibi giriş faktörleri araştırılmıştır (Çizelge 1). Son olarak, çözeltideki Cr(VI) konsantrasyonu, 540 nm'de görünür UV-VIS spektrofotometre ile difenil karbazit yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Tüm deneyler üç kez tekrarlanmış ve adsorpsiyon sürecini ve verimliliğini belirlemek için modellerin hesaplanmasında ortalama değer kullanılmıştır. Yüzde giderim ve adsorbe edilen miktar hesaplamak için Eşitlik (1) ve (2) kullanılmıştır.

$$\text{Giderim Verimi (\%)} = \frac{(C_i - C_e)}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

$$q_e = \frac{(C_i - C_e) \times V}{m} \quad (2)$$

Bu eşitliklerdeki C_i ve C_e sırasıyla başlangıç ve son konsantrasyonları (mg/L), V çözeltinin hacmi (L) ve m adsorbanın kütlesi (g)'dir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. BBD İstatistiksel Değerlendirmesi

PR/G-Ca ile Cr(VI) adsorpsiyonu için deneysel tasarım BBD istatistiksel modeli ile düzenlenen deneysel tasarım Çizelge 1'de verilmiştir. Araştırılan 3 bağımsız değişkenin (grafit konsantrasyonu, zaman ve Cr(VI) konsantrasyonu) Cr(VI) adsorpsiyon verimliliği üzerindeki bireysel ve etkileşimlerinin incelendiği bir yaklaşım sunmaktadır. Faktörleri arasındaki ilişkiyi geliştirmek için ikinci dereceden polinom modeli seçilmiştir. Tepki için regresyon modelinin anlamlılığı ANOVA testlerinin sonuçları kullanılarak değerlendirilmiştir. ANOVA, bir veri setindeki toplam varyasyona dayalı parametreler hakkındaki hipotezleri test etmek için kullanılan istatistiksel bir tekniktir [23]. PR/G-Ca biyokompoziti için ANOVA test sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

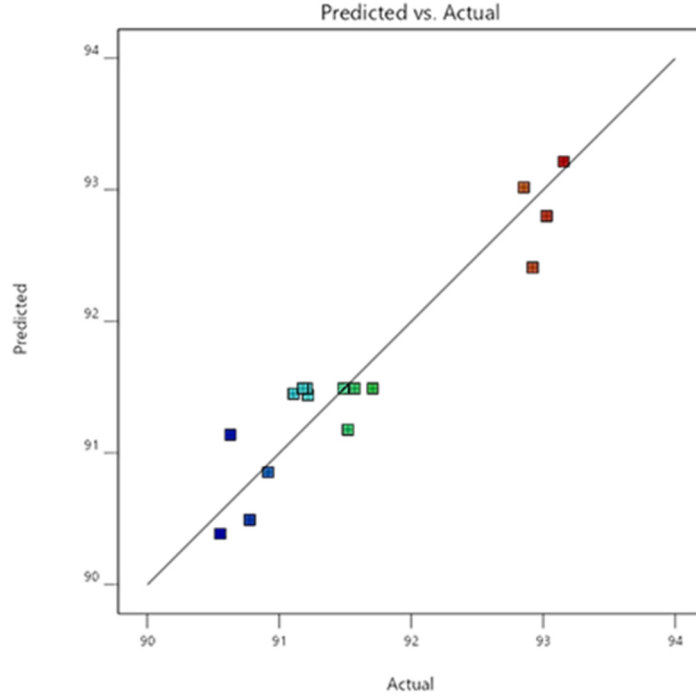
Çizelge 2. Cr(VI) giderimi için varyans analizi (ANOVA)

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value	
Model	10,48	9	1,16	6,65	0,0103	significant
A-Grafite konsantrasyonu	0,5905	1	0,5905	3,37	0,1090	
B-Zaman (saat)	6,59	1	6,59	37,62	0,0005	
C-Cr(VI) konsantrasyonu	1,33	1	1,33	7,62	0,0281	
AB	0,0674	1	0,0674	0,3848	0,5547	
AC	0,6526	1	0,6526	3,72	0,0949	
BC	0,5058	1	0,5058	2,89	0,1331	
A ²	0,6462	1	0,6462	3,69	0,0963	
B ²	0,0020	1	0,0020	0,0114	0,9181	
C ²	0,1159	1	0,1159	0,6614	0,4429	
Residual	1,23	7	0,1752			
Lack of Fit	1,08	3	0,3585	9,49	0,0272	significant
Pure Error	0,1510	4	0,0378			
Cor Total	11,71	16				

P value, model terimlerinin değerlerinin anlamlılığını analiz etmek için kullanılmaktadır. P value 0,05'ten küçükse, model terimleri anlamlı kabul edilir [21]. Başka bir deyişle, P value ne kadar küçükse, model terimi değeri o kadar anlamlıdır. PR/G-Ca biyokompoziti için anlamlı model terimleri B ve C'dir. Bu durum zaman ve Cr(VI) konsantrasyon değişkenlerinin de Cr(VI) adsorpsiyon giderimi üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı görülmektedir. Ayrıca Model Value değerinin 6,65 olması modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Bu kadar büyük bir F değerinin gürlütüden kaynaklanma ihtimali yalnızca %1,03'tür. Model uyumsuzluğu F-value değeri ise 9,49'dir ve Lack of Fit uyumluluğunun anlamlı olduğunu göstermektedir. Test edilen faktörler ile tepki arasındaki ampirik ilişkiler, PR/G-Ca biyokompoziti için Eşitlik (3) kullanılarak sunulmuştur.

$$\begin{aligned} \gamma_1 = & +91,49 + 0,271 * A + 0,90 * B \pm 0,4084 * C + 0,12 * AB \pm 0,40 * AC \pm 0,35 * BC \\ & + 0,39 * A^2 + 0,021 * B^2 \pm 0,16 * C^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Denklemlerde, pozitif katsayılar parametrelerin etkileşim etkilerini gösterirken, negatif katsayılar antagonistik etkileri göstermektedir [24]. Ayrıca, yanıt faktörleri ANOVA ile analiz edilmiş ve PR/G-Ca biyokompoziti 0,90 regresyon katsayısı (R2) değeri elde edilmiştir. Şekil 1’de gösterildiği üzere, gerçek ve öngörülen değerler arasında güçlü bir korelasyon belirgindir.



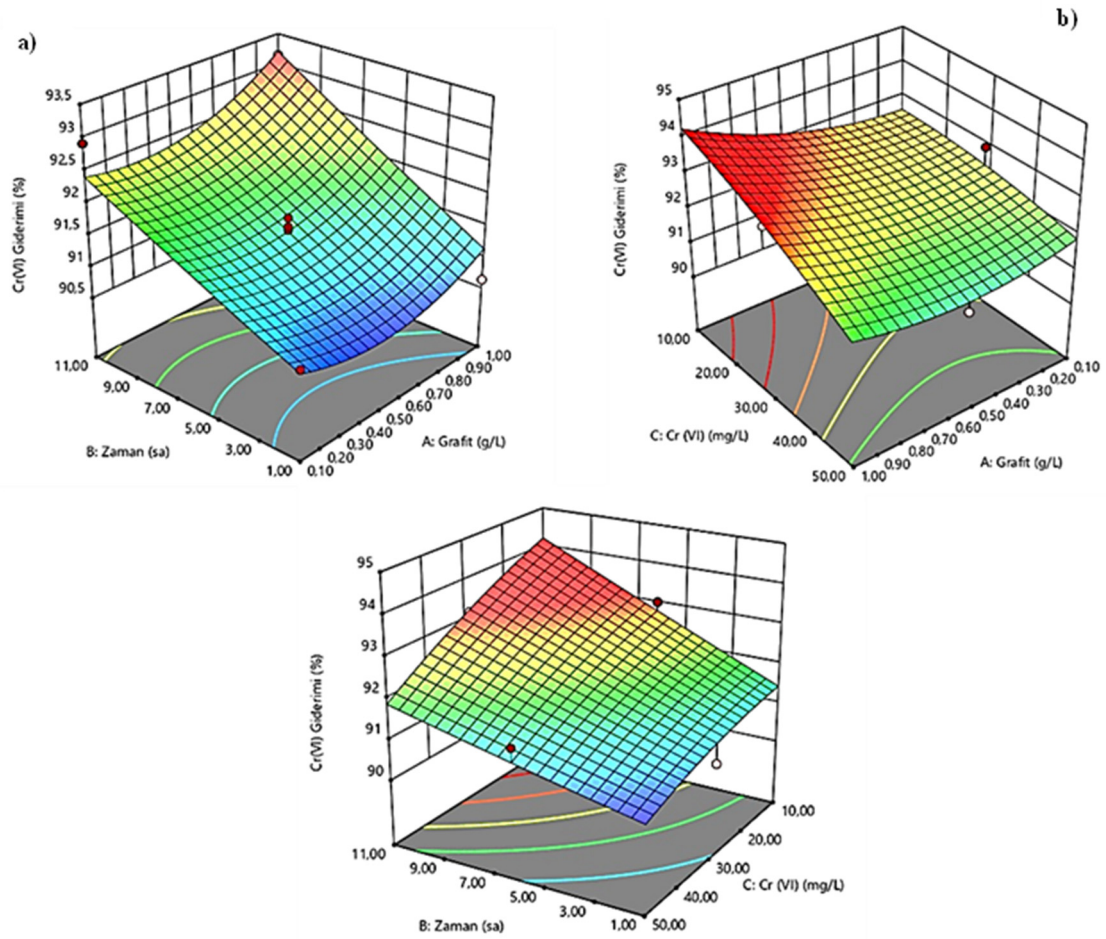
Şekil 1. PR/G-Ca biyokompozitinin Cr (VI) giderimi için gerçek ve öngörülen giderme verimliliğinin korelasyonu

3.2. Etkileşimin Yanıt Yüzey Optimizasyonu Üzerindeki Etkileri

Bu çalışmada, PR/G-Ca biyokompozitinin Cr(VI) adsorpsiyonunda bağımsız değişkenler arasındaki etkileşimi belirlemek için 3D grafikleri kullanılmıştır. PR/G-Ca için grafit, zaman ve Cr(VI) konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak Cr(VI) giderme oranındaki değişimi Şekil 2 (a-c)’de verilmiştir. PR/G-Ca için Cr(VI) adsorpsiyonunda, grafit konsantrasyonu 0,1 g/L, 11 saat adsorplama süresinde ve 30 mg/L Cr(VI) konsantrasyonunda maksimum seviyeye ulaştığı belirlenmiştir. Şekil 2a’da adsorpsiyon süresi arttıkça Cr(VI) giderim oranının arttığı görülmektedir. Fakat grafit konsantrasyonu artması adsorpsiyon süresini azaltmaktadır. Bu grafit konsantrasyonunun Cr (VI) adsorpsiyon giderimi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Literatür çalışmaları incelendiğinde, bu çalışma sonuçlarına paralel olarak, biyokompozit sentezinde katkı/modifiye malzemelerin adsorpsiyon verimini artırdığı gözlemlenmiştir [14,25,26].

Şekil 2b’de ise Cr(VI) ve grafit konsantrasyonlarının giderim verimi üzerine etkileri verilmiştir. Cr(VI) konsantrasyonu 30 mg/L ve grafit konsantrasyonu maksimum (1 g/L) seviyeye ulaştığında Cr(VI) giderimi %93,15 ulaşmıştır. Cr(VI) konsantrasyonu arttıkça giderim verimi azalmıştır. Adsorpsiyonda, adsorban yüzeyinde yeterli boş gözeneklerin mevcut olması, sulu ve katı fazlarda adsorban arasında büyük bir konsantrasyon gradyanı bulunmaktadır. Bu durum krom adsorpsiyonu üzerine yapılan çalışmalarla uyumludur [27,28].

Öte yandan Cr(VI) konsantrasyonundaki artışın denge süresinde ve adsorpsiyon giderim miktarında belirgin bir artışa yol açtığı Şekil 2c’de belirtilmiştir. Ayrıca Cr (VI) konsantrasyonları 10 mg/L’den 50 mg/L’ye arttıkça Cr (VI) giderim oranı yüzdesi %93’ten %89’a kadar düşmüştür. Sonuçlar, PR/G-Ca tarafından Cr(VI) adsorpsiyonunda 3 bağımsız değişkeninin de güçlü bir şekilde etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. PR/G-Ca biyokompoziti Cr(VI) adsorpsiyon parametrelerinin etkileşimlerine ilişkin 3D grafikleri

3.3. PR/G-Ca Biyokompozitinin Adsorpsiyon Giderim Verimi Daha Önce Bildirilen Adsorbanla Karşılaştırılması

Ham, ön yıkama, ozon ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemi uygulanmış %78 pamuk-%22 kenevir içeren denim kumaşa ait hava geçirgenliği testi sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Denim kumaşın ham değeri 89,4 l/m²/s ile yüksek bir hava geçirgenliğine sahiptir. Rinse yıkama sonrası hava geçirgenliği azalma göstermiş olup 55,0 l/m²/s değerine sahiptir. Uygulanan ozon ağartma ve ozonla sararmayı önleme için yıkama işlemlerinden sonra yumuşak su ile ıslatılmış %50 ozon kapasitesinde 15 dakika işlem görmüş olan denim kumaşlar en düşük 44,6 l/m²/s'lik hava geçirgenliği değerine sahiptir. Çoğunlukla 5. dakika'dan 10. dakika'ya kadar hava geçirgenliğinde artış görülürken 15. dakika sonrasında azalma görüldüğü için ozonun kumaş yapısına zarar verdiği düşünülmektedir. Yumuşak suda sert suda bulunan iyonların bulunmaması nedeniyle ozon verimi olumsuz etkilenmemiş, kumaş çekmesi daha fazla görülmüş, sıklık değerleri artış göstererek hava geçirgenliği değerini azaltmıştır.

Çizelge 3. Cr(VI) ağır metal giderimi için sentezlenmiş adsorbanların karşılaştırılması

Adsorban	Cr(VI) giderim verimi	Referans
AOrGO-Ca	%93,3	[30]
PRrGO-Ca	%98,9	[30]
Aktif karbon ve <i>Bacillus subtilis</i> immobilizasyonu	%90,0	[31]
Sodyum bikarbonatla modifiye <i>Swietenia mahagoni</i> kabuğu	%69,0	[32]
Kitin/bentonit	%91,0	[33]
PR/G-Ca	%93,0	Bu çalışma

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, *P. roqueforti* mantar miselleri ile grafit ve kalsiyum aljinatın modifikasyonu yoluyla yüksek verimli bir biyokompozit sentezlemiş ve Cr(VI) gideriminde etkili bir adsorban olarak kullanılabilceğini göstermiştir. Box-Behnken istatistiksel modeli kullanılarak optimize edilen koşullar altında %93,3 oranında Cr(VI) giderimi sağlanmıştır. Sonuçlar, biyokompozitin düşük maliyeti, yüksek giderim verimliliği ve çevre dostu özellikleri sayesinde endüstriyel atık su arıtımında önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, biosorpsiyon yönteminin avantajları, geleneksel ağır metal giderim yöntemlerine kıyasla önemli ölçüde öne çıkmaktadır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 120Y087 numaralı proje ile finanse edilmiştir.

6. KAYNAKLAR

1. Kumar, R., Barakat, M.A., Al-Mur, B.A., Alseroury, F.A., Eniola, J.O., 2020. Photocatalytic degradation of cefoxitin sodium antibiotic using novel BN/CdAl₂O₄ composite. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119076.
2. Liang, S., Cai, W., Dang, C., Peng, X., Luo, Z., Wei, X., 2023. Synthesis of sodium alginate/phosphorus tetramethylmethyl sulfate biocomposite beads with exceptional adsorption rate for Cr(VI) removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2), 109317.
3. Staroń, P., Kuciakowski, J., Chwastowski, J., 2023. Biocomposite of hydrochar and Lindnera jadinii with magnetic properties for adsorptive removal of cadmium ions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 110270.
4. Zou, H., Zhao, J., He, F., Zhong, Z., Huang, J., Zheng, Y., Zhang, Y., Yang, Y., Yu, F., Bashir, M.A., Gao, B., 2021. Ball milling biochar iron oxide composites for the removal of chromium (Cr(VI)) from water: Performance and mechanisms. *Journal of Hazardous Materials*, 413, 125252.
5. Dognani, G., Hadi, P., Ma, H., Cabrera, F.C., Job, A.E., Agostini, D.L.S., Hsiao, B.S., 2019. Effective chromium removal from water by polyaniline-coated electrospun adsorbent membrane. *Chemical Engineering Journal*, 372, 341-351.
6. Djellabi, R., Su, P., Elimian, E.A., Poliukhova, V., Nouacer, S., Abdelhafeez, I.A., Abderrahim, N., Aboagye, D., Andhalkar, V.V., Nabgan, W., Rtimi, S., 2022. Advances in photocatalytic reduction of hexavalent chromium: From fundamental concepts to materials design and technology challenges. *Journal of Water Process Engineering*, 50, 103301.
7. Khan, S.U., Islam, D.T., Farooqi, I.H., Ayub, S., Basheer, F., 2019. Hexavalent chromium removal in an electrocoagulation column reactor: Process optimization using CCD, adsorption kinetics and pH modulated sludge formation. *Process Safety and Environmental Protection*, 122, 118-130.
8. Kononova, O.N., Bryuzgina, G.L., Apchitaeva, O.V., Kononov, Y.S., 2019. Ion exchange recovery of chromium (VI) and manganese (II) from aqueous solutions. *Arabian Journal of Chemistry*, 12, 2713-2720.
9. Rezugui, S., Ghazouani, M., Bousselmi, L., Akrou, H., 2022. Efficient treatment for tannery wastewater through sequential electro-Fenton and electrocoagulation processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107424.
10. Sabzehmeidani, M.M., Mahnaee, S., Ghaedi, M., Heidari, H., Roy, V.A.L., 2021. Carbon-based materials: A review of adsorbents for inorganic and organic compounds. *Materials Advances*, 2, 598-627.
11. Avila, M., Burks, T., Akhtar, F., Göthelid, M., Lansåker, P.C., Toprak, M.S., Muhammed, M., Uheida, A., 2014. Surface functionalized nanofibers for the removal of chromium(VI) from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, 245, 201-209.
12. Doyo, A.N., Kumar, R., Barakat, M.A., 2023. Recent advances in cellulose, chitosan, and alginate-based biopolymeric composites for adsorption of heavy metals from wastewater. *Journal of Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 151, 105095.
13. Liu, W., Zhang, J., Zhang, C., Wang, Y., Li, Y., 2010. Adsorptive removal of Cr(VI) by Fe-modified activated carbon prepared from *Trapa natans* husk. *Chemical Engineering Journal*, 162, 677-684.

14. Madenli, Ö., Akarsu, C., Adigüzel, A.O., Altuntepe, A., Zan, R., Deveci, E.Ü., 2022. Synthesis of graphite/rGO-modified fungal hyphae for chromium(VI) bioremediation process. *Environmental Technology*, 45(5), 811-826.
15. Deveci, E.Ü., Madenli, Ö., Akarsu, C., Zan, R., 2024. Synthesis of reduced graphene oxide-fungal hyphae biochar/iron oxide composite: characterization, adsorption performance, and removal mechanisms. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-14.
16. Zhang, Q., Hou, Q., Huang, G., Fan, Q., 2020. Removal of heavy metals in aquatic environment by graphene oxide composites: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 190-209.
17. Wu, L., Li, M., Sun, Q., Zhang, C., 2020. Preparation of RGO and anionic polyacrylamide composites for removal of Pb(II) in aqueous solution. *Polymers*, 12(6), 1426
18. Bali, M., Tili, H., 2019. Removal of heavy metals from wastewater using infiltration-percolation process and adsorption on activated carbon. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 249-258.
19. Jin, J., Sun, J., Lv, K., Huang, X., Wang, J., Liu, J., Bai, Y., Guo, X., Zhao, J., Liu, J., 2021. Magnetic-responsive CNT/chitosan composite as stabilizer and adsorbent for organic contaminants and heavy metal removal. *Journal of Molecular Liquids*, 334, 116087.
20. Yu, P., Wang, H.-Q., Bao, R.-Y., Liu, Z., Yang, W., Xie, B.-H., 2017. Self-assembled sponge-like chitosan/reduced graphene oxide/montmorillonite composite hydrogels without cross-linking of chitosan for effective Cr(VI) sorption. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5, 1557-1566.
21. Deveci, E.Ü., Akarsu, C., Gönen, Ç., Özyay, Y., 2019. Enhancing treatability of tannery wastewater by integrated process of electrocoagulation and fungal via using RSM in an economic perspective. *Process Biochemistry*, 84, 124-133.
22. Qiu, T., Yan, H., Li, J., Liu, Q., Ai, G., 2018. Response surface method for optimization of leaching of a low-grade ionic rare earth ore. *Powder Technology*, 330, 330-338.
23. Prabha, P.H., Ranganathan, T.V., 2018. Process optimization for evaluation of barrier properties of tapioca starch-based biodegradable polymer film. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120, 361-370.
24. Cho, I.H., Zoh, K.D., 2007. Photocatalytic degradation of azo dye (Reactive Red 120) in TiO₂/UV system: Optimization and modeling using a response surface methodology (RSM) based on the central composite design. *Dyes and Pigments*, 75, 533-543.
25. Khan, T.A., Nazir, M., Ali, I., Kumar, A., 2017. Removal of Chromium(VI) from aqueous solution using guar gum-nano zinc oxide biocomposite adsorbent. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S2388-S2398.
26. Samuel, M.S., Shah, S.S., Subramaniyan, V., Qureshi, T., Bhattacharya, J., Pradeep Singh, N.D., 2018. Preparation of graphene oxide/chitosan/ferrite nanocomposite for Chromium(VI) removal from aqueous solution. *International Journal of Biological Macromolecules*, 119, 540-547.
27. Mthombeni, N.H., Onyango, M.S., Aoyi, O., 2015. Adsorption of hexavalent chromium onto magnetic natural zeolite-polymer composite. *Journal of Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 50, 242-251.
28. Alemu, A., Lemma, B., Gabbiye, N., 2019. Adsorption of chromium (III) from aqueous solution using vesicular basalt rock. *Cogent Environmental Science*, 5(1), 1650416.
29. Banerjee, M., Basu, R.K., Das, S.K., 2018. Cr(VI) adsorption by a green adsorbent walnut shell: Adsorption studies, regeneration studies, scale-up design and economic feasibility. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 693-702.
30. Madenli, Ö., Akarsu, C., Deveci, E.Ü., 2023. Effective removal of hexavalent chromium by novel modified alginate-based biocomposites: Characterization, kinetics and equilibrium studies. *Ceramics International*, 49, 16440-16450.
31. Sukumar, C., Janaki, V., Vijayaraghavan, K., Kamala-Kannan, S., Shanthi, K., 2017. Removal of Cr(VI) using co-immobilized activated carbon and *Bacillus subtilis*: Fixed-bed column study. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19, 251-258.
32. Rangabhashiyam, S., Nandagopal, M.S.G., Nakkeeran, E., Selvaraju, N., 2016. Adsorption of hexavalent chromium from synthetic and electroplating effluent on chemically modified *Swietenia mahagoni* shell in a packed bed column. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 1-13.
33. Saravanan, D., Gomathi, T., Sudha, P.N., 2013. Sorption studies on heavy metal removal using chitin/bentonite biocomposite. *International Journal of Biological Macromolecules*, 53, 67-71.

Krank Milinde Kullanılan Ana Yatağın Nümerik Hasar Analizi

Mehmet Şah GÜLTEKİN^{1,2,a}, Mehmet Said BAYRAKLILAR^{3,b}, Hamit ADİN^{4,c}

¹Siirt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Siirt

²Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Batman

³Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Siirt

⁴Batman Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Batman

^aORCID: 0000-0002-1251-9219; ^bORCID: 0000-0002-5365-4441; ^cORCID: 0000-0003-2455-967X

Makale Bilgileri

Geliş : 11.09.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606477

Sorumlu Yazar

Mehmet Şah GÜLTEKİN

mehmetsahgultekin@siirt.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Sonlu elemanlar analizi

Malzeme tasarım ve davranışları

Kaymalı yataklar

Gerilmeler

Aşınma

Hasar analizi

Atf şekli: GÜLTEKİN, M.Ş., BAYRAKLILAR, M.S., ADİN, H., (2024). Krank Milinde Kullanılan Ana Yatağın Nümerik Hasar Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1151-1164.

ÖZ

Krank milinde kullanılan ana yatak, motorun krank milini desteklemek ve dönmesini sağlamak için kullanılan bir parçadır. Genellikle motor bloğunda bulunur ve krank milinin yataklanması için uygun yüzeyleri sağlar. Bu yataklar genellikle yüksek dayanıklılık ve sürtünme direnci sağlayacak şekilde tasarlanmış metal alaşımlarından imal edilir. Krank milinin doğru hizalanmasını, motorun uzun ömürlü ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar. Ana yatak sistemlerinde yatak ile mil yüzeyleri arasında oluşan sürtünme direncinin minimum düzeyde olması istenir. Bunu sağlamak için, yüzeyler arasında sürtünme kuvveti oluşturan yuvarlanma elemanları ya da bir yağlayıcı madde kullanılır. Günümüzde, Krank milinde kullanılan ana yatakların tribolojik performanslarını arttırmaya yönelik çalışmalar halen devam etmektedir. Bu amaçla, çalışmada motor bloğunda bulunan krank mili ile sürekli sürtünme halinde olan ana yatak parçasının motor çalışırken maruz kaldığı yüklerin nümerik hasar analizi yapılmıştır. Parçanın yatak yüzeyine etki eden noktalarda yatağın belirli bölgelerine kuvvetler uygulanarak statik analiz, Von Mises gerilmeleri, şekil değiştirme, gerilme ve deformasyon analizleri detaylı bir şekilde yapılarak, malzemesi alaşımlı çelik olan ana yatağın nümerik hasar analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler çalışmanın sonuç kısmında yorumlanmıştır. Çalışmanın sonuçlarında, motorun verimli ve uzun ömürlü çalışabilmesi için ana yatak tasarımında dikkat edilmesi gereken faktörler ve materyal seçiminin etkileri detaylı bir şekilde tartışılmıştır. Bu analiz, motor tasarımcılarına, ana yatakların performansını iyileştirmeye yönelik önerilerde bulunulmasına olanak sağlamaktadır.

Numerical Damage Analysis of Main Bearing used in Crankshaft

Article Info

Received : 11.09.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1606477

Corresponding Author

Mehmet Şah GÜLTEKİN

mehmetsahgultekin@siirt.edu.tr

Keywords

Finite element analysis

Material design and behavior

Plain bearings

Stress

Wear

Damage analysis

How to cite: GÜLTEKİN, M.Ş., BAYRAKLILAR, M.S., ADİN, H., (2024). Krank Milinde Kullanılan Ana Yatağın Nümerik Hasar Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 1151-1164.

ABSTRACT

The main bearing used in a crankshaft is a part of the engine used to support the crankshaft and allow it to rotate. It is usually located in the engine block and provides the appropriate surfaces for crankshaft bearing. These bearings are usually made of metal alloys designed to provide high durability and friction resistance. They ensure correct alignment of the crankshaft and long life and efficient engine operation. In main bearing systems, the friction resistance between the bearing and shaft surfaces is desired to be at minimum level. To achieve this, rolling elements or a lubricant that creates a frictional force between the surfaces are used. Nowadays, studies to improve the tribological performance of the main bearings used in the crankshaft are still ongoing. For this purpose, in this study, numerical damage analysis of the loads that the main bearing part, which is in constant friction with the crankshaft in the engine block, is subjected to during engine operation, has been carried out. By applying forces to certain parts of the bearing at the points acting on the bearing surface of the part, static analysis, Von Mises stresses, strain, stress and deformation analyzes were performed in detail, and numerical damage analysis of the main bearing, whose material is alloy steel, was performed. The data obtained are interpreted in the conclusion part of the study. In the results of the study, the factors that should be considered in the design of the main bearing for efficient and long-lasting operation of the motor and the main bearing design are discussed.

1. GİRİŞ

Motor bloğunun içinde hassas bir şekilde üretilen ve sürekli olarak krank mili ile sürtünme halinde olan, aynı zamanda motor bloklarında krank milini taşıyan yataklama elemanlarına ana yatak adı verilir. Ana yatak sayısı motor bloklarında her zaman kol yatak sayısının bir fazlası yani dört silindire sahip motorlarda beş tane ana yatak takılır. Kaymalı yataklarda birbirine göre dönme hareketi yapan yüzeyler arasında bir yağ filmi meydana gelir [1,2].

Kaymalı yataklar, darbe, gürültü ve titreşimleri sönmeler. Yağlama gresi kullanıldığında toza karşı koruma sağlarlar. Montajları basittir ve model tasarımı az yer kaplarlar; ayrıca büyük çaplardaki rulmanlı yataklardan daha ekonomiktirler. İyi bir yağlama ile kaymalı yataklar çok yüksek hızlara çıkabilirler. Ayrıca, aşınma değerini azaltmak için uygun bir yağlama yöntemi ile tercih edilirler. Ancak yeterli yağ olmaması durumunda hızlı hasar meydana gelebilir, bazı tasarımlarda pahalı ve karmaşık bir yağlama sistemi gerekebilir, yüksek yağ tüketimine sahip olabilirler ve yağ filmi oluşması için zaman gerektirebilir; bunun yanı sıra yatağın kullanıldığı milin yüzey kalitesinin iyi olması gerekir. Kaymalı ana yataklar, yağ tarafından iyi ıslatılmalı, iyi basınç ve aşınma direncine sahip olmalı, yatak malzemesi zarf yüzeyine iyi bir şekilde yapışmalı, sıcaklıkla sertliğini kaybetmemelidir. Ayrıca, yağsız kalma durumunda mile hemen zarar vermemeli, döküm ve talaşlı imalat işçiliği kolay olmalı ve düzgün bir yüzey sunmalıdır. Isınma nedeniyle oluşan zararları önlemek için ısıyı iyi iletmelidirler ve korozif etkilere dayanıklı olmalıdırlar; ayrıca özgül ağırlıkları düşük olmalıdır [3].

Yatakta meydana gelen sürtünme nedeniyle oluşan ısı değerleri (L_s) şeklindedir. (Eşitlik 1) =

$$L_s = \mu \cdot F \cdot V \quad (3600/4186) \quad (1)$$

Yatak yüzeyinden dışarı atılan ısı miktarı ise (L_ζ) şeklindedir. (Eşitlik 2) =

$$L_\zeta = \alpha \cdot A_\zeta \cdot \Delta t_1 \quad (2)$$

Suni soğutma ile dışarı atılan ısı ($L_{yağ}$) ile (A_ζ) şeklinde olmaktadır. (Eşitlik3, Eşitlik4) =

$$L_{yağ} = c \cdot G \cdot \Delta t_2 \quad (3)$$

$$A_\zeta \approx (8 \dots 10) \cdot D \cdot B \cdot \pi \quad (4)$$

Sessiz çalışma özelliği ile büyük ve darbeli yüklere dayanım gerektiren yerlerde (içten yanmalı motorlarda biyel ve krank yatakları gibi), titreşim sönmeme vb. gibi isteklerin bulunduğu bütün yataklama durumlarında kullanılır [3].

Rulmanlı yataklar, dişli çarklar ve kam mekanizmaları gibi sürekli sürtünme teması içinde olan parçalar, temas alanının küçük olması nedeniyle Hertz basınçlarına maruz kalır. Bu, temas yüzeylerinin hemen altında farklı değerlere sahip büyük yüklerin oluşmasına neden olur ve bu da yatakta ve milde yorulmaya sebep olabilir. Tekrarlayan ve değişen yükler sonucunda maksimum kayma gerilmelerinin meydana geldiği yerlerde plastik deformasyon ortaya çıkar; ayrıca dislokasyonlar nedeniyle çok küçük boşluklar meydana gelir [4].

Uzuner ve arkadaşları [5], 45 derece eğime sahip radyal kaymalı ve plastik malzemeden yapılan yatakların temas yüzeyi sıcaklığı ve sürtünme katsayısındaki değişimleri, yüzey basıncına ve kayma hızına bağlı parametrelere göre incelediler. Çalışmaları, sürtünme katsayısının kayma hızıyla arttığını, ancak yüzey basıncıyla azaldığını gösterdi. Ayrıca, temas yüzeyi sıcaklığının hem kayma hızı hem de basınçla arttığını bulmuşlardır.

Çuvalcı [6] yapmış olduğu çalışmada çinko-alüminyum esaslı ZA-27 alaşımından ve ticari bronzdan ürettikleri kaymalı yatakları talaşlı imalat yöntemiyle üretmiştir. Bu yatakları, laboratuvar ortamında mevcut bir kaymalı yatak ve yapılan deney düzeneğiyle farklı çalışma parametrelerinde sürtünme deneyine tabi tutarak malzemelerin sürtünme davranışlarını gözlemlemiştir. Yaptıkları deneyler sonucunda yatakların sürtünme faktörünün yatak basıncı tarafından etkilendiğini ve basınç arttıkça sürtünme değerinin

önemli ölçüde azaldığını gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda, yatak boşluğunun artmasıyla birlikte yatakların sürtünme faktörlerinin değerinin düştüğünü belirlemiştir.

Adatepe ve arkadaşları [7] statik yüke maruz kalan radyal kaymalı yataklarda (Chrysler biyel kolu yatağının) sürtünme katsayısındaki değişimi belirlemek için teorik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmanın teorik bölümünde, yatak yükünün, yağ viskozitesi değişiminin ve yatak boşluğunun sürtünme katsayısına etkisi incelenmiştir. Deneylerle elde edilen veriler ışığında ise, sürtünme momentine yatak değerlerinin etkisi TM 290 hidrodinamik radyal kaymalı yatak deney setinden ölçülmüştür. Ölçülen değerler kullanılarak sürtünme momentinden sürtünme katsayısı hesaplanmış ve sonuç olarak teorik ve deneysel olarak belirlenen sürtünme katsayıları karşılaştırılmışlardır.

Canbulut ve arkadaşları [8] yapmış oldukları çalışmada, hidrostatik eksenel kaymalı yatağın optimal tasarım parametrelerini ve çalışma koşullarını belirlemek için teorik analiz ve deneysel verilere dayandırmışlardır. Araştırmalarında, yapay zekanın bir optimizasyon yöntemi olan genetik algoritma yöntemini kullanarak, teorik sınırlamaların yanı sıra deneysel çalışma koşullarını da dikkate alarak çok kriterli analizler gerçekleştirmişlerdir. Genetik algoritmaların optimizasyonu, çalışma koşullarının ve tasarım parametrelerinin belirlenmesinde geniş bir çözüm yelpazesi sunmuşlardır.

Mil, aks gibi dönen ve salınım hareketi yapan elemanları yatak görevi yapması için kullanılan makine elemanlarına kaymalı yataklar adı verilir. Artun [9]'a göre günümüzde kaymalı yatakların tribolojik performanslarını arttırmak için yoğun akademik çalışmalar halen yapılmaktadır.

Güler ve arkadaşları [10] yapmış oldukları çalışmada, hidrodinamik olarak yağlanan kaymalı yatakların sürtünme katsayısı, basınç dağılımı, yağ filminde oluşan kalınlık, yağ sarfiyatı gibi değerlerin, yatak tasarımı ve optimum enerji verimliliği açısından önemli tasarım kriterleri olduğunu ortaya koymuşlardır. Basınç dağılımını ifade eden Reynolds yağlama diferansiyel denklemi, sonlu elemanlar yöntemiyle çözülerek her bir basınç noktası için iteratif çözümler sunmuşlardır. Geliştirilen algoritma kullanılarak basınç değeri, yağlayıcı tabaka kalınlığı, sürtünme katsayısı ve yük taşıma kapasitesi değiştirilerek belirlenmiştir.

Solmaz [11] yapmış olduğu çalışmada, eksantrik hidrostatik kaymalı yatakları ele almıştır. Bu çalışmada, eksantrik hidrostatik kaymalı yataklar için dairesel ve dairesel tipte yataklar incelenmiştir. Eksantrik hidrostatik kaymalı yataklar ve halka yivli rulmanlar için açıkça belirlenmesi gereken miktarlar şunlardır: yük taşıma kapasitesi, debi, sürtünme gücü, pompanın ihtiyaç duyduğu güç, yatağın ihtiyaç duyduğu toplam güç ve sıcaklık artış oranlarıdır.

Baş [12] yapmış olduğu çalışmada, hidrodinamik kaymalı yataklarda sürtünme katsayısı, yağ filmi kalınlığı, basınç dağılımı, yağ akışı vb. parametreler, rulman tasarımı ve optimum enerji verimliliği açısından önemli tasarım kriterleri olduğunu belirtmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün hidrodinamik kaymalı yatakların performansı üzerindeki etkisini incelemek için, aynı yatak malzemesinden ve üç farklı yüzey pürüzlülüğünden yapılmış yatak yuvaları kullanılarak farklı yük ve sıcaklıklarda deneyler yapmıştır.

Toklar [13] yaptığı çalışmada, rulmanların deformasyonunu dikkate alan eksenel kaymalı rulmanların çalışma özelliklerini incelemiştir. Çalışma sırasında rezervuardaki basınç dağılımını ilk olarak Reynolds denklemi kullanarak bulmuştur. Reynolds denkleminin, izotermal koşullar altında ve yağın viskozitesinin sabit olduğu varsayılarak çözüldüğünü gözlemlemiştir. İkinci aşamada, lineer elastik malzemelere uygulanan Gerilme-şekil değiştirme bağıntıları olarak adlandırılan bünye denklemleri kullanılarak tabakadaki deformasyon miktarı belirlenmiştir. Sonuçların genel bir anlam taşıması açısından boyutsuz denklemlerle çalışmayı tercih etmiştir. Çalışmanın sonunda, yatağın belirli bir basınca tepki olarak deformasyon miktarı ve yatağın deformasyon öncesi ve sonrası taşıma kapasitesi belirlenmiştir.

Polat [14] çalışmasında, dairesel sektör şekilli eksenel hidrodinamik kaymalı yatakların performans özelliklerini hesaplamak için kutupsal koordinatlarda genelleştirilmiş Reynolds denklemi elde etmiş ve sonlu farklar yöntemiyle sayısal olarak çözmüştür. Hazırlanan bilgisayar programı, katmanın istenilen geometrisinin ve boyutlarının belirlenmesini sağlamakta ve dolayısıyla herhangi bir dönüşüme gerek kalmadan doğrudan sonuçların elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu sayede, belirli geometrik mesnetler için hazırlanan farklı boyutsuz eğrilere bağlı kalmadan, farklı geometrilerdeki mesnetlerin boyutsal özelliklerinin doğrudan değerleri elde edilebildiği sonucuna ulaşmıştır.

Çeşitli taşıma araçlarında kullanılan aks milinin mekanik hasar analizini ve çelik malzemelerdeki karakteristik değişimleri sayısal olarak incelemişlerdir. Akslar, nakliye araçlarından otobüs, otomobil ve forkliftlere kadar çeşitli araçlarda kullanıldığı için güvenilir bir yapıya sahip olmalıdır. Akslar genellikle dış etkenlerin neden olduğu yüklerle karşılaşır. Bu çalışmada, aks milinin çeşitli yüklenme koşullarındaki mekanik davranışı gözlemlenmek için mekanik testler sayısal analizlerle desteklenmiştir. Hasar gelişiminin fiziksel nedenleri sayısal analizlerle anlaşılabilir. Çalışmanın amacı, AISI 1035 çeliğinden yapılan aks milinin optimizasyon tekniğiyle tasarım değişkenlerinin en uygun değerlere ulaşmasını sağlamaktır. Solidworks programı kullanılarak tasarlanan aks milinin sayısal analizleri yapılarak optimum değerler elde edilmiştir. Analiz sonuçları, aks uçlarında deformasyon meydana geldiğini göstermiştir [15].

Adin ve arkadaşları [16] göre yorulma davranışları yamasız ve yamalı alüminyum borular üzerinde sayısal olarak incelenmiştir. Yorulma analizi için Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmış ve Ansys Workbench (15.0) programıyla uygulanmıştır. Analizlerde Al 6063 alüminyum boru, DP-460 yapıştırıcı ve [0/90]₂ takviyeli açılı cam-epoksi kompozit yama malzemeleri kullanılmıştır. Sayısal çalışma sonuçları, yama boyutunun yorulma mukavemetinde etkili bir parametre olduğunu göstermiş ve çeyrek daire ve yarım daire kompozit yamaların yorulma ömrünü artırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca yapılan analizler, çeyrek daire yamalı alüminyum boruların daha yüksek yorulma mukavemetine ulaştığını göstermiştir.

Adin ve arkadaşları [17] göre piyasadan temin edilen hasarlı bir fren diski incelenmiştir. Fren diskine neden olan kırılma ve aşınma faktörleri araştırılmış ve Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Parça modellemesi Solidworks paket programıyla yapılmış ve bu model ANSYS paket programıyla analiz edilmiştir. Analiz sonucunda fren diskine neden olan hasarın kökenleri tespit edilmiştir.

Kam mili, krank milinden aldığı hareketle motorun egzoz ve hava subaplarını düzenli olarak açıp kapatır. Bu işlem, içeri hava girişini sağlar, yanma işlemini başlatır ve ardından kirli havanın egzozdan atılmasını sağlar. Genellikle yüksek kaliteli çelik alaşımlarından üretilen kam milleri, sertleştirilmiş kam yüzeylerine sahiptir. Her silindir için bir emme ve bir egzoz kamı bulunur, ancak bazı motor tiplerinde karşılıklı silindirlere için tek bir emme ve tek bir egzoz kamı kullanılır. Örneğin, DOHC motorlarda emme ve egzoz supapları için ayrı ayrı kam mili bulunabilir sonucuna ulaşılmıştır [18].

Sağlam ve arkadaşları (2018) göre ISUZU marka EUROBUS model midibüsün yaprak yayının üzerine gelen kuvvetlerle ilgili nümerik statik analizler Solidworks paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yaprak yaylarının kullanımında oluşabilecek potansiyel hasarların önlenmesi için analizler yapılmış ve malzeme üzerinde oluşabilecek hasarlar değerlendirilmiştir. Bu veriler, istenmeyen sonuçların engellenmesi amacıyla kullanılmıştır.

Makine elemanlarının önemli bir parçası olan mil, dişli çark, kayış kasnağı, zincir dişlisi gibi parçaları taşır ve dönebilmelerini sağlar. Yüklerin etkisiyle eğilme, döndürme momentiyle burulma gibi kuvvetlere maruz kalır. Çelik alaşımların kaynak malzemesi olarak kullanımı, sıcak çatlamların oluşumunu etkileyen faktörlerin araştırılmasında önemli bir rol oynamıştır. Ancak deneysel çalışmalar, alaşımlı kaynakların sıcak çatlama ile sonuçlanmasında etkin rol oynayan faktörlerin tam olarak ayrıştırılmadığını göstermiştir [19].

Makaracı ve Bayraklılar [20] yapmış olduğu çalışmada, doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi kullanarak rulmanların mekanik davranışını incelemiş ve delik çapı, katman kalınlığı ve şekil gibi parametrelerin etkilerini araştırmıştır. Bulgular, dış katmanların en yüksek stres seviyelerine maruz kaldığını ve özellikle delik çapının değiştirilmesinin maksimum gerilimi azaltarak rulmanların kullanım ömrünü uzattığını göstermiştir.

Koçak ve arkadaşları [21] göre bir shaft modelinin yapısının analiz edilmesi ve topoloji optimizasyonun uygulanması üzerine odaklanmıştır. ANSYS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda, maksimum gerilimde %2,65, maksimum gerinimde %2,46 azalma ve ağırlıkta %57,81 oranında azalma gözlemlenmiştir. Ancak maksimum deformasyonda %33,24'lük bir artış tespit edilmiştir, bu da daha fazla değerlendirme gerektirmektedir. Topoloji optimizasyonun potansiyelini vurgulayan bu sonuçlar, daha hafif ve daha güçlü shaft modellerinin mühendislik uygulamalarında kullanımını desteklemiştir.

Özbakış (2023) yapmış olduğu çalışmada ağır ticari araçlarda kullanılan kardan millerinin yorulma dayanımını sanal ve fiziksel testlerle inceleyerek, sanal testlerin fiziksel testlere en yakın sonuçları vermesi

için parametrelerin belirlenmesini amaçlamıştır. Çekme ve yorulma testleri, SAE 1141, C45E ve 41Cr4 çelik türlerinin mekanik özellikleri ile gerilme-yorulma davranışlarını ortaya koymuş, ardından fiziksel ve sanal testler arasında korelasyon sağlamıştır. Elde edilen veriler, kardan millerinin yorulma dayanımını artıracak parametrelerin tespiti için temel oluşturmuştur [22].

Bu çalışma, motor arızalarına neden olan ve endüstride "yatak sardı" olarak bilinen ana yatak sorunlarının detaylı incelenmesiyle krank milinin taşıyabileceği belirli yük senaryoları ve kullanılan malzeme türü bakımından verilerin belirlenmesini amaçlamaktadır. Motor bloğundaki diğer parçalara kıyasla ana yatak üzerine yoğunlaşan bu araştırma, ilgili literatürde önemli bir boşluğu doldurarak sektöre katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Von Mises gerilmesi, karmaşık gerilme durumlarında malzemenin akma dayanımını değerlendirerek bileşenlerin taşıyabileceği maksimum yükleri tahmin etmek için kullanılır. Krank milinin ana yataklarında bu tür analizler, yük taşıma kapasitesinin belirlenmesi ve motor arızalarının önlenmesi açısından kritik öneme sahiptir [23].

Benzer şekilde, şekil değişimi analizi, malzemenin elastik ve plastik deformasyon sınırlarını anlamak için hayati bir araçtır. Ana yatakların şekil değişimi özellikleri, krank milinin uyumlu çalışmasını ve motorun uzun vadeli dayanıklılığını sağlamak için incelenmelidir. Bu tür yaklaşımlar, motor bileşenlerinin optimize edilmesi, aşırı yüklenmelerin öngörülmesi ve "yatak sardı" gibi yaygın arızaların nedenlerinin anlaşılması açısından temel oluşturmaktadır.

Bu bağlamda, bu çalışmanın Von Mises gerilmesi ve şekil değişimi gibi kavramları ele alarak motor endüstrisine sunduğu analitik çerçeve, yalnızca literatürdeki boşlukları doldurmakla kalmayıp aynı zamanda daha dayanıklı ve verimli motor tasarımları için bir yol haritası oluşturmaktadır [24].

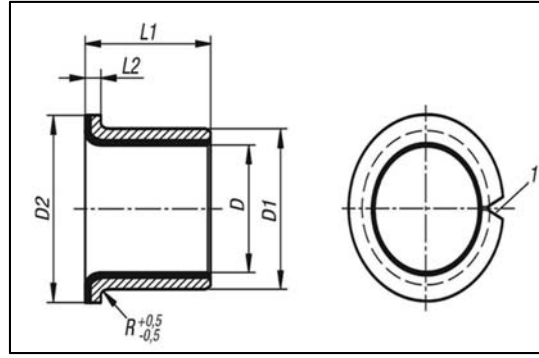
2. YÖNTEM

Motorların blok kısmında bulunan hassas olarak üretilen ve krank mili ile sürekli sürtünme halinde olan aynı zamanda motor bloklarında krank milini taşıyan ana yatak elamanının malzeme özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Alüminyum alaşımlı çelik 2219-T31 mekanik özellikleri

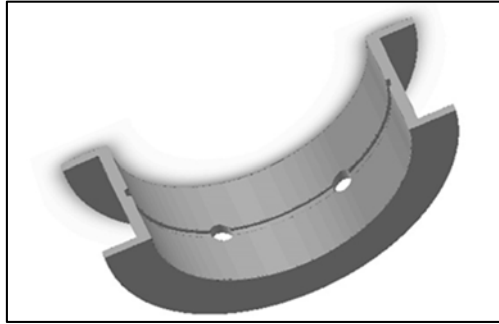
Statik yük değeri	250 N/mm ²
Dinamik yük değeri	140 N/mm ²
Sürtünme katsayısı (Kuru)	0,03 - 0,20
Kayma hızı, kuru	2 m/s
Yağ ile yağlama ve kayma hızı	maks. 5 m/s
Isıl iletkenlik değeri	42 W (m*K)-1
Isıl genleşme katsayısı	22 x 10 ⁻⁶ /K
Sıcaklık değerleri	-195 °C ila +280
Yoğunluk	2840 kğ/m ³
Termal iletkenlik	116 W/mK
Özgül ısı	886 J/Kğ.K
Elastisite modülü	74Gpa
Poisson oranı	0,33 N/A
Yırtılma modülü	2,7e+010N/m ²
Gerilme mukavemeti	360000000 N/m ²
Akma mukavemeti	250000000 N/m ²
Termal genleşme katsayısı	2,23e-005

Titreşim, darbe ve gürültü sönümlenme özelliği olan titreşimlere karşı hassas olmayan kullanıldığı yerde gresele yağlama halinde toza karşı korumalı bir şekilde duran basit tasarımı sayesinde iki parçaya ayrılabilen büyük çaplarda rulmanlı yataklara göre daha ekonomik olan endüstride yaygın olarak kullanılan kaymalı yatakların şematik görünümü Şekil 1'de verilmiştir.



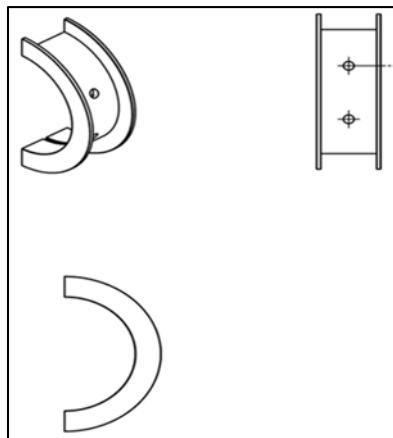
Şekil 1. Kaymalı yatak sisteminin şematik görünümü [25]

İçten yanmalı motorlarda krank milinin dönebilmesi ve motor parçalarının uygun şekilde çalışabilmesi için krank milinin desteklendiği yatak önemlidir. Krank milinin döndüğü yataklar genellikle motorun alt kısmında, karter denilen bölgede bulunur. Bu yataklar genellikle metalden yapılırlar ve krank mili üzerindeki yükü alarak düzgün bir şekilde dönmesini sağlar. Her motor tasarımı farklı olabilir, bu yüzden kullanılan ana yatak türleri de değişiklik gösterebilir. Krank milinin desteklendiği ana yatak, motorun sağlıklı ve düzgün çalışması için kritik bir bileşen olan ana yatağın Solidworks paket programı ile modellenmiş hali Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Solidworks paket programında modellenmiş ana yatak

Şekil 3’de ana yatağın teknik resmi verilmiş olup, ana yatağın malzemesi alaşımli çelik olarak seçilmiş bu çalışma Solidworks paket programı yardımı ile sayısal analizlerle gerçekleştirilmiştir.



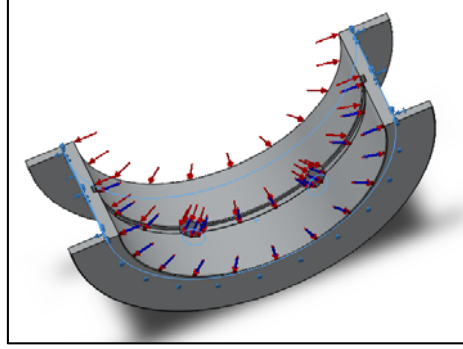
Şekil 3. Teknik resimleri verilmiş ana yatak

Bu çalışma kapsamında ana yatak parçasının üzerine etkileyeceği noktalarda yatağın belirli bölgelerine göre bir takım kuvvetler uygulanarak statik analiz, Von Mises gerilmeleri, şekil değiştirme, gerilme ve deformasyon analizleri detaylı bir şekilde yapılarak malzemesi alaşımli çelik olan yatağın nümerik hasar analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler yapılırken malzemeye uygulanacak kuvvetler, daha önce Sağlam ve

arkadaşları [26] tarafından yapılan çalışmada yatak mili çalışması referans alınarak belirlenmiştir. Ayrıca belirlenen kuvvetler malzemenin mekanik özelliklerinde belirtilen statik ve dinamik yükleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Kuvvetler ve uygulanan kuvvetlerin yönleri ve malzemeye uygulanan kuvvetlerin değerleri detaylı olarak alt başlıklarda verilmiş, ayrıca görsel olarak da sunulmuştur.

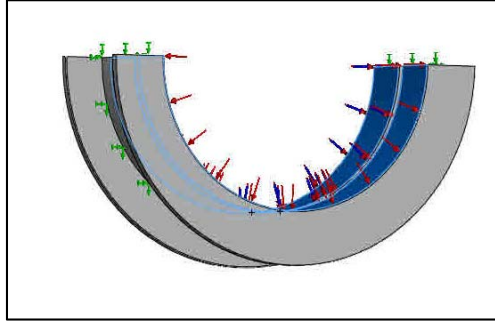
3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Şekil 4'te görüldüğü üzere ana yatağın sağ ve sol iki düzlemine nümerik analiz verisi olarak ana yatağın yatak kısmında içeri yönlü 125 N'luk bir basınç kuvveti etkisinde olacak şekilde değer girilmiştir.



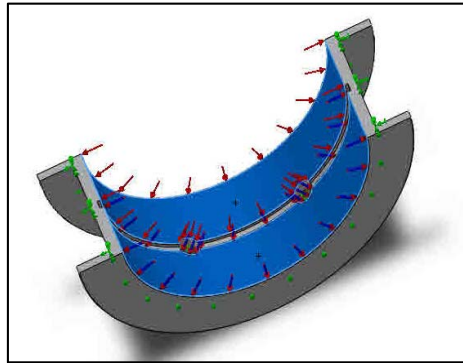
Şekil 4. Ana yatağa etkiyen kuvvetler

Şekil 5'de görüldüğü üzere ana yatağın sağ ve sol iki düzlemine nümerik analiz verisi olarak ana yatağın yatak kısmında içeri yönlü 200 N'luk bir basınç kuvveti etkisinde olacak şekilde değer girilmiştir.



Şekil 5. Ana yatağa etkiyen kuvvetler

Şekil 6'da görüldüğü üzere ana yatağın sağ ve sol iki düzlemine nümerik analiz verisi olarak ana yatağın yatak kısmında içeri yönlü 275 N'luk bir basınç kuvveti etkisinde olacak şekilde değer girilmiştir.



Şekil 6. Ana yatağa etkiyen kuvvetler

Şekil 4'te Parçada yatak üzerine uygulanacak kuvvetlerin dağılımından sonra parçanın analizi neticesinde x, y ve z doğrultularında ortaya çıkan tepki kuvvetleri ise Çizelge 2'de verilmiştir.

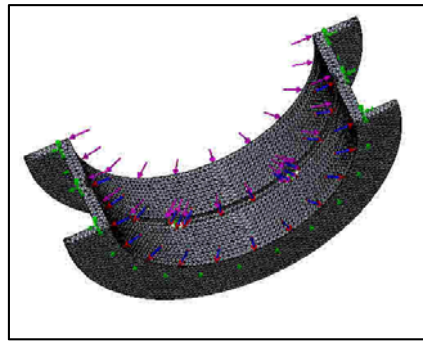
Çizelge 2. Tepki kuvvetleri

Tepki kuvveti N	X	Y	Z	Sonuç
	222211	45,1614	0,0728168	222211

Şekil 4'te analiz neticesinde uygulanacak olan kuvvetler belirlendikten sonra parça sonlu elemanlara ayrılmak üzere mesh edilmiştir. Yapılan mesh işleminin sonunda ortaya çıkan veriler Çizelge 3'te gösterilmiştir. Mesh tipi Düzlemsel 2B Mesh olup Şekil 4'te verildiği gibi 2 düzlemden sabit olmak kaydıyla standart olarak uygulanmış daha sonra ön görülen analiz yapıлып elde edilen veriler paylaşılmıştır.

Çizelge 3. Mesh bilgisi

Eleman Boyutu (mm)	1,2058 mm
Tolerance (mm)	0,060288 mm
Eleman Sayısı	60767
Düğüm Sayısı	99418



Şekil 7. Modelin mesh hali

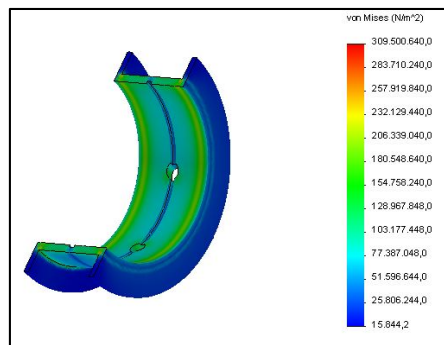
Şekil 5'te parça üzerine yatak yüzeyine uygulanan kuvvetlerin dağılımından sonra ana yatağın x, y ve z doğrultularında vermiş olduğu tepki kuvvetleri ise Çizelge 4'te verilmiştir.

Şekil 5'te yatak yüzeyine uygulanan kuvvetlerin dağılımı incelenmiş ve bu kuvvetlerin x, y ve z eksenlerindeki tepki kuvvetleri Çizelge 4'te sunulmuştur. Tepki kuvvetleri x ekseninde -0.138535 N, y ekseninde 0.800598 N, z ekseninde ise 0.00019455 N olarak hesaplanmış; toplam büyüklük ise 0.812496 N olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, ana yatak üzerindeki yük taşınımının mekanik performansını değerlendirmek ve yatak tasarımının optimizasyonu için kritik veriler sağlamaktadır. Yük dağılımı ve tepki analizi, parçanın dinamik stabilitesine ilişkin tasarım iyileştirmeleri için bir temel oluşturabilir.

Çizelge 4. Tepki kuvvetleri

Tepki kuvveti N	X	Y	Z	Sonuç
	-0,138535	0,800598	0,00019455	0,812496

Von Mises Gerilmeleri, Şekil 4'te 125N kuvvet uygulandığında buna karşılık yatak kısmında görülen akma mukavemetine karşı ortaya çıkan davranış Von Mises Gerilme grafiği Şekil 8'de görülmektedir.



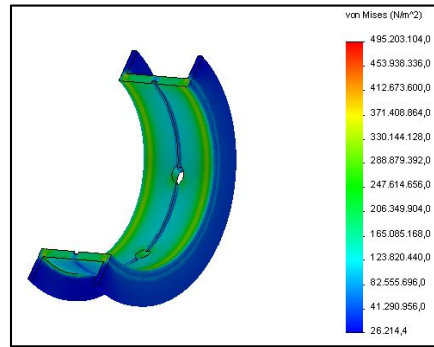
Şekil 8. Von Mises gerilmeleri

Parçanın 125 N'luk yük altında gösterdiği davranışı Şekil 8'de ortaya çıkan grafik ile anlaşılmaktadır. Ana yatağın yatak kısmına etki eden bu yük yatağın iç kısmında akma mukavemetinin altında bir mukavemete neden olarak parçanın yüzeyinde herhangi bir deformasyona sebebiyet vermemiştir. Bu durum, parçanın mevcut tasarımının ve malzeme seçimlerinin, uygulanan yük altında güvenli çalışma sınırları içinde olduğunu göstermektedir. Von Mises gerilmelerinden elde edilen veriler sırası ile parçaya etki eden düğüm nokta sayıları ve yatağa etki eden kuvvetler Çizelge 5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5. Von Mises gerilmeleri analiz sonucu

Ad	Tip	Min	Konum	Max	Konum
Stress	Von Mises Stress	15834 N/m ² Node: 5353	(-0,00403243 mm, 44,9859 mm, -0,915411 mm)	3,0928e+008 N/m ² Node: 93632	(0,716815 mm, -35,5213 mm, -2,93899 mm)

Şekil 5'te uygulanan 200N kuvvet uygulandığında buna karşılık yatak kısmında görülen akma mukavemetine karşı ortaya çıkan davranış Von Mises Gerilme grafiği Şekil 9'da görülmektedir.



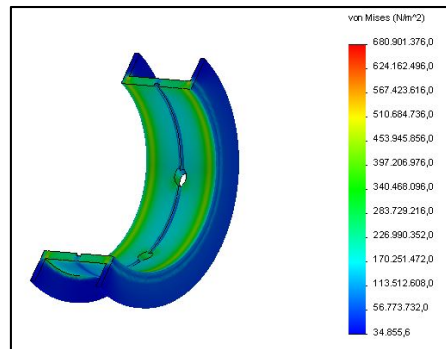
Şekil 9. Von Mises gerilmeleri

Parçanın 200 N'luk yük altında gösterdiği davranışı Şekil 9'daki ortaya çıkan grafik ile anlaşılmaktadır. Ana yatağın yatak kısmına etki eden bu yük yatağın iç kısmında akma mukavemetinin üstünde bir mukavemete neden olarak parçanın yatak yüzeyinde bir deformasyona neden olduğu görülmüştür. Bu deformasyon, malzemenin yük taşıma kapasitesinin aşıldığını ve motor arızalarına yol açabilecek potansiyel bir zayıflık oluşturduğunu göstermektedir. Von Mises gerilmelerinden elde edilen veriler sırası ile parçaya etki eden düğüm nokta sayıları ve yatağa etki eden kuvvetler Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Von Mises gerilmeleri analiz sonucu

Ad	Tip	Min	Konum	Max	Konum
Stress1	Von Mises Stress	26214,4 N/m ² Node: 5353	(-0,00645636 mm, 44,9775 mm, -0,881305 mm)	4,95203e+008 N/m ² Node: 93632	(0,716968 mm, -35,52 mm, -2,93986 mm)

Şekil 6'da uygulanan 275N kuvvet uygulandığında buna karşılık yatak kısmında görülen akma mukavemetine karşı ortaya çıkan davranış Von Mises Gerilme grafiği Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10. Von Mises gerilmeleri

Parçanın 275 N'luk yük altında gösterdiği davranışı Şekil 10'daki ortaya çıkan grafik ile anlaşılmaktadır. Ana yatağın yatak kısmına etki eden bu yük yatağın iç kısmında akma mukavemetinin üstünde bir

mukavemete neden olarak parçanın yatak yüzeyinde deformasyona neden olduğu görülmüştür. Bu deformasyon, yükün daha da artırılması durumunda malzemenin kalıcı hasar görebileceğini ve motorun verimliliğini olumsuz şekilde etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Von Mises gerilmelerinden elde edilen veriler sırası ile parçaya etki eden düğüm nokta sayıları ve yatağa etki eden kuvvetler Çizelge 7’de verilmiştir.

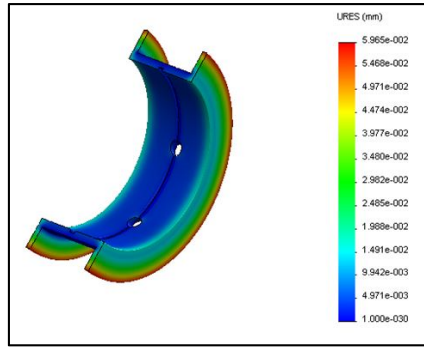
Çizelge 7. Von Mises gerilmeleri analiz sonucu

Ad	Tip	Min	Konum	Max	Konum
Stress1	VON: von	34855,6	(-0,00887768 mm,	6,80901e+008	(0,71712 mm,
	Mises	N/m ²	44,969 mm,	N/m ²	-35,5188 mm,
	Stress	Node: 5353	-0,847245 mm)	Node: 93632	-2,94074 mm)

Gerilme analizleri, Şekil 11’de verilen gerilme grafiği 125 N’luk kuvvet sonucunda uygulanan kuvvetten sırası ile etki altında kalan düğüm noktaları sayıları ve minimum- maksimum gerilmelerin sayısal değerleri Çizelge 8’de verilmiştir

Çizelge 8. Gerilme analizleri sonucu

Ad	Tip	Min	Max
Gerinim	URES: Resultant	0 mm	0,0596497 mm
	Displacement	Node: 1	Node: 5357



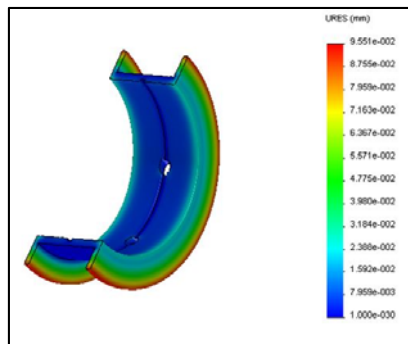
Şekil 11. Gerilme grafiği

Şekil 12’de verilen gerilme grafiği 200 N’luk kuvvet sonucunda uygulanan kuvvetten sırası ile etki altında kalan düğüm noktaları sayıları ve minimum-maksimum gerilmelerin sayısal değerleri Çizelge 9’da verilmiştir.

Çizelge 9’da verilen verilere göre, düğüm noktalarının etkileşimleri sonucu oluşan gerilmelerin, malzemenin dayanım sınırlarına yaklaşmadan önce önemli bir değişim gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu, motor bileşenlerinin dayanıklılığını değerlendirirken daha hassas tasarım parametrelerinin belirlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Çizelge 9. Gerilme analiz sonucu

Ad	Tip	Min	Max
Gerinim	URES: Resultant	0 mm	0,0955089 mm
	Displacement	Node: 1	Node: 5357



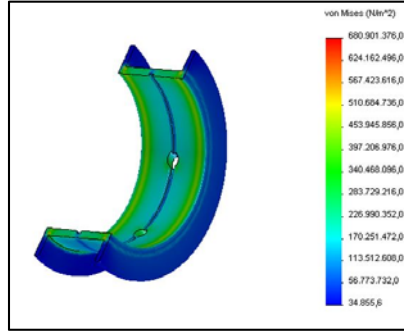
Şekil 12. Gerilme grafiği

Şekil 13’de verilen gerilme grafiği 275 N’luk kuvvet sonucunda uygulanan kuvvetten sırası ile etki altında kalan düğüm noktaları sayıları ve minimum – maksimum gerilmelerin sayısal değerleri Çizelge 10’da verilmiştir.

Çizelge 10’a göre, 275 N’luk kuvvetin etkisiyle meydana gelen gerilmelerin, malzemenin akma mukavemetini aşmaya başladığı ve belirli düğüm noktalarında belirgin deformasyonlar meydana geldiği görülmektedir. Bu sonuç, motor bileşenlerinde daha yüksek kuvvetlerin, malzeme yorgunluğuna ve potansiyel arızalara yol açabileceğini göstermektedir.

Çizelge 10. Gerilme analiz sonucu

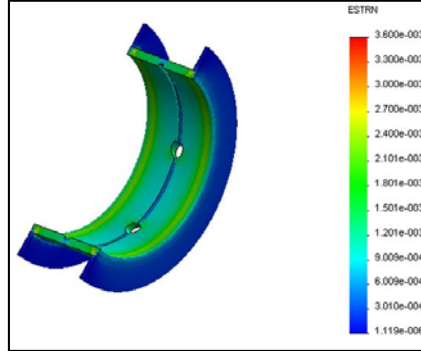
Ad	Tip	Min	Max
Gerinim	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 1	0,131323 mm Node: 5357



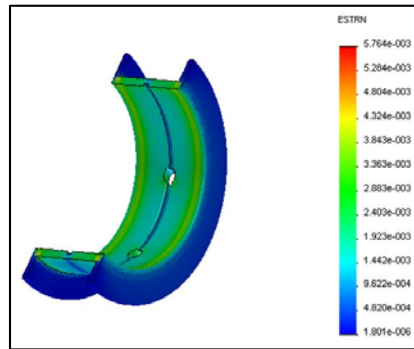
Şekil 13. Gerilme grafiği

Analizler sonucunda deformasyona uğramış modelin görünüşleri sırası ile 125, 200 ve 275 N’luk kuvvetler için Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16’ da verilmiştir.

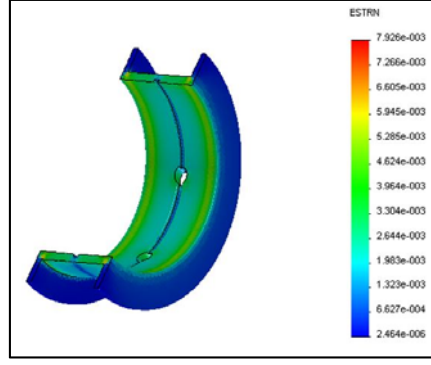
Bu görünüşler, her bir kuvvet uygulamasının ardından ana yatağın yüzeyinde ve iç kısmında meydana gelen gerilme ve deformasyon seviyelerinin görsel olarak analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Kuvvet arttıkça, malzemenin deformasyonunun belirginleşmesi, motor bileşenlerinde meydana gelebilecek potansiyel arızaların önceden tespit edilmesine yardımcı olabilir.



Şekil 14. Deforme olmuş model görünümü



Şekil 15. Deforme olmuş model görünümü



Şekil 16. Deforme olmuş model görünümü

4. SONUÇLAR

Alaşımli çelik malzemesinden imal edilen ana yatağın deforme olmuş model görünümü yapılan analizlerde görülmüş. Özellikle ana yatağın yapıldığı malzemeden ve sahip olduğu geometriden dolayı yatağın iç yüzeyinde ve yanlarında ciddi deformasyonlar ortaya çıkmıştır. Ayrıca, ana yatağa uygulanan yüklerin bu elemanların yatak yüzeyi boyunca etkileyen kuvvetlerden kaynaklandığı konumlardan dolayı analizde Şekil14, Şekil 15, Şekil 16 da yatağın hasar görmüş model hali verilmiştir. Ana yatağın üç boyutlu görüntüsü tasarım olarak Solidworks programı yardımı ile yapılmış olup ve Solidworks paket programı kullanılarak bilgisayar destekli ortamda ana yatağın nümerik hasar analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerde, ana yatak 125N ve 200N kuvvete maruz bırakıldığında akma mukavemetinin altında bir yüke maruz kaldığından dolayı hasar meydana gelmemiş fakat 275 N olarak girilen kuvvetler akma mukavemetinin üstünde olduğu için malzemede deformasyon gözlemlenmiştir.

Bulunan değerler çizelge ve grafik olarak incelendiğinde krank milinde kullanılan ana yatak motorun çalışma koşullarında yüksek kuvvetler seçildiğinde yatak hasara uğrayıp motor arıza verebileceği görülmektedir.

Ayrıca bulunan değerler malzemenin mekanik özelliği ile uyum göstermektedir. Bu sonuçlar ışığında analizimiz bu malzeme ile daha sonra yapılacak olan deneysel çalışmalar ile desteklenerek yeni bir çalışmaya dönüştürülebilecektir.

Yıldız ve arkadaşlarına [19] göre yapmış oldukları çalışmada, daire testere makinesinde kullanılan milin nümerik hasar analizini Solidworks kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Üç boyutlu tasarım ve bilgisayar destekli analizlerde, mil üzerine 1500N, 5000N ve 60000N olarak belirlenen çeşitli kuvvetler uygulamışlardır. Statik analiz sonuçları, milin basma ve döndürme kuvvetlerine karşılık, farklı noktalardan uygulanan kuvvetlerin hem eğilme hem de burulma hasarlarına neden olduğunu bulmuşlardır.

Yaptığımız çalışmada ise kullandığımız malzemenin yatak yüzeylerine uyguladığımız 125 N'luk ve 200N kuvvet malzemenin akma dayanımından düşük olduğu için hasara neden olmamıştır. Ancak, 275N kuvvetlerinde eğilme ve basma kuvvetlerinden dolayı malzemenin yatak yüzeylerinde hasarlar görülmüştür.

Yapılan nümerik analizler, alaşımli çelikten imal edilen ana yatak malzemesinin belirli yük sınırları altında güvenli çalışma kapasitesini ortaya koymuştur. Çalışmada uygulanan 125 N ve 200 N'luk kuvvetler, malzemenin akma dayanımının altında kalarak herhangi bir hasar ya da deformasyona neden olmamıştır. Ancak, 275 N'luk kuvvet uygulandığında, malzeme akma dayanımını aşarak iç yüzey ve yan yüzeylerde gözle görülür deformasyonlar meydana getirmiştir. Bu sonuç, motor çalışma koşullarında yüksek kuvvetlerin ana yatağın mekanik sınırlarını aşarak motor arızalarına yol açabileceğini göstermektedir. Bu çalışma, motor tasarımında kullanılan malzemelerin güvenlik sınırlarını belirlemede önemli bir bilimsel yenilik sunmakta, aynı zamanda motor arızalarının önlenmesi için tasarım süreçlerine katkı sağlamaktadır. Yapılan analizler, kullanılan malzemenin mekanik özellikleri ile uyumlu sonuçlar vermiş ve seçilen yöntemlerin güvenilirliğini kanıtlamıştır. Krank mili ana yataklarının yük taşıma kapasitesine yönelik bu çalışma, malzeme seçimi ve tasarım optimizasyonu açısından önemli bilgiler sağlamaktadır. Gelecekte, yapılan bu analizlerin doğruluğunu artırmak ve daha kapsamlı sonuçlar elde etmek için deneysel

çalışmalarla desteklenmesi önerilmektedir. Ayrıca, motor bileşenlerinin farklı malzeme ve geometri kombinasyonları kullanılarak incelenmesi, tasarım geliştirme süreçlerinde faydalı olacaktır. Bu bağlamda, gelecekte yapılacak deneysel testlerin analiz sonuçları ile doğrulanması, elde edilen verilerin daha güvenilir hale gelmesini sağlayacaktır. Yıldız ve arkadaşlarının [19] çalışmasında, kullanılan malzeme türleri ve tasarımın doğruluğunu artırmak için yapılan deneysel testlerin sonuçları, bu çalışmadaki analizlerle paralellik göstermektedir. Bu, daha güvenilir tasarım geliştirme süreçleri için önemli bir yol haritası sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma motor arızalarının önlenmesine yönelik mühendislik tasarımlarında kullanılabilir veriler sunmakta ve sektörde hem nümerik hem de deneysel araştırmalar için bir temel oluşturmaktadır. Yapılan analizler, özellikle motor bileşenlerinin dayanım ve deformasyon sınırlarını belirlemede önemli bir kaynak oluşturmıştır. Ayrıca, Yıldız ve arkadaşlarının [19] çalışmasında da benzer bilgisayar destekli analizlerin ve deneysel verilerin birleştirilmesiyle elde edilen bulgular, bu araştırmada elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir. Bu da yapılan çalışmanın doğruluğunu ve uygulanabilirliğini desteklemektedir. Gelecek çalışmaların, bu bulguları daha geniş bir malzeme ve geometri yelpazesi üzerinde test etmesi, motor tasarımının daha güvenli ve verimli hale gelmesine katkı sağlayacaktır.

5. KAYNAKLAR

1. Dikmen, F., 2018. Makine elemanları-2, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
2. Karl, H.V., Heinz, D., 1982. Maschinen elemente gestaltung und berechnung, München.
3. Temiz, V., Ders notları. İstanbul Teknik Üniversitesi.
4. Adin, H., 2016. Hasar analizi ders notları. Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Bilim Dalı.
5. Uzuner, F., Gediktaş, M., 2004. Salınım hareketi yapan radyal kaymalı plastik yataklarda sürtünme. İTÜ Dergisi Seri D: Mühendislik, 3(6), 91-98.
6. Çuvalcı, H., 2001. Çinko-alüminyum esaslı ticari ZA-27 kaymalı yatağının sürtünme davranışının incelenmesi. Türk J Engin Environ Sci., 25, 199-204.
7. Adatepe, H., Cengil, M., Güneş, B., 2012. Statik yük altındaki kaymalı yataklarda sürtünme katsayısının teorik ve deneysel olarak belirlenmesi. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 9(1), 25-34.
8. Canbulut, F., Erdoğan, H.B., 2021. Genetik algoritma yöntemiyle dairesel cepli hidrostatik kaymalı yatakların optimizasyonu. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 33(1), 39-48.
9. Artun, Y., 2020. Hidrodinamik radyal kaymalı yataklarda basınç dağılımının incelenmesi. Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 1(1), 30-36.
10. Güler, Ö.N.C.Ü., Durak, E., 2021. Statik yüklü radyal kaymalı yataklarda hidrodinamik yağlamanın analizi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(1), 167-175.
11. Solmaz, E., 2000. Eksenel hidrostatik kaymalı yatakların optimum tasarımı. Doktora tezi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
12. Baş, H., 2022. Hidrodinamik radyal kaymalı yataklarda yüzey pürüzlülüğünün sürtünme davranışları üzerindeki etkilerinin incelenmesi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12(3), 877-887.
13. Toklar, A., 2003. Eksenel kaymalı yatakların performans karakteristiklerine deformasyonun etkisi Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
14. Polat, A., 1996. Oynak lokmalı eksenel hidrodinamik kaymalı yataklarının davranışının sayısal olarak belirlenmesi için yeni bir algoritma. Doktora tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
15. Adin, H., Ergün, R.K., Adin, M.Ş., 2022. Computer aided numerical damage analysis of the axle shaft. European Mechanical Science, 6(3), 201-206.
16. Adin, H., Yıldız, B., Adin, M.Ş., 2021a. Numerical investigation of fatigue behaviours of non-patched and patched aluminium pipes. European Journal of Technique (EJT), 11(1), 60-65.
17. Adin, H., Adin, M.Ş., Akgül, S., 2021b. Araçlarda kullanılan fren diskinin sonlu elemanlar yöntemiyle hasar analizi. International Symposium on Engineering, Natural and Social Sciences (ISENS-21), 25-28 November 2021, Batman, Turkey.
18. Yıldız, B., Adin, M.Ş., İşcan, B., Seven, B., 2018a. Motorlarda kullanılan kam milinin nümerik hasar analizi. 1st International Engineering and Technology Symposium (IETS 2018), 3-5 May 2018. Batman, Turkey.
19. Yıldız, B., Adin, M.Ş., Adin, H., İşcan, B., 2018b. Daire testere makinesinde kullanılan milin nümerik hasar analizi. 1st International Engineering and Technology Symposium (IETS 2018), 3-5 May 2018. Batman, Turkey.

20. Makaracı, M., Bayraklılar, M.S., 2024. Unveiling stress mitigation and lifespan extension strategies for spherical elastomeric bearings in aerospace applications. *Strength of Materials*, 1-15.
21. Koçak, M.T., Bayraklılar, M.S., 2023. Mechanical shaft optimization: A study on static structural analysis and topological optimization in ANSYS. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 7(3), 541-549.
22. Özbakış, M., 2023. Ağır seri ticari araçlarda kullanılan kardan millerinin yorulma davranışlarının nümerik ve deneysel yöntemlerle belirlenerek yorulma dayanımlarını arttırmaya yönelik parametrelerin saptanması. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
23. Nişancı, D.Ş., 2021. Şase yorulma parçalarından olan motor beşiğinin alüminyum ekstrüzyon metodu ile tasarımı ve kaynak edilmesinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
24. Arslan, B., 2019. AISI 304 paslanmaz çeliğin işlenmesinde farklı talaş kırıcı formlarının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisinin deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
25. Norelem Normelemente GmbH & Co. KG, <https://www.norelem.com.tr>, Erişim tarihi: 02.04.2024.
26. Sağlam, Z., Yıldız, B., Adin, M.Ş., Adin, H., Seven, B., 2018. Yaprak yayların nümerik metotlar yardımıyla hasar analizi. 1st International Engineering and Technology Symposium (IETS 2018), 3-5 May 2018. Batman, Turkey.



Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi Yazım Kuralları

Çukurova Üniversitesi Mühendislik 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 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 yayımlansın veya yayımlanmasın iade edilmez. Makaleleri yayımlama 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 yansıtabilmelidir. **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** yalın bir dil ve anlatımla yazılmalı, makale Türkçe ise Türkçe, makale İngilizce ise İngilizce yazım kurallarına uygun olmalıdır.

Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralanmalıdır. Eşitlikler (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:

Makale ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. makalenin tam başlığı. derginin adı, cilt, sayı, başlama ve bitiş sayfaları.

Kitap ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. kitabın tam adı. cilt numarası, varsa editörü, yayımlandığı yer, son sayfa no.

Bildiri ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. bildirim tam başlığı. konferansın adı, yapıldığı yer.

Elektronik ortamdan alınmış ise: Bildiri sadece CD/DVD'de yayımlanmış ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, yıl, bildirim 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., yıl. tezin adı. derecesi, sunulduğu kurum, son sayfa no.

Rapor ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, yıl. raporun adı. türü, numarası, kuruluşun adı, yayımlandığı yer.

Web Sitesi ise: Yazar(lar) belli ise; yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, varsa yayımlandığı yıl. yazım başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.

Kurum/Kuruluşlara ait ise: Kurum adı, varsa yayımlandığı yıl. yazımın başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.

Elektronik kitap/rapor ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi veya kitap/raporu yayımlayan kurum veya kuruluşun adı, varsa yayımlandığı yıl, konunun tam adı, Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.