



**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ**  
**DERGİSİ**

CUKUROVA UNIVERSITY  
JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING

Cilt/Vol: 39

Sayı/Issue: 3

Eylül/September 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

<b>A New Approach for Improving Flame Retardancy of Automotive Interior Upholstery</b> .....	577
<i>Otomotiv İç Döşemelerinin Güç Tutuşurluğunu Geliştirmek İçin Yeni Bir Yaklaşım</i> <b>Özlem ERDEM, Ali Can YILMAZ, Ahmet COSGUN</b>	
<b>Optimal Design and Analysis of High-Frequency Isolation Transformer for Switched-Mode Power Converters</b> .....	585
<i>Anahtarlamalı Güç Dönüştürücüleri için Yüksek Frekanslı İzolasyon Transformatörünün Optimum Tasarımı ve Analizi</i> <b>Abdurrahman YAVUZDEĞER, Burak ESENBOĞA, Tuğçe DEMİRDELEN</b>	
<b>Investigation of The Effect of CNC Milling Cutting Process on The Tensile Test of PLA Samples Produced Using Two Different 3D Printers with The FDM Method</b> .....	599
<i>EYM Yöntemiyle İki Farklı 3B Yazıcı Kullanılarak Üretilen PLA Numunelerde CNC Freze İle Kesme İşleminin Çekme Testi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi</i> <b>Muhammed Safa KAMER, Çağrı UZAY</b>	
<b>2-D Microstructure Modeling based on Micrographs of Laser Powder Bed Fusion Melted Specimens</b> .....	609
<i>Lazer Toz Yataklı Füzyon ile Eritilmiş Numunelerin Mikrograflarına Dayalı 2 Boyutlu Mikroyapı Modellemesi</i> <b>Ali Can KAYA</b>	
<b>Determination of the Hydraulic Conductivity Behavior of Seaweed Added Zeolite-Bentonite Mixtures in the Presence of Temperature with Empirical Relationships</b> .....	617
<i>Deniz Yosunu Katkılı Zeolit-Bentonit Karışımlarının Sıcaklık Varlığında Hidrolik İletkenlik Davranışının Ampirik İlişkilerle Belirlenmesi</i> <b>Esra GÜNERİ</b>	
<b>Borlanmış AISI H11 Takım Çeliğinin Kaplama Özellikleri ve Korozyon Oranının Makine Öğrenmesi Temelli Modellenmesi</b> .....	625
<i>Machine Learning Based Modeling of Coating Properties and Corrosion of Borided AISI H1 Tool Steel</i> <b>Faruk ÇAVDAR, Ali GÜNEN, Mustafa SERT</b>	
<b>An Evidential Mask Transformer for Left Atrium Segmentation</b> .....	639
<i>Kanıtısal Maske Dönüştürücü Model ile Sol Kulakçık Bölütlemesi</i> <b>Fatmatülzehra USLU</b>	
<b>Farklı Özelliklere Sahip Çok Katlı Binalarda Deprem Düzensizliklerinin İrdelenmesi</b> .....	647
<i>Examination of Earthquake Irregularities in Multi-Storey Buildings with Different Geometric Features</i> <b>Yusuf Ziya NOMANOĞLU, Timuçin Alp ASLAN, Beytullah TEMEL</b>	

<b>Beton Yüzey Çatlaklarının YOLOv8 Derin Öğrenme Algoritması ile Tespit Edilmesi.....</b>	<b>667</b>
<i>Concrete Surface Crack Detection via YOLOv8 Deep Learning Algorithm</i>	
<b>Muhammet Gökhan ALTUN, Ahmet Hakan ALTUN</b>	
<b>Performance Modeling of the Fenton Process Used as a Single Unit for Treating Raw Textile Effluent .....</b>	<b>679</b>
<i>Ham Tekstil Atık Sularının Arıtılması İçin Tek Bir Ünite Olarak Kullanılan Fenton Prosesinin Performans Modellemesi</i>	
<b>Selman TURKES, Hakan GÜNEY, Bülent SARI, Olcayto KESKINKAN</b>	
<b>Examination of Thermal Dispersion and Airflow within a Refrigerator.....</b>	<b>695</b>
<i>Şok Dondurucunun Isı Dağılımı ve Hava Akışının İncelenmesi</i>	
<b>Nima MOLANI, Haydar KEPEKCI</b>	
<b>Time Series Installed Capacity Forecasting with Deep Learning Approach for Türkiye.....</b>	<b>709</b>
<i>Türkiye için Derin Öğrenme Yaklaşımı ile Zaman Serisi Kurulu Kapasite Tahmini</i>	
<b>Zeynep ALTIPARMAK, İnayet Özge AKSU</b>	
<b>Farklı Kesit Geometrilerine Sahip İnce Duvarlı Sac Metal Çarpışma Kutularının Darbe Performanslarının Nümerik İncelenmesi.....</b>	<b>719</b>
<i>Numerical Investigation of the Impact Performance of Thin-walled Sheet Metal Crash Boxes with Different Cross-section Geometries</i>	
<b>Oğuz DOĞAN, Muhammed Safa KAMER</b>	
<b>Toprakkale (Osmaniye) Bölgesi Bazaltik Kayaçlarının Jeolojik, Petrografik ve Mineralojik Özellikleri .....</b>	<b>729</b>
<i>Geological, Petrographic, and Mineralogical Characteristics of Basaltic Rocks in the Toprakkale (Osmaniye) Region</i>	
<b>Nil YAPICI, Nusret NURLU, Hande SONSUN</b>	
<b>Adana Seyhan Barajının Yıkılma ve 2 Boyutlu Taşkın Yayılımının HEC-RAS ile Modellenmesi.....</b>	<b>741</b>
<i>Modeling the Failure and 2D Flood Propagation of Adana Seyhan Dam with HEC-RAS</i>	
<b>Mehmet ARDIÇLIOĞLU</b>	
<b>Monte Carlo Simülasyonu ile Yenidoğan Transportunda Fizyolojik Stabilite Risk Skor Değişiminin Tahminlemesi.....</b>	<b>753</b>
<i>Estimation of Physiological Stability Risk Score Change in Transport of Newborn Infants by Monte Carlo Simulation</i>	
<b>Müfide NARLI</b>	
<b>Investigation of Surface Flow Behaviors on Wing Model Made of Different Airfoils.....</b>	<b>759</b>
<i>Farklı Profillerden Meydana Gelen Kanat Modelinde Yüzey Akış Davranışlarının İncelenmesi</i>	
<b>Selim TANGÖZ</b>	

<b>Kiremit Tozu ve Biyopolimerle İyileştirilmiş Kil Zeminin Mukavemet Parametrelerinin İncelenmesi</b> .....	771
<i>Investigation of Strength Parameters of Clay Soil Improved with Tile Powder and Biopolymer</i>	
<b>İlkim ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ, Baki BAĞRIAÇIK</b>	
<b>Trafik Kaynaklı Emisyonun Azaltılabilirliği Amacıyla Sürdürülebilir ve Çok Modlu Yol Ağlarının Tasarlanması; Erzurum – Tortum Yolu Örneği</b> .....	785
<i>Designing Sustainable and Multi-Modal Road Networks to Reduce Traffic-Related Emissions</i>	
<b>Emre KUŞKAPAN, Mahmut YILDIRIM, Ömer Lütfü AYDIN</b>	
<b>Rüzgâr Enerji Santralleri Rampa Oranı: Türkiye Örneği</b> .....	797
<i>Wind Power Plant Ramp Rate: The Case of Turkey</i>	
<b>İsrafil KARADÖL, Uğur Serkan BALTAÇI, Ökkeş Fatih KECEÇİOĞLU</b>	
<b>Çavuşlu (Malatya) Granitlerinin Demiryolu Balastı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması</b> .....	813
<i>Investigation of the Usability of Çavuşlu (Malatya) Granites as Railway Ballast</i>	
<b>Esmâ KAHRAMAN, Ali Can ÖZDEMİR</b>	
<b>Life Cycle Assessment (LCA) of Single Jersey Knitted Fabrics Containing Recycled Cotton Fiber and Fabric Performance</b> .....	821
<i>Geri Dönüştürülmüş Pamuk Elyafı İçeren Süprem Örme Kumaşların Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ve Kumaş Performansı</i>	
<b>Fusun DOBA KADEM, Raziye OZAN</b>	
<b>Patlatma Sonucu Meydana Gelen Hava Şoku ve Partikül Madde Yayılımı Arasındaki İlişkinin Araştırılması</b> .....	831
<i>Investigation of the Relationship between Air Overpressure and Particulate Matter Dispersion Caused by Blasting</i>	
<b>Ülkü KALAYCI ŞAHİNOĞLU</b>	
<b>Düşük Karbonlu St52 Çeliğinin Elektromanyetik Kalkanlama Potansiyeli: 4900-6000 MHz Frekans Aralığında Performans İncelemesi</b> .....	839
<i>Low Carbon St52 Steel Electromagnetic Shielding Potential: 4900-6000 MHz Frequency Range Performance Analysis</i>	
<b>Uğur SORGUCU</b>	
<b>Determination of Financial Performance in Electric Power Enterprises with Entropy Weighted WASPAS Analysis Method</b> .....	849
<i>Entropi Ağırlıklı WASPAS Analiz Yöntemi İle Elektrik Enerji İşletmelerinde Finansal Performansın Belirlenmesi</i>	
<b>Ayşe KÖKYILDIRIM, Zahide Figen ANTMEN</b>	



## A New Approach for Improving Flame Retardancy of Automotive Interior Upholstery

Özlem ERDEM <sup>1,a</sup>, Ali Can YILMAZ <sup>2,b</sup>, Ahmet COSGUN <sup>3,c</sup>

<sup>1</sup>Çukurova University, Department of Textile Technologies, Adana, Türkiye

<sup>2</sup>Çukurova University, Department of Automotive Technologies, Adana, Türkiye

<sup>3</sup>Akdeniz University, Department of Mechanical Engineering, Antalya, Türkiye

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0002-0976-2162; <sup>b</sup>ORCID: 0000-0001-9832-9880; <sup>c</sup>ORCID: 0000-0002-0243-5476

### Article Info

Received : 13.03.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1559895

### Corresponding Author

Özlem ERDEM

ozlemerdem@cu.edu.tr

### Keywords

Flame retardancy

LOI

Burning rate

Automotive textiles

**How to cite:** ERDEM, Ö., YILMAZ, A.C., COSGUN, A., (2024). A New Approach for Improving Flame Retardancy of Automotive Interior Upholstery. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 577-584.

### ABSTRACT

This study presents the flame retardant (FR) performance of chemically treated automotive upholstery fabrics using two different impregnation methods of Resin Transfer Molding (RTM) and supercritical carbon dioxide (scCO<sub>2</sub>). Referring to the related standards, untreated seat fabric obtained from seat upholstery of a bus (neat fabric, NF) and treated fabric samples underwent burning rate (BR) and limiting oxygen index (LOI) tests to compare effect of treatment and impregnation methods on FR performance. Thermal analysis was also conducted on the samples considering onset degradation temperatures and char yields. The results showed that BR and LOI of all samples were in acceptable range and treatment provided enhancement in FR performance of NF. The treated sample using scCO<sub>2</sub> method gave the highest LOI value of 32% and the lowest BR of 21 mm/min subtending to 18.5% increase in LOI and 30% reduction in BR compared to those of NF. The performance of treatment in RTM was worse than that of scCO<sub>2</sub> and better than that of NF. The results confirm that both treatment and methods used in this study give promising results for safety against fire in transportation vehicles.

## Otomotiv İç Döşemelerinin Güç Tutuşurluğunu Geliştirmek İçin Yeni Bir Yaklaşım

### Makale Bilgileri

Geliş : 13.03.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1559895

### Sorumlu Yazar

Özlem ERDEM

ozlemerdem@cu.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Güç tutuşurluk,

LOI

Yanma hızı,

Otomotiv tekstilleri

**Atf şekli:** ERDEM, Ö., YILMAZ, A.C., COSGUN, A., (2024). A New Approach for Improving Flame Retardancy of Automotive Interior Upholstery. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 577-584.

### ÖZ

Bu çalışmanın amacı, RTM ve scCO<sub>2</sub> olmak üzere iki farklı yöntem kullanılarak otomotiv kumaşlarının alev geciktirici performansını arttırmaktır. Bir otobüsün koltuk döşemesinden elde edilen kumaş numuneleri yanma hızı (BR) ve sınırlayıcı oksijen indeksi (LOI) testlerine tabi tutulmuşlardır. Numuneler üzerinde termal analiz de yapılmıştır. Sonuçlar, tüm örneklerin BR ve LOI değerlerinin uygun aralıkta olduğunu ve kimyasal iyileştirmenin NF'nin FR performansında artış sağladığını göstermiştir. scCO<sub>2</sub> yöntemi kullanılarak işlenen numune, NF'ye kıyasla, %32 LOI değeri (%18.5 artış) ve 21 mm/min BR değeri (%30 azalış) ile en iyi performansı göstermiştir. Elde edilen bulgulara göre, bu çalışmada kumaşa uygulanan yöntemlerin ve kimyasal işlemin ulaşım araçlarında yangına karşı güvenlik açısından umut verici sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

## 1. INTRODUCTION

Textile materials used in everyday life are either originated from natural sources or derived from synthetic compounds. The production rate of synthetic compounds is roughly 55% higher than that of natural fibers due to their superior features such as low-cost, strength, flexibility, wear resistance, etc. On the other hand, the organic structure of synthetic fibers paves the way for tendency of easily catching fire and fast spreading of flame due to melt dripping in case of a contact with the fire source [1-3].

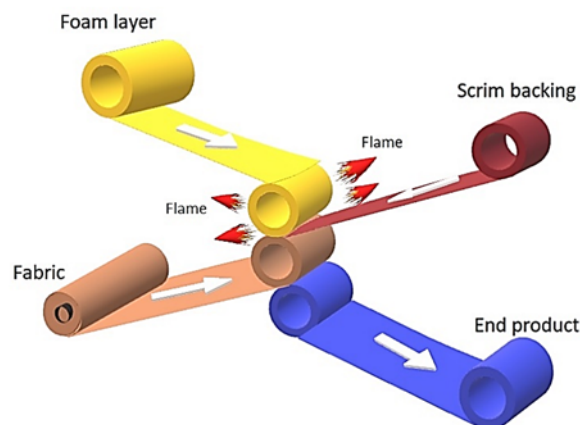
Technical textiles have a broad range of usage area in automotive industry such as interior upholstery, floor and pillar coverings, airbags, seat belts, tires, filters etc. accounting for approximately 20-25 kg of textile usage in an average passenger car [4-7]. As per customers' demands, automotive textiles should meet various requirements. For instance, it is expected that seat fabric of a vehicle should perform high flame retardancy, resistance to abrasion and sunlight as well as stain repellency [1,2,8,9]. On the other hand, seat belts and tires require high strength materials and thus, polyester fibers and high abrasion resistance polyamide fibers are often used in transportation vehicles [10,11]. The fabric classification with GSM ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) values used as seat upholstery of a vehicle is tabulated in Table 1 [12].

**Table 1.** Fabric types for vehicle seat upholstery

Fabric type	GSM ( $\text{g}/\text{m}^2$ )
Plain woven	200-400
Plain woven velvet	360-450
Warp-knitted	160-340
Raschel double needle bar knitted	280-370
Circular knitted	160-230

In the late 1960s and early 1970s, in seat coverings, automotive industry had used Nylon-6, acrylic, wool and polyester fibers instead of polyvinylchloride. However, there are drawbacks in usage of nylon, polyacrylonitrile fiber and wool in automotive coverings due to high decomposition rate in sunlight, limited abrasion resistance and high cost, respectively. In this context, polyester fabric steps forward for seat coverings of vehicles [8].

The seat covering is primarily constructed of polyurethane foam cushion which is laminated to the fabric in a variety of ways [13-19]. Among these, flame lamination method (Figure 1) is commonly used for lamination of foam and seat fabric rather than dry lamination with thermoplastic adhesive due to drawbacks of the latter in terms of high cost, low process speed and requirement of chemical glue during the process.



**Figure 1.** Flame lamination technique

Alternative fuel vehicles are now utilized in practically every kind of transportation, including cars, buses, heavy-duty trucks, trains, and airplanes. Currently, apart from explosive conventional fuels such as LPG and gasoline, latest technological advances in automotive technology focus on hydrogen fueled vehicles, ethanol fueled cars or electric vehicles with batteries capable of covering long ranges. However, certain alternative fuel cars may pose significantly greater risks in terms of flammability. For instance, a thermal



runaway in an electric vehicle's battery caused by an overcharge, an electrical malfunction, an outside fire, or a heating source could emit hazardous fumes and perhaps cause an explosion. Explosions can take several forms such as detonation, boiling liquid expanding vapor explosion, gas tank rupture, and deflagration [20]. Thus, researches and utilization of flame retardant (FR) materials in transportation vehicles are very important safety factors for drivers and passengers. In this context, seat fabrics undergo several chemical processes [21–28] with various recipes to gain flame retardant specification. The conventional pad-dry-cure process (Figure 2), which involves dipping the fabric into the FR solution, padding to remove extra solvent, and then drying and curing the cloth, is widely used to insert FRs into cotton fabric. However, incorporation of FRs in this system may be a challenging issue [29]. Another way to incorporate molecules into textiles is by using a supercritical fluid. Supercritical fluids are extensively used as processing media for synthetic and biopolymers offering an alternative method for modification of natural cellulose [30]. They are also known with their cost-effective, environmentally-friendly, non-flammable, non-toxic, and high diffusion rate in organic material features. Moreover, supercritical fluids can minimize or completely do away with the need for water and organic solvents when dyeing or impregnating hydrophobic or hydrophilic substances into cotton fabrics [31,32].  $scCO_2$  has been commonly utilized in extractions, impregnations, drying processes, and coloring of textiles or polymers [33,34].

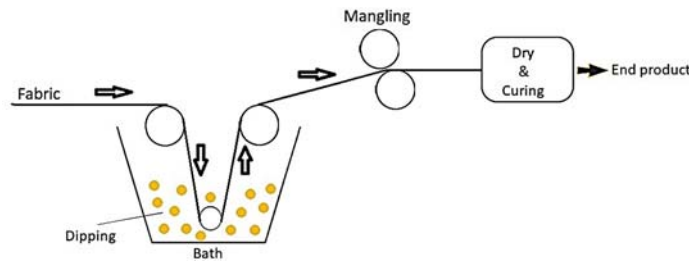


Figure 2. Pad dry-cure system

The lowest oxygen concentration required in an oxygen and nitrogen combination to sustain a material's blazing combustion is known as the limiting oxygen index, or LOI. It's stated as a volume percentage (vol%). The procedure entails setting up a sample vertically in a regulated environment and ignite the top of the sample using a burner. Combustible materials have LOI values of less than 21%, whereas self-extinguishing materials have LOI values of greater than 21, indicating that they require an external energy source to sustain their combustion at room temperature. One of the benefits of LOI is that it offers a repeatable and easy way to calculate a flammability index. In addition, the test apparatus is reasonably priced, and the sample quantity needed for testing is little [35]. The LOI can be found as shown below:

$$\text{LOI (\%)} = 100 \times [\text{O}_2] / ([\text{O}_2] + [\text{N}_2]) \quad (1)$$

where;  $[\text{O}_2]$  and  $[\text{N}_2]$  denote the concentration of oxygen and nitrogen gas, respectively.

Resin transfer molding (RTM) is an effective way of impregnation of fabric with the chemical recipes in a rigid mold cavity [36]. Its foundation consists of an injection pump, a catalyst-resin storage system, and a mold where yarns are subjected to a high load pressurization process while bonding and reaction-accelerating components are mixed with resin catalyst [37,38].

Amphoteric aluminum hydroxide,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , functions as a base in acidic media, creating a salt, and act as a Lewis acid in basic medium. Decomposition of  $\text{Al}(\text{OH})_3$  with an endothermic dehydration reaction at around  $180^\circ\text{C}$  and releasing water vapor in case of a fire makes it unique as FR additive. Furthermore, these metal hydroxide functions as powerful smoke suppressants to stop the combustion of polymer matrix materials [39-41].

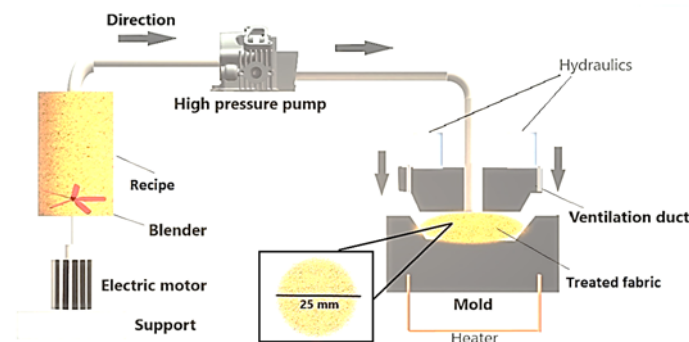
This study aims to investigate the effect of two different methods of resin transfer molding and  $scCO_2$  method on enhancing flame retardancy of automotive seat fabrics. In literature, to the author's knowledge, though there are several studies focusing on improving flame retardancy of fabrics, neither impact of  $scCO_2$  and RTM method on reducing flammability of automotive interior upholstery nor their comparison have been established. Thus, it is expected that this study will be a good guide for automotive textile industry.

## 2. MATERIAL AND METHOD

The 100% polyester double-face knitted fabric samples (34 wales x 22 courses) with GSM of 45 g/m<sup>2</sup> were supplied from seat upholstery of a bus. ZnO nanoparticles (~50 nm, 99.9% purity, in powder), urea (99%) and aluminum hydroxide were purchased and used without any modification. The fabric samples were bleached and any contamination was removed before the treatment in RTM machine and scCO<sub>2</sub> reactor. In RTM machine (Figure 3), thoroughly mixed matrix (Table 2) at 140 rpm for 1 h was sent to the molding chamber by a specially made high pressure pump and compressed by hydraulic pistons at very high pressure of 170 bar (17 MPa) for good impregnation of fabric with the flame retardant mixture. The temperature of the treated fabric in the mold was at about 150°C.

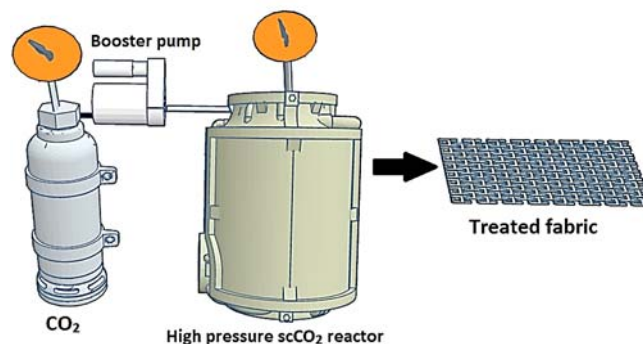
**Table 2.** Substance concentration in FR solution

Sample code	Definition	Substance fraction in treatment bath			
		ZnO nanoparticle	Al(OH <sub>3</sub> )	Urea	Deionized water
NF	Neat fabric	-	-	-	-
TF-RTM	Fabric treated in RTM	1 wt%	20 wt%	10 wt%	69 wt%
TF-scCO <sub>2</sub>	Fabric treated in scCO <sub>2</sub>	-	-	-	-



**Figure 3.** RTM experimental test rig

The temperature controlled scCO<sub>2</sub> reactor (Figure 4) consists of high purity carbon dioxide and purge pump. The fabric sample was immersed in the FR matrix and placed into the scCO<sub>2</sub> reactor in a fixed position. The temperature of the reactor was maintained at 100°C while the treated fabric was impregnated with scCO<sub>2</sub> for 2 h at pressure of 130 bar. Following a 10-min drying period at 110°C, the fabric samples were cured for 5 minutes at 140°C.



**Figure 4.** Illustration of scCO<sub>2</sub> method

The samples' ability to withstand flames was evaluated in accordance with ISO 3795 [42]. In this method, the samples were positioned horizontally in a U-shaped holder and free-ends were exposed to low-energy flame for 15 seconds (Fig. 5). The purpose of this test was to measure the rate of horizontal burning of textile composite structures found in transportation vehicles. The test detected whether and when the flame went out or how long it took for the flame to go a predetermined distance [7,43].



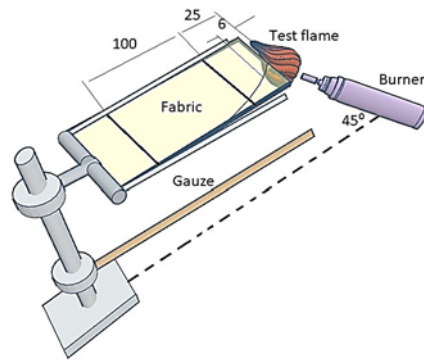


Figure 5. Schematic of the flammability test

In LOI tests, the fabric sample was inserted vertically into a glass cylinder, and the top edge of the specimen was ignited. To maintain the burning flame, a steady stream of a mixture of oxygen and nitrogen was supplied from the chamber's bottom. The oxygen content is gradually lowered until the sample extinguishes (Figure 6).

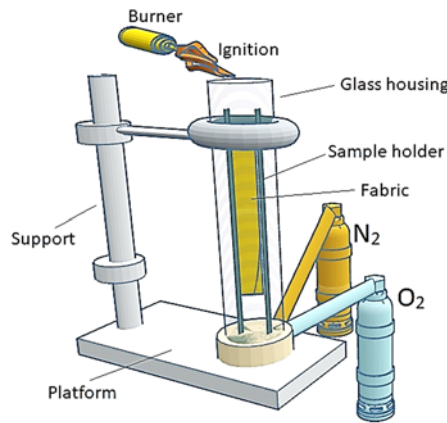


Figure 6. Fabric LOI test set-up

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

BR and LOI were considered as flame retardancy performance of NF and treated fabrics in RTM (TF-RTM) and scCO<sub>2</sub> (TF-scCO<sub>2</sub>). NF was taken as control sample and comparison was made in terms of aforementioned parameters. As shown in Figure 7, burning rate values of all samples were below 100 mm/min which is the upper limit for automotive technical textiles [44]. Thus, it can be said that burning rate results were in acceptable range for the automotive industry. The BR results present that the chemical treatment using two different methods provided considerable reduction in BR of fabric samples compared to that of NF. The average BR of TF-RTM was 25 mm/min subtending to a roughly 15% reduction compared to that of NF. However, TF-scCO<sub>2</sub> showed better performance in terms of BR corresponding to an average of 21 mm/min which is 16% lower than that of TF-RTM and 30% lower than that of NF.

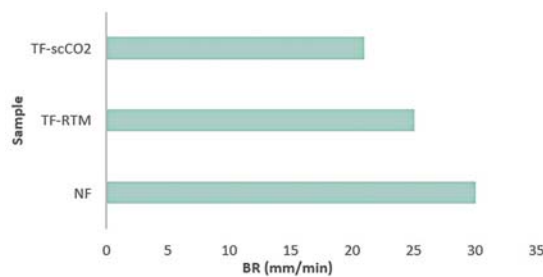


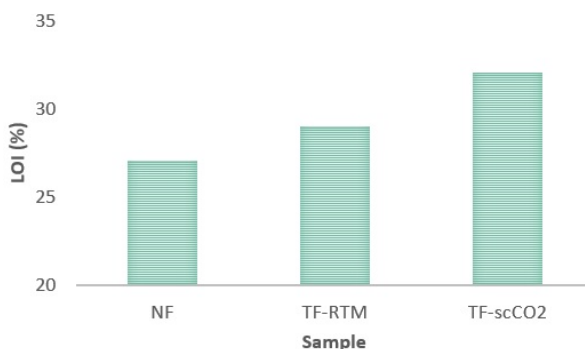
Figure 7. Average BR values of the samples

The average onset temperature and char yield of the samples burned in RTM and scCO<sub>2</sub> chamber are tabulated in Table 3. When compared to NF, the flame retardants decreased the textile's onset point, that is, weight loss in treated samples began earlier than that of NF. On the other hand, treatment process provides higher char yield values compared to that of NF. The higher char residues for treated samples may be ascribed to lower mass loss in BR and LOI tests.

**Table 3.** Data acquired from thermal analysis

Sample code	Onset of degradation (°C)	Average char residue at 700 °C (%)
NF	312.4	24.7
TF-RTM	299.7	32.1
TF-scCO <sub>2</sub>	278.3	40.2

A textile that is combustible has a LOI value of less than 21%, while a textile that is flame-retardant has a LOI value of 26% or more [29,35]. Referring to this information, all samples performed FR feature as seen in Figure 8. The average LOI values for NF, TF-RTM and TF-scCO<sub>2</sub> were 27%, 29% and 32%, respectively which were in accordance with BR values. Results confirm that chemical treatment of the NF using two different methods yields improvement in FR feature of the seat upholstery. TF-scCO<sub>2</sub> performed the best result both in BR and LOI tests showing that, apart from its other advantages, scCO<sub>2</sub> can also be good candidate in terms of enhancing FR performance of the fabrics. One of the reason for improving FR is the characteristics of ZnO metallic nanoparticles which may have acted as heat sink during the BR and LOI tests. Heat release rate was augmented due to good thermal conductivity of the ZnO nanoparticles leading to flame retardancy. The other reason for improving FR can be attributed to the decomposition of Al(OH<sub>3</sub>) at about 180 °C and giving off water so as to act as an extinguisher. In scCO<sub>2</sub> reactor, the sample fabrics were wrapped with the scCO<sub>2</sub> layer protecting the fibers being destroyed by the flame. Furthermore, TF-scCO<sub>2</sub> samples may function better due to their capacity to break down into additional gas products from the nitrogen atom. The higher FR performance of scCO<sub>2</sub> than that of RTM method may be attributed to the physical conditions of the RTM. In RTM, the fabric was impregnated by the chemical treatment mixture which was pumped and physically compressed onto the fabric sample leading to lower impregnation compared to that of scCO<sub>2</sub> method.



**Figure 8.** Average LOI vs. samples

#### 4. CONCLUSIONS

Automotive seat upholstery fabric samples were successfully treated with various chemicals to improve FR performance. Aforementioned concentrations of related chemicals provided considerable enhancement for both treated samples referring to BR and LOI tests. Two different impregnation methods of RTM and scCO<sub>2</sub> were utilized to carry out chemical treatment to fabric samples. The results showed that treated fabric in scCO<sub>2</sub> depicted the best LOI performance of 40%, char yield of 40.2% and BR of 21 mm/min among NF and TF-RTM. On the other hand, RTM also demonstrated better FR performance than that of NF. However, impregnation in scCO<sub>2</sub> was more influential on enhancement of FR performance than that of RTM due to limitation of RTM method's physical conditions. Thus, it can be said that methods and chemical treatment used in this study gave promising results for variety of applications in FR automotive technical textiles.

## 5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank Çukurova University, Scientific Research Projects for their financial support under Grant number: FBA-2024-16761.

## 6. REFERENCES

1. Kundu, C.K., Li, Z., Song, L., Hu, Y., 2020. An overview of fire retardant treatments for synthetic textiles: From traditional approaches to recent applications. *European Polymer Journal* 137, 109911.
2. Younis, A.A., 2017. Protection of polyester fabric from ignition by a new chemical modification method. *Journal of Industrial Textiles*, 47(3), 363-376.
3. Parvinzadeh, M., Ebrahimi, I., 2011. Atmospheric air-plasma treatment of polyester fiber to improve the performance of nanoemulsion silicone. *Applied Surface Science*, 257(9), 4062-4068.
4. Islam, S., 2008. Development of automotive textiles with antiodour/antimicrobial properties. MSc thesis, RMIT University, 104.
5. Kamath, M.G., Bhat, G.S., Parikh, D.V., Mueller, D., 2005. Cotton fiber nonwovens for automotive composites. *International Nonwovens Journal*, 14, 34-40.
6. Singha, K., 2012. Strategies for in automobile: strategies for using automotive textiles-manufacturing techniques and applications. *Journal of Safety Engineering*, 1(1), 7-16..
7. Başyigit, Z.Ö., 2019. Improvement of multifunctional automotive textile. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 29(2): 113-20.
8. Mezarciöz, S., Mezarciöz, S., Oğulata, R.T., 2018. Teknik tekstiller-otobüs koltuk döşemelerinde kullanımı ve uygulanan test yöntemleri. *Tekstil ve Mühendis*, (82), 36-41.
9. Vietro, N. De., Belforte, L., Lambertini, V., Placenza, B., Fracassi, F., 2015. Plasma treatment for preparing durable water repellent and anti-stain synthetic fabrics for automotive applications. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 5(3), 103-109.
10. Meccait, D., Ilgaz, S., Duran, D., Başal, G., Gülümser, T., Tarakçıoğlu, I., 2007. Teknik tekstiller ve kullanım alanları (Bölüm 2). *Tekstil ve Konfeksiyon*, 2, 79-82.
11. Conway, R., 2016. Coating of textiles (Chapter 8). *Handbook of Technical Textiles*. 2nd edition, Horrocks, A.R., Anand, S. C. (editors), Woodhead Publishing Series, 211-229.
12. Toprakaya, D., Orhan, M., Güneşoğlu C., 2002. Polyester esaslı farklı yapıdaki otomotiv koltuk döşeme kumaş özelliklerinin karşılaştırılması. *Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, Bursa.
13. Walter, F., Mike H., 2001. Product engineering–interior trim. *Textiles in Automotive Engineering*, Walter, F., Mike H. (editors), Woodhead Publishing Series, 194-226.
14. Singha, K., 2012. A Review on coating & lamination in textiles: processes and applications. *American Journal of Polymer Science*, 2(3), 39-49.
15. Doba Kadem, F., Ergen, A., 2011. Investigation of some comfort properties of fabrics laminated with different types of membranes. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 21(4), 323-7.
16. Bulut, Y., Sülar, V., 2010. Kaplama veya laminasyon teknikleri ile üretilen kumaşların genel özellikleri ve performans testleri. *The Journal of Textiles and Engineers*, 6(16), 70-71.
17. Schwarz, I.G., Kovačević, S., Kos, I., 2015. Physical-mechanical properties of automotive textile materials. *Journal of Industrial Textiles*, 45(3), 323-337.
18. Bradshaw, H., 1927. Coated textiles. *Industrial and Engineering Chemistry*, 19(10), 1109-1110.
19. Ekici, B., Kentli, A., Küçük, H., 2012. Improving sound absorption property of polyurethane foams by adding tea-leaf fibers. *Archives of Acoustics*, 37(4), 515-520.
20. Li, Y.Z., 2019. Study of fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels. *Fire Safety Journal*, 110, 102871.
21. Didane, N., Giraud, S., Devaux, E., 2012. Fire performances comparison of back coating and melt spinning approaches for PET covering textiles. *Polymer Degradation and Stability*, 97(7), 1083–1089.
22. Zhang, W., Zheng, C., Zhang, Y., Guo, W., 2019. Preparation and characterization of flame-retarded poly(butylene terephthalate)/poly(ethylene terephthalate) blends: Effect of content and type of flame retardant. *Polymers*, 11(11), 1784.
23. Wu, J.N., Chen, L., Fu, T., Zhao, H.B., Guo, D.M., Wang, X.L., Wang, Y.Z., 2018. New application for aromatic Schiff base: High efficient flame-retardant and anti-dripping action for polyesters. *Chemical Engineering Journal*, 336, 622-632.

24. Pan, Y., Liu, L., Song, L., Hu, Y., Wang, W., Zhao, H., 2019. Durable flame retardant treatment of polyethylene terephthalate (PET) fabric with cross-linked layer-by-layer assembled coating. *Polymer Degradation and Stability*, 165, 145-152.
25. Ni, Y.P., Wu, W.S., Chen, L., Zhao, X., Qin, Z.H., Wang, X.L., Wang, Y.Z., 2020. How Hydrogen bond interactions affect the flame retardancy and anti-dripping performances of PET? *Macromolecular Materials and Engineering*, 305(1), 1-14.
26. Fabia, J., Gawłowski, A., Rom, M., Ślusarczyk, C., Brzozowska-Stanuch, A., Sieradzka, M., 2020. PET fibers modified with cloisite nanoclay. *Polymers*, 12(4), 774.
27. Yoshioka-Tarver, M., Condon, B.D., Santiago Cintrón, M., Chang, S., Easson, M.W., Fortier, C.A., Madiseon, C.A., Bland, J.M., Nguyen, T.M., 2012. Enhanced flame retardant property of fiber reactive halogen-free organophosphonate. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51(34), 11031-11037.
28. Nguyen, T.M., Chang, S., Condon, B., Slopek, R., Graves, E., Yoshioka-Tarver, M., 2013. Structural effect of phosphoramidate derivatives on the thermal and flame retardant behaviors of treated cotton cellulose. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(13), 4715-4724.
29. Chang, S., Condon, B., Nam, S., 2020. Development of flame-resistant cotton fabrics with casein using pad-dry-cure and supercritical fluids methods. *International Journal of Materials Science and Applications*, 9(4), 53.
30. Yin, C., Li, J., Xu, Q., Peng, Q., Liu, Y., Shen, X., 2007. Chemical modification of cotton cellulose in supercritical carbon dioxide: Synthesis and characterization of cellulose carbamate. *Carbohydrate Polymers*, 67(2), 147-154.
31. Kraft, G., Muss, C., Adelwohrer, C., Roder, T., Rosenau, T., 2004. Treatment of cellulosic fibers with supercritical carbondioxide. *Lenzinger Berichte*, 83, 117-121.
32. Tsiopstias, C., Panayiotou, C., 2011. Thermal stability and hydrophobicity enhancement of wood through impregnation with aqueous solutions and supercritical carbon dioxide. *Journal of Materials Science*, 46(16), 5406-5411.
33. Van Ginneken, L., Weyten, H., 2003. Particle formation using supercritical carbon dioxide. *Carbon Dioxide Recovery and Utilization*, 123-136.
34. De Gooijer, J.M., Koning, C.E., 2006. Chemical Modification of polymers in supercritical carbon dioxide. *Carbon Dioxide Recovery and Utilization*, 273-301.
35. John, M.J., 2019. Flammability performance of biocomposites (Chapter 2). *Green Composites for Automotive Applications*. Georgios, K., Arlindo, S. (editors), Woodhead Publishing Series, 43-58.
36. Gomez, C., Salvatori, D., Caglar, B., Trigueira, R., Orange, G., Michaud, V., 2021. Resin transfer molding of High-fluidity polyamide-6 with modified glass-fabric preforms. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 147.
37. Liu, B., Bickerton, S., Advani, S.G., (1996). Modelling and simulation of resin transfer moulding (RTM)-gate kontrol, venting and dry spot prediction. *Composites Part A*, 27(2), 135-141.
38. Arulappan, C., Duraisamy, A., Adhikari, D., Gururaja, S., 2015. Investigations on pressure and thickness profiles in carbon fiber-reinforced polymers during vacuum assisted resin transfer molding. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(1): 3-18.
39. Piperopoulos, E., Scionti, G., Atria, M., Calabrese, L., Proverbio, E., 2022. Flame-retardant performance evaluation of functional coatings filled with  $Mg(OH)_2$  and  $Al(OH)_3$ . *Polymers*, 14(3), 1-16.
40. Elbasuney, S., 2017. Novel multi-component flame retardant system based on nanoscopic aluminium-trihydroxide (ATH). *Powder Technology*, 305, 538-545.
41. White, S., 1998. Smoke suppressants. *Plastics Additives*, Pritchard, G. (editor), Polymer Science and Technology Series, Springer, 576-583.
42. International Organization for Standardization, 1989. ISO 3795: Road vehicles, and tractors and machinery for agriculture and forestry (determination of burning behaviour of interior materials). <https://www.iso.org/standard/9328.html>, Access date: 11/02/2024.
43. Taj, A., Swamy, R.P., Naik, K., Bharath, K.N., 2023. Effect of nano-filler aluminum oxide and graphene on flammability properties of kenaf epoxy composites. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 104(1), 143-154.
44. JSP International Group, Ltd. ARPRO fire resistant properties. <https://www.arpro.com/contentassets/d304d579bde242f1bec0a362fd9b85f7/arpro-fire-resistanceproperties-v04-en.pdf>, Access date: 15/02/2024.

## Optimal Design and Analysis of High-Frequency Isolation Transformer for Switched-Mode Power Converters

Abdurrahman YAVUZDEĞER<sup>1,a</sup>, Burak ESENBOĞA<sup>2,b</sup>, Tuğçe DEMİRDELEN<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup>Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Adana, Türkiye

<sup>2</sup>Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Adana Türkiye

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0001-8058-4672; <sup>b</sup>ORCID: 0000-0002-7777-259X; <sup>c</sup>ORCID: 0000-0002-1602-7262

### Article Info

Received : 21.02.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1559912

### Corresponding Author

Abdurrahman YAVUZDEĞER

ayavuzdeger@atu.edu.tr

### Keywords

High-frequency transformer

Modeling

Electromagnetic

ANSYS/Maxwell

Loss analysis

Flyback

**How to cite:** YAVUZDEĞER, A., ESENBOĞA, B., DEMİRDELEN, T., (2024). Optimal Design and Analysis of High-Frequency Isolation Transformer for Switched-Mode Power Converters. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 585-598.

### ABSTRACT

High-frequency (HF) transformers have gained great interest in recent years due to the advent of powerful soft magnetic materials with low core loss in semiconductor power switches. Also, the optimal design of the HF transformer is a significant issue for high-performance energy conversion systems. In this paper, a 40W 50/12.5/25 V universal input and two output discontinuous-conduction mode (DCM) flyback transformer is designed by using mathematical calculations and analyzed via 3D ANSYS/Maxwell simulation including electromagnetic and loss analysis. It is shown that the simulation results accounting for hysteresis losses, eddy current losses, copper losses, and magnetic flux density determine the accuracy of the mathematical model calculation. Analyses are performed at 100 kHz frequency levels. Results obtained will include core magnetic flux density, core/copper losses, leakage/magnetizing inductances, windings parasitic capacitances, input/output voltage, current values, and all design parameters. Finally, the proposed HF transformer's overall efficiency is calculated and presented. Significantly, the HF transformer achieves 97.8% efficiency thanks to the transformer's core and coil selection, B-H and B-P characteristics, one-to-one dimension design, and mesh operation. The dynamic and mathematical results of the designed transformer demonstrate the design and efficiency success.

## Anahtarlamalı Güç Dönüştürücüleri için Yüksek Frekanslı İzolasyon Transformatorünün Optimum Tasarımı ve Analizi

### Makale Bilgileri

Geliş : 21.02.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1559912

### Sorumlu Yazar

Abdurrahman YAVUZDEĞER

ayavuzdeger@atu.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Yüksek frekans transformator

Modelleme

Elektromanyetik

ANSYS/Maxwell

Kayıp analizi

Geri dönüşlü

**Atf şekli:** YAVUZDEĞER, A., ESENBOĞA, B., DEMİRDELEN, T., (2024). Optimal Design and Analysis of High-Frequency Isolation Transformer for Switched-Mode Power Converters. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 585-598.

### ÖZ

Yüksek frekanslı (YF) transformatorler yarı iletken güç anahtarlarında düşük çekirdek kaybına sahip güçlü yumuşak manyetik malzemelerin ortaya çıkması nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Ayrıca YF transformatorünün optimal tasarımı, yüksek performanslı enerji dönüşüm sistemleri için önemli bir konudur. Bu makalede, 40W 50/12.5/25 V tek girişli ve iki çıkışlı süresiz iletim modlu (SIM) bir geri dönüş transformatorü matematiksel hesaplamalar kullanılarak tasarlanmış ve elektromanyetik ve kayıp analizini içeren 3B ANSYS/Maxwell simülasyonu ile analiz edilmiştir. Histeresis kayıplarını, girdap akımlarını, bakır kayıplarını ve manyetik akı yoğunluğunu hesaba katan simülasyon sonuçlarının matematiksel model hesaplamasının doğruluğunu belirlediği göstermektedir. Analizler 100 kHz frekans seviyelerinde gerçekleştirilir. Elde edilen sonuçlar çekirdek manyetik akı yoğunluğunu, çekirdek/bakır kayıplarını, sızıntı/mıknatıslama endüktanslarını, sargıların parazit kapasitanslarını, giriş/çıkış voltajını, akım değerlerini ve tüm tasarım parametrelerini içerecektir. Son olarak önerilen YF transformatorünün genel verimliliği hesaplanmış ve sunulmuştur. YF transformatorünün çekirdek ve bobin seçimi, B-H ve B-P özellikleri, birebir boyut tasarımı ve ağ çalışması sayesinde %97,8 verim elde etmesi dikkate değerdir. Tasarlanan transformatorün dinamik ve matematiksel sonuçları, tasarım ve verimlilik başarısını ortaya koymaktadır.



## 1. INTRODUCTION

Transformers are one of the main components of the electrical energy transmission and distribution system. Thanks to transformers, electricity transmission, and distribution have become easier and more useful.

In recent times, there has been a notable rise in the variety of transformers employed in small and medium-scale power applications. Among these, high-frequency transformers stand out as one of the most crucial types [1]. These transformers are widely used in the field of power electronics, electric vehicle and renewable energy applications [2-8]. These transformers are preferred in power electronics in terms of reliability, stability, and quality. They are also very useful in terms of size, cost, and efficiency. They are generally small in size. Therefore, it is both less costly and more convenient for power electronics. Researchers have done a lot of work to minimize core loss for high-frequency transformers and optimize properties such as efficiency and cost [9-12].

It is investigated the effect of wire type and interleaved winding structure on the electric field distribution of medium frequency transformers using the 2D finite element method (FEM). The study presents the six different forms of non-interleaved windings with various wire types. The maximum electric field intensities are measured and compared [13]. A high-frequency transformer (HFT) is of great importance in obtaining a high-efficiency Solid State Transformer (SST). And for this, a multi-purpose optimization algorithm has been developed that minimizes the core volume and minimizes the total losses that may occur in the transformer, and the total cost of the HFT [14]. An HFT is used for DC/DC conversion. The transformer has dry-cast windings and is designed for DC system voltages up to 50kV. It has been observed that the individual cast LV and HV windings provide good efficiency with insulation size and performance. The AC insulation test was carried out for 70 kV and the LI voltage test for 150 kV. At these voltages, careful grading down to the PD test voltage is important, to prevent discharge in air. In addition, careful insulation of the HV terminals near the grounded components of the HFT is also required [15].

It is presented different core and coil materials under the variable medium frequencies [16]. In a frequency range of up to 10kHz, a performance factor is used to determine the acceptability of each material. From the result of these evaluations, it has been shown that amorphous and nanocrystalline materials perform better in high-frequency applications above 1 kHz, and amorphous materials can outperform SiFe materials due to losses at low frequencies (60-200 Hz). High-frequency transformers (HFT) are used in a lot of modern-day applications. Ordinary winding topology is being used in most of these high-frequency transformers and because of that, the magnetic core saturates without guaranteeing the maximum power transfer (DWT). To get over this issue, it is introduced a new distributed winding topology. To apply this DWT the magnetic core should be changed in terms of its shape and size to optimize. It is proven that DWT-based HFT transfers %48.37 more power than the regular one [17]. Because of the lack of freedom and difficulty in obtaining the optimal solution fast and correctly the traditional converter is not optimal. To overcome this issue an HFT design that uses the ALO algorithm is introduced [18]. By using different conductors and winding arrangements on an HFT, the skin effect can be studied. AC winding resistance increases and the leakage inductance decreases with the skin effect as the frequency goes higher. In wire conductors, the shape of the wires can affect the parasitic and loss behavior. Skin effects behavior in the conductor changes with the shape of the wires as well. This study shows that by changing the square shape to a circular shape the winding loss and the leakage inductance increase up to 2 times and 1.2 times respectively [19]. It is determined the best high-frequency transformer design for maximum performance. Magnetic core material, precisely estimating the core loss, and experimental methodologies for core loss measurement are discussed. In addition, the performance of a transformer is determined by winding loss or copper loss, leakage inductance, leakage resistance, stray capacitance, and thermal analysis. All requirements that are described, are critical to optimize the design of a high-frequency transformer to get high power density and efficiency [20]. It is examined and analyzed high-frequency transformer leakage inductances and parasitic capacitances for different windings and structures. It is used the finite element method for the analysis of these transformers. These results, looking at the relationship and balance between leakage inductance and parasitic capacitance values, have helped in classifying and designing the structure of this transformer [21]. It is mentioned the overall effect of interleaving on leakage induction, a general method used to reduce induction and may also cause increased parasitic capacitance. One of the parts is the plane transformation applications in the high voltage area and the design of the exchange between all interference. It suggests the partially reserved transformer structure improved for high-voltage and high-frequency multiple outputs [22]. It is conducted to design a high-frequency high voltage transformer. Core

selection, losses and thermal model for a high-frequency transformer in LLC resonant converters are studied. 3F4 ferrite core for the high-frequency transformer, the design is realized by using E38/9/15 core. This high-frequency transformer design is installed in an LLC resonant converter at 800 V [23]. A medium frequency transformers model with a complete analytical steady-state thermal network has been proposed and experimentally verified using finite element technique analysis. The similarities between the FEM model and analytical model show that the model built is extremely accurate. Due to the low quality of empirical natural air convection models and their restricted applicability on the specified geometrical details, there were several issues with the calculated and measured temperatures. Although analytical models are quick to implement, they must be rigorously connected with experimental data [24]. It is suggested a novel data-driven technique for extracting FEM simulation data of high-frequency transformers featuring litz-wire windings. By homogenizing these windings, computational expenses are significantly diminished. The findings show that the double 2-D FEM model introduced, accounting for inner and outer core window length factors, adeptly captures the three-dimensional nature of leakage inductance within high-frequency transformers [25]. It is introduced a design for a multi-winding (HFT) aimed at a multiport unified charge converter. It includes the development of a loss model and provides a step-by-step procedure for designing the multi-winding transformer [26]. Another study presents the development of a model for HFT windings. This model enables the calculation of voltage distribution along the winding and the identification of its resonance frequencies [27].

Upon reviewing the existing literature, it becomes evident that high-frequency (HF) transformers have been extensively studied and applied across various power applications. However, a noticeable gap exists concerning detailed design methodologies and electromagnetic analyses specifically tailored for HF transformers. While numerous studies are exploring their functionalities and applications, there's a scarcity of in-depth examinations focusing on the intricate design and electromagnetic behaviors inherent to HF transformers. This void underscores the need for further research and analysis in this specialized domain to advance the understanding and optimization of HF transformer performance. Thus, the main focus of this study is;

- to calculate the design parameters and core losses of the HF transformer thanks to the mathematical model and realist simulation study.
- to present the more efficient HF transformer model.
- to create a 3D model and realize the electromagnetic analysis with ANSYS/Maxwell.
- to verify the effectiveness of the mathematical model with the electromagnetic analysis.

In this paper, the mathematical model of a HF transformer is discussed in detail. All parameters such as power, weight and electromagnetic calculations are given thanks to the mathematical model. Also, the proposed HF transformer is modeled and analyzed via ANSYS/Maxwell program. Electromagnetic analysis results present the losses, magnetic flux distribution of the core and magnetic field distribution of the transformer. Thus, the efficiency and performance analysis of the HF transformer is performed before the transformer is produced.

## 2. MATERIAL AND METHOD

### 2.1. Structure Analysis of High-Frequency Transformers

A transformer is an electrical machine that transfers energy from one electrical circuit to the next or numerous circuits. High-frequency transformers are one of the sorts, with frequencies ranging from 10 kHz to 1MHz. There are numerous advantages to using a higher frequency for this high-frequency transformer. The transformer's size is the first of these. The smaller the transformer is for any power rating, the greater the frequency. Second, because the transformer is smaller, less copper wire is required, which reduces losses and helps the high-frequency transformer to be more efficient and operate. The use of Litz wire in high-frequency transformers is an important factor in reducing the skin effect. Because of this to lessen the skin effect, Litz wire is preferred. High-frequency transformers are classified into three types as flyback transformer, push-pull transformer and forward transformer.

A flyback transformer is a hollow core inductor with a combined inductor. Once the input voltage is supplied to the primary winding throughout each cycle, energy is contained in the cavity of the core. To energize the load, this voltage is subsequently transmitted to the secondary winding. Voltage transformation

and circuit isolation are provided by flyback converters shown in Figure 1. The transformer isolation or turn-ratio voltage transformation is provided by the flyback topology, which is based on a buck-boost topology.

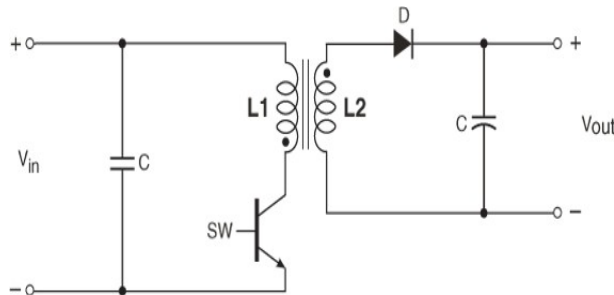


Figure 1. Typical flyback converter schematic

A switch controls the primary winding of the flyback transformer. The main inductance causes the current to build up in a ramp when the switch is turned on. The creation of secondary current, which would eventually oppose the primary current ramp, is prevented by an integrated diode linked in series with the secondary winding. The current in the main decreases to zero when the switch is switched off. As the magnetic field in the core shrinks, the energy contained in it is released to the secondary. The output winding voltage rises rapidly (typically less than a microsecond) until it is restricted by the load circumstances.

Flyback transformers basically work in two modes. The secondary current will never reach zero only when the FET (Field Effect Transistor) SW return is turned on again until all of its energy has been transferred to the secondary. A continuous transmission mode (CCM) waveform is depicted in Figure 2.

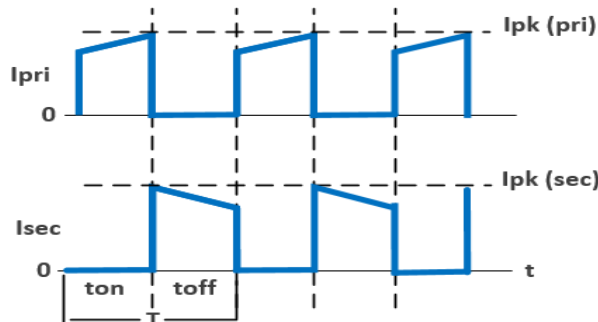


Figure 2. Continuous current mode (CCM) flyback current waveforms

If the stored return energy discharges fully to the secondary before the FET comes on once again, the secondary current hits zero before the period expires, resulting in a "idle time" (tde) during the cycle. This kind of transmission is known as discontinuous transmission mode (DCM). A DCM waveform is illustrated in Figure 3.

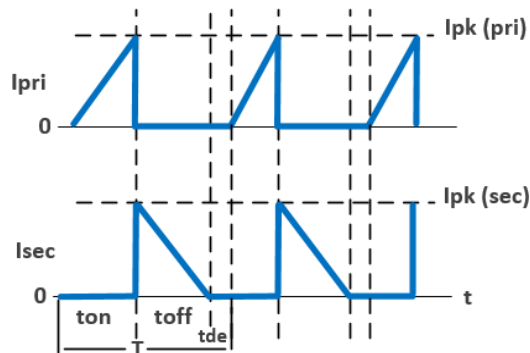


Figure 3. Discontinuous current mode (DCM) flyback current waveforms



In forward mode DC-DC converters, forward transformers are utilized for circuit isolation and voltage conversion. In forward transformers, the core isn't employed for energy storage. When the switch is turned, both the primary and secondary transmit at the same time, and the energy is processed straight through the transformer.

One of the first switching topologies is the push-pull transformer. With a single input, this transformer can produce numerous outputs. When the transformer's winding turn ratio is changed, the output voltages might be greater or lesser than the input voltages. Therefore, a push-pull converter is one in which currents are constantly pushed into and drawn from something. This is also a type of flyback transformer or an inductor. Current is constantly pushed and drawn from the transformer. With this push-pull method, the transformer transfers flux from the primary coil to the secondary coil, providing a kind of isolated voltage.

## 2.2. Electromagnetic Analysis via ANSYS/Maxwell

The ANSYS/Maxwell software tackles electromagnetic field issues across a substantial spatial domain by employing Maxwell's equations, considering user-defined starting conditions within suitable boundary parameters. It utilizes the finite element method (FEM) to address electrical or magnetic field challenges, employing various design and solver types tailored to specific equations. The analysis involves creating a mesh of basic units for the model, with the meshing process requiring careful parameter input to ensure optimal analysis outcomes. Overly complex meshes can lead to prolonged analysis times and potential computational capacity constraints, while overly simplified meshes may compromise analysis sensitivity. Correctly identifying current excitation in analyses involving electrical currents can pose challenges for many users. This study aims to address such challenges and highlight key considerations for ANSYS/Maxwell usage through a step-by-step analysis example utilizing a magnetostatic solver.

Depending on the choice of the class included in the program, the appropriate equation sets and terms are solved. There are three different design types (design types) available in ANSYS/Maxwell.

## 2.3. Mathematical Modeling

The mathematical model is realized for isolated discontinuous current flyback high-frequency transformer. First, it is necessary to consider some parameters which are already chosen. These parameters can be chosen according to the suitable usage area for any power application. Table 1 present the proposed HF transformer parameter to use for a HF step-down dc-dc converter.

**Table 1.** A 50/12.5/25 V single-phase flyback high-frequency transformer defined parameters

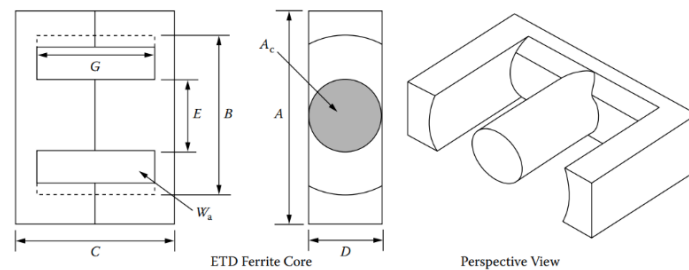
Symbols	Parameters	Units	Values
$V_{in-min}$	Minimum Input Voltage	V	50
$V_{in-max}$	Maximum Input Voltage	V	75
$V_{in-nominal}$	Nominal Input Voltage	V	12.5
$V_{O1}$	Output voltage 1	V	12.5
$I_{O1}$	Output Current 1	amps	2
$V_{O2}$	Output voltage 2	V	25
$V_{O2}$	Output Current 2	amps	0.5
$K_u$	Window Utilization	-	0.29
$f$	Frequency	kHz	20
$R_{eq}$	Equivalent Resistance	$\Omega$	1
$D_{max}$	Max Duty Ratio	amps	0.5
$D_w$	Dwell Time Duty Ratio	watts	0.1
$\alpha$	Regulation	%	1
$B_m$	Operating Flux Density	Tesla	0.3

American Wire Gauge (AWG) size and feature standard contain frequency values. By looking at the corresponding AWG according to the frequency value, certain parameters wire diameter, bare wire area, and resistance values are determined. The parameters are selected according to this standard. Table 2 presents the selected parameters.

**Table 2.** Selected wire parameters according to AWG standard

AWG	Selected wire size
Diameter (mm)	0.91186
Area (mm <sup>2</sup> )	0.653
Resistance (ohm/km)	26.407
Max. current (A)	1.8
Max Frequency for 100% Skin Depth	21kHz
Bare Area (10 <sup>-3</sup> cm <sup>2</sup> )	6.531

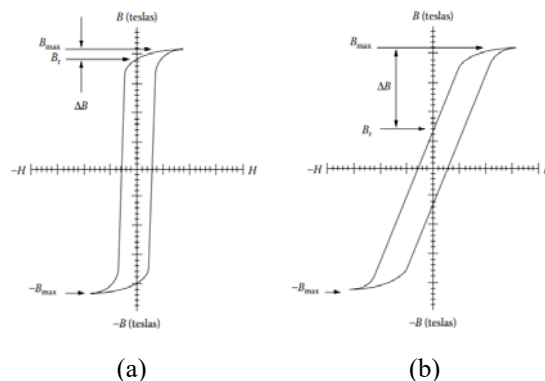
It has been chosen an ETD core with a core geometry that is comparable to core geometry ( $K_g$ ). The core geometry for ETD ferrite cores as shown in Figure 4. Size and design data for ETD ferrite cores are given Table 3 and Table 4, respectively. EDT-39 is selected according to  $K_g$  parameters. It is the good option for choosing core type of high frequency flyback transformer.



**Figure 4.** The core geometry for ETD ferrite cores [28]

An air gap put into the core has a strong demagnetizing impact, causing the hysteresis loop to "shearing over" and the permeability of high-permeability materials to drop significantly. Excitation by direct current maintains the same pattern. On the other hand, the introduction of a tiny air gap, has a much smaller impact on the core bias than on the magnetization properties. The amount of the air gap effect is affected by the length of the mean magnetic path and the uncut cores properties too. With a larger magnetic flux path, the drop in permeability is less apparent, but it is more noticeable in a large permeability core with a low coercive force.

A comparison of a common toroidal core B-H loop with and without a gap is shown in Figure 5. The gap expands the magnetic path's length. Due to highly inductive circuit, once the voltage  $E$  is impressed throughout a transformer's primary winding, the resultant current, will be minimal. Once the air gap is the smallest for a given core size, maximum inductance happens.



**Figure 5.** Comparing magnetic materials a) with gap, b) without a gap [28]

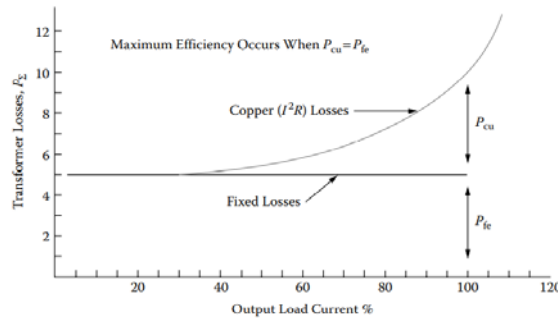
**Table 3.** Size data for ETD ferrite cores

ETD, Ferrite Cores (Ferroxcube)						
Part No.	A (cm)	B (cm)	C (cm)	D (cm)	E (cm)	G (cm)
ETD-34	3.500	2.560	3.460	1.110	1.110	2.360
<b>ETD-39</b>	<b>4.000</b>	<b>2.930</b>	<b>3.960</b>	<b>1.280</b>	<b>1.280</b>	<b>2.840</b>
ETD-44	4.500	3.250	4.460	1.520	1.520	3.220

**Table 4.** Design data for ETD ferrite cores

ETD, Ferrite Cores (Ferroxcube)											
Part No.	$W_{tcu}$ (grams)	$W_{tfe}$ (grams)	MLT (cm)	MPL (cm)	$\frac{W_a}{A_c}$	$A_c$ ( $cm^2$ )	$W_a$ ( $cm^2$ )	$A_p$ ( $cm^4$ )	$K_g$ ( $cm^5$ )	$A_t$ ( $cm^2$ )	*AL (mh/1K)
ETD-34	43.4	40.0	7.1	7.87	1.757	0.974	1.711	1.6665	0.0914	53.4	1182
<b>ETD-39</b>	<b>69.3</b>	<b>60.0</b>	<b>8.3</b>	<b>9.22</b>	<b>1.871</b>	<b>1.252</b>	<b>2.343</b>	<b>2.9334</b>	<b>0.1770</b>	<b>69.9</b>	<b>1318</b>
ETD-44	93.2	94.0	9.4	10.30	1.599	1.742	2.785	4.8515	0.3596	87.9	1682

Input power is not entirely passed to the output load in high frequency transformers. The loss power, which consists mostly of core loss and copper loss, is the difference between input power  $P_{in}$  and output power  $P_{out}$ . The efficiency of a transformer serves as a standard for its performance. The overall loss will be the least and the efficiency will be the maximum when core loss is equal to copper loss. Transformer losses versus output load current are shown in Figure 6.



**Figure 6.** Transformer losses versus output load current [17]

The copper losses is exactly proportional to the properties of material. A design is influenced by a number of elements, size, material availability, temperature rise and cost. The use of iron alloys and ferrites in the construction of power inductors provides substantial advantages. The magnetic core material properties are given in Table 5. As can be seen in the Table 5, the effect of the material used on the flux density is compared. Ferrite was chosen as the most suitable material among the compared materials.

The mathematical model of the transformer yields the specifications for a 50/12.5/25 V flyback-type high-frequency transformer. Table 6 provides comprehensive details regarding the transformer's weight, electrical characteristics, and electromagnetic properties.

**Table 5.** Magnetic core material properties

Material name	Composition	Initial permeability $\mu_i$	Flux density $B_s$	Curie temperature °C	Density grams/ $cm^3$ $\delta$
Silicon	3-97 SiFe	1500	1.5-1.8	750	7.63
Orthonol	50-50 NiFe	2000	1.42-.158	500	8.24
Permalloy	80-20 NiFe	25000	0.66-0.82	460	8.73
Amorphous	81-3.5 FeSi	1500	1.5-1.6	370	7.32
Amorphous	66-4 CoFe	800	0.57	250	7.59
Amorphous ( $\mu$ )	73-15 FeSi	30000	1.0-1.2	460	7.73
<b>Ferrite</b>	<b>MnZn</b>	<b>2500</b>	<b>0.5</b>	<b>&gt;230</b>	<b>4.8</b>

**Table 6.** The design parameters of 50/12.5/25 V single-phase flyback-type high frequency transformer by using a mathematical model of the transformer

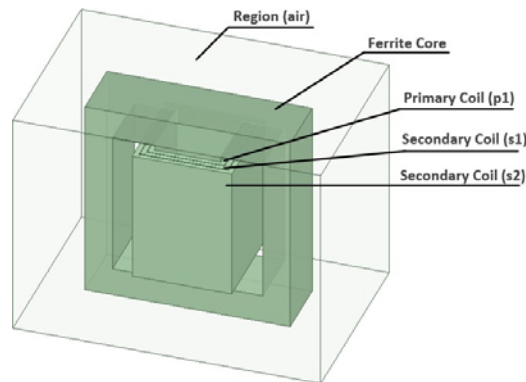
Symbols	Parameters	Units	Values
$\delta$	Skin Depth	cm	0.0468
$D_{AWG}$	Wire Diameter	cm	0.0936
$A_w$	Base Wire Area	mΩ/cm	263.9
T	Time Period	sec	$5 * 10^{-5}$
$t_{on}$	Maximum Transistor on Time	sec	$2.5 * 10^{-5}$
$P_{o1}$	Power out in secondary No.1	watts	27
$P_{o2}$	Power out in secondary No.2	watts	13
$P_T$ or $P_{omax}$	Total Secondary Power	watts	40
$I_{pri,max}$	Max Primary Current	amps	0.88
$I_{pri,pk}$	Primary Peak Current	amps	3.55
$I_{pri,RMS}$	Primary RMS Current	amps	1.45
$P_{in,max}$	Maximum Input Power	watts	44.44
$R_{in,eq}$	Equivalent Input Resistance	ohms	56.25
L	Primary Inductance	μH	351
W-S	Energy Handling Capability	w – s	0.0022
W-S	Energy Handling Capability	w – s	0.0022
$K_e$	Electrical Condition	-	$5.22 * 10^{-5}$
$K_g$	Core Geometry	cm <sup>5</sup>	0.0946
J	Current Density	amps/cm <sup>2</sup>	174.15
$A_{pw}(B)$	Primary Wire Area	cm <sup>2</sup>	$8.3 * 10^{-3}$
$S_{np}$	The Required Number of Primary Strands	-	2
$N_p$	The Number of Primary Turns	turns	26
$l_g$	The Required Gap	cm	0.0266
mils	The Equivalent Gap in Mils	-	10.472
F	Fringing Flux Factor	-	1.1275
$N_{np}$	The New Number of Turns $N_{np}$ , by Inserting The Fringing Flux, F	turns	23
$B_{pk}$	The Peak Flux Density	teslas	0.382
μΩ/cm	The primary, The new μΩ/cm	-	131.95
$P_p$	Primary Copper Loss	watts	0.053
$N_{s01}$	The Secondary Turns	turns	5
$I_{s01(pk)}$	Secondary Peak Current	amps	10
$I_{s01(rms)}$	The Secondary rms Current	amps	3.65
$A_{sw01(B)}$	The Secondary Wire Area	cm <sup>2</sup>	0.0210
$S_{ns01}$	Required Number of Secondary Strands	-	3
$(S_{01})\mu\Omega/cm$	The $S_{01}$ secondary, μΩ/cm	-	82.2
$R_{s01}$	The Winding Resistance	ohms	0.0037
$P_{s01}$	The Secondary Copper Loss	watts	0.0487
$N_{s02}$	The Secondary Turns	turns	10
$I_{s02(pk)}$	The Secondary Peak Current	amps	2.5
$I_{s02(rms)}$	The Secondary rms Current	amps	0.913
$A_{sw02(B)}$	The Secondary Wire Area	cm <sup>2</sup>	0.00524
$S_{ns02}$	The Required Number of Secondary Strands	-	1
$(S_{02})\mu\Omega/cm$	The, $S_{02}$ , Secondary, μΩ/cm	-	263.9
$R_{s02}$	The Winding Resistance	ohms	0.0219
$P_{s02}$	The Secondary Copper Loss	watts	0.0183
$K_u$	The Window Utilization	-	0.2086
$P_{cu}$	The Total Copper Loss	watts	0.12
$\alpha$	The Regulation, $\alpha$ , For this design	%	0.30
$R_p$	Primary Winding Resistance	ohms	0.025
$B_{ac}$	The AC Flux Density	teslas	0.191
WK	The Watts per Kilogram	watts/kg	12.4
$P_{fe}$	The Core Loss	watts	0.7443
$P_{\Sigma}$	The Total Loss, Core $P_{fe}$ and Copper $P_{cu}$ , in watts	watts	0.8643
$\Psi$	The Watt Density	watts/cm <sup>2</sup>	0.0124

### 3. ELECTROMAGNETIC ANALYSIS AND RESULTS

An analysis is conducted on a discontinuous high-frequency flyback transformer using electromagnetic methods. Initially, the transformer's characteristics are determined through a mathematical model, which includes losses (such as copper, core, and stray losses), transformer weight (including core and winding weights), and the dimensions of the core and windings. Subsequently, these parameters are optimized for weight and efficiency. Following optimization, the transformer is modeled in the ANSYS/Maxwell program, which is tailored for designing and analyzing electrical machines from an electromagnetic and thermal perspective. The design process for the transformer's core and windings will be elaborated upon in the subsequent steps. All the procedures are outlined below:

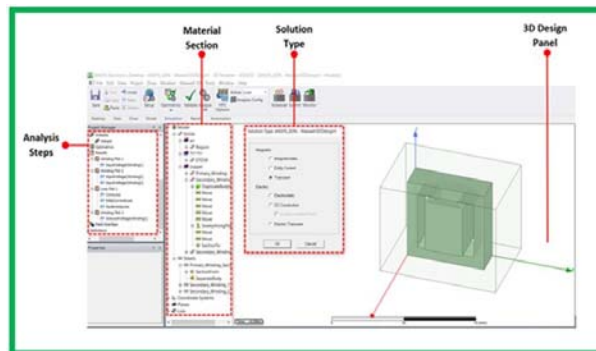
- Choosing the simulation type (electromagnetic, transient)
- Draw 3D the geometry
- Assign the materials
- Specify the boundary
- Assign the excitations and coil terminals
- Mesh operations
- Determine the solution setup
- Analyze Time Calculation
- Getting results and diagrams

The analysis of the high-frequency flyback transformer is conducted using the ANSYS/Maxwell simulation program in discontinuous mode. To accurately represent the transformer's electromagnetic nature, the solution type is selected as magnetic-transient, and the resulting analysis outcomes are time-dependent. The transformer's core and windings are then modelled using 3D-solid objects. Figure 7 displays the resulting model of the designed transformer.



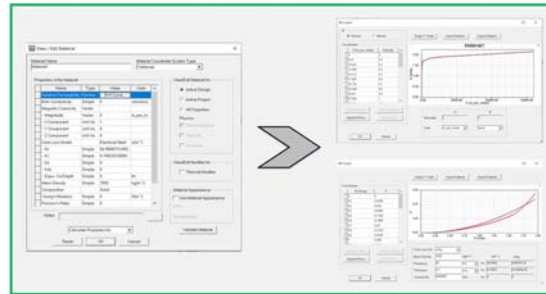
**Figure 7.** ANSYS Maxwell design of flyback high-frequency transformer

Following this, the transformer is structured in a 3D format, allowing for the design of its core, primary, and secondary windings utilizing Maxwell-3D, as illustrated in Figure 8.



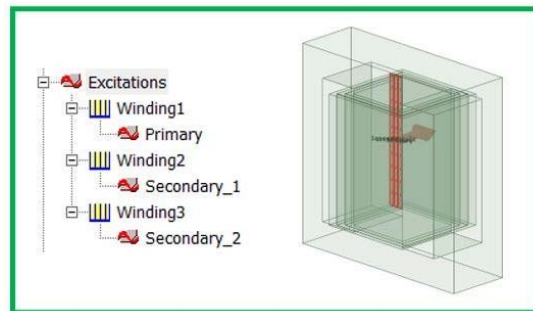
**Figure 8.** ANSYS/Maxwell 3D design operation panel

Once the transformer core and windings have been modeled, the material types for this equipment are chosen through the material property panel, as depicted in Figure 9.



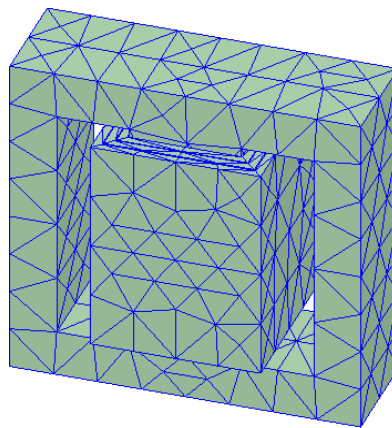
**Figure 9.** Creating specific material property and determining B-H and B-P curves of the core

During the design process, ferrite is specified as the core material for the transformer, with its characteristic features outlined in Section 2. Additionally, copper is chosen as the material for both the primary and secondary windings. Air material is then assigned to specific regions or boundaries due to the transformer's characteristics. After the assignment of materials, the primary and secondary windings are energised based on transformer parameters, taking into account factors such as turn ratio, ohmic resistance, and excitation terminal voltage values. The allocation of excitation to the windings is shown in Figure 10.



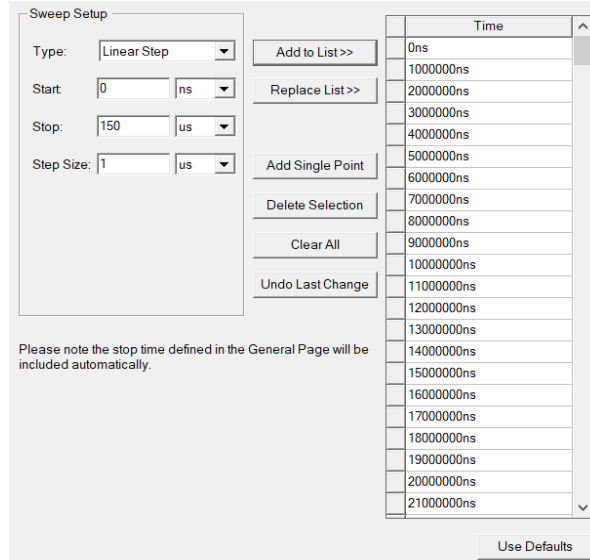
**Figure 10.** Assignment of excitation to the coil terminals of the transformer

The result of a finite element analysis (FEA) application should be independent of the mesh size. Convergence study not only accelerates the solution of the problem but also increases the accuracy of the result. Finite element analysis (FEA) is a method that can be used when making high-risk and costly decisions. Therefore, the finite element analysis results must be verifiable. To show the accuracy of the results, the mesh operation is used in the simulation study. The designed transformer undergoes a mesh operation, dividing it into 80000 particles, enabling electromagnetic analysis of each particle. This mesh operation enhances the accuracy of the analysis for the designed model. The mesh operation performed on the transformer model is illustrated in Figure 11.



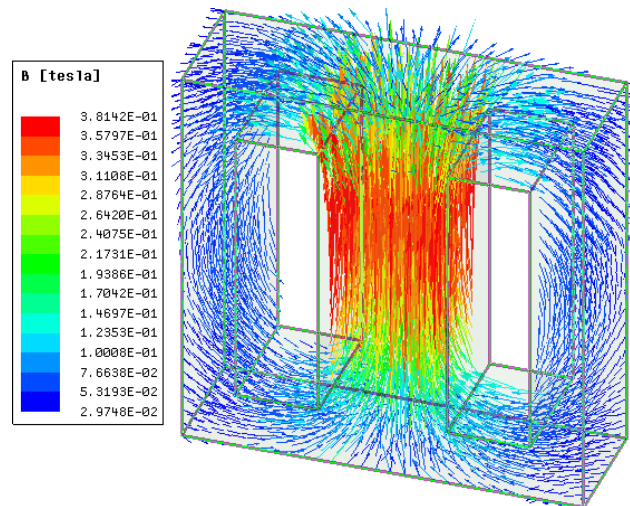
**Figure 11.** Mesh operation applied to the core and windings of the transformer

After completing these procedures, the transformer can be analyzed in subsequent stages. The analysis duration needs to be specified using the setup panel. The analysis solution step is employed in the setup panel to accurately define parameters such as type, start time, and stop time. These parameters are essential for achieving accurate electromagnetic transient analysis of the transformer as they directly affect the precision of the currents and voltages on the transformer. In this study, small ranges are selected for the analysis step size in order to obtain clear signals. The analysis configuration for the transformer is shown in Figure 12.



**Figure 12.** Analysis settings of the high-frequency transformer in ANSYS/Maxwell

The analysis duration ultimately determines the results. The electromagnetic transient analysis produces the following outcomes: When voltage is applied to the primary side of the coils, a varying magnetic field is generated within the transformer core and coils, resulting in voltage generation across the coil ends. The current and magnetic flux are both affected by changes in the magnetic field of the primary coil. This change in magnetic flux induces voltage in the secondary side of the coils. Figure 13 shows the analyzed transformer core and the distribution of magnetic flux.



**Figure 13.** Magnetic field distribution on the transformer core

The transformer is subjected to testing in both normal load and overload scenarios. Under load, where 50 volts is supplied to the primary windings, 25 volts are induced in the secondary side. Figure 14 illustrates the primary and secondary voltages and currents of the engineered transformer.



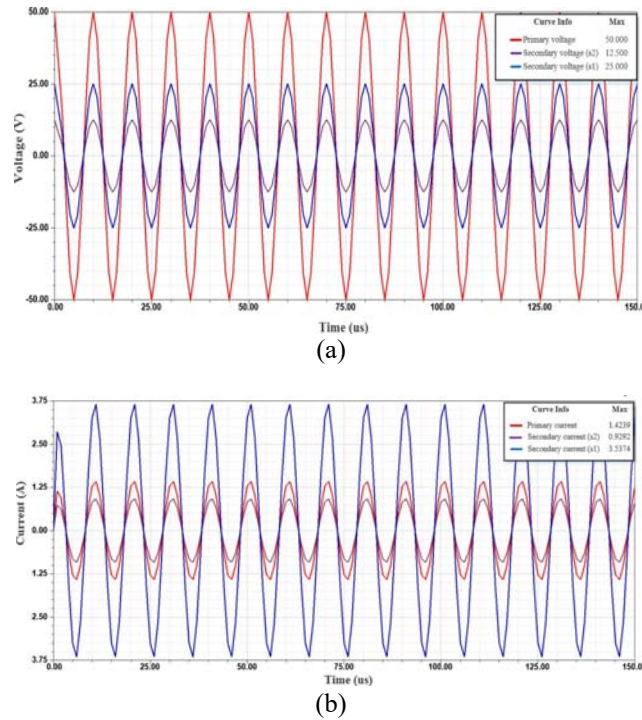


Figure 14. High-frequency flyback transformer primary and secondary (a) voltages (b) currents

Also, power loss analysis of the transformer is realized in the transformer core and coils. Figure 15. presents the power losses. When an alternating current flows through a coil wrapped around a core, it induces voltage in the core. This induced voltage leads to the creation of numerous closed-loop current paths within the core. This phenomenon occurs not only on the surface of the core but also within its interior. These currents, which form in the form of closed tiny rings, are called fuco currents (eddy currents). The current strength in each closed current path is directly proportional to the induced voltage. The current intensity is inversely proportional to the electrical resistance of this current path. Fuco currents cause overheating of the cores. Warming up means loss of energy. Some ferromagnetic materials, such as iron, become temporarily or permanently magnetic when exposed to an external magnetic field. This magnetism is opposite to the magnetic field on the transformer and causes energy loss as heat. This loss is called hysteresis loss. The hysteresis loss occurs in the form of heat as a result of the friction of the molecules with each other during the change of direction of the core molecules depending on the frequency. Copper loss is a term generally used for the heat produced by electric current in transformer windings or conductors of other electrical devices. All these losses in the HF transformer are presented with electromagnetic transient analysis results.

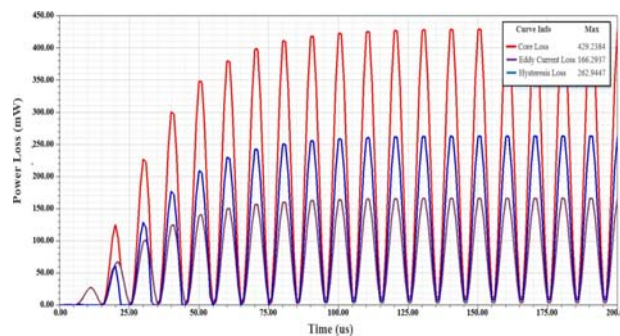


Figure 15. Power losses of the HF flyback transformer

When the losses in the HF transformer are examined, it is around 859 mW. In the mathematical model, it is seen that this power loss is about 864 mW. This shows that the simulation results are realistic. This realistic analysis is directly related to the transformer's core and coil selection, B-H and B-P characteristics, one-to-one dimension design and mesh operation. The HF transformer's total power is 40-W so the efficiency of the transformer is 97.8%.



## 4. CONCLUSIONS

The simple design of the high-frequency flyback transformer is smaller, lighter, and easier to install than other transformers. This means they are better suited to general electrical systems. A high-frequency flyback transformer usually has the same investment as other transformers. However, flyback converters, in which the high-frequency flyback transformer is the main component, are typically less expensive than similar converters because they consist of fewer components. An important benefit of the high-frequency flyback transformer is that it can be used as circuit isolation, which prevents electrical hazards and provides enhanced safety, especially for those near high-energy electrical systems. A high-frequency flyback transformer is used to isolate and switch multiple output voltages from a single control. A 50/12.5/25 V single-phase flyback transformer prioritizes optimal weight and size efficiency. Its parameters are derived through the utilization of a mathematical model. After performing the mathematical calculation, the transformer is designed using model parameters and then analyzed electromagnetically. The performance analysis of the HF transformer such as power losses, voltages, currents and magnetic field are verified with the experimental results. Thanks to this study, the efficiency and performance analysis of the HF transformer is performed before the transformer is produced. Also, the material selection of the HF transformer plays key role to achieve the great potential efficiency from the transformer. In the future study, CFD analyses of HF transformer and temperature and strength tests will be carried out under overload conditions. Also, the HF transformer will be experimentally exposed to the overload conditions and its strength and temperature analysis will be verified by simulation studies. Thus, before the HF transformer is produced commercially, both electromagnetic and temperature and strength tests will be carried out realistically.

## 5. REFERENCES

1. Elrajoubi, A.M., Ang, S.S., 2019. High-frequency transformer review and design for low-power solid-state transformer topology. 2019 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), 1-6.
2. Ding, H., Zhao, W., Li, M., Zhang, L., Sun, Y., 2023. Electromagnetic vibration characteristics of high-frequency transformer under DC bias with different winding structures. *Processes*, 11(4), 1185.
3. Yao, W., Lu, J., Taghizadeh, F., Bai, F., Seagar, A., 2023. Integration of SiC devices and high-frequency transformer for high-power renewable energy applications. *Energies*, 16(3), 1538.
4. Mukherjee, S., Barbosa, P., 2023. Design and optimization of an integrated resonant inductor with high-frequency transformer for wide gain range DC–DC resonant converters in electric vehicle charging applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(5), 6380-6394.
5. Li, Z., Hsieh, E., Li, Q., Lee, F., 2023. High-frequency transformer design with medium-voltage insulation for resonant converter in solid-state transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(8), 9917-9932
6. Olowu, T.O., Jafari, H., Moghaddami, M., Sarwat, A.I., 2020. Multiphysics and multiobjective design optimization of high-frequency transformers for solid-state transformer applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57(1), 1014-1023.
7. Li, Z., Hsieh, Y.H., Li, Q., Lee, F.C., Ahmed, M.H., 2020. High-frequency transformer design with high-voltage insulation for modular power conversion from medium-voltage AC to 400-V DC. 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 5053-5060.
8. Dang, Y., Zhu, L., Liu, J., Zhan, C., Long, L., Ji, S., 2022. Module integral method for the calculation of frequency-dependent leakage inductance of high-frequency transformers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(6), 7028-7038.
9. Rahman, S., Candan, M.Y., Tamyurek, B., Aydin, E., Meşe, H., Aydemir, M.T., 2022. Design and implementation of a 10 kV/10 kW high-frequency center-tapped transformer. *Electrical Engineering*, 1-17.
10. Barg, S., Bertilsson, K., 2019. Multi-objective pareto and GAs nonlinear optimization approach for flyback transformer. *Electrical Engineering*, 101(3), 995-1006.
11. Ahmed, N.A., Madouh, J.Y., 2018. High-frequency full-bridge isolated DC–DC converter for fuel cell power generation systems. *Electrical Engineering*, 100(6), 1-13.
12. Guillod, T., Krismer, F., Kolar, J.W., 2018. Magnetic equivalent circuit of MF transformers: modeling and parameter uncertainties. *Electrical Engineering*, 100, 2261-2275.
13. Huang, P., Mao, C., Wang, D., 2017. Electric field simulations and analysis for high voltage high power medium frequency transformer. *Energies*, 10(3), 371.

14. Olowu, T.O., Jafari, H., Moghaddami, M., Sarwat, A.I., 2019. Physics-based design optimization of high frequency transformers for solid state transformer applications. 2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1-6.
15. Gradinger, T.B., Drofenik, U., Alvarez, S., 2017. Novel insulation concept for an MV dry-cast medium-frequency transformer. 2017 19<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), 1-10.
16. Kauder, T., Hameyer, K., 2017. Performance factor comparison of nanocrystalline, amorphous, and crystalline soft magnetic materials for medium-frequency applications. IEEE Transactions on Magnetics, 53(11), 1-4.
17. Kiran, M.R., Farrok, O., Islam, M.R., Zhu, J., 2021. Increase in the power transfer capability of advanced magnetic material based high frequency transformer by using a novel distributed winding topology. IEEE Transactions on Industry Applications, 57(6), 6306-6317.
18. Gao, Z., Zhang, J., Guo, F., Zhou, Y., Guan, R., Huang, Y., 2021. An improved high-voltage high-frequency multi-winding transformer structure for anode power supply in ECRH. Fusion Engineering and Design, 172, 112899.
19. Nia, M.S.S., Saadatmand, S., Altimania, M., Shamsi, P., Ferdowsi, M., 2019. Analysis of skin effect in high frequency isolation transformers. 2019 North American Power Symposium (NAPS), 1-6.
20. Islam, M.R., Rahman, M.A., Sarker, P.C., Muttaqi, K.M., Sutanto, D., 2019. Investigation of the magnetic response of a nanocrystalline high-frequency magnetic link with multi-input excitations. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 29(2), 1-5.
21. Nia, M.S.S., Saadatmand, S., Altimania, M., Shamsi, P., Ferdowsi, M., 2019. Analysis of various transformer structures for high frequency isolation applications. 2019 North American Power Symposium (NAPS), 1-6.
22. Zhao, B., Ouyang, Z., Andersen, M.A.E., Duffy, M.C., Hurley, W.G., 2017. An improved partially interleaved transformer structure for high-voltage high-frequency multiple-output applications. Proceedings of IEEE 43<sup>rd</sup> Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 798-804.
23. Guo, S., Liu, P., Zhang, L., Huang, A.Q., 2017. Design and optimization of the high frequency transformer for a 800V/1.2 MHz SiC LLC resonant converter. 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 5317-5323.
24. Mogorovic, M., Dujic, D., 2018. Sensitivity analysis of medium-frequency transformer designs for solid-state transformers. IEEE Transactions on Power Electronics, 34(9), 8356-8367.
25. Chen, T., Zhao, Z., Shen, Z., Jia, H., Ji, J., Wang, H., 2024. Litz-wire winding loss calculation method for optimal design of high-frequency transformers. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 12(2), 2027-2040.
26. Rajput, N., Sandhibigraha, H.B., Mahadeva Iyer, V., 2024. Analysis and design trade-offs of a multi-winding high-frequency transformer for a battery charger. 2024 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 854-860.
27. Nasirpour, F., Heidary, A., Niasar, M.G., Lekić, A., Popov, M., 2023. High-frequency transformer winding model with adequate protection. Electric Power Systems Research, 223, 109637.
28. Colonel, W.T., 2011. Transformer and inductor design handbook. 4th ed; CRC Press: Boca Raton, FL, USA.

## Investigation of The Effect of CNC Milling Cutting Process on The Tensile Test of PLA Samples Produced Using Two Different 3D Printers with The FDM Method

Muhammed Safa KAMER<sup>1,a</sup>, Çağrı UZAY<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Dept. of Mechanical Engineering, Kahramanmaraş, Türkiye

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0003-3852-1031; <sup>b</sup>ORCID: 0000-0002-7713-8951

### Article Info

Received : 08.05.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1559927

### Corresponding Author

Muhammed Safa KAMER

msafakamer@ksu.edu.tr

### Keywords

Additive manufacturing

3D printer

PLA

Filament diameter

CNC milling

Tensile test

**How to cite:** KAMER, M.S., UZAY, Ç., (2024). Investigation of The Effect of CNC Milling Cutting Process on The Tensile Test of PLA Samples Produced Using Two Different 3D Printers with The FDM Method. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 599-608.

### ABSTRACT

One of the most commonly used materials in additive manufacturing with the fused deposition modeling (FDM) method is polylactic acid (PLA) filaments. In 3-dimensional (3D) printed products, an external wall is also used in addition to the internal structure pattern. The exterior wall pattern differs from the interior structure pattern. The 3D products obtained by this method contain two different pattern structures, which is not desired when determining the mechanical properties. In this study, tensile test specimens were produced with two different 3D printers using 1.75 mm and 2.85 mm diameter PLA filaments. Some tensile test specimens were directly produced in ASTM D638-14 Type 1 dimensions and subjected to tensile testing. The rest of the specimens were produced in a rectangular shape with 19 mm x 165 mm dimensions and the side edges of those specimens, produced in rectangular shape, were cut with CNC milling to bring their dimensions to ASTM D638-14 Type 1. All tensile test specimens were manufactured with a thickness of 4 mm. The test specimens cut with CNC milling after 3D printing were compared with the specimens tested only by 3D printing. The effects of CNC milling cutting on the tensile test properties of specimens produced on two different 3D printers using 1.75 mm and 2.85 mm diameter PLA filaments were investigated. Consequently, it was observed that cutting the side edges with CNC milling eliminated irregularities caused by 3D printing due to the tensile stress in those areas and allowed for more regular and consistent fractures of test specimens. When compared with only the 3D-printed specimens, the elongation at break of the tensile test specimens whose side edges were cut with CNC milling resulted in 13.45% and 33.55% higher using 1.75 mm and 2.85 mm PLA filaments, respectively. It was determined that the toughness of the samples cut by CNC milling was higher than the test samples that were only 3D printed.

## EYM Yöntemiyle İki Farklı 3B Yazıcı Kullanılarak Üretilen PLA Numunelerde CNC Freze ile Kesme İşleminin Çekme Testi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

### Makale Bilgileri

Geliş : 08.05.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1559927

### Sorumlu Yazar

Muhammed Safa KAMER

msafakamer@ksu.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Ekleme imalat

3B yazıcı

PLA

Filament çapı

CNC freze

Çekme testi

**Atf şekli:** KAMER, M.S., UZAY, Ç., (2024). Investigation of The Effect of CNC Milling Cutting Process on The Tensile Test of PLA Samples Produced Using Two Different 3D Printers with The FDM Method. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 599-608.

### ÖZ

Erियik yığın modelleme (EYM) yöntemi ile eklemeli imalatta en çok kullanılan malzemelerden biri polilaktik asit (PLA) malzemedir. 3-boyutlu (3B) yazdırılan ürünlerde iç yapı deseninin haricinde bir de dış duvar kullanılmaktadır. Dış duvar deseni, iç yapı deseninden farklılıklar göstermektedir. Bu yöntemle üretilen ürünler iki farklı desen yapısı içermekte olup, bu durum 3B yazdırılmış ürünlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde istenen bir durum değildir. Bu çalışmada, 1,75 mm çapında ve 2,85 mm çapında PLA filamentler kullanılarak iki farklı 3B yazıcıda çekme test numuneleri üretilmiştir. Çekme test numunelerinin bir kısmı ASTM D638-14 Tip1 boyutlarında üretilmiş olup, numunelere çekme testi uygulanmıştır. Çekme test numunelerinin bir kısmı da 19 mm x 165 mm boyutlarında dikdörtgen şekilde üretilmiştir. dikdörtgen şeklinde üretilen numunelerin yan kenarları CNC freze ile kesilerek numuneler ASTM D638-14 Tip1 boyutlarına getirilmiştir. Çekme test numunelerinin tamamının kalınlığı 4 mm olacak şekilde üretimler gerçekleştirilmiştir. 3B yazdırdıktan sonra CNC freze ile kesilen test numuneleri, sadece 3B yazdırılarak test edilen numunelerle karşılaştırılmıştır. CNC freze ile kesme işleminin, 1,75 mm çapında ve 2,85 mm çapında PLA filamentler kullanılarak iki farklı 3B yazıcıda üretilen numunelerin çekme testi özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, 3B yazdırılmış çekme test numunelerinin çekmeye maruz kalan yan kenarlarının CNC freze ile kesilmesi sonucunda, bu bölgelerde 3B yazdırmadan kaynaklanan düzensizliklerin ortadan kaldırıldığı, test numunelerinde daha düzenli ve tutarlı kopmaların gerçekleştiği tespit edilmiştir. 1,75 mm PLA filament kullanılarak üretilen ve yan kenarları CNC freze ile kesilen çekme test numunesinin kopma uzamasında, 3D-printed çekme test numunesinin kopma uzamasına kıyasla %13,45 artış olduğu belirlenmiştir. 2,85 mm PLA filament kullanılarak üretilen ve yan kenarları CNC freze ile kesilen çekme test numunesinin kopma uzamasında, 3D-printed çekme test numunesinin kopma uzamasına kıyasla %33,55 artış olduğu belirlenmiştir. CNC freze ile kesilen numunelerin tokluğunun 3D-printed test numunelerine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

## 1. INTRODUCTION

Today, additive manufacturing is widely used with one of the most commonly applied 3D production methods being Fused Deposition Modeling (FDM). FDM involves layer-by-layer production in additive manufacturing. Determining the mechanical properties of products produced with this method is important for assessing their suitability for various applications. In FDM additive manufacturing, products typically have both an infill pattern and an outer wall pattern. Therefore, test specimens, produced to determine the mechanical properties of the materials manufactured with this method, naturally exhibit two different infill pattern structures. This makes it difficult to determine the actual mechanical properties of the produced materials. Various methods (such as producing without outer walls, production by cutting specimens from a 3D produced sheet, etc.) are applied to eliminate this issue, with the most common being the production of test specimen dimensions slightly larger and then cutting these parts using various methods [1-4]. This eliminates the infill pattern differences in the outer walls of the produced product, ensuring that only a single infill pattern remains in the test region of the specimen. One of the most commonly used materials in additive manufacturing with the FDM method is PLA material. Two different diameters of PLA filaments, 1.75 mm, and 2.85 mm, are used in 3D printers. The filament diameter is determined depending on the 3D printer. Just as there may be differences in the mechanical properties of PLA filaments of these two different diameters, there may also be differences in the mechanical properties of 3D printed products using these filaments. Many studies have been conducted in the literature to determine the mechanical properties of 3D-printed PLA materials, some of which are introduced below.

Tunçel and Tutar [5] examined the effects of different edge widths on the compressive strength of face-centered cubic structured specimens produced using PLA material with the FDM method. They determined that increasing the edge width also increased the compressive strength. Demirci et al. [6] investigated the effects of nozzle diameter and layer thickness parameters on the mechanical behavior of 3D-printed PLA lattice structures under quasi-static loading. They found that a combination of small nozzle diameter and high layer thickness led to a decrease in compressive strength in both types of lattice structures. Şahin et al. [7] exposed tensile test specimens produced using PLA material on a 3D printer and the PLA filaments used in production to 80% relative humidity for different durations. They investigated the changes in mechanical properties as a result of the test specimens being exposed to a humid environment. Their study revealed that the tensile strengths of filament and tensile test specimens exposed to a humid environment decreased by 6.8% on the twentieth day. Bolat and Ergene [8] investigated the dimensional accuracy of tensile test specimens produced using PLA, PET-G, and ABS materials with different layer heights with a 3D printer. They determined that the most accurate dimensional measurement results for length and height were obtained from PET-G test specimens, while the most accurate dimensional measurement results for width were obtained from PLA test specimens.

The authors have previously experimentally investigated various aspects of additive manufacturing and material properties. They examined the mechanical properties of tensile test specimens produced with ABS and PLA materials using different table and nozzle temperatures [1], the mechanical properties of bending test specimens produced with different printing parameters on a 3D printer [2], the mechanical properties of tensile test specimens produced with ABS and PLA materials in different colors and infill patterns [3], the creep behavior of PLA test specimens produced with different printing parameters using the FDM [9], the mechanical properties of tensile test specimens produced with ABS and PLA materials at different printing speeds on a 3D printer [10,11], the tensile and shear strengths of bolts created by threading the polymer shafts produced with PLA material at different printing orientations using a 3D printer [12], the bending strengths of honeycomb sandwich structures with different cell diameters produced using a 3D printer [13], and the mechanical properties of tensile test specimens produced with PLA filaments of different diameters on a 3D printer [14].

In this study, tensile test specimens were produced using PLA filaments with diameters of 1.75 mm and 2.85 mm on two different 3D printers. Some of the tensile test specimens were directly produced in ASTM D638-14 [15] Type 1 dimensions and subjected to tensile testing. The rest of the test specimens were produced in rectangular shapes with 19 mm x 165 mm dimensions, and then the side edges of the specimens produced in rectangular shapes were cut using CNC milling to size them into ASTM D638-14 Type 1 dimensions. All tensile test specimens were produced to have a thickness of 4 mm. Tensile test specimens that were 3D printed and then cut with CNC milling to obtain specified dimensions were compared with the specimens that were tested after being solely 3D printed. The effects of the CNC milling process on the



tensile test properties of specimens, produced with two different 3D printers using 1.75 mm and 2.85 mm diameter PLA filaments, were investigated.

## 2. MATERIAL AND METHOD

**Table 1.** The 3D printing parameters for manufacturing test specimens

Nozzle temperature	208°C
Bed temperature	60°C
Printing speed	70 mm/s
Travel speed	150 mm/s
Nozzle diameter	0.4 mm
Layer thickness	0.2 mm
Wall thickness	0.4 mm
Wall number	1
Infill density	%100
Infill pattern	Zig Zag
Applied standard	ASTM D638-14 Type-1 – 4mm thickness

In this study, tensile test specimens were produced using PLA filaments with diameters of 1.75 mm (Raise3D Premium PLA Blue [16]) and 2.85 mm (Ultimaker PLA Pearl White [17]) on two different 3D printers (Zaxe Z1 Plus 3D printer [18] and Ultimaker S5 3D printer [19]). Test specimens were produced using Raise3D Premium PLA Blue filament with a diameter of 1.75 mm on the Zaxe Z1 Plus 3D printer. On the Ultimaker S5 3D printer, test specimens were produced using Ultimaker PLA Pearl White filament with a diameter of 2.85 mm. The parameters given in Table 1 were used for 3D printing of the tensile test specimens on both printers.

Six tensile test specimens, based on ASTM D638-14 Type-1 dimensions, each having a thickness of 4 mm were produced using 1.75 mm and 2.85 mm diameter PLA filaments, respectively (Figures 1a and 1c). Additionally, six rectangular specimens of 19 mm x 165 mm in size and 4 mm in thickness were produced using PLA filaments of two different diameters (Figures 1b and 1d). The images of all produced specimens after 3D printing are shown in Figure 1.



**Figure 1.** 3D-printed test samples

A two-stage cutting process was performed with a CNC milling machine to size the rectangular specimens into ASTM D638-14 Type-1 dimensions in the form of a dog-bone shape. The cutting with CNC milling operations were performed in two stages. In the first stage, one side of the rectangular specimen was cut. Then it was turned to cut the other side. At this stage, the test specimen was brought to ASTM D638-14 Type-1 dimensions. The images, illustrating the CNC milling stages of the rectangular specimens, are shown in Figure 2. A 6 mm diameter, 4-flute, flat-end mill cutter was used in CNC milling operations. Initially, a rough cutting operation was applied with a depth of 0.8 mm and a lateral feed of 0.9 mm to leave a 0.30 mm finishing allowance. Then, two passes of finish cutting with a lateral feed of 0.15 mm were conducted with cutting depths are to be equal to the material thickness, followed by one final pass of idle cutting without lateral feed. First, the cutting was performed on one edge of the specimen (Figures 2b and 2e) which was placed on the CNC milling machine (Figures 2a and 2d). Then, the test specimen was rotated 180° along the vertical axis and placed on the CNC milling machine, and cutting was performed on the other edge of the test specimen (Figures 2c and 2f). In all CNC milling operations, a spindle speed of 3500 rpm, a cutting axis speed of 500 mm/min, an idle axis speed of 1500 mm/min, and a conventional cutting direction were used. A Hattech 3-axis CNC milling machine was used for milling the side edges of the test specimens. No cooling system was used in CNC milling cutting processes and dry milling was done. In order to prevent the chips formed during cutting with the CNC milling machine from sticking to the workpiece or tool, the chips were removed by air blasting once in each round-trip period.



**Figure 2.** Converting rectangular samples into dog-bone shape with CNC milling

Tensile test specimens produced in two different ways (3D-printed samples and milled samples) using 1.75 mm and 2.85 mm diameter PLA filaments were measured for their dimensions, masses, hardness, and surface roughness values, and all specimens were subjected to tensile testing. Additionally, four pieces of 165 mm long filaments, prepared individually from 1.75 mm and 2.85 mm diameter PLA filaments, respectively, were subjected to the tensile tests. A digital caliper with a precision of 0.01 mm was used to measure the dimensions of the test specimens. KERN PLS 6200-2A precision balance with 0.01g sensitivity was used to measure the masses of the test specimens. The hardness values of the test specimens were measured using an MITECH MH210 portable hardness tester. Hardness measurements were performed on the bottom surfaces of the test specimens using a Shore D probe, and average values were determined by taking measurements from five different regions of each specimen. Surface roughness values of the test specimens were measured using a JENOPTIK Hommel-Etamic W5 surface roughness measurement device with parameters set at a measurement length of 4.8 mm, measurement speed of 0.5 mm/s, and wavelength of 0.8 mm. Surface roughness measurements were performed parallel to the tensile direction on the top surfaces of the test specimens, and average values were determined by taking measurements from three different regions of each specimen. Tensile tests were conducted using a Zwick/Roell Z100 tensile testing

machine, equipped with a long-stroke extensometer mounted on the machine frame. Tensile tests were performed at a speed of 5 mm/min, with an extensometer gauge length set to 50 mm. The sample codes and production parameters for the test specimens in all tested parameters are provided in Table 2. The test specimens will be referenced by these codes in the paper henceforth.

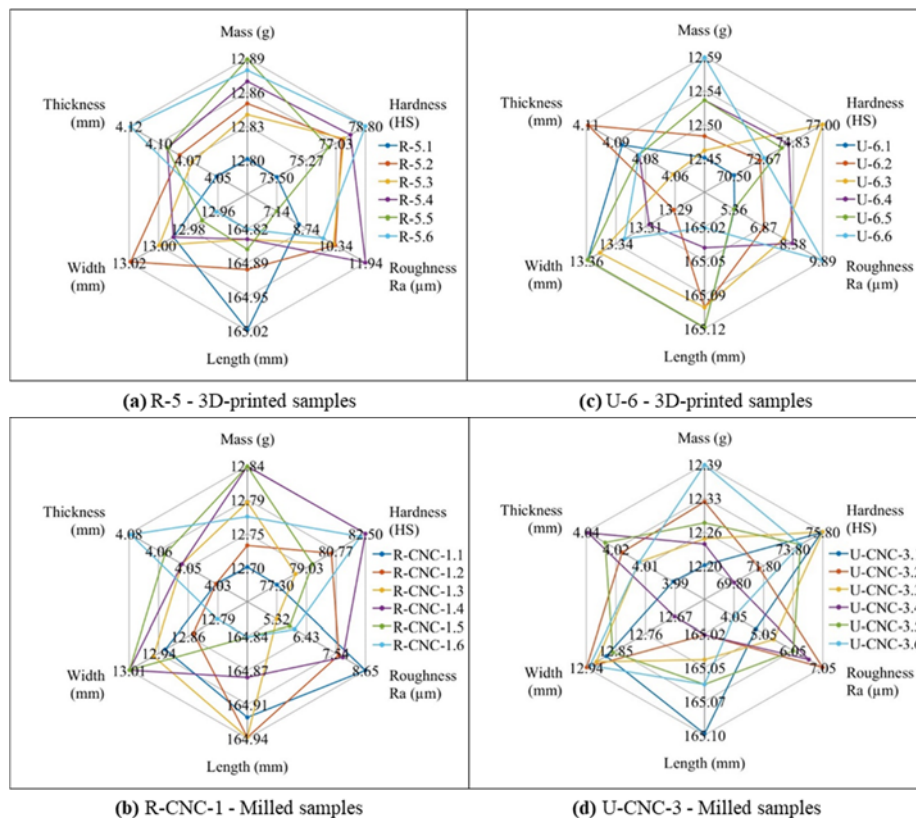
**Table 2.** Sample codes of test specimens and production parameters

Sample code	Production method	Production parameters		
		Filament	3D printer	CNC milling machine
R-F.1~4	Filament	1.75 mm Raise3D Premium PLA Blue	-	-
R-5.1~6	3D-printed		-	-
R-CNC-1.1~6	Milled		Zaxe Z1 Plus 3D printer	Hattech 3-Axis CNC Milling Machine
U-F.1~4	Filament	2.85 mm Ultimaker PLA Pearl White	-	-
U-6.1~6	3D-printed		-	-
U-CNC-3.1~6	Milled		Ultimaker S5 3D printer	Hattech 3-Axis CNC Milling Machine

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

Spider graphs generated from measurements of all tensile test specimens produced using two different diameters of PLA filament (1.75 mm, 2.85 mm) and two different methods (3D-printed, Milled) are shown in Figure 3. When the figure is examined, it can be seen that the measurement data of the test specimens for each parameter are very close to each other within each graph.

The average values of tensile test specimens' measurements, taken from four different production types, were used to create the spider graph, as shown in Figure 4. When the graph is examined, it can be revealed that the highest dimensional values are generally found in the U-6 3D-printed test specimens, the highest mass values are in the R-5 3D-printed test specimens, the highest hardness values are in the R-CNC-1 Milled test specimens, and the lowest arithmetic mean surface roughness values are in the U-CNC-3 Milled test specimens.



**Figure 3.** Spider graphs created with data obtained from measurements

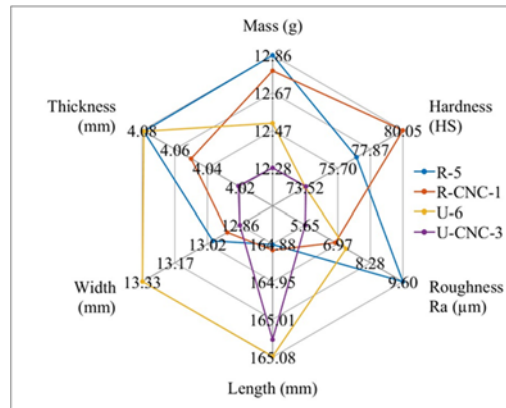


Figure 4. Spider graph created with average values of parameters

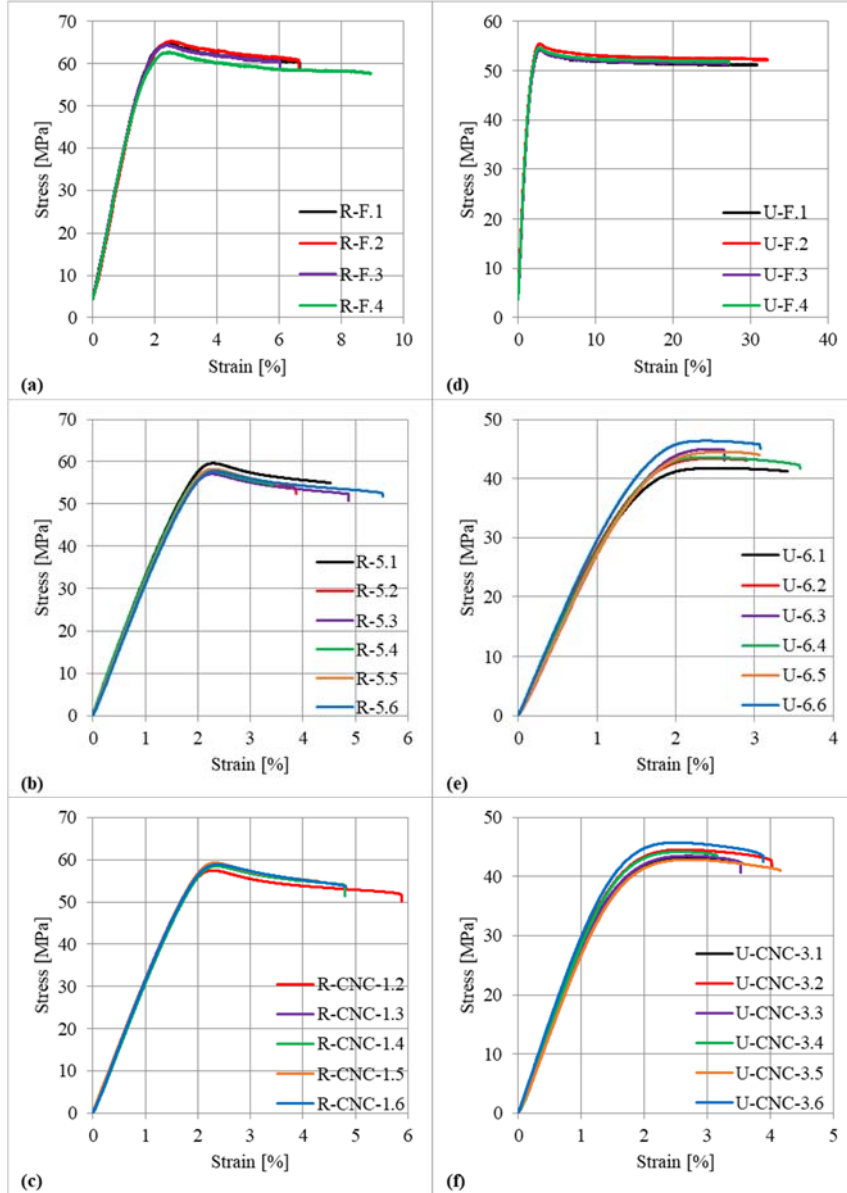
The failures of the tensile test samples for all parameters are shown in Figure 5. Since an error was observed during the tensile test of the R-CNC-1.1 Milled test specimen, the results of this test specimen are not included in the paper. In some of the R-5 3D-printed tensile test specimens (Figure 5a), fractures occurred from the neck region during the tensile test (R-5.1, R-5.4). However, such a situation was not encountered in the R-CNC-1 Milled tensile test specimens, whose side edges were cut with a CNC milling machine (Figure 5b), and the fractures were generally observed in the middle regions of the test specimens. Similar to the failures of R-5 3D-printed and R-CNC-1 Milled tensile test specimens, respectively, in some of the U-6 3D-printed tensile test specimens (Figure 5c), the fractures occurred in the neck region during the tensile test (U-6.1, U-6.3). However, such occurrences were not observed in the U-CNC-3 Milled tensile test specimens, whose side edges were cut with CNC milling (Figure 5d), and the fractures were observed in the middle regions of all test specimens. It was found that cutting the side edges of the specimens with CNC milling operations eliminated the irregularities, where those regions were exposed to tensile forces, caused by 3D printing, and resulted in more regular and consistent fractures in the test specimens.



Figure 5. Images of broken samples



Stress-strain curves obtained from all tensile tests are shown in Figure 6. It is observed that the stress-strain curves of R-F 1.75 mm PLA filament (Figure 6a) and U-F 2.85 mm PLA filament (Figure 6d) are generally very close to each other. Although the tensile strengths of the tensile test curves of the R-5 3D-printed test specimens (Figure 6b) and the U-6 3D-printed test specimens (Figure 6e) are close to each other, it is seen that there are irregularities in their elongation at break values. It has been determined that the stress-strain curves of R-CNC-1 milled test specimens (Figure 6c) and U-CNC-3 milled test specimens (Figure 6f) exhibit much closer and more consistent results among themselves.



**Figure 6.** Tensile test stress-strain graphs

(a) R-F 1.75 mm filament, (b) R-5 3D-printed specimens, (c) R-CNC-1 milled specimens, (d) U-F 2.85 mm filament, (e) U-6 3D-printed specimens, (f) U-CNC-3 milled specimens

Figure 7 was created by selecting a curve that can be represented as an average from each parameter shown in Figure 6. It was determined that the tensile strength of the R-5.2 3D-printed tensile test specimen is 11.3% lower than that of the R-F.2 1.75 mm filament (Figure 7a). Similarly, it was determined that the tensile strength of the U-6.5 3D-printed tensile test specimen is 17.8% lower than that of the U-F4 2.85 mm filament (Figure 7a). Since voids are formed within the specimens produced during 3D printing, it can be concluded that 3D-printed tensile test specimens have a porous structure. Therefore, it is expected that the tensile strength values of 3D-printed tensile test specimens can be lower than the tensile strength of the

filaments used in 3D printing. It was determined that the elongation at break value of the R-5.2 3D-printed tensile test specimen is 36.5% lower than that of the R-F.2 filament (Figure 7a). Similarly, the elongation at break value of the U-6.5 3D-printed tensile test specimen is 89.4% lower than that of the U-F4 filament (Figure 7a). Based on these results, it can be inferred that there is a significant decrease in the toughness of 3D-printed products compared to the filaments used in 3D printing. Similar results were also encountered in the literature [7].

When Figure 7b is examined, it can be seen that there is almost no change in the tensile strength as a result of cutting the side edges of the 3D-printed test specimens with a CNC milling machine. However, there was a 13.45% increase in the elongation at break value of the R-CNC-1.4 milled tensile test specimens, whose side edges were cut with a CNC milling machine, compared to that of R-5.2 3D-printed tensile test specimens. Similarly, it was determined that there was a 33.55% increase in the elongation at break value of the U-CNC-3.2 milled tensile test specimens, whose side edges were cut with a CNC milling machine, compared to that of the U-6.5 3D-printed tensile test specimens. As a result, it can be concluded that cutting the side edges of the 3D-printed test specimens with CNC milling reduces the possible notching effects that may occur during 3D printing, and reveals the stress-strain curves that the test specimens should exhibit.

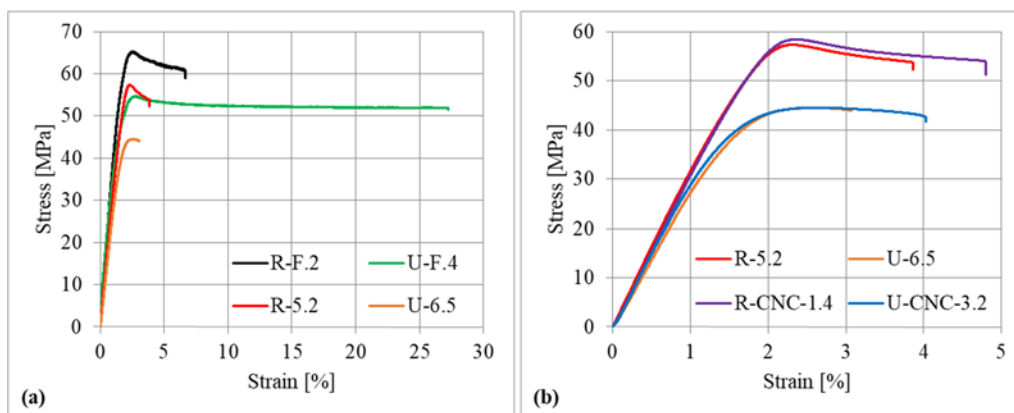


Figure 7. Comparison graph (a) filament vs 3D-printed, (b) 3D-printed vs milled

Figure 8 presents the comparison of the average tensile strength and elongation at break values for samples using 1.75 mm and 2.85 mm PLA filaments. When Figure 8a is examined, it is determined that the tensile strengths of the specimens using 2.85 mm filament are consistently lower than those using 1.75 mm filament in all cases (filament, 3D-printed, milled). It is determined that the tensile strength of the 1.75 mm filament is approximately 19% higher than the tensile strength of the 2.85 mm filament. The elongation at break value of the 2.85 mm filament is approximately 4.39 times higher than that of the 1.75 mm filament as seen in Figure 8b. Contrarily, in other cases (3D-printed, milled), it is found that the elongation at break value of the samples using 2.85 mm filament is slightly lower than that of the samples using 1.75 mm filament.

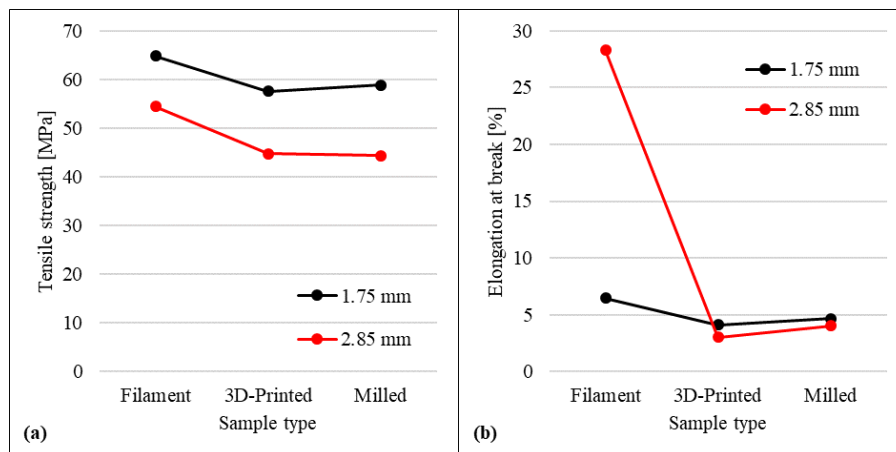


Figure 8. Variation of (a) tensile strength and (b) elongation at break according to sample type

## 4. CONCLUSIONS

In this study, tensile test specimens were produced on two different 3D printers using 1.75 mm and 2.85 mm diameter PLA filaments. Some of the tensile test specimens were directly produced according to ASTM D638-14 Type 1 dimensions and subjected to tensile testing. The remaining specimens were produced in a rectangular shape with 19 mm x 165 mm dimensions. The side edges of the specimens, produced in a rectangular shape, were cut using CNC milling to bring the specimens into ASTM D638-14 Type 1 dimensions. All tensile test specimens were manufactured with a thickness of 4 mm. The results of test specimens cut by CNC milling after 3D printing were compared to those produced by only 3D printing. The results obtained from the study are listed below.

- Cutting the side edges of the 3D printed tensile test specimens, which were exposed to tension, with a CNC milling machine eliminated the irregularities caused by 3D printing in those areas, leading to obtaining more uniform and consistent fractures in the test specimens.
- Tensile strength and elongation at break values of the 3D-printed tensile test specimens were lower than those of the filaments used in 3D printing. Accordingly, a significant decrease in the toughness of the 3D-printed products compared to the filaments, used in 3D printing, was observed.
- There was almost no change in the tensile strength of the 3D-printed test specimens as a result of cutting the side edges with CNC milling.
- A 13.45% increase was obtained in the elongation at break value of the R-CNC-1.4 milled tensile test specimen, produced using 1.75 mm PLA filament and with side edges cut by CNC milling, compared to that of the R-5.2 3D-printed tensile test specimen.
- A 33.55% increase was obtained in the elongation at break value of the U-CNC-3.2 milled tensile test specimen, produced using 2.85 mm PLA filament and with side edges cut by CNC milling, compared to that of the U-6.5 3D-printed tensile test specimen.
- Cutting the side edges of 3D printed test samples with a CNC milling machine, the notch effects that could occur in 3D printing were reduced, and the stress-strain curves expected for the test specimens were revealed.
- Tensile strengths of the specimens using 2.85 mm filament were consistently lower than those using 1.75 mm filament in all cases (filament, 3D-printed, milled).
- Elongation at break values of 2.85 mm diameter filament was significantly higher than that of 1.75 mm diameter filament. Conversely, in other cases (3D-printed, milled), it was observed that the elongation at break values of the test specimens using 2.85 mm filament was slightly lower than that of the specimens using 1.75 mm filament.

## 5. REFERENCES

1. Kamer, M.S., Temiz, Ş., 2021. Investigation of the mechanical properties of tensile test samples produced with a 3D printer using different bed and nozzle temperatures with ABS and PLA filaments. *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 24(4), 341-358.
2. Kamer, M.S., Doğan, O., Temiz, Ş., Yaykaşlı, H., 2021. Investigation of the mechanical properties of flexural test samples produced using different printing parameters with a 3D printer. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 36(3), 835-846.
3. Kamer, M.S., Temiz, Ş., Yaykaşlı, H., Kaya, A., 2021. Investigation of the mechanical properties of tensile test samples produced in different colors and different infill patterns with a 3D printer. *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*, 26(33), 829-848.
4. Kartal, F., Kaptan, A., 2023. Experimental determination of the optimum cutting tool for CNC milling of 3D printed PLA parts. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 7(2), 150-160.
5. Tunçel, O., Tutar, M., 2023. Investigation of the effect of edge width on compressive strength of FCC structured specimens produced with FDM. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 38(3), 851-858.
6. Demirci, E., Şenaysoy, S., Tuğcu, S.E., 2023. The effect of nozzle diameter and layer thickness on mechanical behaviour of 3D printed PLA lattice structures under quasi-static loading. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 7(1), 105-113.

7. Şahin, G., Özyıldırım, H., Şahin, A., 2023. Investigation of the change in the mechanical and print properties of the poly (lactic acid) filaments used in 3D printers as a result of exposure to humid environment. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 7(2), 204-219.
8. Bolat, Ç., Ergene, B., 2022. An investigation on dimensional accuracy of 3D printed PLA, PET-G and ABS samples with different layer heights. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 37(2), 449-458.
9. Doğan, O., Kamer, M.S., 2023. Experimental investigation of the creep behavior of test specimens manufactured with fused filament fabrication using different manufacturing parameters. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(3), 1839-1848.
10. Kamer, M.S., Temiz, Ş., Yaykaşlı, H., Kaya, A., Akay, O.E., 2022. Comparison of mechanical properties of tensile test specimens produced with ABS and PLA material at different printing speeds in 3D printer. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(3), 1197-1211.
11. Kamer, M.S., Temiz, Ş., Yaykaşlı, H., Kaya, A., Akay, O.E., 2022. Effect of printing speed on FDM 3D-printed PLA samples produced using different two printers. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 6(3), 438-448.
12. Doğan, O., Kamer, M.S., 2022. A novel production method of polymer bolts and the effects of the printing orientation on tensile and shear strength of the 3D printed bolts. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 37(2), 519-529.
13. Kaveloğlu, S., Temiz, Ş., Doğan, O., Kamer, M.S., 2022. Investigation of bending strength of honeycomb sandwich structures with different cell diameters produced by 3D printer. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 37(2), 459-470.
14. Kamer, M.S., Uzay, Ç., 2022. Investigation of tensile test samples produced by 3D printer using PLA filaments of different diameters. *Al-Farabi 4th International Congress on Applied Sciences*, 539-548, 19-20 August 2022, Erzurum, Turkey.
15. ASTM D638-14, 2014. Standard test method for tensile properties of plastics. ASTM International, <https://www.doi.org/10.1520/D0638-14>. Access date: 16 Aug 2017.
16. Raise3D Premium PLA\_TDS-v4.0, 2019. Raise3D premium PLA technical data sheet. Raise3D, [https://s2.raise3d.com/public/media/2019/07/Raise3D\\_Premium\\_PLA\\_TDS\\_V4.pdf](https://s2.raise3d.com/public/media/2019/07/Raise3D_Premium_PLA_TDS_V4.pdf). Access date: 3 May 2024.
17. Ultimaker-PLA-TDS-v5.00, 2022. Ultimaker PLA technical data sheet. Ultimaker, <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011962720-Ultimaker-PLA-TDS>. Access date: 3 May 2024.
18. Zaxe Z1+. ZAXE Z1+ PLUS 3D YAZICI. Yıldız Büro, <https://yildizburo.com/ZAXE%20Z1%20PLUS%203D%20YAZICI>. Access ate: 3 May 2024.
19. Ultimaker\_S5. Ultimaker S5 3D printer. Ultimaker, <https://ultimaker.com/3d-printers/s-series/ultimaker-s5/>. Access date: 3 May 2024.

## 2-D Microstructure Modeling based on Micrographs of Laser Powder Bed Fusion Melted Specimens

Ali Can KAYA<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup>Turkish-German University, Faculty of Engineering, Department of Mechatronics Engineering, Istanbul, Türkiye

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0003-2856-5508

### Article Info

Received : 23.02.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1559938

### Corresponding Author

Ali Can KAYA

alican.kaya@tau.edu.tr

### Keywords

Microstructure

FE method

Additive manufacturing

Fusion boundary

**How to cite:** KAYA, A.C., (2024). 2-D Microstructure Modeling based on Micrographs of Laser Powder Bed Fusion Melted Specimens. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 609-615.

### ABSTRACT

2D microstructural modeling based on the optical micrographs was successfully carried out. Creating a realistic microstructural model containing microstructural features such as fusion boundaries and phases makes it possible to analyze the relationship between the microstructure and property. We implemented this method to the 316 stainless steel (SS) laser powder bed fusion melted specimens. The optical micrographs were meshed and imported into finite element (FE) software. According to the results, the orientation of the fusion boundaries significantly influenced the mechanical properties of the printed parts. Stress localization was significant when the fusion boundaries were parallel to the loading direction. The situation differed when the fusion boundaries were perpendicular to the loading direction. In this case, the large amount and size of fusion boundaries showed significant ductility with homogeneously distributed straining.

## Lazer Toz Yataklı Füzyon ile Eritilmiş Numunelerin Mikrograflarına Dayalı 2 Boyutlu Mikroyapı Modellemesi

### Makale Bilgileri

Geliş : 23.02.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1559938

### Sorumlu Yazar

Ali Can KAYA

alican.kaya@tau.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Mikroyapı

Sonlu elemanlar metodu

İmalat

Füzyon sınırları

**Atf şekli:** KAYA, A.C., (2024). 2-D Microstructure Modeling based on Micrographs of Laser Powder Bed Fusion Melted Specimens. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 609-615.

### ÖZ

Optik mikrograflara dayalı 2 boyutlu mikroyapısal modelleme başarıyla gerçekleştirildi. Füzyon sınırları ve fazlar gibi mikroyapısal özellikleri içeren gerçekçi bir mikroyapısal modelin oluşturulmasıyla mikroyapı ve özellik arasındaki ilişkinin analiz edilmesi mümkün olmuştur. Bu yöntemi 316 paslanmaz çelik (SS) lazer toz yataklı füzyon ile sinterlenmiş numunelere uyguladık. Optik mikrograflara mesh atıldı ve sonlu elemanlar (FE) yazılımına aktarıldı. Sonuçlara göre, füzyon sınırlarının yönelimi, 3d yazıcı ile üretilmiş parçaların mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Füzyon sınırları yüklem eksenine paralel olduğunda önemli bir gerilim lokalizasyonu oluşmuştur. Füzyon sınırları yüklem doğrultusuna dik olduğunda ise durum farklıdır. Bu durumda büyük miktarda ve boyuttaki füzyon sınırları, homojen olarak dağılmış bir şekil değiştirme ile önemli bir süneklik göstermiştir.

## 1. INTRODUCTION

Additive manufacturing technologies draw attention to part production for diverse applications. In additive manufacturing, various fabrication parameters, such as layer thickness, laser power, scanning speed, and hatching distance, influence the microstructure of the parts and result in a complex interplay between the microstructure and the mechanical properties. A substantial effort is dedicated to comprehending the impact of these production parameters on microstructure and mechanical properties [1].

The laser powder bed fusion process is an additive manufacturing method that uses a high-energy laser to melt metal powder layer by layer [2]. During this process, the laser impinged on a single point and tracked the surface of the powder bed. Melting of the powder results in a melt pool, which solidifies quickly and creates an anisotropic microstructure with elongated grains. Besides, melt pools intersect along the building direction and overlap with adjacent scan tracks, forming fusion boundaries between tracks and layers. Shifeng et al. [2] addressed that sharp corners were generated at the junction of layer-layer and track-track fusion boundaries, triggering crack initiation. They also discovered that slippage at these fusion boundaries enhanced material ductility, even under room-temperature loading conditions.

Several studies have investigated the impact of building direction, or texture, on mechanical properties [3-7]. For instance, Hitzler et al. [6] revealed maximum values for samples fabricated at a polar angle of 45 degrees. Contrary to that Guan et al. [3] illustrated that horizontally built 316L samples exhibited the highest tensile strength. Furthermore, Güden et al. [5] reported that strength increased with increasing the polar angle for 316L samples. As computational work, Ahmadi et al. [7] carried out a 3D numerical study on the effects of the microstructure on the mechanical properties of the parts fabricated by selective laser melting (SLM). They modeled the microstructure with grain and melt pools, simulated by overlapping cylinders interconnected by cohesive surfaces. They modeled the grains using the Voronoi tessellation method. Furthermore, Rodgers et al. [8] applied a computational method based on a Monte Carlo Potts model to generate an additively manufactured microstructure. Microstructure evolution was simulated using the melt pool shape, temperature gradient, and scan pattern.

To our knowledge, 2D microstructure modeling of laser powder bed fusion melted specimens based on optical micrographs has not been applied. Here in this study, FE modeling of the microstructure was conducted, and the influence of the fusion boundaries on the mechanical properties was elucidated.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Materials

Specimens were produced using a laser powder bed fusion machine for additive manufacturing of metal parts (Concept Laser M2 Cusing, Concept Laser GmbH, Lichtenfels, Germany) [1]. The samples were synthesized with an energy density of  $75 \text{ J mm}^{-3}$  under a nitrogen gas atmosphere with the printing parameters in Table 1. The layer thickness of the parts was  $30 \mu\text{m}$ .

**Table 1.** Printing parameters of the samples [1]

Parameters	Value
Laser power (W)	180
Spot size ( $\mu\text{m}$ )	140
Scann speed (mm/s)	700
Offset to original contour (mm)	0.0825
Hatching distance (mm)	0.115

Fig. 1 shows dogbone-shaped specimens of various sizes and shapes. The specimens were built vertically and parallel to the building directions. The thickness of the micros tensile specimens was 1 mm.



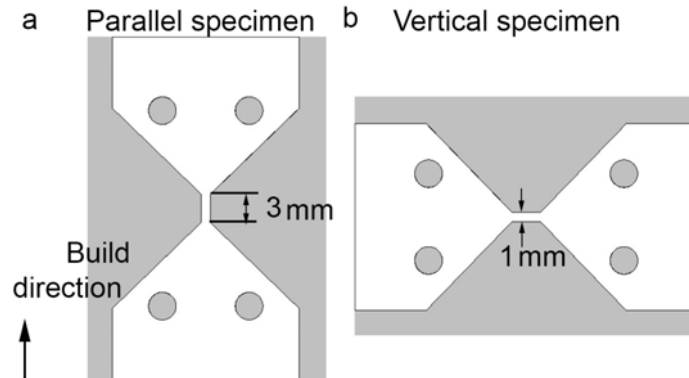


Figure 1. Dimension and shape of the a) parallel and b) vertical printed samples [1]

## 2.2. Metallographic Preparation

The etched samples were used to observe the microstructure optically. For this purpose, specimens were inserted in epoxy resin and ground on SiC abrasive paper with grit sizes spanning from 300 grit to 1200 grit. After that, polishing was conducted using diamond suspensions of 3 and 1  $\mu\text{m}$  grain size for 5 and 3 min, respectively. Further polishing was accomplished with silica suspension for 1 minute.

To observe the fusion layers, etching was conducted with a V2A etchant at 50 °C for 30 sec. The microstructure surface was then captured with a Leica DMRM light microscope (Leica Microsysteme Vertrieb GmbH, Wetzlar, Germany).

## 2.3. Image Processing

Before FE meshing, captured microstructure images were processed using a software, Image J [9]. Figure 2 demonstrates the image processing sequence. The optical micrograph was initially scaled, and then the “subtract background” tool was implemented to isolate the fusion boundaries. Secondly, the “make binary” tool was carried out to create a binary image. The emerging speckles in the background were removed using the “despeckle tool”. Finally, the gray image value was inverted to develop the segmented fusion boundaries in the micrograph.

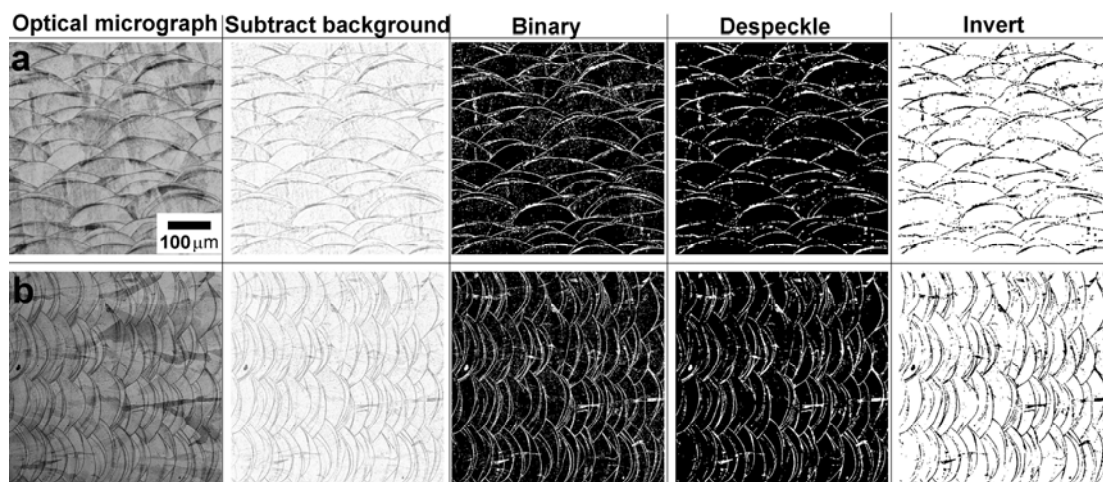


Figure 2. Image processing on the micrographs of the a) parallel and b) vertical specimens

## 2.4. FE Meshing

FE meshing was accomplished using the Im2mesh plug-in [10] based on MESH2D [11] (Delaunay mesh generator), which converted 2D multi-phase images into FE triangular meshes. The Im2mesh plug-in was executed in Matlab R2023a (The MathWorks Inc., Massachusetts, USA). Table 2 gives the parameters for meshing the microstructure.

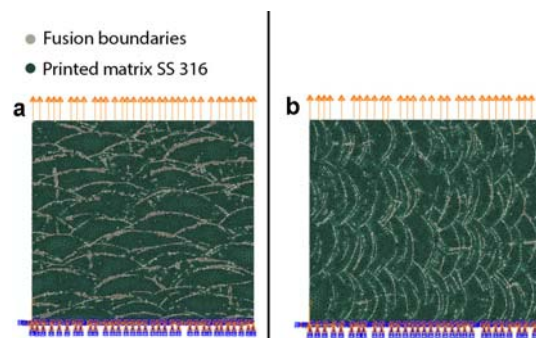
Three essential parameters are used in the Im2mesh, including tolerance, hmax, and grad\_limit. Tolerance is used as a tolerance for polygon simplification. hmax depicts the maximum mesh size. grad\_limit explains the scalar gradient limit for the mesh [10, 11]. Generated meshes were recorded as .inp files and imported into the FE software.

**Table 2.** Parameters used for meshing

Parameters	Values
tolerance	1
hmax	2500
grad_limit	+0.25

### 2.5. FE Modeling

Initially, vertical and horizontally built microstructure meshes were scaled to their actual size using the copy command in FE Software. Fusion boundaries and matrix meshes were imported as different parts in the beginning. Then, those parts and nodes were merged only on the boundary. Constitutive material models were taken from our previous work [1]. Micro-tensile testing of the specimen was performed with a speed of 5  $\mu\text{m/s}$  using a micro-testing machine (Kammrath und Weiss, Dortmund, Germany). Tensile testing was carried out under a digital light microscope to image the surface of the samples. Image series were acquired every 15 sec for evaluation in the digital image correlation method (DIC, Vic-2d, Correlated Solutions, Inc., Irmo, USA). Elongation of the printed samples was determined using a virtual extensometer function on the strain field. For more detailed information, please refer to reference [1]. The young modulus for horizontally and vertically built-up specimens were 193.3 GPa and 225 GPa, respectively. The yield strengths for horizontally and vertically built-up specimens were 513 and 667 MPa, respectively. Poisson's ratio was 0.3 [12]. The elastic-plastic material model was assigned to the matrix materials; however, only the elastic material model was set to the fusion boundaries. A 3-node linear plane stress triangle CPS3 with a linear geometric order was used as an element type. On one end, micrographs were fixed with encastre and displaced from the other end with a length of 0.016 mm, as illustrated in Fig. 3. The number of elements of vertically and horizontally built-up specimens was 101810 and 51511, respectively.



**Figure 3.** FE model of the printed a) parallel and b) vertical steel microstructures

### 2.6. XRD Measurement

XRD experiments were carried out on the printed sample using an XRD machine (Empyrean, Malvern Panalytical, Malvern, England) with Cu  $K\alpha$  radiation ( $\lambda = 1.54060 \text{ \AA}$ ). XRD scans were carried out in the range of  $2\theta = 40^\circ - 120^\circ$ . Scan parameters include a step size of  $0,013^\circ$  and a holding time of 80 s per step.

## 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

### 3.1. Microstructure Quantification

Parallel specimens have larger fusion boundary sizes than vertical specimens. The area percentage of the parallel specimen's fusion boundary is higher than that of the vertical specimen. The circularity and solidity

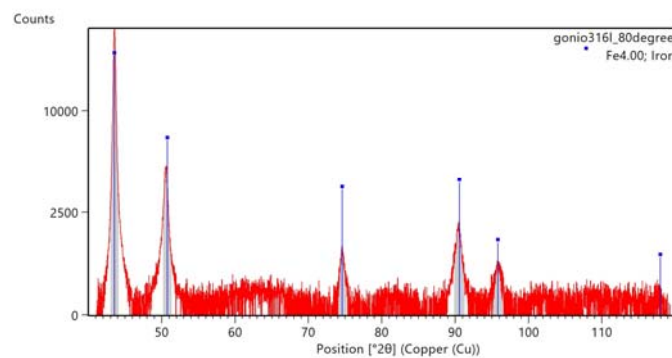
of both specimens are almost the same. The feret diameter of the fusion boundary was measured to be 8.9 and 14.6  $\mu\text{m}$  for vertical and parallel specimens, respectively.

**Table 3.** Quantification of the fusion boundary of the printed specimens

Fusion boundary properties	Vertical specimen	Parallel specimen
Average size	21.4 $\mu\text{m}$	82 $\mu\text{m}$
Area percentage	12.3%	17.4%
Circularity	0.76	0.77
Solidity	0.82	0.82
Feret diameter	8.9 $\mu\text{m}$	14.6 $\mu\text{m}$

### 3.2. X-ray Diffraction

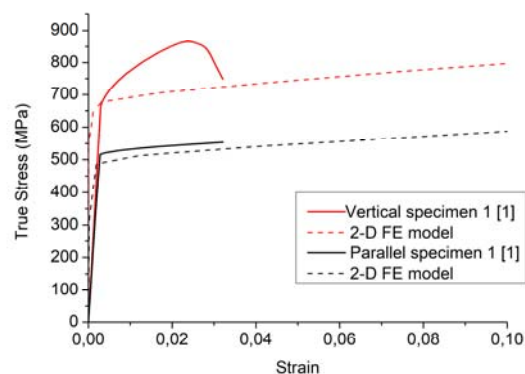
Fig. 4 illustrates the X-ray spectrum of the printed specimen. 316 stainless steel (SS) has an austenitic phase with  $\gamma$ -iron, also detected in the XRD.



**Figure 4.** XRD Spectrum of the 316 steel sample fabricated by laser powder bed fusion

### 3.3. Effects of Fusion Boundary on the Mechanical Properties

Microtensile testing results were compared with the 2-D modeling results. The Mises stresses and displacement from the nodes at the side of the model were averaged and plotted in Fig. 5. The 2-D modeling results well matched with the elastic portion of the curve. In the plastic regime, however, there is a discrepancy between the vertical samples' modeling and micro tensile testing results. Interestingly, the plastic portion of the parallel specimen is consistent with the experimental results.



**Figure 5.** True stress-strain curves of the modeling results and micro tensile testing.

Mises stress and PEEQ strain fields of the vertical specimen was demonstrated in Fig. 6. At a strain of 0.02, stress concentrated on the fusion boundaries, and a large localized strain was observed in the microstructure. At a strain of 0.03, there is a significant elongation in the microstructure, resulting in a decrease in the stress. Localized strain is aligned with an angle of  $45^\circ$  to the loading axis.

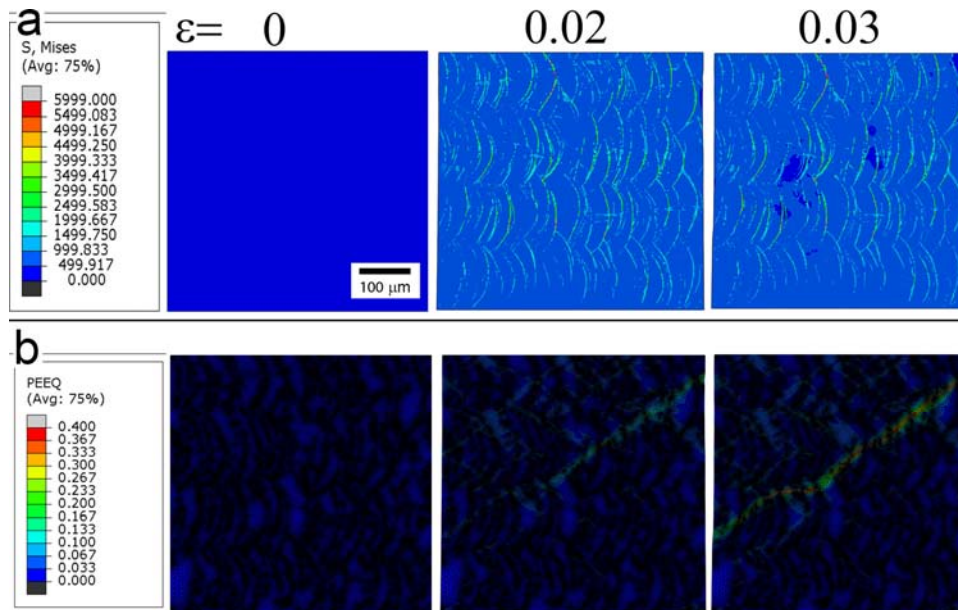


Figure 6. a) Mises stresses and b) Equivalent plastic strain (PEEQ) on the microstructure of vertical specimen at a strain of 0, 0.02, and 0.03

In the case of a parallel specimen, Mises stress and PEEQ strain fields differ more from the vertical specimens (Figure 7). At a strain of 0.02, there is a stress concentration on the fusion boundaries. Upon further loading, the stress concentration on the fusion boundaries is maintained. The straining in the microstructure is distributed homogeneously.

Vertical specimens showed significant strain hardening in the plastic regime. This can be attributed to the localization of the stress flow due to the orientation of the fusion boundaries. Parallel fusion boundaries enhance the strain hardening. However, in the case of vertical specimens, the fusion boundaries significantly hindered stress flow, where boundaries are situated vertically to the loading direction.

The inherent property of the printed microstructure significantly impacts the mechanical properties of the metals and may lead to unexpected results during service.

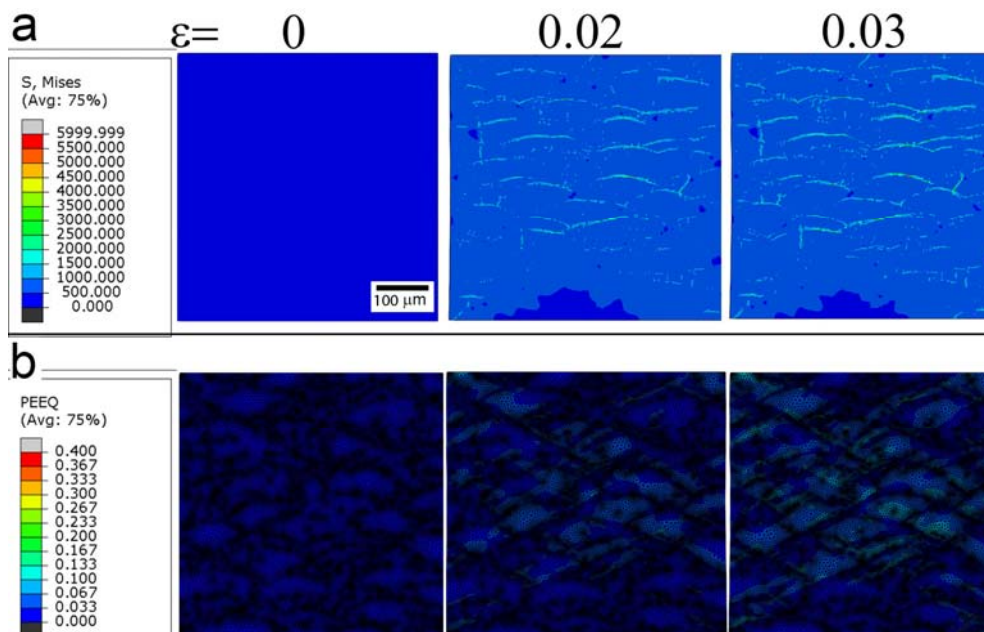


Figure 7. a) Mises stresses and b) Equivalent plastic strain (PEEQ) on the microstructure of parallel specimen at a strain of 0, 0.02, and 0.03



## 4. CONCLUSIONS

2-D microstructure modeling allows us to demonstrate the influence of the fusion boundary shape and size on the stress and strain distribution in the microstructure. According to findings in this study the following results can be drawn from this study:

1. Parallel built-up specimens possessed larger dimensions and higher amounts of fusion boundaries than vertical specimens.
2. Fusion boundaries are almost parallel to the loading axis for vertically built-up specimens. The enormous strain was localized in the microstructure.
3. Fusion boundaries in parallel specimens are perpendicular to the longitudinal axis, resulting in a more homogenous strain distribution.
4. Higher plasticity of the parallel specimen is due to the uniform distribution of the strain in the microstructure
5. The orientation, size, and amount of the fusion boundaries are important and affect the mechanical properties.

2-D microstructure modeling based on the optical micrographs allows us to analyze the microstructure-property relationship in detail.

## 5. REFERENCES

1. Kaya, A.C., Salamcı, M.U., Fleck, C., 2023. Influence of anisotropy on the deformation behavior in microtensile 316L steel specimens fabricated by laser powder bed fusion (PBF-LB/M). *Materials Science & Engineering A*, 863, 144521.
2. Shifeng, W., Shuai, L., Qingsong, W., Yan, C., Sheng, Z., Yusheng, S., 2014. Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 2660-2667.
3. Guan, K., Wang, Z., Gao, M., Li, X., Zeng, X., 2013. Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel. *Materials & Design*, 50, 581-586.
4. Rehme, O., Emmelmann, C., 2006. Rapid manufacturing of lattice structures with selective laser melting, in: Bachmann, F.G., Hoving, W., Lu, Y., Washio, K., (Eds.), *Proc. SPIE 6107, Laser-Based Micropackaging*, San Jose, CA, USA, p. 61070K.
5. Güden, M., Yavas, H., Tanrikulu, A.A., Tasdemirci, A., Akın, B., Enser, S., Karakus, A., Hamat, B.A., 2021. Orientation dependent tensile properties of a selective-laser-melt 316L stainless steel. *Materials Science & Engineering A*, 824, 141808.
6. Hitzler, L., Hirsch, J., Heine, B., Merkel, M., Hall, W., Ochsner, A., 2017. On the anisotropic mechanical properties of selective laser-melted stainless steel. *Materials*, 10, 1136.
7. Ahmadi, A., Mirzaeifar, R., Moghaddam, N.S., Turabi, A.S., Karaca, H.E., Elahinia, M., 2016. Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting: a computational framework. *Materials & Design*, 112, 328-338.
8. Rodgers, T.M., Madison, J.D., Tikare, V., 2017. Simulation of metal additive manufacturing microstructures using kinetic Monte Carlo. *Computational Materials Science*, 135, 78-89.
9. Abramoff, M.D., Magelhaes, P.J., Ram, S.J., 2004, *Image processing with Image J* *Biophoton. Int.*, 11, 36-42.
10. Ma, J., 2024. Im2mesh (2D image to triangular meshes) (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/71772-im2mesh-2d-image-to-triangular-meshes>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved March 23, 2024.
11. Engwirda, D., 2014, *Locally-optimal Delaunay-refinement and optimisation-based mesh generation*. Ph.D. Thesis, School of Mathematics and Statistics, The University of Sydney, <http://hdl.handle.net/2123/13148>.
12. Kaya, A.C., 2020. In situ shear behavior of open-cell austenitic 316L steel foams. *Materials Chemistry and Physics*, 252, 123303.





## Determination of the Hydraulic Conductivity Behavior of Seaweed Added Zeolite-Bentonite Mixtures in the Presence of Temperature with Empirical Relationships

Esra GÜNERİ<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup>Izmir Democracy University, Department of Civil Engineering, Izmir, Türkiye

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0002-1840-2118

### Article Info

Received : 19.02.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1559943

### Corresponding Author

Esra GÜNERİ

esra.guneri@idu.edu.tr

### Keywords

Bentonite

Hydraulic conductivity

Seaweed

Temperature

Zeolite

**How to cite:** GÜNERİ, E., (2024). Determination of the Hydraulic Conductivity Behavior of Seaweed Added Zeolite-Bentonite Mixtures in the Presence of Temperature with Empirical Relationships. *Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering*, 39(3), 617-623.

### ABSTRACT

The temperature factor is of great importance in areas that directly affect the environment and engineering parameters of liners, such as solid waste storage areas. It is known that the temperature value increases as a result of the degradation of waste in these areas, and temperature changes affect the engineering properties of the soils. Properties vary depending on the soil type, and additives that can be used to improve the engineering properties of soils come to the fore. One of the most important criteria is that the additive to be used is sustainable and environmentally friendly. *Zostera marina*, with its terminological name, or dried seaweed an aquatic plant and is a sustainable, low-cost material used in thermal insulation. In this study, dried seaweed additive was added to zeolite-bentonite mixtures and compression parameters were determined under room temperature and 40°C. Hydraulic conductivity values of seaweed-added mixtures were determined with the help of volumetric compression coefficient ( $m_v$ ) and consolidation coefficient ( $c_v$ ) parameters and empirical relationships obtained as a result of consolidation tests. Its potential to be used as a buffer material in the presence of temperature in solid waste storage areas evaluated. The tests results showed that the seaweed additive decreased the hydraulic conductivity values of zeolite-bentonite mixtures at room temperature and under 40°C.

## Deniz Yosunu Katkılı Zeolit-Bentonit Karışımlarının Sıcaklık Varlığında Hidrolik İletkenlik Davranışının Ampirik İlişkilerle Belirlenmesi

### Makale Bilgileri

Geliş : 19.02.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1559943

### Sorumlu Yazar

Esra GÜNERİ

esra.guneri@idu.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Bentonit

Hidrolik iletkenlik

Deniz yosunu

Sıcaklık

Zeolit

**Atf şekli:** GÜNERİ, E., (2024). Determination of the Hydraulic Conductivity Behavior of Seaweed Added Zeolite-Bentonite Mixtures in the Presence of Temperature with Empirical Relationships. *Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering*, 39(3), 617-623.

### ÖZ

Katı atık depolama alanlarında çevre ve mühendislik parametreleri açısından sıcaklık faktörü de önem arz etmektedir. Bu alanlarda atıkların bozunması sonucunda sıcaklık değerinin yükseldiği bilinmektedir ve sıcaklık değişimleri zeminlerin mühendislik özelliklerini etkilemektedir. Zemin cinsine bağlı olarak da özellikler değişim göstermektedir ve zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılabilecek katkı malzemeleri ön plana çıkmaktadır. Burada en önemli kriterlerden biri kullanılacak katkının sürdürülebilir ve çevreyle dost olmasıdır. Terminolojik adıyla *Zostera marina* yani kurutulmuş deniz yosunu, bir su bitkisi olup sürdürülebilir, maliyeti düşük ve ısı yalıtımında kullanılan bir materyaldir. Bu çalışmada kurutulmuş yosun katkısı, zeolit-bentonit karışımlarına eklenerek oda sıcaklığı ve 40° C sıcaklık altında sıkışma parametreleri belirlenmiştir. Konsolidasyon deneyleri sonucunda elde edilen hacimsel sıkışma katsayısı ( $m_v$ ) ve konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ) parametreleri ve ampirik ilişkiler yardımı ile yosun katkılı karışımların hidrolik iletkenlik değerleri belirlenmiştir. Katı atık depolama alanlarında sıcaklık varlığında tampon malzeme olarak kullanıma potansiyeli değerlendirilmiştir. Deney sonuçları yosun katkısının, zeolit-bentonit karışımlarının hidrolik iletkenlik değerlerini oda sıcaklığı ve 40° C sıcaklık altında azalttığını göstermiştir.

## 1. INTRODUCTION

Studies in the field of geotechnical engineering under higher temperatures are gaining importance day by day. Because the increasing world population, the ability to meet the energy needs of the population in a sustainable way, and the orientation towards alternative energy sources instead of fossil fuels have resulted in an increase in the use of energy geo-structures.

It is known that the engineering behavior of soils changes to a non-negligible extent in areas where high temperatures occur, such as solid waste and nuclear waste storage areas [1,2]. Solid waste is decomposed by bacteria and during this process, the temperature values in the environment rise. In order for decomposition to occur, the temperature value must be between 35-40 °C and 50-60 °C. These values vary depending on the type of microorganism that performs the decomposition. [3]. It has been recorded that it is 55 °C and below for multiple solid waste storage areas [4-6]. It has been determined that temperature values in areas with high temperature storage areas, which is a different concept, reach 100 °C [7]. For instance, high temperature values resulting from the decomposition of waste by microorganisms in solid waste storage areas [3] affect the hydraulic conductivity coefficient (k), one of the most important parameters in these areas, and accelerate permeability, leading to undesirable results. The exposure of the soil to temperature does not only occur due to the above-mentioned structures. Seasonal changes, melting of frozen ice masses and mixing into the soil play an important role in changing the temperature values of the soil [8,9]. Although hydraulic conductivity is one of the most basic engineering parameters, it varies depending on many factors such as temperature, viscosity, void ratio, mineralogical structure, dry density and stress history [10]. As the temperature increases, permeability increases due to the decrease in viscosity [11-13].

Another parameter affected by temperature changes belongs to consolidation. In cases where the compression index, consolidation coefficient and creep mechanism occur, creep behavior is affected by the temperature increase. In the most basic way, it can be said that the void ratio decreases with increasing temperature and therefore the compression increases [14]. The creep behavior, that is, the part that expresses how consolidation occurs in the heating-cooling cycle of the soils, refers to the drainage of excess pore water from the voids [15-16].

Within the scope of this study, dried seaweed additive was used to be used as a buffer material in solid waste storage areas. This aquatic plant, whose terminological name is *Zostera marina*, has been used for years for purposes such as roof insulation in cold countries such as Denmark, and is low-cost, sustainable and resistant to thermal changes. In this study, the hydraulic conductivity behavior of dried seaweed-added zeolite-bentonite mixtures were examined with the help of the parameters obtained as a result of consolidation tests carried out at room temperature and 40°C. The dried seaweed additive effect on the permeability of mixtures and the mechanism of permeability changing with temperature are discussed.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Materials

In this study, bentonite, zeolite and dried seaweed (as additive) were used.



**Figure 1.** Dried seaweed additive

Materials were obtained from local companies. The physico-chemical properties of bentonite and zeolite are given in Table 1. Seaweed (*Zostera marina*) is a marine plant whose habitat is an aquatic area, which grows under water, and whose leaf length is maximum 1100 mm. Underwater leaf blade width is approximately 2-12 mm. The seaweed used as additive material in the tests was provided in dried form (Figure 1).

**Table 1.** Physicochemical properties of the materials

Property	Zeolite	Bentonite
Specific gravity	2.40	2.70
Liquid limit (%)	50.0	476.0
Plastic limit (%)	N.P.	70.1
pH	7.6	9.5

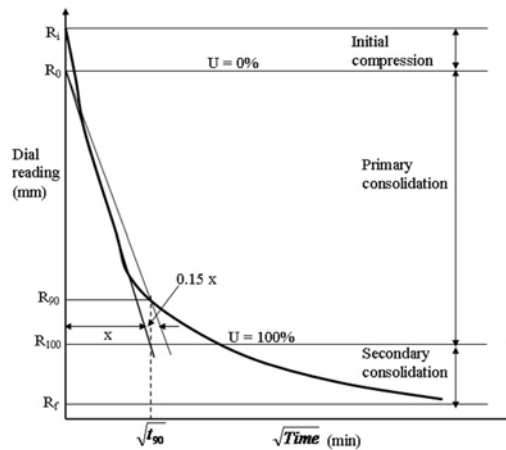
## 2.2. Methods

The Standard Proctor tests [17] were conducted on the samples. According to the optimum water content ( $w_{opt}$ ) and maximum dry unit weight parameters ( $\gamma_{dry,max}$ ) obtained from these tests, mixtures were prepared and the consolidation test was started.



**Figure 2.** Consolidation test equipment at room temperature and 40°C

Consolidation tests were carried out according to ASTM D2435 [18]. The tests were carried out at room temperature and under 40°C. Loadings started from 0.25 kg/cm<sup>2</sup> and continued up to 2 kg/cm<sup>2</sup>. Then the unloading phase started. For the tests under high temperature, a heat ring was placed inside the cell, precautions were taken for evaporation by supplying water from the water tank through pipes, and the cells were covered with a thick membrane (Figure 2). The tests were started and terminated at 40°C. After then, the samples were placed in the oven for water content determination. By comparing the test results, the high temperature effects were observed.



**Figure 3.** Square root of time method [19]

The square root time method was used to calculate the consolidation coefficient,  $c_v$  (Figure 3). After determining the  $t_{90}$  value with this method, the  $c_v$  value was obtained by substituting in Equation 1. The  $m_v$  value was obtained with the experimental data during the calculation of the compression amount. The hydraulic conductivity coefficient was calculated using the consolidation coefficient ( $c_v$ ) and volumetric compression coefficient ( $m_v$ ) parameters obtained at room temperature and under 40°C. The permeability coefficient ( $k$ ) was calculated by Equation 2.

$$c_v = \frac{0.848d^2}{t_{90}} \quad (1)$$

$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_{water} \quad (2)$$

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The Standard Proctor test results showed that as the seaweed content was increased, the optimum water content increased and the maximum dry unit volume weight value decreased. Consolidation test results indicated that the compression amount of additive free zeolite-bentonite mixtures at room temperature was 19.4%. With 10% and 20% seaweed additive, this rate decreased to 17.7% and 16.8%, respectively. An increase in the amount of compression of the mixtures was observed at 40°C compared to room temperature, it was determined that the additives had an effect on reducing the amount of compression. In parallel with these data, a decrease in the consolidation coefficient was observed with the addition of dried seaweed, and it's change depending on temperature as given in Figure 4. Abuel-Naga et al. (2005) reported that in their study on the normally consolidated soft Bangkok clay at different temperatures that the consolidation rate ( $c_v$ ) increases with increasing temperature. Delage et al. (2004) studied on the over consolidated Boom clay sample and stated that the changes in  $c_v$  and  $m_v$  with temperature increase were negligible unless the temperature was higher than 60 °C [20, 21].

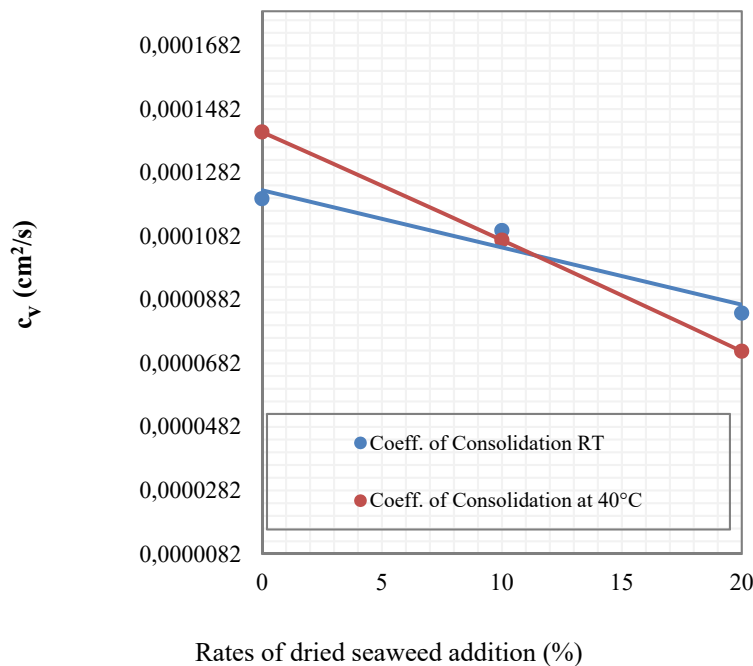
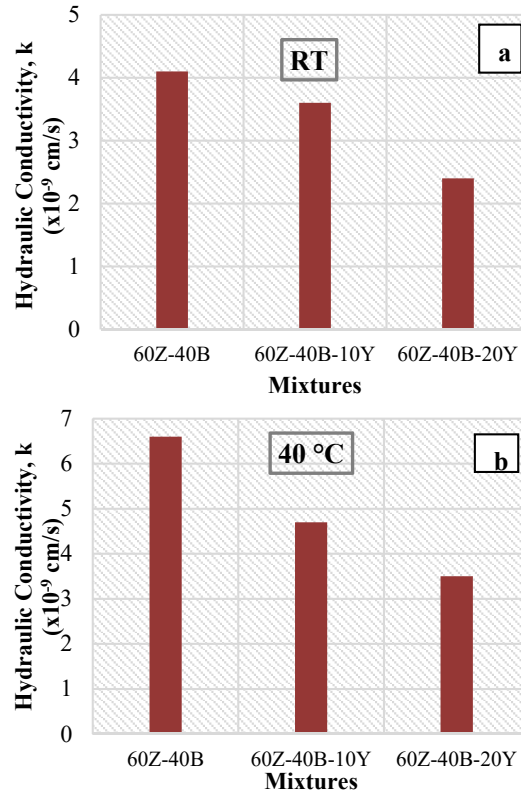


Figure 4. Change of  $c_v$  depending on addition amount

The  $t_{90}$  value was calculated from the consolidation curve of all mixtures using the square root time method. The permeability coefficient  $k$ , determined by empirical methods shows that the value of zeolite-bentonite mixtures at room temperature is  $4.1 \times 10^{-9}$  cm/s, while with 10% and 20% seaweed additive these values decreased  $3.6 \times 10^{-9}$  cm/s and  $2.4 \times 10^{-9}$  cm/s, respectively.



**Figure 5.** Hydraulic conductivity ( $k$ ) values of dried seaweed added mixtures a) at RT and b) 40°C

It is shown in Table 2 that decreasing trend was also seen under 40°C temperature. It was observed that as the temperature increases to 40°C, the increase in the permeability values compared to room temperature. It is possible that a clay mineral with a larger surface area will retain more water than a smaller surface area, and the surface area will be more affected by the increase in temperature [1].

**Table 2.** The coefficients of permeability, consolidation and volumetric compressibility

Mixtures	Room temperature			40°C		
	$c_v$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$m_v$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	$k$ ( $\text{cm}/\text{s}$ )	$c_v$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$m_v$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	$k$ ( $\text{cm}/\text{s}$ )
<b>60Z-40B</b>	$1.2 \times 10^{-4}$	$34 \times 10^{-6}$	$4.1 \times 10^{-9}$	$1.41 \times 10^{-4}$	$47 \times 10^{-6}$	$6.6 \times 10^{-9}$
<b>60Z-40B-10Y</b>	$1.1 \times 10^{-4}$	$33 \times 10^{-6}$	$3.6 \times 10^{-9}$	$1.07 \times 10^{-4}$	$44 \times 10^{-6}$	$4.7 \times 10^{-9}$
<b>60Z-40B-20Y</b>	$8.4 \times 10^{-5}$	$29 \times 10^{-6}$	$2.4 \times 10^{-9}$	$7.2 \times 10^{-5}$	$49 \times 10^{-6}$	$3.5 \times 10^{-9}$

Also, the effect of soil mineralogy in the resulting difference cannot be neglected. Different factors such as specific surface area (SSA) and soil mineralogy change the consistency limits in the presence of temperature, viscosity changes and hydraulic conductivity is affected [22]. The potential for redistribution of intra- and inter-particle pores with increasing temperature may change the permeability coefficient of the soil [23]. As the temperature increases, the size of the diffuse double layer changes with temperature. Water adsorbed at a high temperature can be converted into bulk pore water, resulting in increased hydraulic conductivity [12, 24]. Different additive materials were used to evaluate hydraulic conductivity behavior. Studies have shown that 15% boron additive (tincal) has an effect of increasing hydraulic conductivity by approximately 20 times [25]. In another study, it was revealed that the hydraulic conductivity value of sand-bentonite mixtures increased approximately 3.5 times in the presence of 10% ulexite, another boron mineral, while it did not show a significant change in the presence of 20% ulexite [26].

The behavior revealed that the dried seaweed additive contributes to the permeability-reducing effect and is suitable for use in situations where leachate as well as temperature need to be buffered, such as solid waste storage areas. The sealing limit value  $k$  of the material that can be used as a buffer in solid waste storage areas is around  $\sim 10^{-11}$  m/s. It was observed that the permeability of the added and additive free zeolite-bentonite mixtures used in this study was approximately and generally compatible with these limits.

If seaweed is used in applications, it should be evaluated by taking into account the degradation processes and rates according to the type and characteristics of the seaweed. Biodegradation of seaweed depends on the dissolution and degradation of the component called "alginate". Alginate constitutes the main structural component of the cell wall and intercellular matrix of brown seaweeds. However, compounds such as polyphenols in seaweed can also affect biodegradation. Alginates can be degraded by acid and alkali hydrolysis. Hydrolysis refers to the combined dissolution of particulate material as well as the degradation of polymeric substances [27].

#### 4. CONCLUSIONS

In this study, behavior of dried seaweed-added zeolite-bentonite mixtures were determined using empirical relationships at room temperature and 40°C. The  $k$  coefficients were determined with the help of  $c_v$  and  $m_v$  parameters obtained from the consolidation tests. It was observed that when the temperature was increased from room temperature to 40°C, the amount of compression of the mixtures increased in line with the literature, but the seaweed additive had a reducing effect on the amount of compression in both temperature conditions. The test results showed that the dried seaweed additive had a reducing effect on the permeability of zeolite-bentonite mixtures under both conditions. Additionally, it was observed that as the temperature increases to 40°C, the permeability increased in comparison with room temperature. When all the results were evaluated, it was revealed that the mixtures within the scope of the study had a high potential to be used as buffer material in solid waste storage areas.

#### 5. REFERENCES

1. Jefferson, I., Rogers, C.D.F., (1998). Liquid limit and the temperature sensitivity of clays. *Eng. Geol.*, 49(2), 95-109.
2. Cekerevac, C., Laloui, L., (2004). Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28, 209-228.
3. Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S., (1993). *Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues*. Irwin/McGraw-Hill, Boston, MA.
4. Yeşiller, N., Hanson, J.L., Liu, W.L., (2005). Heat generation in municipal solid waste landfills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(11), 1330-1344.
5. Hanson, J.L., Yeşiller, N., Oettle, N.K., (2010). Spatial and temporal temperature distributions in municipal solid waste landfills. *Journal of Environmental Engineering*, 136(8), 804-814.
6. Hanson, J.L., Yeşiller, N., Onnen, M.T., Liu, W.L., Oettle, N.K., Marinos, J.A., (2013). Development of numerical model for predicting heat generation and temperatures in MSW landfills. *Waste Management*, 33(10), 1993-2000.
7. Tupsakhare, S., Moutushi, T., Castaldi, M.J., Barlaz, M.A., Luettich, S., Benson, C.H., (2020). The impact of pressure, moisture and temperature on pyrolysis of municipal solid waste under simulated landfill conditions and relevance to the field data from elevated temperature landfill. *Science of the Total Environment*, 723, 138031.
8. Konrad, J.M., (1989). Physical processes during freeze thaw cycles in clayey silts. *Cold Regions Science and Technology*, 16(3), 291-303.
9. Qi, Z., Hampton, C.R., Shin, R., Barkla, B.J., White, P.J., Schachtman, D.P., (2008). The high affinity  $K^+$  transporter AtHAK5 plays a physiological role in planta at very low  $K^+$  concentrations and provides a caesium uptake pathway in Arabidopsis. *J. Exp. Bot.*, 59, 595-607.
10. Villar, M.V., Gómez-Espina, R., Lloret, A., (2010). Experimental investigation into temperature effect on hydro-mechanical behaviours of bentonite. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2, 171-178.
11. Sultan, N., (1997). Etude du comportement thermo-mécanique de l'argile de Boom: expériences et modélisation. PhD Thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 217.
12. Delage, P., Sultan, N., Cui, Y.J., (2000). On the thermal consolidation of boom clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 37, 343-354.
13. Chen, G.J., Maes, T., Vandervoort, F., Sillen, X., Van Marcke, P., Honty, M., Vanderniepen, P., (2014). Thermal impact on damaged boom clay and opalinus clay: permeameter and isostatic tests with  $\mu$ CT scanning. *Rock Mech. Rock. Eng.*, 47(1), 87-99.



14. Jarad, N., (2016). Temperature impact on the consolidation and creep behaviour of compacted clayey soils. *Mechanics of materials [physics.class-ph]*. Université de Lorraine. English. NNT:2016LORR0251.
15. Le, T.M., Fatahi, B., Khabbaz, H., (2012). Viscous behaviour of soft clay and inducing factors. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, 1069-1083.
16. Green, W.J., (1969). The influence of several factors on the rate of secondary compression of soil. Master Thesis, The Missouri University of Science and Technology, Rolla, Missouri, USA.
17. ASTM: D698-12, (2012). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1-13.
18. ASTM International, (2011). ASTM D2435/D2435M-11: standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading.
19. EduRev, <https://edurev.in/t/125039/Taylor%E2%80%99s-Square-Root-of-Time-Fitting-Method-Determ>, Access date: 08.02.2024.
20. Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T., Soralump, S., Rujivipat, P., (2005). Thermal consolidation of soft Bangkok clay. *Lowland Technology International*, 7, 13-21.
21. Delage, P., Cui, Y.J., Sultan, N., (2004). On the thermal behavior of boom clay. *Proceeding Eurosafe 2004 Conference*. Berlin, Germany.
22. Youssef, M.S., Sabry, A., El Ramli A.H., (1961). Temperature changes and their effects on some physical properties of soils. *Proceedings of the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2, 419-421, Paris.
23. Bouazza, A., Abuel-Naga, H.M., Gates, W.P., Laloui, L., (2008). Temperature effects on volume change and hydraulic properties of geosynthetic clay liners. *The First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition*, Cancun, Mexico.
24. Cho, W.J., Lee, J.O., Chun, K.S., (1999). The temperature effects on hydraulic conductivity of compacted bentonite. *Applied Clay Science*, 14, 47-58.
25. Alpaydın, Ş.G., (2019). An investigation of effects of boron additives on the permeability and shear strength behavior of sand bentonite mixtures under high temperatures. Master Thesis, Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir.
26. Alpaydın, S.G., Yukselen-Aksoy, Y., (2021). Üleksit katkısının kum-bentonit karışımlarının mühendislik özelliklerine etkisi. *Politeknik Dergisi*, 24(4), 1345-1352.
27. Moen, Einar, (1997). Biological degradation of brown seaweeds. Doktor ingenjör, Department of Biotechnology Norwegian University of Science and Technology, 69.



## Borlanmış AISI H11 Takım Çeliğinin Kaplama Özellikleri ve Korozyon Oranının Makine Öğrenmesi Temelli Modellenmesi

Faruk ÇAVDAR<sup>1,a</sup>, Ali GÜNEN<sup>2,b</sup>, Mustafa SERT<sup>3,c</sup>

<sup>1</sup>Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Osmaniye

<sup>2</sup>İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Hatay

<sup>3</sup>İskenderun Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Hatay

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0002-4981-6428; <sup>b</sup>ORCID: 0000-0002-4101-9520; <sup>c</sup>ORCID: 0009-0003-6536-354X

### Makale Bilgileri

Geliş : 19.01.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560038

### Sorumlu Yazar

Faruk ÇAVDAR

farukcavdar@osmaniye.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

AISI H11

Kutu borlama

Korozyon oranı

Makine öğrenmesi

Regresyon modeli

**Atf şekli:** ÇAVDAR, F., GÜNEN, A., SERT, M., (2024). Borlanmış AISI H11 Takım Çeliğinin Kaplama Özellikleri ve Korozyon Oranının Makine Öğrenmesi Temelli Modellenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 625-638.

### ÖZ

Yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direncinde önemli ölçüde artışlar sağlaması nedeniyle borlama işlemi kullanılan en yaygın termokimyasal kaplama işlemlerinden birisidir. Bu çalışmada sıcak iş takım çeliklerinden AISI H11 malzemenin kutu borlama tekniğiyle borlanmasında işlem sıcaklığı ve süresinin kaplama kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü, sertliği ve korozyon oranına etkisi makine öğrenmesi yöntemleriyle modellenmiş ve incelenmiştir. Çalışma kapsamında çoklu doğrusal, K en yakın komşu, destek vektör makinesi, karar ağacı, rastgele orman ve ekstrem eğim artırma regresyon algoritmaları ile modeller oluşturulmuş ve bu modellerin performansları R<sup>2</sup>, ortalama mutlak hata ve ortalama kare hatası kriterleri kullanılarak kıyaslanmıştır. Kaplama tabakası kalınlık ve sertlikleri işlem sıcaklığı ve süresi ile artmaktadır. Diğer yandan bu özellikleri üzerinde borlama sıcaklığı süreye göre daha etkilidir. Regresyon modeli sonuçları incelendiğinde kaplama parametrelerinin kaplama kalınlığına ve pürüzlülüğe olan etkilerinin birleşerek korozyon oranı üzerinde kümülatif bir etkiye dönüştüğü görülmüştür. Çalışma sonucunda AISI H11 çeliğinin borlanmasında korozyon direnci için optimum parametre değerlerinin 1000 °C ve 2,2 saat olduğu sonucuna varılmıştır.

## Machine Learning Based Modeling of Coating Properties and Corrosion of Borided AISI H1 Tool Steel

### Article Info

Received : 19.01.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560038

### Corresponding Author

Faruk ÇAVDAR

farukcavdar@osmaniye.edu.tr

### Keywords

AISI H11

Pack boronizing

Corrosion rate

Machine learning

Regression model

**How to cite:** ÇAVDAR, F., GÜNEN, A., SERT, M., (2024). Borlanmış AISI H11 Takım Çeliğinin Kaplama Özellikleri ve Korozyon Oranının Makine Öğrenmesi Temelli Modellenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 625-638.

### ABSTRACT

Due to the significant increases in hardness, wear, and corrosion resistance it provides, boronizing is one of the most commonly used thermochemical coating processes. In this study, the effect of process temperature and duration on coating thickness, surface roughness, microhardness, and corrosion rate in boronized hot work tool steel AISI H11 material with pack boronizing technique has been modeled and investigated using machine learning methods. Multiple linear, K-nearest neighbors, support vector machine, decision tree, random forest, and extreme gradient boosting regression algorithms were employed to create models, and their performances were compared using R<sup>2</sup>, mean absolute error, and mean squared error criteria. Coating thickness and hardness increase with process temperature and duration. However, process temperature has a more significant effect on these properties compared to duration. Upon examining the results of the regression model, it was observed that the effects of coating parameters on thickness and roughness cumulatively transformed into an effect on the corrosion rate. As a result of the study, optimum parameter values for corrosion resistance in boronized AISI H11 steel were determined to be 1000°C and 2.2 hours.

## 1. GİRİŞ

Yüksek alaşımlı çeliklerden birisi olan AISI H11 çeliği yüksek tokluk, dayanım ve süneklik özelliklerine sahip olduğundan sıcak ve soğuk işlem uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [1,2]. AISI H11'in uygulamaları arasında uçak iniş takımları, helikopter rotor kanatları ve milleri, ekstrüzyon mandrilleri, plastik kalıpları, maçalar, kalıp tutucu bloklar, sıcak iş zımbaları, dişliler, merdaneler ve diskler yer almaktadır [3-5]. Bununla birlikte, diğer birçok metalde olduğu gibi, AISI H11 çeliği, yapısı kararsız olduğundan, kararlı, oksitlenmiş bileşikler oluşturmak için çevre ile etkileşime girme eğilimindedir. Bu durum malzemenin servis hayatında korozyon olarak kendisini göstermektedir. Pratikte korozyonu tamamen ortadan kaldırmak mümkün değildir. Fakat korozyonun ilerlemesi, çeşitli kaplamalar vasıtasıyla yavaşlatılabilir [6,7]. Bunlardan en etkili olanı metal yüzeyinin korozyon direnci yüksek bir malzeme ile kaplanmasıdır.

Aşındırıcı ortama maruz kalan çeliklerin veya diğer sert malzemelerin direncini artırmak için çok çeşitli kaplamalar uygulanır. Nitrüleme [8], alüminyumlama [9], iyon implantasyonu [10], seçici lazer eritme, fiziksel buhar biriktirme [11], kimyasal buhar biriktirme [12,13] ve derin kriyojenik ısıtma işlemi bu yöntemler arasındadır [14]. Kaplama tabakasının ana malzeme üzerindeki varlığını 1000 °C'ye varan sıcaklıklara kadar koruyabilmesi ve altlık malzeme ile adhezyonu yüksek olması avantajlarından dolayı termokimyasal işlemler diğerler kaplama metodlarına göre tercih sebebidir [3,7].

Borlama işlemi sonucu elde edilen borür kaplamaların yüksek sertlik, korozyon ve aşınma dirençleri sebebiyle termokimyasal kaplamalar içerisinde en yaygın olarak kullanılan kaplama yöntemlerinden birisidir. Bu yöntem Bor (B) verici bir ortamdan yüksek sıcaklık ve süreye bağlı olarak bor'un metalik malzemelere difüze olması ve metalik malzeme ile kimyasal bağlı bir borür tabakası oluşturması esasına dayanır. B'nin bir veya birden fazla bileşiminin oluşan sert bir yüzey elde edilmesini sağlar [15-18]. Borlama ile yüksek sertliğe ve mukavemete, ayrıca çeliklerde karbonlama, nitrüleme ve karbonitasyon gibi geleneksel yüzey işlemleriyle kolayca elde edilemeyen üstün tribolojik performansa sahip yüzeyler elde edilir [19-22]. Ayrıca bazı çalışmalarda borit tabakalarının çeşitli aşındırıcı sıvılara karşı çeliklerin korozyon direncini arttırdığını ortaya konulmuştur [23-26].

Değişik türdeki kaplamaların özelliklerinin makine öğrenmesi modelleri kullanılarak modellenmesi ile çalışmalara literatürde ancak son zamanlarda rastlanmaktadır. Kaplamalar ile ilgili yapılan makine öğrenmesi çalışmalarında, Magnezyum alaşımlarına uygulanan termal spreycaplamaların aşınma davranışları [27], çeliklere uygulanan çok katmanlı  $Ti_xAl_{1-x}N$  kaplamanın mekanik ve tribolojik özellikleri [28], karbid kesme takım uçlarının katı yağlayıcı ile kaplanmasında kaplama kalınlığı [29], yüksek entropili alaşımların ve çok elemanlı alaşımların termal spreycaplamaları ile oluşturulmasında toz formasyonlarının ve bunlara karşılık gelen faz oluşumları [30], kaplanmış alüminyum alaşımlı vidalama elamanlarının galvanik korozyon davranışları [31], değişik kalınlıklarda iki katmandan oluşan  $TiAlN$  kaplama sistemlerinin mekanik özellikleri [32] gibi hususların tahmin edilmesi gibi konular araştırılmıştır.

Borlanmış çeliklerin korozyon direncini inceleyen araştırmalar daha çok asit ortamlarında, özellikle bir HCl ortamındaki korozyon davranışlarına yöneliktir [33,34]. Yapılan çalışmalar sonucunda borlama işleminden sonra çeliklerin (düşük karbonlu çelik, soğuk takım çeliği, dişli çelik, AISI 1018, AISI 304'ten AISI M2'ye) korozyon direncinin arttığı belirlenmiştir. Birçok çelik malzeme NaCl ortamında kullanılıyor olmasına rağmen borürlenmiş çeliklerin NaCl ortamında korozyon davranışı üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür [35-38].

Önceki çalışmalarda borlanmış AISI H11 takım çeliğinin NaCl ortamında korozyon direnci analitik olarak incelenmiştir fakat kaplama işlemindeki uygulanan parametrelerinin korozyon direncine etkisinin herhangi bir yöntemle modellenmesine yönelik çalışmaya rastlanmamıştır [39]. Bu çalışmada AISI H11 çeliğinin kutu borlama tekniği ile borlanması 800 °C ile 1000 °C arasındaki sıcaklık ve 1 ile 5 saat arasındaki işlem süresi parametrelerinin kaplama kalınlığı, pürüzlülük, mikrosertlik gibi kaplama özelliklerinin yanı sıra korozyon direncine etkisi de değişik makine öğrenmesi yöntemleri ile modellenmiştir. Modelleme uygulamalarında, ekstrem gradyan artırma (XGBoost), destek vektör makinesi regresyonu (SVR), karar ağacı regresyonu (DT), K en yakın komşu (k-NN), çoklu doğrusal regresyon (MLR) ve rastgele orman (RF) algoritmaları kullanılmış ve bunların tahmin performansları karşılaştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Veri Seti

Bu çalışmada kullanılan veri seti daha önce yayınlanmış olan AISI H11 takım çeliğinin borlanmasında sıcaklık ve işlem süresi parametrelerinin korozyon dayanımına etkisi ile ilgili çalışmasındaki deney sonuçlarından oluşturulmuştur [39]. Kullanılan altlık malzemesinin DV-6S 3063A, Thermo Jarrell ASH/BAIRD Corp., ABD spektral analiz cihazı ile tespit edilen kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir. Çalışmada bor kaynağı olarak %90 amorf nanobor ve aktivatör olarak ağırlıkça %10 NaBF<sub>4</sub> tozundan oluşan borlama maddesi kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Deneysel çalışmada kullanılan AISI H11 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal kompozisyonu

Element	Cr	Mo	V	Si	C	Fe
% Ağırlık	5.07	1.25	0.3	1.0	0.35	Kalan

Belirtilen çalışma kapsamında AISI H11 çeliği numuneleri nano boyutlu borlama tozları kullanılarak 800, 900 ve 1000 °C’de 1, 3 ve 5 saat süreyle kutu borlama tekniği ile borlanmıştır. Belirtilen sıcaklık ve işlem sürelerinin kombinasyonları ile gerçekleştirilen deneysel kaplamalar ile elde edilen numunelerin kaplama tabakası kalınlıkları, ortalama yüzey pürüzlülükleri ve ortalama mikrosertlik değerleri tespit edilmiştir. Sonrasında borlanmış AISI H11 çelik numunelerinin korozyon direnci performansı CH 608E analiz cihazı kullanılarak ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testi yapılarak belirlenmiştir. Her test üç kez tekrarlanmış ve korozyon değerlerinin her biri, üç ölçümün ortalaması olarak rapor edilmiştir. Her numune için uygulanan borlama parametreleri ve ölçüm sonuçları Tablo 2’de sunulmuştur.

**Tablo 2.** Deneysel çalışmada kullanılan bağımsız işlem parametreleri ve ölçüm sonuçları

Deney no	İşlem sıcaklığı (°C)	İşlem süresi (Saat)	Kaplama kalınlığı (µm)	Mikrosertlik (HV <sub>0.05</sub> )	Yüzey pürüzlülüğü, Ra (µm)	Korozyon oranı (g/h) 10 <sup>-6</sup>
S1	800	1	10.25±0,5	1704±150	0.65	6.371
S2	800	3	12.18±0,6	1710±95	0.52	4.544
S3	800	5	15.8±1	1719±70	0.45	4.28
S4	900	1	32.55±0,9	1935±75	0.312	4.759
S5	900	3	42.75±1,2	1942±61	0.298	3.027
S6	900	5	47.5±2,1	1955±52	0.285	2.769
S7	1000	1	54.6±1,5	1950±75	0.327	5.255
S8	1000	3	85.8±1,9	1993±55	0.335	5.272
S9	1000	5	94.9±2,2	2015±105	0.358	6.062

Çalışma kapsamında işlem sıcaklığı ve işlem süresi bağımsız değişkenlerinin kombinasyonlarından ve kaplama kalınlığı, mikrosertlik, yüzey pürüzlülüğü ve korozyon oranı bağımlı değişkenlerinin ölçülen değerlerinden oluşan 9 satırlık veri seti elde edilmiştir. Veri seti çok küçük olduğu için verilerin tümü eğitim seti olarak kullanılmıştır.

Veri setindeki sıcaklık ve süre değerlerinin büyüklük farkı oldukça fazladır. Buna gibi durumlarda bir değişkenin diğerini baskılamasının önüne geçmek için standartlaştırma işlemi uygulanır. Bu çalışmada da sıcaklık ve süre verileri Denklem 1’e göre ölçeklendirme yapan ScikitLearn kütüphanesi kullanılarak standartlaştırılmıştır.

$$z = \frac{x-u}{s} \quad (1)$$

Denklemden  $z$ ,  $x$  numunesinin standartlaştırılmış değerini,  $u$  numunelerin ortalamasını,  $s$  de numunelerin standart sapmasını ifade etmektedir.

### 2.2. Makine Öğrenmesi Modelleri

Bu çalışmada matematiksel işlemler için Numpy, makine öğrenmesi modellerinin uygulanmasında ScikitLearn kütüphaneleri kullanılmıştır. Tablo 2’de listelenen deney parametreleri kullanılarak kaplama kalınlığı, mikrosertlik, yüzey pürüzlülüğü ve korozyon oranı bağımlı değişkenlerinin her biri için aşağıda belirtilen makine öğrenmesi algoritmaları uygulanmıştır.



### 2.2.1. Çoklu Doğrusal Regresyon (MLR)

Birden fazla bağımsız değişken ile bunlara bağlı olarak değişen çıktılar arasındaki ilişkinin doğrusal olduğunu varsayan istatistiksel bir yaklaşımdır. Çoklu doğrusal regresyon modeli regresyon katsayılarını bu ilişkiyi en iyi şekilde yansıtmak için veri setinden tahmin eder [40].

Çoklu doğrusal regresyon modeli matematiksel olarak denklem 2 ile formüle edilir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (2)$$

Denklemden,  $Y$  bağımlı değişkeni,  $X_1, X_2, \dots, X_k$  bağımlı değişkenleri,  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  regresyon katsayılarını ve  $\varepsilon$  hata terimini ifade eder.

### 2.2.2. K En Yakın Komşu Regresyonu (kNN)

K En Yakın Komşu Regresyonunun temel prensibi, yeni bir veri noktasının tahminini, en yakınındaki  $k$  veri noktasının ortalaması veya medyanı gibi bu noktalara ait değerlerin bir türü ile yapmaktır. Bu yöntem, veri setindeki benzer örneklerin çevresindeki yapıyı kullanarak tahmin yapar [41].

Bu yöntemde bir veri noktasının tahmini yapılırken önce en yakın  $k$  sayıda veri noktası genellikle Euclidean mesafesi veya diğer benzer mesafe ölçütleri kullanılarak belirlenir. Bu komşulara ait bağımlı değişken değerleri kullanılarak bir tahmin yapılır. Bu tahmin,  $k$  veri noktasının ortalaması veya medyanı gibi istatistiksel bir değer olabilir. Kullanıcı tarafından belirlenen bir  $k$  değeri vardır. Bu  $k$  değeri, tahminin ne kadar hassas olacağını etkiler. Daha küçük  $k$  değerleri modelin karmaşıklığını artırırken, daha büyük  $k$  değerleri düzgünleştirme etkisi yapar [41].

### 2.2.3. Destek Vektör Makinesi Regresyonu (SVR)

Bu algoritma, veri setindeki noktaları bir hiperdüzlem etrafında bir regresyon çizgisine yerleştirmeye çalışır. Bu çizgi, veri setindeki noktalara olan uzaklıkların toplamını minimize ederken, bir tolerans parametresi ( $\varepsilon$ ) kullanılarak bir hata payına izin verilir.

Destek Vektör Makinesi, regresyon problemleri için önce bir hiperdüzlem oluşturur. Bu hiperdüzlem, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini temsil eden bir regresyon çizgisini ifade eder. Algoritma, hiperdüzleme yakın olan noktalara daha az ağırlık verir ve belirli bir hata payına ( $\varepsilon$ ) izin verir. Bu şekilde, modelin veri setindeki gürültülü noktalara daha az hassas olması sağlanmış olur. SVM, hiperdüzlemi çevreleyen destek vektörleri arasındaki mesafenin maksimize edilmesini hedefler. Buna maksimum margin prensibi denir ve modelin genelleme yeteneğini artırır, aşırı uyum riskini azaltır [42].

### 2.2.4. Karar Ağacı Regresyonu (DT)

Temelde, veri setini belirli koşullar altında bölerek ve bu bölünmelerdeki ortalamaları veya medyanları kullanarak bağımlı değişkeni tahmin eden bir ağaç yapısı oluşturur. Her bir yaprak düğümü, bir regresyon değerini temsil eder [42].

Karar ağacı regresyonu, veri setini belirli koşullar altında bölerek homojen alt gruplara ayırır. Bu bölünmeler, her bir düğümde belirli bir özellik (değişken) ve bir eşik (threshold) kullanılarak yapılır. Veri noktaları, ağacın dallarında ilerlerken belirli koşullar altında ağacın çeşitli düğümlerine yönlendirilir. Her bir düğüm, belirli bir alt kümeyle ilişkilidir. Ağacın yaprak düğümlerine ulaşıldığında, bu düğümlerdeki alt kümelerle ait bağımlı değişken değerlerinin ortalaması veya medyanı, o düğümün regresyon tahmin değerini oluşturur [41].

### 2.2.5. Rastgele Orman Regresyonu (RF)

Rastgele ormanlar, ağaçlardan oluşan bir ensemble modelidir. Her bir ağaç, veri setinin rastgele alt kümeleri üzerinde eğitilir ve bu ağaçların tahminleri birleştirilerek genel bir tahmin yapılır [41,43].

Rastgele orman regresyonu, veri setinin rastgele alt kümeleri üzerinde birden çok karar ağacı eğitir. Bu alt kümeler, veri setinden rastgele örnekleme yaparak oluşturulur. Her bir alt küme üzerinde ağaçlar eğitilir. Ağaçlar, veri setinin belirli özelliklerine ve hedef değişkenine göre bölünerek eğitilir. Bu bölünmeler, ağaçların belirli koşullar altında veriyi ayırmasını sağlar. Tüm ağaçlar eğitildikten sonra, her bir ağaç bağımsız olarak tahminlerde bulunur. Rastgele orman, bu tahminleri birleştirerek genel bir regresyon tahminini elde eder. Bu birleştirme genellikle ağaçların tahminlerinin ortalamasıdır [42,43].

### 2.2.6. Ekstrem Eğim Arttırma (XGBoost)

Orijinal adı “Extreme Gradient Boosting” olan bu algoritma “gradient boosting” algoritmasının performansını iyileştirmek ve bazı özellikler katmak amacıyla Chen ve Guestrin tarafından geliştirilmiştir [44,45]. Gradient boosting zayıf tahmincileri birleştirerek önceki tahmincilerin hatalarını düzelteren bir öğrenme algoritmasıdır. XGBoost algoritmasında ise her ağaç eğitim sırasında belirli bir örnek kümesi üzerinde çalışır ve her ağaç bir önceki ağacın hatalarını telafi eder. Hesaplanan gradyanlar her bir örnek için tahmin hatalarını belirlemek ve bunlara göre modeli güncellemek için kullanılır. Algoritmada modelin aşırı uyumunu (overfit) önlemek için ağaçların karmaşıklığını kontrol eder [46,47].

### 2.3. Model Başarı Ölçütleri

Herhangi bir bağımlı değişkenin matematiksel modelinin başarısının değerlendirilmesi için değişik ölçütler tanımlanmıştır. Bu çalışmada geliştirilen makine öğrenmesi modellerinin başarıları, Belirleme katsayısı ( $R^2$ ), Ortalama kare hatası (MSE), mutlak hata ortalaması (MAE) ile belirlenecek ve birbirleri ile kıyaslanacaktır.

Belirleme katsayısı ( $R^2$ ), tahmin edilen değerlerin gerçek değerlere olan uyumunu ölçer. 1'e yaklaşan bir  $R^2$  değeri, modelin veri setindeki değişkenliğin büyük bir kısmını açıkladığını, sifıra yaklaşan bir değer ise açıklamanın daha düşük olduğunu gösterir.  $R^2$ , Eşitlik 3 ile hesaplanır:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

Ortalama Mutlak Hata (MAE), bir regresyon modelinin tahminlerinin ne kadar doğru veya yanlış olduğunu ölçen bir metriktir. MAE, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki mutlak farkların ortalamasını ifade eder ve Eşitlik 4 ile hesaplanır.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (4)$$

Ortalama Kare Hatası (MSE) ise tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasını ifade eder ve Eşitlik 5 ile hesaplanır.

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

Denklem 4 ve 5'te  $n$  veri setindeki gözlem sayısını,  $y_i$  gerçek değerleri,  $\bar{y}$  veri setindeki  $y$ 'lerin ortalamasını,  $\hat{y}_i$  model tahminini ifade etmektedir.

## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Şekil 1'de görüldüğü üzere AISI H11 çeliği üzerinde tüm işlem sıcaklıklarında borür kaplama tabakalarının elde edildiği görülmektedir. Ancak, 800 °C'de elde edilen kaplama kalınlıklarının 900 °C ve 1000 °C'ye göre çok düşük kalınlıklarda olduğu görülmektedir. Bu durum borun çeliğin  $\alpha$  (Ferrit) ve  $\gamma$  (Östenit) fazları içerisindeki çözünürlükleri ile ilgilidir. Borun ferrit ve östenit fazları içerisindeki çözünürlüğü ile ilgili birçok sayısal bulgu bu alanda çalışan bilim insanları tarafından sunulmuştur. Ancak, tüm bilim insanlarının hem fikir oldukları nokta borun östenit fazı içerisindeki çözünürlüğünün ferrite göre daha yüksek olduğudur [48–56]. Sharma ve diğerleri (2019)  $\alpha/\gamma$  dönüşüm aralığına yakın sıcaklıklarda borun, düşük alaşımlı çelikteki çözünürlüğü ağırlıkça % $\approx$ 0,001 olduğu 925 °C'nin üzerine çıkıldığında çözünürlüğün hızla arttığı ve 1150–1170 °C'de  $\gamma$ -Fe'de ağırlıkça %0,0055–0,260 ile en yüksek değere

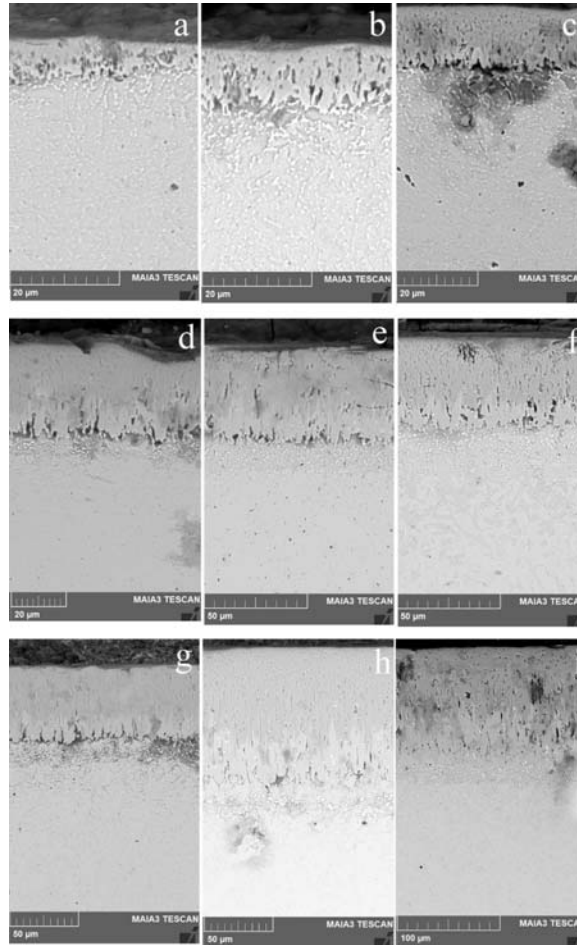
eriştiği bildirmiştir[48]. Şimdiki çalışmada 800°C'de elde edilen kaplama tabakalarının 900 ve 1000 °C'ye göre düşük kalması bundan dolayıdır.

### 3.1. Makine Öğrenmesi Modelleme Sonuçları

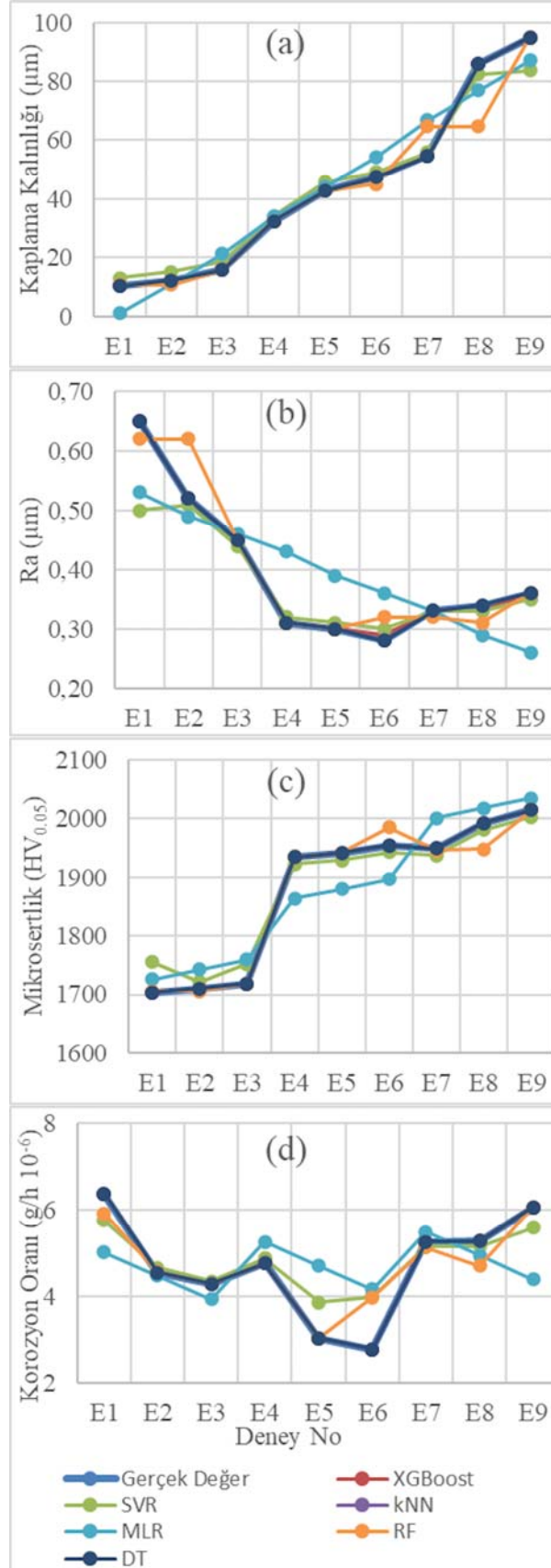
Veri setindeki parametre değerlerine karşılık ölçülen bağımlı değişken değerleri kullanılarak makine öğrenme modelleri eğitilmiştir. Elde edilen modellerin kullanılabilirliğinin belirlenmesi için önce gerçek değerler ve model tahminleri Şekil 2'de görselleştirilmiştir. Daha sonra her bir bağımlı değişken için belirlenen model başarı ölçüleri hesaplanmış ve Tablo 3'te listelenmiştir.

Şekil 2 genelinde gerçek ölçüm değerleri ve regresyon modeli tahminleri incelendiğinde XGBoost, kNN, DT regresyon modeli tahminlerinin tümünün gerçek değerler ile bire bir çakıştığı görülmektedir. Bunların yanında Tablo 3'te XGBoost, kNN ve DT modelleri için R<sup>2</sup> değerlerinin 1 olduğu ve MAE ile MSE değerlerinin de ya 0 ya da ölçüm aralık değerlerine kıyasla çok küçük değerler aldığı görülmektedir. Bu veriler XGBoost, kNN ve DT makine öğrenme modellerinde aşırı öğrenme ihtimalinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Şekil 2 genelinde gerçek ölçüm değerleri ve regresyon modeli tahminleri incelendiğinde XGBoost, kNN, DT regresyon modeli tahminlerinin tümünün gerçek değerler ile bire bir çakıştığı görülmektedir. Bunların yanında Tablo 3'te XGBoost, kNN ve DT modelleri için R<sup>2</sup> değerlerinin 1 olduğu ve MAE ile MSE değerlerinin de ya 0 ya da ölçüm aralık değerlerine kıyasla çok küçük değerler aldığı görülmektedir. Bu veriler XGBoost, kNN ve DT makine öğrenme modellerinde aşırı öğrenme ihtimalinin yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 1. AISI H11 çeliğine a) 800 °C'de 1 saat, b) 800 °C'de 3 saat, c) 800 °C'de 5 saat, d) 900 °C'de 1 saat, e) 900 °C'de 3 saat, f) 900 °C'de 5 saat, g) 1000 °C'de 2 saat, h) 1000 °C'de 4 saat ve i) 1000 °C'de 5 saat kutu borlama uygulanarak elde edilen kaplamaların kesitsel SEM mikroyapı görüntüleri



Şekil 2. a) kaplama kalınlığı, b) yüzey pürüzlülüğü, c) mikrosertlik ve d) korozyon oranı için oluşturulan değişik makine öğrenmesi modeli tahminleri ve bunlara karşılık ölçülen değerler

**Tablo 3.** Geliştirilen makine öğrenmesi modellerinin performans değerleri

Bağımlı Değişken	Algoritma	R <sup>2</sup>	MAE	MSE
Kaplama Kalınlığı	MLR	0.97	2.45	7.10
	kNN	1,00	0,00	0,00
	SVR	0.99	1.85	4.47
	DT	1,00	0,00	0,00
	RF	0.96	1.99	7.86
	XGBoost	1,00	0.15	0.03
Yüzey Pürüzlülüğü	MLR	0.74	0.26	0.08
	kNN	1,00	0,00	0,00
	SVR	0.89	0.16	0.05
	DT	1,00	0,00	0,00
	RF	0.95	0.15	0.04
	XGBoost	1,00	0.01	0,00
Mikrosertlik	MLR	0.93	6.51	46.04
	kNN	1,00	0,00	0,00
	SVR	0.98	4.36	23.22
	DT	1,00	0,00	0,00
	RF	0.99	3.07	18.14
	XGBoost	1,00	0.22	0.09
Korozyon oranı	MLR	0.42	0.92	1.05
	kNN	1,00	0,00	0,00
	SVR	0.87	0.64	0.56
	DT	1,00	0,00	0,00
	RF	0.91	0.51	0.47
	XGBoost	1,00	0.03	0,00

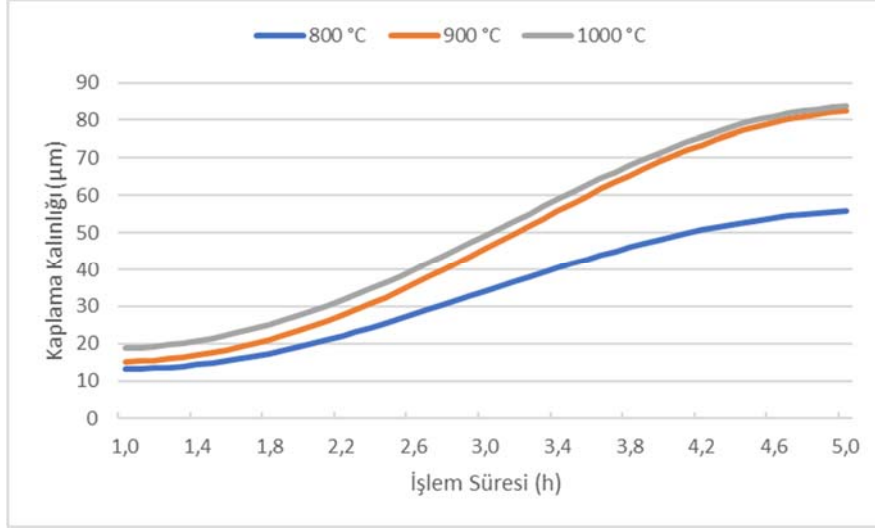
Şekil 2a ve d’de SVR modeli tahminlerinin gerçek değerlere grafik genelinde çok yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca kaplama kalınlığı ve korozyon oranı için modellerin performans kriterleri Tablo 3’te incelendiğinde SVR algoritmasının R<sup>2</sup>, MAE ve MSE değerlerinin oldukça iyi olduğu görülmektedir. Bahsedilen durumlar göz önünde bulundurularak SVR algoritmasıyla gerçekleştirilen modelin kaplama kalınlığı ve korozyon oranı için daha uygun olduğu kanaatine varılmıştır. Diğer yandan Şeki2 1b ve c incelendiğinde Yüzey pürüzlülüğü ve mikrosertlik için RF algoritmasıyla oluşturulan model tahminlerinin gerçek ölçüm sonuçlarla oldukça yakın olduğu fark edilmektedir. Bu modellerin performans R<sup>2</sup>, MAE ve MSE değerleri Tablo 3’te incelendiğinde modellerin gerçek değerlerle oldukça uyumu olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenlerle RF algoritmasıyla elde edilen makine öğrenmesi modellerinin yüzey pürüzlülüğü ve mikrosertlik için en uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

### 3.2. Tartışmalar

Yapılan makine öğrenmesi modellerine göre kaplama kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik ve korozyon oranı tahminlerinin deney parametrelerine bağlı değişimlerini inceleyebilmek için sırası ile Şekil 3, 4, 5 ve 6 oluşturulmuştur.

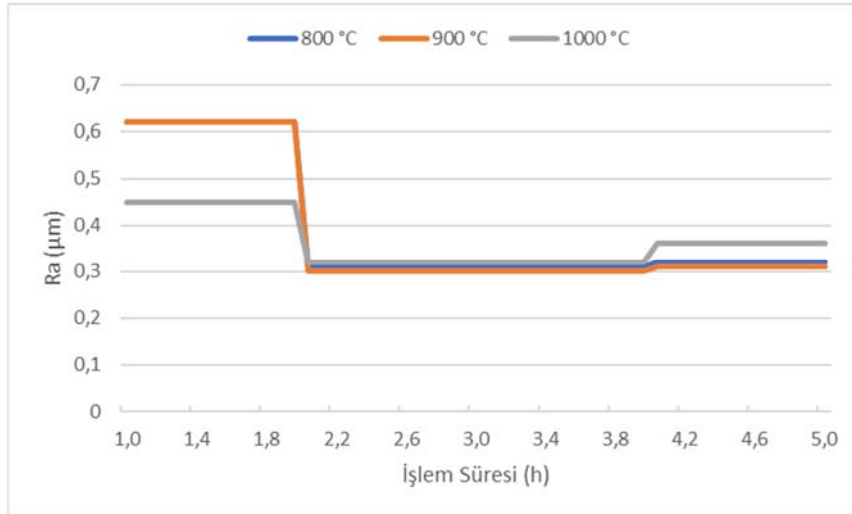
Şekil 3’te SVR algoritmasıyla geliştirilen makine öğrenmesi modeline göre kaplama kalınlığının 800 °C, 900 °C ve 1000 °C’de zaman göre değişimi görülmektedir. Grafiğe göre bütün sıcaklık değerlerinde kaplama kalınlığı 1 saat ile iki saat aralığındaki sürelerde zamanla belirsiz bir şekilde artmaktadır. Sürenin 2 saatin üzerine çıkmasıyla birlikte işlem süresinin kaplama kalınlığı üzerindeki olumlu etkisi artmaktadır. Bu durum yaklaşık 4 saat işlem süresine kadar devam etmekte ve 4,6 saatin üzerindeki işlem sürelerinde kaplama kalınlığı neredeyse sabitlenmektedir. Grafiğin özellikle işlem süresinin 2 saatin üzerindeki kısmı [57,58] tarafından raporlanan bulgularla uyumludur. Bu durum, birinci Fick kanununun bir sonucudur. Borlama işlemi başladığında, borun konsantrasyon gradyanı yüksektir ve bu nedenle başlangıçtaki akı da yüksektir. Ancak, zamanla bor gradyanı azalır ve bu da borür kaplama tabakasının oluşumunun azalmasıyla sonuçlanır.



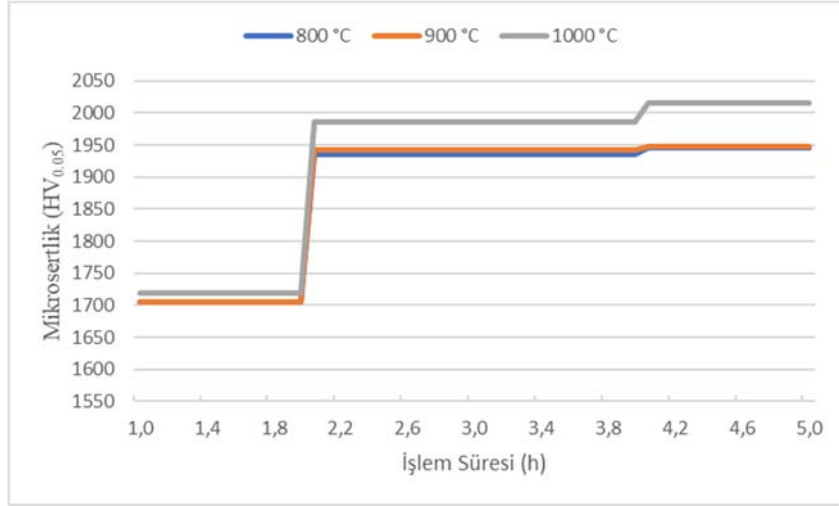


Şekil 3. SVR ile oluşturulmuş modele göre kaplama kalınlığının işlem sıcaklığı ve süresine bağlı değişimi

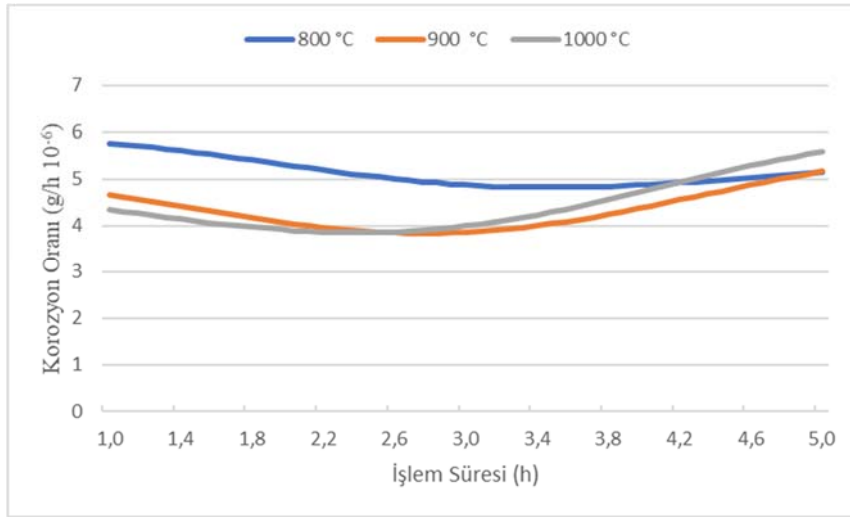
Yüzey pürüzlülüğünün RF algoritmasıyla geliştirilen modele göre sıcaklık ve işlem süresine bağlı değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Grafikte yüzey pürüzlülüğünün 800 °C ve 900 °C sıcaklıklarda zamana göre değişiminin neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Bu sıcaklıklarda yüzey pürüzlülüğü 2 saat işlem süresine kadar 0,63 µm değerinde sabit kalmaktadır. Daha sonra yüzey pürüzlülüğü hızla 0,3 µm'ye düşmekte ve 4 saat bekleme süresine kadar sabit devam etmektedir. Bu süre sonunda yüzey pürüzlülüğünde belirgin olmayan bir artış gerçekleşmekte ve 3,1 µm değerinde sabit kalmaktadır. İşlem sıcaklığı 1000 °C'ye çıktığında 2 saate kadar olan işlem süresinde yüzey pürüzlülüğü 0,45 µm olarak gerçekleşmektedir. İşlem süresinin 2 ile 4 saat olduğu aralıkta 0,32 µm'ye düşmekte ve 4 saat sonrasında ile hafifçe artarak 3,6 µm olarak devam etmektedir. Borlama sıcaklığının 800 °C'den 900 °C'ye çıkmasıyla yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma meydana gelirken, 900 °C'den 1000 °C'ye çıkması ise yüzey pürüzlülük değerlerinde bir miktar artışa neden olmuştur. Bu karmaşık durum, Şahin (2009) tarafından incelenmiştir ve termokimyasal kaplamalar sonrası numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinde genellikle artış olabileceği öngörülse de bazı durumlarda azalma meydana gelebileceği bildirilmiştir. Bu bulgular numunelerin kaplama öncesi yüzey pürüzlülük değerlerinin önemine işaret etmektedir. Yapılan çalışmalarda her bir çelik türüne bağlı olarak değişebilen bir kritik yüzey pürüzlülüğü değeri olduğu bildirilmiştir. Eğer kaplama işlemi öncesi yüzey pürüzlülük değeri bu eşğin altındaysa, borlama işlemi sonrası yüzey pürüzlülük değerlerinde artış beklenirken, yüzey pürüzlülük değeri bu eşğin üstündeyse, dışarı doğru büyüyen borür tabakasının bu sırtları azaltacağından kaplama işlemi sonucunda yüzey pürüzlülük değerlerinin azalabileceği belirtilmiştir [59,60].



Şekil 4. RF algoritması ile oluşturulmuş modele göre yüzey pürüzlülüğünün işlem sıcaklığı ve süresine bağlı değişimi



Şekil 5. RF algoritması ile oluşturulmuş modele göre mikrosertliğin işlem sıcaklığı ve süresine bağlı değişimi



Şekil 6. SVR ile oluşturulmuş modele göre korozyon oranının işlem sıcaklığı ve süresine bağlı değişimi

Şekil 5'te mikrosertlik için RF algoritması kullanılarak geliştirilmiş regresyon modeline göre mikrosertliğin sıcaklık ve işlem süresine göre değişimi görülmektedir. Bütün sıcaklık değerleri için 2 saat işlem süresine kadar 1710 HV<sub>0,05</sub> değerinde devam etmektedir. İşlem süresinin 2 ile 4 saat olduğu aralıkta mikrosertlik değeri 800 °C ve 900 sıcaklıklar için 1940 iken 1000 °C için 1985 değerini almaktadır. İşlem süresinin 4 saatin üzerinde olduğu durumlarda mikrosertlikler küçük artışlar göstererek 800 °C ve 900 °C için 1948, 1000 °C için 2015 HV<sub>0,05</sub>'e çıkmaktadır. Li ve ark. çalışmalarında Cr12Mn2V2 üzerine gerçekleştirilen borlama işleminde zamanın ve sıcaklığın artmasıyla mikrosertlik değerlerinin arttığını gözlemlemiştir [61]. Borlama süresi ve sıcaklık artışı ile beraber sertlik değerlerinin artması kaplama tabakası içeriğindeki FeB fazının kalınlığının artışıyla ilgilidir. Nitekim FeB fazının sertliği 1900-2100 HV<sub>0,05</sub> aralığında iken düşük sıcaklık ve işlem sürelerinde oluşması daha muhtemel olan Fe<sub>2</sub>B fazının sertliği 1650- 1800 HV<sub>0,05</sub>'dir [7,62,63]. Sıcaklık ve sürenin daha da artması sonu sertlik değerlerinin az artması yukarıda anılan 2 fazın daha sert bir faza dönüşmemesinin bir sonucudur.

SVR algoritması kullanılarak oluşturulan regresyon modeline göre, korozyon oranının işlem sıcaklığı ve süresine bağlı değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir. Korozyon direncinin 800 °C'lik borlama sıcaklığında 4.2 saate kadar diğer diğer sıcaklık değerlerine göre daha üstün olduğu görülmektedir. Bu durum 800°C'lik borlama sıcaklığında Fe<sub>2</sub>B/FeB oranının 900 ve 1000 °C'de yapılan borlamalara göre daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü Fe<sub>2</sub>B fazının korozyon direnci FeB fazına göre daha yüksektir [64,65].

Öte yandan, 1000 °C'nin 900°C'ye göre 2,6 saatten sonraki borlama sıcaklıklarında daha iyi korozyon direnci göstermiş olması korozyon direncinde kaplama kalınlıklarının da önemli bir rol oynadığına işaret etmektedir. Literatürdeki çok sayıda termokimyasal kaplama araştırması, kaplama kalınlıklarındaki artışın kaplamalarda mikro çatlaklar oluşmasına neden olmadığı sürece daha iyi bariyer koruması sağladığı bildirilmiştir [59,66,67].

Grafikte, 800°C'de 3,5 saat işlem süresine kadar korozyon oranında hafif bir azalma görülmekte, sonrasında süre arttıkça korozyon oranında artış meydana gelmektedir, 5 saatlik işlem süresinde 5,16'ya ulaşmaktadır. Korozyon oranı, 900°C işlem sıcaklığı için 1 saatlik işlem süresinde 4,66'dan başlayarak 2,8 saatlik süre için 3,85'e kadar düşmekte, ardından 5,16'ya çıkmaktadır. İşlem sıcaklığı 1000 °C'ye çıktığında ise korozyon oranı önce azalarak sürelerin 2,5 saat ve 3,9 olduğu noktalarda minimuma ulaşmakta ve sonrasında 5.58'e yükselmektedir.

Şekil 3, 4, 5 ve 6 bir arada değerlendirildiğinde kaplama parametrelerinin kaplama kalınlığına ve pürüzlülüğe olan etkilerinin birleşerek korozyon oranı üzerinde kümülatif bir etkiye dönüştüğü görülmektedir. Düşük sıcaklık ve işlem sürelerinde kaplama kalınlıkları düşük olmaktadır ve kaplama kalınlığının artması yalnız başına değerlendirildiğinde korozyonu artırıcı bir etkiye sahiptir. Diğer yandan yüzey pürüzlülüğünün azalması korozyonu azaltıcı bir etkiye sahiptir [35]. Bu durum da düşük sıcaklık ve işlem süreleri için geçerlidir. Düşük işlem sürelerinde kaplama kalınlıkları bütün sıcaklıklar için birbirine yakındır fakat pürüzlülük değeri özellikle 800 ve 900 C'de 1000 C'ye göre yüksektir. Bu durum kısa işlem sürelerinde korozyon oranının düşük sıcaklıklarda daha yüksek olması sonucu doğurmuştur. Şekil 4'de işlem süresinin orta değerlerinde yüzey pürüzlülüğünün bütün sıcaklıklar için birbirine yakın olduğu, Şekil 3'de bu sürelerde kaplama kalınlığının sıcaklık artışıyla olumsuz etkilendiği görülmektedir. Bu durum Şekil 6'da işlem süresinin orta değerlerinde korozyon oranının özellikle 800 C'de belirgin şekilde yüksek olmasıyla kendisini göstermektedir. Uzun işlem sürelerinde bu parametrelerin etkilerinin oldukça karmaşık bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada AISI H11 çeliği kutu borlama tekniği kullanılarak 800, 900 ve 1000°C sıcaklıklarda, 2, 3 ve 5 saat işlem sürelerinde borlama işlemine tabii tutulmuştur. Elde edilen kaplamaların kalınlık, yüzey pürüzlülüğü ve mikrosertlikleri ile korozyon oranları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar MLR, kNN, SVR, DT, RF ve XGBoost algoritmaları ile regresyon modellerinin geliştirilmesinde kullanılmıştır. Oluşturulan regresyon modellerinin R<sup>2</sup>, MAE ve MSE başarı değerlendirmeleri yapılmış ve oldukça tatmin edici sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Değerlendirmeler sonucunda kaplama kalınlığı ve korozyon oranı için SVR, yüzey pürüzlülüğü ve mikrosertlik için RF algoritmalarının en iyi sonuçları verdiği kanaatine ulaşılmıştır.

Regresyon modelleri kullanılarak bağımsız değişkenlerin sıcaklık ve işlem süresine bağlı değişimleri grafiklere aktarılmıştır. Grafikler kullanılan yapılan çıkarımlar şunlardır:

- AISI H11 çeliğinin  $\alpha/\gamma$  dönüşüm sıcaklığı 845°C olması sebebiyle 800°C'de oluşan kaplama tabakaları 900 ve 1000°C'ye göre oldukça düşük kalmıştır.
- Kaplama tabakası kalınlık ve sertlikleri artan borlama sıcaklığı ve süresi ile artmıştır. Kaplama tabakası kalınlık ve sertlik değerlerinde borlama sıcaklığı süreye göre daha etkilidir.
- Korozyon dirençleri oluşan borür fazları ve kaplama tabakası kalınlıklarına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. 800 °C'de borlanmış numune diğer iki numuneye göre 4,6 saate kadar daha yüksek korozyon direnci göstermiş olması bu sıcaklıktaki borlama sonucu Fe<sub>2</sub>/FeB değerlerinin 900 ve 1000 °C'ye göre daha yüksek olması ile ilgilidir. Bu durum Fe<sub>2</sub>B'nin korozyon direncinin FeB'den daha yüksek olduğunu göstermiştir.
- Korozyon direncine etki eden diğer parametre ise kaplama kalınlıkları bariyer etki gösterdiğinden faz yapısı birbirine yakın olan, 900 ve 1000 °C'de borlanan numuneler arasında 1000 °C'de borlanmış numuneler daha iyi korozyon direnci göstermiştir.

Çalışmanın sonucunda AISI H11 çeliğinin borlanmasında korozyon direnci için optimum borlama sıcaklık ve süresinin 1000 °C ve 2,2 saat olduğu sonucuna varılmıştır.

## 5. REFERANSLAR

1. Ma, L., Luo, Y., Wang, Y., Du, W., Song, Z., Zhang, J., 2018. Fatigue and ratcheting assessment of AISI H11 at 500°C using constitutive theory coupled with damage rule. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 41(3), 642-652.
2. Tillmann, W., Grisales, D., Stangier, D., Butzke, T., 2019. Tribomechanical behaviour of TiAlN and CrAlN coatings deposited onto AISI H11 with different pre-treatments. *Coatings*, 9(8), 519.
3. Gök, M.S., Küçük, Y., Erdoğan, A., Öge, M., Kanca, E., Günen, A., 2017. Dry sliding wear behavior of borided hot-work tool steel at elevated temperatures. *Surf Coat Technol*, 328, 54-62.
4. Podgornik, B., Puš, G., Žužek, B., Leskovšek, V., Godec, M., 2018. Heat treatment optimization and properties correlation for H11-type hot-work tool steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 49(2), 455-462.
5. Šebek, M., Falat, L., Kováč, F., Petryshynets, I., Horňák, P., Girman, V., 2017. The effects of laser surface hardening on microstructural characteristics and wear resistance of AISI H11 hot work tool steel. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62(3), 1721-1726.
6. Davis, J.R., 2001. *Surface engineering for corrosion and wear resistance*, ASM International.
7. Günen, A., Kanca, Y., Karahan, İ.H., Karakaş, M.S., Gök, M.S., Kanca, E., Çürük, A., 2018. A comparative study on the effects of different thermochemical coating techniques on corrosion resistance of STKM-13A steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 49(11), 5833-5847.
8. Deng, J., Wu, F., Lian, Y., Xing, Y., Li, S., 2012. Erosion wear of CrN, TiN, CrAlN, and TiAlN PVD nitride coatings. *Int J Refract Metals Hard Mater*, 35, 10-16.
9. Salem, M., Le Roux, S., Dour, G., Lamesle, P., Choquet, K., Rézaï-Aria, F., 2019. Effect of aluminizing and oxidation on the thermal fatigue damage of hot work tool steels for high pressure die casting applications. *Int J Fatigue*, 119, 126-138.
10. Peng, D.Q., Bai, X.D., Sun, H., Chen, B.S., 2007. Effect of copper ions implantation on corrosion behavior of zirconium in 1M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Int J Refract Metals Hard Mater*, 25(1), 32-38.
11. Picas, J.A., Forn, A., Baile, M.T., Martín, E., 2005. Substrate effect on the mechanical and tribological properties of arc plasma physical vapour deposition coatings. *Int J Refract Metals Hard Mater*, 23(4-6), 330-334.
12. Azadi, M., Rouhaghdam, A.S., Ahangarani, S., Mofidi, H.H., 2014. Mechanical behavior of TiN/TiC multilayer coatings fabricated by plasma assisted chemical vapor deposition on AISI H13 hot work tool steel. *Surf Coat Technol*, 245, 156-166.
13. Qiu, L., Du, Y., Wang, S., Li, K., Yin, L., Wu, L., Zhong, Z., Albir, L., 2019. Mechanical properties and oxidation resistance of chemically vapor deposited TiSiN nanocomposite coating with thermodynamically designed compositions. *Int J Refract Metals Hard Mater*, 80, 30-39.
14. Çiçek, A., Kara, F., Kivak, T., Ekici, E., 2013. Evaluation of machinability of hardened and cryo-treated AISI H13 hot work tool steel with ceramic inserts. *Int J Refract Metals Hard Mater*, 41, 461-469.
15. Altinsoy, I., Efe, F.G.C., Ipek, M., Ozbek, I., Zeytin, S., Bindal, C., 2013. An investigation on borided AISI 1020 steel. *AIP Conf Proc*, 1569(1), 43-46.
16. Arslan, D., Uzun, R.O., 2021. Microwave boriding to improve the corrosion resistance of AISI 304L austenitic stainless steel. *İğdir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 490-499.
17. Gómez-Vargas, O.A., Solis-Romero, J., Figueroa-López, U., Ortiz-Domínguez, M., Oseguera-Peña, J., Neville, A., 2016. Boro-nitriding coating on pure iron by powder-pack boriding and nitriding processes. *Mater Lett*, 176, 261-264.
18. Su, Z.G., Tian, X., An, J., Lu, Y., Yang, Y.L., Sun, S.J., 2009. Investigation on boronizing of N80 tube steel. *ISIJ International*, 49(11), 1776-1783.
19. Gunes, I., Yıldız, I., 2016. Investigation of adhesion and tribological behavior of borided AISI 310 stainless steel. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 21(1), 61-71.
20. Hernández-Sánchez, E., Velázquez, J.C., Castrejón-Flores, José. L., Chino-Ulloa, A., Avila, I.P.T., Carrera-Espinoza, R., Yescas-Hernández, J.A., Orozco-Alvarez, C., 2019. Tribological behavior of borided AISI 316L steel with reduced friction coefficient and enhanced wear resistance. *Mater Trans*, 60(1), 156-164.
21. Kara, G., Purcek, G., Yanar, H., 2017. Improvement of wear behaviour of titanium by boriding. *Industrial Lubrication and Tribology*, 69(1), 65-70.
22. Zuno-Silva, J., Ortiz-Domínguez, M., Simón-Marmolejo, I., Martínez-Martínez, L.E., Flores-Rentería, M.A., Arenas-Flores, A., Cruz-Avilés, A., 2018. The powder-pack boriding process: a microstructure comparison of boride layers formed on AISI 4150 and M2 steels. *Microscopy and Microanalysis*, 24(S1), 1064-1065.

23. Bayça, S.U., Bican, O., 2022. Increasing corrosion resistance of AISI 1010 steel by boride coatings. *Materials and Corrosion*, 73(12), 2032-2040.
24. Flores-Renteria, M.A., Ortiz-Dominguez, M., Simon-Marmolejo, I., Martinez-Martinez, L.E., Zuno-Silva, J., 2018. Microstructural characterization of nitro-boriding coating on ARMCO® pure iron. *Microscopy and Microanalysis*, 24(S1), 2240-2241.
25. Medvedovski, E., Leal Mendoza, G., Vargas, G., 2021. Influence of boronizing on steel performance under erosion-abrasion-corrosion conditions simulating downhole oil production. *Corrosion and Materials Degradation*, 2(2), 293-324.
26. Medvedovski, E., Leal Mendoza, G., Vargas, G., 2021. Influence of boronizing on steel performance under erosion-abrasion-corrosion conditions simulating downhole oil production. *Corrosion and Materials Degradation*, 2(2), 293-324.
27. Gurgenc, T., Altay, O., Ulas, M., Ozel, C., 2020. Extreme learning machine and support vector regression wear loss predictions for magnesium alloys coated using various spray coating methods. *J Appl Phys*, 127(18).
28. Pashkov, D.M., Belyak, O.A., Guda, A.A., Kolesnikov, V.I., 2022. Reverse engineering of mechanical and tribological properties of coatings: results of machine learning algorithms. *Physical Mesomechanics*, 25(4), 296-305.
29. Paturi, U.M.R., Reddy, N.S., Cheruku, S., Narala, S.K.R., Cho, K.K., Reddy, M.M., 2021. Estimation of coating thickness in electrostatic spray deposition by machine learning and response surface methodology. *Surf Coat Technol*, 422, 127559.
30. Kamnis, S., Sfikas, A.K., Gonzalez, S., 2022. Design of high entropy alloys for thermal spray processes using machine learning, *ITSC 2022*, 522-533.
31. Jokar, M., Guo, X., Frankel, G.S., 2022. Machine learning approaches to model galvanic corrosion of coated alloy systems. *Corrosion*, 78(12), 1176-1189.
32. Kolesnikov, V.I., Pashkov, D.M., Belyak, O.A., Guda, A.A., Danilchenko, S.A., Manturov, D.S., Novikov, E.S., Kudryakov, O.V., Guda, S.A., Soldatov, A.V., Kolesnikov, I.V., 2023. Design of double layer protective coatings: finite element modeling and machine learning approximations. *Acta Astronaut*, 204, 869-877.
33. Kariofillis, G.K., Kiourtsidis, G.E., Tspas, D.N., 2006. Corrosion behavior of borided AISI H13 hot work steel. *Surf Coat Technol*, 201(1-2), 19-24.
34. Kulka, M., 2019. Trends in thermochemical techniques of boriding. In *Current Trends in Boriding*, 17-98.
35. Günen, A., 2020. Properties and high temperature dry sliding wear behavior of boronized inconel 718. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 51(2), 927-939.
36. Jiang, J., Wang, Y., Zhong, Q., Zhou, Q., Zhang, L., 2011. Preparation of Fe<sub>2</sub>B boride coating on low-carbon steel surfaces and its evaluation of hardness and corrosion resistance. *Surf Coat Technol*, 206(2-3), 473-478.
37. Tavakoli, H., Mousavi Khoie, S.M., 2010. An electrochemical study of the corrosion resistance of boride coating obtained by thermo-reactive diffusion. *Mater Chem Phys*, 124(2-3), 1134-1138.
38. Wang, H., Zhao, Y., Yuan, X., Chen, K., Xu, R., 2013. Effects of boronizing treatment on corrosion resistance of 65Mn steel in two acid mediums. *Phys Procedia*, 50, 124-130.
39. Günen, A., 2020. Properties and corrosion resistance of borided AISI H11 tool steel. *J Eng Mater Technol*, 142(1), 011010.
40. James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R., 2021. *An introduction to statistical learning*. Springer US, New York, NY.
41. Müller, A.C., Guido, S., 2016. *Introduction to machine learning with python: a guide for data scientists*. O'Reilly Media.
42. Géron, A., 2019. *Hands-on machine learning with scikit-learn. Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems*, O'Reilly Media.
43. Breiman, L., 2001. Random forests. *Mach Learn*, 45(1), 5-32.
44. Chen, T., Guestrin, C., 2016. XGBoost: a scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, ACM, New York, NY, USA, 785-794.
45. Friedman, J.H., 2001. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *The Annals of Statistics*, 29(5), 1189-1232.
46. Demirelli, E., Solak, H.İ., Tiryakioğlu, İ., 2023. Makine öğrenmesi algoritmaları ile deprem katalogları kullanılarak deprem tahmini. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(4), 979-989.



47. Kelle, A.C., Yüce, H., 2022. MQTT trafiğinde DoS saldırılarının makine öğrenmesi ile sınıflandırılması ve modelin SHAP ile yorumlanması. *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 3(1), 50-62.
48. Sharma, M., Ortlepp, I., Bleck, W., 2019. Boron in heat-treatable steels: a review. *Steel Res Int*, 90(11), 1900133.
49. Luitjohan, K.E., Krane, M.J.M., Ortalan, V., Johnson, D.R., 2018. Investigation of the metatectic reaction in iron-boron binary alloys. *J Alloys Compd*, 732, 498-505.
50. Lucci, A., Venturello, G., 1971. Comments on the condition of boron in  $\alpha$ -iron. *Scripta Metallurgica*, 5(1), 17-24.
51. Hallemans, B., Wollants, P., Roos, J.R., 1994. Thermodynamic reassessment and calculation of the Fe-B phase diagram. *International Journal of Materials Research*, 85(10), 676-682.
52. Busby, P.E., Warga, M.E., Wells, C., 1953. Diffusion and solubility of boron in iron and steel. *JOM*, 5(11), 1463-1468.
53. Goldhoff, R.M., Spretnak, J.W., 1957. Distribution of boron in gamma iron grains. *JOM*, 9(10), 1278-1283.
54. Nicholson, M.E., 1954. Constitution of iron-boron alloys in the low boron range. *JOM*, 6(2), 185-190.
55. Strocchi, P.M., Melandri, B.A., Tamba, A., 1967. On the nature of boron solid solution in  $\alpha$ -iron. *Il Nuovo Cimento B Series 10*, 51(1), 1-11.
56. Lucci, A., Della Gatta, G., Venturello, G., 1969. On the solubility of boron in high-purity alpha-iron. *Metal Science Journal*, 3(1), 14-17.
57. Başman, G., Arıkan, M.M., Arısoy, C., Şeşen, K., 2023. A kinetic study of thermochemically borided AISI 316L stainless steel. *Journal of Scientific Reports-A*, (052), 279-296.
58. Gunes, I., Kanat, S., 2015. Diffusion kinetics and characterization of borided AISI D6 steel. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 51(5), 842-846.
59. Turgut, S., Günen, A., 2020. Mechanical properties and corrosion resistance of borosintered distalloy steels. *J Mater Eng Perform*, 29(11), 6997-7010.
60. Şahin, S., 2009. Effects of boronizing process on the surface roughness and dimensions of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2714. *J Mater Process Technol*, 209(4), 1736-1741.
61. Li, C., Shen, B., Li, G., Yang, C., 2008. Effect of boronizing temperature and time on microstructure and abrasion wear resistance of Cr12Mn2V2 high chromium cast iron, *Surf Coat Technol*, 202(24), 5882-5886.
62. Mathew, M., Rajendrakumar, P.K., 2014. Effect of precarburation on growth kinetics and mechanical properties of borided low-carbon steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 29(9), 1073-1084.
63. Bourithis, L., Papaefthymiou, S., Papadimitriou, G.D., 2002. Plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: microstructure and wear properties. *Appl Surf Sci*, 200(1-4), 203-218.
64. Kaouka, A., Alaoui, O., 2019. Characterization and corrosion resistance of boride layers on carbon steel. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 477, 012029.
65. Kayalı, Y., Kul, M., Talaş, Ş., Yalçın, M.C., 2022. Investigation of corrosion and adhesion behaviors of boronized asp ® 2012 Steel. *Surface Review and Letters*, 29(12), 2250155.
66. Alkan, S., Günen, A., Gülen, M., Gök, M.S., 2024. Effect of boriding on tribocorrosion behaviour of HSLA offshore mooring chain steel. *Surf Coat Technol*, 476, 130276.
67. Campos, I., Palomar, M., Amador, A., Ganem, R., Martinez, J., 2006. Evaluation of the corrosion resistance of iron boride coatings obtained by paste boriding process. *Surf Coat Technol*, 201(6), 2438-2442.

## An Evidential Mask Transformer for Left Atrium Segmentation

Fatmatülzehra USLU<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup>Bursa Technical University, Department Electrical and Electronics Engineering, Bursa, Türkiye

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0001-7153-7583

### Article Info

Received : 05.01.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560046

### Corresponding Author

Fatmatülzehra USLU

fatmatulzehra.uslu@btu.edu.tr

### Keywords

Mask transformer

Image segmentation

Uncertainty

MRI images

Evidential learning

**How to cite:** USLU, F., (2024). An Evidential Mask Transformer for Left Atrium Segmentation. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 639-646.

### ABSTRACT

The segmentation of the left atrium (LA) is required to calculate the clinical parameters of the LA, to identify diseases related to its remodeling. Generally, convolutional networks have been used for this task. However, their performance may be limited as a result of the use of local convolution operations for feature extraction. Also, such models usually need extra steps to provide uncertainty maps such as multiple forward passes for Monte Carlo dropouts or training multiple models for ensemble learning. To address these issues, we adapt mask transformers for LA segmentation which effectively use both local and global information, and train them with evidential learning to generate uncertainty maps from the learned Dirichlet distribution, with a single forward pass. We validated our approach on the STACOM 2013 dataset and found that our method can produce better segmentation performance than baseline models, and can identify locations our model's responses are not trustable.

## Kanıtısal Maske Dönüştürücü Model ile Sol Kulakçık Bölütlemesi

### Makale Bilgileri

Geliş : 05.01.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560046

### Sorumlu Yazar

Fatmatülzehra USLU

fatmatulzehra.uslu@btu.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Maske dönüştürücü

Görüntü bölütleme

Belirsizlik

Manyetik rezonans görüntüleri

Kanıtısal öğrenme

**Atıf şekli:** USLU, F., (2024). An Evidential Mask Transformer for Left Atrium Segmentation. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 639-646.

### ÖZ

Sol kulakçığın yeniden şekillenmesine sebep olan hastalıklarının tanısının konulabilmesi için, sol kulakçığın bölütlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, genel olarak, konvolüsyonel ağlar kullanılmaktadır. Fakat bu modellerin performansı, yerel hesaplama yapımları nedeniyle düşük olabilir. Belirsizlik haritaları üretebilmeleri için, Monte Karlo dropout ya da çoklu model eğitimi (ensemble) gibi yaklaşımlara ihtiyaç duyulur. Bu problemleri gidermek için, yerel ve global bilgiyi bir arada kullanan, maske dönüştürücü modelleri, sol kulakçık bölütlenmesi için adapte ettik. Belirsizlik haritalarını elde etmek için de bu modeller, kanıtısal öğrenme ile eğitildi. Böylece, öğrenilen Dirichlet dağılımı kullanılarak, tek adımda belirsizlik haritaları elde edilebildi. Öne sürülen yaklaşım, STACOM 2013 veri setinde test edildi ve karşılaştırılan modellerden daha başarılı performans gösterdiği gözlemlendi. Üretilen belirsizlik haritalarının, modelin kararsız olduğu yerlerde yüksek belirsizlik gösterdiği gözlemlendi.

## 1. INTRODUCTION

The segmentation of the left atrium (LA) in Magnetic Resonance Imaging (MRI) images is necessary to extract clinical parameters, such as ejection fraction, volume and geometrical characteristics, to identify diseases related to the remodeling of the LA such as atrial fibrillation [1-3]. The low contrast of the LA in MRI images and its complicated shape makes it harder to segment with automatic tools. Recent work has reported promising results generated by deep networks on this task [1-3]. However, the task remains challenging when images to be segmented are collected from different vendors of MRI machines, leading to the problem known as the data-shift problem. Given the high confidence of deep networks even for their inaccurate results, wrongly segmented images reduce the trust of clinicians in such image analysis tools.

Uncertainty maps can give clues to clinicians to understand where a segmentation model has low confidence in its decision. Ensemble models or Monte Carlo dropout networks have been used for uncertainty map production [4]. The former approach trains multiple models to obtain a variety of segmentation masks, mimicking the behaviors of human experts with different medical expertise. On the other hand, the latter trains a single network with dropout layers, which are left active during test time. Monte Carlo simulation is performed with multiple runs of the same model, which produces multiple segmentation masks. Both approaches generate uncertainty maps by calculating variation across generated segmentation maps for the same input image. Despite their common use [4], these methods are costly, requiring training multiple models or running the same model multiple times to obtain different segmentation masks.

Recently, evidential learning (EL) was proposed for image classification [5] and later for segmentation problems [6-7]. This method estimates closed-form prediction distribution, based on the Dempster-Shafer Theory of Evidence [8]. The outputs of a network are described as categorical variables, and EL learns the parameters of prediction distributions over these variables, in contrast to yielding single point estimates posterior probabilities for each class output generated by the softmax function [8]. This property of EL makes it a good choice for model uncertainty calculation, which can be easily computed with a single forward pass from network outputs. Despite its high potential to improve the reliability of deep models, a few studies used EL for uncertainty calculation on medical image analysis, where the segmentation of brain tumors [6] and lymphomas [7] were examined. As far as we are aware, no previous study examined its use for uncertainty prediction of cardiac image segmentation.

Previous methods for LA segmentation generally used Convolutional Neural Networks (CNN) to learn local information in various abstraction levels [1-3]. Recent work introduced a new type of model enhancing CNN/transformer features with transformer decoders, called *mask transformers* [9], which was shown to outperform previous methods using CNN or only encoder-decoder transformers for semantic segmentation and object detection [9-10]. In these models, a pre-trained segmentation model provides local information to transformer decoders to learn global information in input images with self-attention and cross-attention mechanisms. Despite their high performance in image analysis [9-10], they struggle to reproduce small structures in input images. This may be due to yielding downsampled segmentation masks to reduce their high computational cost; for example, [9,11] produced segmentation masks four times smaller than the original size of input images. This property of mask transformers limits their applications to medical image analysis problems, where the segmentation of small structures is of high value [6-7].

In this study, we explore if the accuracy of LA segmentation and the reliability of its binary masks can be improved by training mask transformers with evidential loss. We modify the design of the mask transformers to increase their ability to segment small structures in input images. We present a training scheme specific to evidential learning to improve model performance, as well. Particularly, we investigate whether the two-steps training of mask transformers plays any role in its segmentation performance, which allows different model parts -- CNN and transformer decoders -- to be trained with different loss functions. We validated our method on a public LA segmentation dataset, the STACOM 2013 dataset [12]. We conduct ablation experiments to examine how our design choices for mask transformers change their segmentation performance. We also produce uncertainty maps to indicate locations where our model fails to yield confident results.

## 2. RELATED WORK

### 2.1. Evidential Learning

Evidential learning can make learning probability distributions over classes possible for a deterministic network. It uses the concepts of Dempster–Shafer Theory of Evidence [8], a generalization of Bayesian theory to subjective probability, where a belief distribution is obtained by assigning belief masses to the subsets of a discerning frame. The belief distribution for the M-classes classification problem can be represented with a Dirichlet distribution with M parameters, which are calculated from the outputs of the network, called *evidences*. Evidences are continuous values equal to or larger than zero so the activation function of the last layer of the network should be selected accordingly. For example, the softplus function can be used for this aim. The conversion between Dirichlet distribution parameters,  $\alpha$ , and evidences,  $e$ , can be calculated with  $\alpha_m = (e_m + 1)$  for the class  $m$ . Predicted classification probabilities for the class  $m$  are calculated with  $\check{y}_m = \frac{\alpha_m}{S}$  for one-hot encoded class labels vector  $\mathbf{y}$ , where  $S = \sum_{m=1}^M \alpha_m$  is the Dirichlet strength.

One can define an image segmentation task as an M-class classification problem for each pixel  $k$  in input images, and can minimize the Bayes risk of the cross-entropy loss to train the network with evidential learning; however, this loss calculation was found to be less stable than minimizing the Bayes risk of mean square loss [5], whose formula is given below:

$$E_k(\boldsymbol{\theta}) = \int \|\mathbf{y}_k - \check{\mathbf{y}}_k\|_2^2 \frac{1}{B(\boldsymbol{\alpha}_k)} \prod_{m=1}^M \check{y}_k^{\alpha_{km}-1} d\check{\mathbf{y}}_k \quad [1]$$

where  $B$  is a multinomial beta function.  $\mathbf{y}_k$  is the ground truth label for  $k^{th}$  pixel and  $\check{\mathbf{y}}_k$  is its corresponding estimate by the network. Equation (1) can be simply rewritten in equation (2)

$$E_k(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{m=1}^M (y_{km} - \check{y}_{km})^2 + \frac{\check{y}_{km}(1-\check{y}_{km})}{s_{k+1}} \quad [2]$$

### 2.2. LA Segmentation

Compared to other cardiac structures such as the left ventricle, there are few methods on the segmentation of the LA [1-3]. LA-Net [1] is a multi-task CNN model equipped with cross-attention and enhanced decoder modules to improve LA segmentation. TMS-Net [2] is a CNN ensemble model with an encoder and three decoders, which can segment the LA in MRI images along three orthogonal axes. The network also has a segmentation quality control module to eliminate poor segmentation masks. GSM-Net [3] is another CNN model, proposed to better use inter-slice similarities and the information at the temporal axis of CINE MRI images for LA segmentation, respectively, with a global slice sequence encoder and sequence-dependent channel attention module. These networks mostly used local information obtained with convolutional layers to segment the LA. However, they lack mechanisms that effectively learn global information in input images, which can limit their capacities when input images are noisy and have poor contrast.

## 3. METHOD

### 3.1. Evidential Learning for LA Segmentation

Firstly, we formulate the segmentation of the LA as a regression problem to minimize the Bayes risk of the sum of the square loss, given with equation (2). We use softplus function at the end of the proposed network to generate evidences,  $e$ , for each segmentation class, image background, and the LA. When calculating Dirichlet parameters, we use  $\alpha = (e + 1)^2$  similar to [6], to easily reach high Dirichlet parameters, which increases the certainty of network outputs.

Similar to previous work [5-6], we assign pixel label predictions with misleading evidences to the uniform distribution, with Kullback-Leibler (KL) divergence loss, described with equation (3).

$$KL(D(\check{Y}_k|\check{\alpha}_k)||D(\check{Y}_k|\mathbf{1})) = \log\left(\frac{\Gamma(\sum_{m=1}^M \check{\alpha}_{km})}{\Gamma(M)\prod_{m=1}^M \Gamma(\check{\alpha}_{km})}\right) + \sum_{m=1}^M (\check{\alpha}_{km} - 1) [(\psi(\check{\alpha}_{km}) - \psi(\sum_{m=1}^M \check{\alpha}_{km}))] \quad [3]$$

where  $\Gamma(\cdot)$  and  $\psi(\cdot)$  respectively denote the gamma and digamma function.  $\check{\alpha}_k = \mathbf{y}_k + (\mathbf{1} - \mathbf{y}_k)\alpha_k$  denotes the Dirichlet parameters for misleading evidences.

Therefore, our total loss function becomes as given below:

$$E(\theta) + \lambda KL(D(\check{Y}|\check{\alpha})||D(\check{Y}|\mathbf{1})) \quad [4]$$

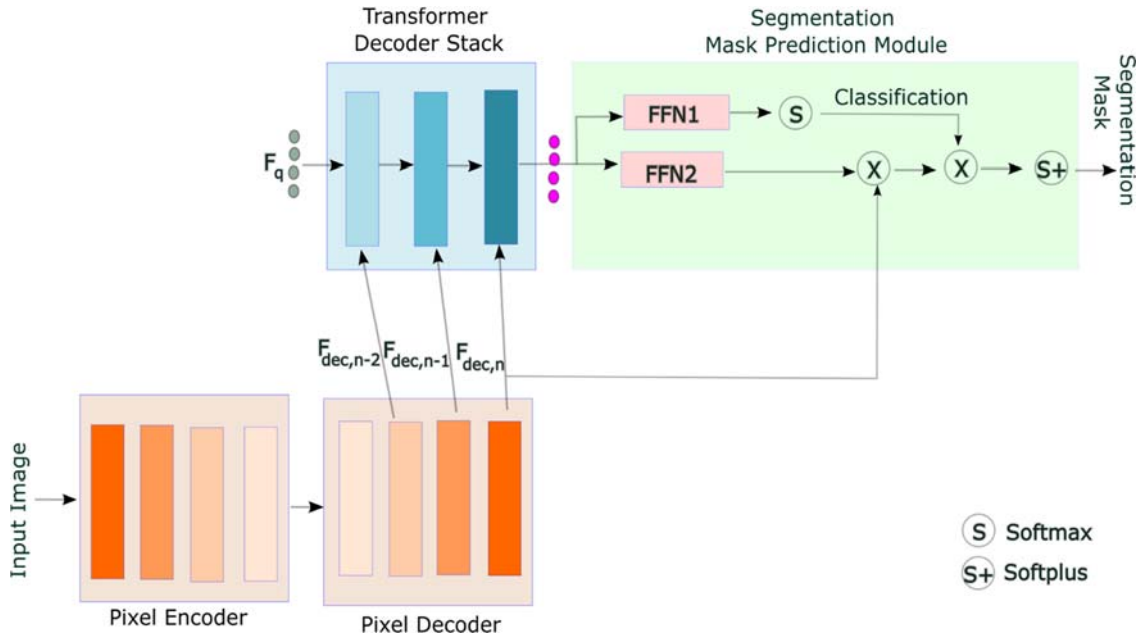
where we set  $\lambda = 0.1 \min(1, t/5)$  for a current epoch of  $t$ .

### 3.2. Uncertainty Map Prediction

We use normalized entropy for uncertainty prediction, which can be calculated with  $-\frac{1}{\log(M)} \sum_{m=1}^M \check{y}_m \log \check{y}_m$ , for each pixel in an input image [6].

### 3.3. Our Segmentation Model

As shown in Figure 1, our segmentation model consists of three main parts: (i) a pixel encoder-decoder sub-network to generate pixel features, (ii) a transformer decoder stack to learn mask and class embeddings, and (iii) a segmentation mask prediction module. We will explain each part of our model, and the interaction between them, as follows.



**Figure 1.** An overview of our network. FFN: feed forward network. Our model uses high resolution decoder features to enhance the segmentation of small structures in predicted masks

#### 3.3.1. Pixel Encoder-Decoder Sub-network

We use Res-UNet [13] as a pixel encoder-decoder network, with five encoder layers and five decoder modules. Each module consists of two convolutional layers and a residual connection. Convolutional layers are followed by a group normalization layer and the parametric ReLU activation function, apart from the last decoder module, which has a convolutional layer with 2 channels followed by the softmax function to generate binary masks for image background and the LA classes.



After being fully trained for segmentation, its weights are frozen, and the outputs of its three decoder modules right before the final decoder module are used as pixel features, --  $F_{dec,n-2}$ ,  $F_{dec,n-1}$  and  $F_{dec,n}$  -- for the transformer decoder stack in our model (see Figure 1).

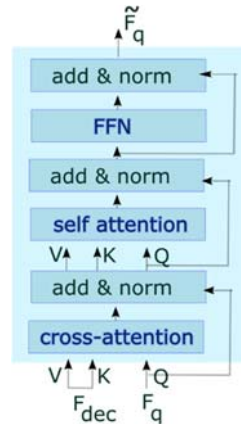
### 3.3.2. Transformer Decoder Stack

This module updates input query features,  $F_q$ , with pixel features through several decoder transformers, to generate mask and class embeddings in the segmentation mask prediction module [9] (see Figure 1). The initial query features,  $F_q$ , are evolved to be precursors of mask and class embeddings,  $\tilde{F}_q$ , with the cross-attention and self-attention mechanisms in each transformer decoder in the stack.

Figure 2 shows a detailed schematic of a transformer decoder [14]. Firstly, query features go through a linear projection to obtain  $Q_n \in R^{N \times C}$ , where N denotes the number of object masks and C represents the dimension of projected query feature vectors. Also, pixel features, generated by *pixel encoder-decoder module*, are linearly projected to yield keys and values matrices. For example, for  $F_{dec,n}$ , we produce  $K_n \in R^{dim_n \times C}$  and  $V_n \in R^{dim_n \times C}$ , where  $dim_n$  corresponds to the dimension of projected decoder features. Then, the cross attention mechanism updates query features with  $\tilde{F}_q = softmax(Q_n K_n^T) V_n + Q_n$ .

In the transformer decoder stack, query features produced by a previous transformer decoder are sent to the next one in sequence to progressively update them. The stack in our model contains three transformer decoders, each being fed with a different scale of image features for cross attention mechanism, --  $F_{dec,n-2} \in R^{256 \times \frac{H}{4} \times \frac{W}{4}}$ ,  $F_{dec,n-1} \in R^{128 \times \frac{H}{2} \times \frac{W}{2}}$  and  $F_{dec,n} \in R^{64 \times H \times W}$  --.

In contrast to previous work [9], we use higher resolution of pixel features to obtain segmentation masks, with the same size as input images. In order to reduce computation costs as a result of using high-resolution pixel features, we use a few object masks and reduce the dimensions of pixel features with linear projections to a small number such as 32.



**Figure 2.** A transformer decoder module.  $F_{dec}$  and  $F_q$  respectively represent pixel and query features. K: keys, V: values and Q: queries

### 3.3.3. Segmentation Mask Prediction Module

This module consists of two feed-forward networks (FFN), and converts updated query features to class embeddings with  $C_e = FFN_1(\tilde{F}_q)$  and mask embeddings with  $M_e = FFN_2(\tilde{F}_q)$ . Mask embeddings are multiplied with a highest resolution of pixel features,  $F_{dec,n}$ , to generate object masks with  $M = M_e F_{dec,n}$ , where  $M \in R^{N \times H_n \times W_n}$  represents N object masks. Later, these object masks are transformed to segmentation masks by multiplying object masks with class embeddings  $\tilde{M} = M C_e^T$ , where  $\tilde{M} \in R^{2 \times HW}$  and  $C_e \in R^{N \times 2}$ . Note that, we learn object masks more than the number of classes in this setting.

In contrast to previous work [9,11], *our segmentation mask prediction module* uses image features with a resolution equal to that of the input image; this largely ensures the reproduction of small structures in segmentation masks.

## 4. RESULTS

### 4.1. Material

We assessed the performance of our model on the publicly available Stacom 2013 dataset [12]. The dataset contains MRI images obtained with balanced steady-state free precession (bSSFP) acquisition and has a resolution of 1.25 mm x 1.25 mm x 2.7 mm. The dataset consists of 10 MRI images for model training, and 20 MRI images for performance evaluation. The dataset provides binary masks for both the LA and proximal pulmonary veins. However, we combine them to generate a single mask for each image, similar to previous work [2].

### 4.2. Experiments

We used the ResUnet trained with the cross entropy (CE) and another ResUnet trained with evidential learning (EL) as our baseline models and compared their performance against our model.

#### 4.2.1. Experiment 1

This experiment investigates the performance of our model for different loss functions. We examine three scenarios: (i) ResUnet, used in pixel encoder-decoder sub-network, and the rest of our model is trained with EL, (ii) ResUnet and the rest of our model are trained with the CE loss, (iii) the ResUnet is trained with CE and the rest of our model is trained with EL.

#### 4.2.2. Experiment 2

This experiment examines the importance of using high-resolution features as pixel features, in the accuracy of produced segmentation masks. We prepare three different versions of pixel feature sets for our mask transformer. For a fair comparison with the original model, we use the same number of transformer decoders in all models, which is 3. We upsample the generated segmentation masks to ensure they have the same size as the ground truth segmentation masks when necessary.

Evaluated sets of pixel feature resolutions are (i) only rough resolution features,  $F_{dec,n-2} \in R^{256 \times \frac{H}{4} \times \frac{W}{4}}$  --, for each transformer, (2) rough resolution features,  $F_{dec,n-2} \in R^{256 \times \frac{H}{4} \times \frac{W}{4}}$  --, for the first two transformers and moderate resolution features,  $F_{dec,n-1} \in R^{128 \times \frac{H}{2} \times \frac{W}{2}}$  --, for the last one, (3) rough  $F_{dec,n-2} \in R^{256 \times \frac{H}{4} \times \frac{W}{4}}$  --, moderate  $F_{dec,n-1} \in R^{128 \times \frac{H}{2} \times \frac{W}{2}}$  -- and fine resolution  $F_{dec,n} \in R^{64 \times H \times W}$  -- features (as in the original model).

### 4.3. Experimental Setup

We first trained the Res-UNet for 100 epochs with a learning rate of 0.005, and the rest of the model was trained for 40 epochs with a learning rate of 0.005. We used a weight decay of 0.001 for the training of both models.

We used decoder features of the ResUnet with the spatial resolutions of 48x48 pixels, 96x96 pixels, and 192x192 pixels, as input to the transformer decoders respectively. The embeddings of keys, values, and queries have dimensions of 32. The number of queries was set to be 4. We added sinusoidal positional encodings to the pixel features, prior to feeding them to any transformer decoder.

### 4.4. Performance Metrics

We report Dice and Jaccard scores when measuring overlapped areas between the reference and predicted volumes. ASSD and HD distance are used when calculating distances between the boundaries of the two volumes.

#### 4.5. Results and Discussion

Our model outperformed baseline models with large margins for three performance metrics, with a Dice score of 0.90, a Jaccard score of 0.82, and an ASSD of 1.85 (see Table 1). The baseline models are naively ResUnets trained with either CE or EL losses. On the other hand, our model consists of a transformer decoder stack and a segmentation mask prediction module, in addition to ResUNet used as pixel encoder and decoder. Despite its increased complexity compared to the baseline models, our model has a small overhead of less than 0,054 million parameters, in addition to the parameter of the Res-UNet, which is approximately 18 million parameters. This small overhead leads to a large performance improvement over baseline models. Another observation from Table 1 is that despite providing an easy uncertainty calculation, EL loss yields an underperforming ResUNet, compared to the CE loss.

A similar observation is made when training our model with CE and EL losses, as described in Experiment 1 in Section 4.2.1. Training our model purely with EL loss leads to poorer performance with a Dice score of 0.87 (see Table 2); however, its performance is still better than the baseline model of ResUNet trained with EL loss, which was 0.85. Training our model with purely CE loss outperforms the baseline model of ResUNet trained with CE loss, with a margin of 0.01. Finally, the best performance was obtained when the ResUNet was trained with the CE loss and the rest of our model with EL, as described in scenario 3, with a Dice score of 0.90 (see Table 2). These results show the effectiveness of our two-steps training scheme. It also shows that using a better-performing segmentation model --- ResUNet trained with CE instead of EL loss -- is important to reach a better performance by our model.

We also analyzed how much feature resolution is necessary for the transformer decoder stack, to obtain the most accurate segmentation masks. Table 3 summarises the results of Experiment 2 detailed in Section 4.2.2. We found that using higher-resolution pixel features in the transformer decoder stack leads to better segmentation performance, instead of repeating the same set of lower-resolution features such as  $F_{dec,n-2}$ . Incremental improvement is obtained by gradually increasing the resolution of features in the transformer decoder stack (see Table 3). The best segmentation performance is obtained when the finest resolution features  $F_{dec,n}$  were included in the stack. This shows the importance of increasing the resolution of features in the transformer decoder stack to maintain small details in segmentation masks.

Figure 3 shows segmentation masks and uncertainty maps generated by our model. Our method produces very close responses to the ground truth masks and accurately reproduces small structures, as well as larger ones. Although deterministic networks are naively not capable of producing uncertainty maps, we generate the maps thanks to training our model with the EL loss. Similar to human-expert labeling, the uncertainty maps show higher uncertainty for the boundary of the LA. Boundary pixels are hard to label, and they are generally known to lead to high uncertainty even among medical experts [12].

## 5. CONCLUSIONS

As far as we are aware, it is the first time that mask transformers are used for the segmentation of cardiac MRI images. We modified the design of mask transformers to better segment small structures of the LA by incrementally increasing the resolution of decoder features in the transformer decoder stack. We trained our model with EL to generate uncertainty maps from the learned Dirichlet distribution over LA and image background classes. We also presented a training scheme to improve the segmentation performance of our model, where our two-steps training with CE and EL losses produced the best segmentation performance for the LA in MRI images.

We found that our model outperforms baseline models with large margins in the STACOM 2013 dataset. Another superiority of our method is that it can generate uncertainty maps with a single network and a single pass, therefore, it is less costly in terms of computation, and expected to work faster, compared to ensemble models and Monte Carlo dropout method. Future work will explore its use for the segmentation of other cardiac structures such as ventricles.

**Table 1.** Performance comparison of LA segmentation

Methods	Dice	Jaccard	HD	ASSD
ResUnet & EL	0.85 ±0.04	0.75 ±0.05	29.62 ±13.21	2.59 ±0.48
ResUnet & CE	0.88 ±0.03	0.79 ±0.05	<b>22.63</b> ±10.69	2.00 ±0.36
Our model	<b>0.90</b> ±0.03	<b>0.82</b> ±0.04	30.07±22.86	<b>1.85</b> ±0.42

**Table 2.** Performance comparison for three scenarios in Experiment 1

#Scenario	Dice	Jaccard	HD	ASSD
1	0.87 ±0.03	0.78 ±0.05	38.23 ±18.71	2.55 ±0.68
2	0.89 ±0.03	0.80 ±0.04	<b>29.24</b> ±23.03	1.90 ±0.36
3	<b>0.90</b> ±0.03	<b>0.82</b> ±0.04	30.07±22.86	<b>1.85</b> ±0.42

**Table 3.** Performance comparison for Experiment 2, where we use different combinations for pixel feature resolution.  $F_{dec,n-2} \in \mathbf{R}^{256 \times \frac{H}{4} \times \frac{W}{4}}$ ,  $F_{dec,n-1} \in \mathbf{R}^{128 \times \frac{H}{2} \times \frac{W}{2}}$ , and  $F_{dec,n} \in \mathbf{R}^{64 \times H \times W}$ 

Decoder features	Dice	Jaccard	HD	ASSD
$F_{dec,n-2}$ & $F_{dec,n-2}$ & $F_{dec,n-2}$	0.89±0.03	0.80±0.05	35.71±25.11	2.05±0.45
$F_{dec,n-2}$ & $F_{dec,n-2}$ & $F_{dec,n-1}$	0.89±0.03	0.81±0.04	32.68±24.28	1.94±0.41
$F_{dec,n-2}$ & $F_{dec,n-1}$ & $F_{dec,n}$	<b>0.90</b> ±0.03	<b>0.82</b> ±0.04	<b>30.28</b> ±22.75	<b>1.86</b> ±0.42

## 6. REFERENCES

1. Uslu, F., Varela, M., Boniface, G., Mahenthiran, T., Chubb, H., Bharath, A.A., 2021. LA-Net: a multi-task deep network for the segmentation of the left atrium. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 41(2), 456-464
2. Uslu, F., Bharath, A.A., 2023. TMS-Net: a segmentation network coupled with a run-time quality control method for robust cardiac image segmentation. *Computers in Biology and Medicine*, 152, 106422.
3. Uslu, F., 2023. GSM-Net: a global sequence modelling network for the segmentation of short axis CINE MRI images. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 102266.
4. Gawlikowski, J., Tassi, C.R.N., Ali, M., Lee, J., Humt, M., Feng, J., Zhu, X.X., 2023. A survey of uncertainty in deep neural networks. *Artificial Intelligence Review*, 56(Suppl 1), 1513-1589.
5. Sensoy, M., Kaplan, L., Kandemir, M., 2018. Evidential deep learning to quantify classification uncertainty. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 31.
6. Li, H., Nan, Y., Del Ser, J., Yang, G., 2023. Region-based evidential deep learning to quantify uncertainty and improve robustness of brain tumor segmentation. *Neural Computing and Applications*, 35(30), 22071-22085.
7. Huang, L., Ruan, S., Decazes, P., Denœux, T., 2022. Lymphoma segmentation from 3D PET-CT images using a deep evidential network. *International Journal of Approximate Reasoning*, 149, 39-60.
8. Yager, R.R., Liu, L.(Eds.), 2008. *Classic works of the dempster-shafer theory of belief functions*. Springer, 219).
9. Cheng, B., Schwing, A., Kirillov, A., 2021. Per-pixel classification is not all you need for semantic segmentation. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 34, 17864-17875.
10. Carion, N., Massa, F., Synnaeve, G., Usunier, N., Kirillov, A., Zagoruyko, S., 2020. End-to-end object detection with transformers. In *European Conference on Computer Vision* (213-229). Cham: Springer International Publishing.
11. Yu, Q., Wang, H., Qiao, S., Collins, M., Zhu, Y., Adam, H., Chen, L.C., 2022. K-means mask transformer. In *European Conference on Computer Vision* (288-307). Cham: Springer Nature Switzerland.
12. Tobon-Gomez, C., Geers, A.J., Peters, J., Jürgen W., Karen, P., Rashed, K., et al., 2015. Left atrial segmentation challenge 2013: MRI testing. *Figshare*. Dataset.
13. Zhang, Z., Liu, Q., Wang, Y., 2018. Road extraction by deep residual u-net. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 15(5), 749-753.
14. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Polosukhin, I., 2017. Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30.

## Farklı Özelliklere Sahip Çok Katlı Binalarda Deprem Düzensizliklerinin İrdelenmesi

Yusuf Ziya NOMANOĞLU<sup>1,a</sup>, Timuçin Alp ASLAN<sup>1,b</sup>, Beytullah TEMEL<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0002-9755-977X; <sup>b</sup>ORCID: 0000-0002-7558-3568; <sup>c</sup>ORCID: 0000-0002-1673-280X

### Makale Bilgileri

Geliş : 17.07.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560075

### Sorumlu Yazar

Timuçin Alp ASLAN

taslan@cu.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Türkiye bina deprem yönetmeliği

Eşdeğer deprem yükü yöntemi

Yapı düzensizlikleri

Yüksek betonarme binalar

**Atf şekli:** NOMANOĞLU, Y.Z., ASLAN, T.A., TEMEL, B., (2024). Farklı Özelliklere Sahip Çok Katlı Binalarda Deprem Düzensizliklerinin İrdelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 647-666.

### ÖZ

Bu çalışmada, çok katlı betonarme yüksek binaların 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY -2018) kapsamındaki hususlara göre analizleri yapılmıştır. Salt betonarme çerçeve sistemler, perdeli sistemler ve bodrum perdeli sistemlerin analizleri Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemine göre yapılmıştır. Bununla beraber analizlerde, farklı modeller için etrafı rijit bodrum perdeleri ile çevrili binaların deprem etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Farklı özelliklere sahip çok katlı binalar modellenerek TBDY- 2018'e göre yapı düzensizlikleri araştırılmıştır. Bina modellemeleri ve analizleri için SAP2000 sonlu elemanlar paket programından faydalanılmıştır.

## Examination of Earthquake Irregularities in Multi-Storey Buildings with Different Geometric Features

### Article Info

Received : 17.07.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560075

### Corresponding Author

Timuçin Alp ASLAN

taslan@cu.edu.tr

### Keywords

Türkiye building earthquake code

Equivalent seismic load method

Structural irregularities

High-rise reinforced concrete buildings

**How to cite:** NOMANOĞLU, Y.Z., ASLAN, T.A., TEMEL, B., (2024). Farklı Özelliklere Sahip Çok Katlı Binalarda Deprem Düzensizliklerinin İrdelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 647-666.

### ABSTRACT

In this paper, the analysis of tall multi-story buildings is performed based on the regulations of the 2018 Türkiye Building Earthquake Code (TSC-2018). The static and dynamic analysis of reinforced concrete frame structures, structures with shear walls, and structures with shear walls at their basement floors is carried out using equivalent seismic load method. In addition, the response of several models of buildings having their basements surrounded by rigid shear walls is examined under the seismic loads in the analysis. Multi-storey buildings with different characteristics are modeled and structural irregularities are investigated according to TSC-2018. The SAP 2000 finite element package program is used for the modelling and analysis of the buildings.



## 1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze istenmeyen oranda can ve mal kayıplarına sebep olan çok sayıda orta ve büyük şiddetli depremler meydana gelmektedir. Bu sebeple deprem etkisi altında olan betonarme binaların tasarımında yeterli dayanımın sağlanması hayati önem taşımaktadır.

Kürkçü [1], yüksek katlı bir betonarme yapının TBDY-2018 göre tasarımını ETABS programını kullanarak yapmıştır. Asıgçel [2], betonarme binalarda deprem etkisini doğrusal analiz metodu kullanarak 2007-Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (DBYBH-2007) ve TBDY-2018 deprem yönetmeliklerine göre karşılaştırmıştır. Hamsici [3], çok katlı betonarme binalarda İDECAD programı yardımıyla TBDY-2018 ve DBYBHY-2007 deprem yönetmeliklerine göre analizleri yapılarak taban kesme kuvvetleri ve maksimum görelî kat ötelemelerinin karşılaştırılmalarını yapmıştır. Kapıdaş [4], betonarme yüksek binaların TBDY-2018 deprem yönetmeliğine göre tasarım ve analizini yapmıştır. Adar [5], DBYBH-2007 ve TBDY-2018 deprem yönetmeliklerini karşılaştırmış 13 katlı bir yapıyı analiz edip meydana gelen yer değiştirmeleri incelemiştir. Kefeli [6], planda düzensizliği bulunan farklı katlı yapıların SAP2000 programında modellemiş ve itme analizi ve zaman tanım alanında deprem performanslarının analizi için uygulamıştır. Topçu [7], 30 katlı bir betonarme binanın çekirdek perde ve çerçeve sistemi kullanarak tasarımını yapmıştır. Deliktaş [8] geometrik özellik ve kullanım amaçları bakımından aynı olan taşıyıcı sistemleri DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 göre oluşan gerilmeler ve yükleri hesaplayıp karşılaştırmıştır. Tekdemir [9], TBDY-2018 göre Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ve Mod Birleştirme yöntemini kullanarak 4 katlı betonarme bir binanın tasarım, analiz ve karşılaştırmasını yapmıştır. Fraidoon [10], perde sisteme sahip 24 katlı bir betonarme binanın TBDY-2018'e göre tasarımını ve deprem performanslarının incelemesini yapmıştır. Akçora [11], SAP2000 ve ETABS programlarını kullanarak binanın 3 boyutlu sonlu eleman modelleri hazırlamış ve mod birleştirme yöntemi ile analizini yapmıştır. Özmen ve Sayın [12], çok katlı betonarme bir yapının DBYBH-2007 ve TBDY-2018'e göre deprem yüklerini karşılaştırmışlardır. Karaca [13], bodrumlu betonarme binaları irdelenmiş ve bodrumun önemini ve hesaplamalarda dikkat edilmesi gereken hususları ortaya koymuştur. Zeybek [14] çalışmasında TBDY-2018'e göre yüksek katlı bir yapının analizi için yönetmelikte yapılması gerekenleri, aşamalar halinde anlatmış elde ettiği verileri yorumlayarak karşılaşılan zorlukları ve eksiklikleri ortaya koymuştur. Uludağ [15], TBDY-2018'de verilen yükseklik sınırına göre tasarım kurallarını örneklerle karşılaştırarak incelemiştir. Seçkin ve Boran [16], 20 katlı bir binada TBDY 2018'e göre betonarme perdelerin kesme güvenliğini araştırmışlardır. Özerdem [17] farklı detaylara sahip betonarme çerçevelerin deprem davranışlarını incelemiştir. Sağlam [18] betonarme yüksek bir yapının TBDY-2018 e göre tasarımını ve performans analizini SAP 2000 programını kullanarak gerçekleştirmiştir. Yılmaz [18] tez çalışmasında kat adedi farklı binaların zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizini TBDY-2018 ve Eurocode-8 deprem yönetmeliklerini kullanılarak incelemiştir.

Bu çalışmada çok katlı betonarme yüksek binaların TBDY-2018 kapsamındaki hususlara göre analizleri yapılmıştır. Salt çerçevelerden oluşan, perdeli ve bodrum perdeli sistemler için incelemeler Eşdeğer Deprem Yüğü yöntemi ile aşamalar halinde yapılmış, her aşama sonucunda elde edilen veriler yorumlanmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında TBDY-2018'e [19] göre çeşitli bina modllerinin analizleri yapılacaktır. İlk olarak bina kullanım sınıfı (BKS) ve bina önem katsayı (I) TBDY-2018'de Çizelge 1 incelenerek bina kullanım amacına uygun olarak seçilir.

Farklı deprem yer hareketi düzeyleri için tanımlanmış olan deprem tehlike haritalarına <https://tdth.afad.gov.tr> [20] web adresinden erişim sağlanmaktadır. Haritadan koordinat bilgileri, deprem yer hareketi düzeyi, zemin sınıfı bilgileri ve zemin sınıfına bağlı olarak bina yapılacak parselde özgü spektral ivme katsayıları ile yatay ve düşey elastik tasarım spektrum katsayıları bulunmaktadır.

**Çizelge 1.** BKS ve I (TBDY-2018)

Bina Kullanım Sınıfı	Binanın Kullanım Amacı	Bina Önem Katsayısı (I)
BKS = 1	<b>Deprem sonrası kullanımı gereken binalar, insanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar, değerli eşyanın saklandığı binalar ve tehlikeli madde içeren binalar</b> <b>a)</b> Deprem sonrasında hemen kullanılması gerekli binalar (Hastaneler, dispanserler, sağlık ocakları, itfaiye bina ve tesisleri, PTT ve diğer haberleşme tesisleri, ulaşım istasyonları ve terminalleri, enerji üretim ve dağıtım tesisleri, vilayet, kaymakamlık ve belediye yönetim binaları, ilk yardım ve afet planlama istasyonları) <b>b)</b> Okullar, diğer eğitim bina ve tesisleri, yurt ve yatakhaneler, askeri kışlalar, cezaevleri, vb. <b>c)</b> Müzeler <b>d)</b> Toksik, patlayıcı, parlayıcı, vb. özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı binalar	1.5
BKS = 2	<b>İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar</b> Alışveriş merkezleri, spor tesisleri, sinema, tiyatro, konser salonları, ibadethaneler, vb.	1.2
BKS = 3	<b>Diğer binalar</b> BKS=1 ve BKS=2 için verilen tanımlara girmeyen diğer binalar (Konutlar, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapıları, vb.)	1.0

Deprem tasarım sınıfı (DTS) ve BKS'ye göre kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı bulunur (Çizelge 2).

**Çizelge 2.** DTS (TBDY-2018)

DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı ( $S_{Ds}$ )	Bina kullanım sınıfı	
	BKS = 1	BKS = 2, 3
$S_{Ds} < 0.33$	DTS = 4a	DTS = 4
$0.33 < S_{Ds} \leq 0.50$	DTS = 3a	DTS = 3
$0.50 < S_{Ds} \leq 0.75$	DTS = 2a	DTS = 2
$0.75 \leq S_{Ds}$	DTS = 1a	DTS = 1

TBDY-2018 Çizelge 3' ten bina toplam yüksekliği ve DTS'ye göre Bina yükseklik sınıfı (BYS) bulunur. Bina toplam yüksekliği sayısal model oluşturulduktan sonra TBDY-2018 Madde 3.3.1'e göre yeniden belirlenir.

Süneklik düzeylerine göre bina taşıyıcı sistemleri için taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R), dayanım fazlalığı katsayısı (D) ve izin verilen bina yükseklik sınıfları (BYS) Çizelge 4. üzerinde verilmiştir. Çizelge 4'den seçilen taşıyıcı sistem davranış katsayısı, sayısal model oluşturulduktan sonra TBDY-2018 4.3.2.4. ve 4.3.2.5. maddelerine göre tekrardan değerlendirilir.

**Çizelge 3.** BYS ve DTS'ye göre tanımlanan bina yükseklik aralıkları (TBDY-2018)

Bina yükseklik sınıfı	Bina yükseklik sınıfları ve deprem tasarım sınıflarına göre tanımlanan bina yükseklik aralıkları [m]		
	DTS = 1, 1a, 2, 2a	DTS = 3, 3a	DTS = 4, 4a
BYS = 1	$H_N > 70$	$H_N > 91$	$H_N > 105$
BYS = 2	$56 < H_N \leq 70$	$70 < H_N \leq 91$	$91 < H_N \leq 105$
BYS = 3	$42 < H_N \leq 56$	$56 < H_N \leq 70$	$56 < H_N \leq 91$
BYS = 4	$28 < H_N \leq 42$	$42 < H_N \leq 56$	
BYS = 5	$17.5 < H_N \leq 28$	$28 < H_N \leq 42$	
BYS = 6	$10.5 < H_N \leq 17.5$	$17.5 < H_N \leq 28$	
BYS = 7	$7 < H_N \leq 10.5$	$10.5 < H_N \leq 17.5$	
BYS = 8	$H_N \leq 7$	$H_N \leq 10.5$	

**Çizelge 4.** Bina taşıyıcı sistemleri için R, D ve BYS katsayıları (TBDY-2018)

Bina taşıyıcı sistemi	Taşıyıcı sistem davranış katsayısı R	Dayanım fazlalığı katsayısı D	İzin verilen bina yükseklik sınıfları BYS
<b>A. YERİNDE DÖKME BETONARME BİNA TAŞIYICI SİSTEMLERİ</b>			
<b>A1. Süneklik Düzeyi Yüksek Taşıyıcı Sistemler</b>			
A11. Deprem etkilerinin tamamının moment aktaran <i>süneklik düzeyi yüksek</i> betonarme çerçevelerle karşılandığı binalar	8	3	BYS ≥ 3
A12. Deprem etkilerinin tamamının <i>süneklik düzeyi yüksek</i> bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdelerle karşılandığı binalar	7	2.5	BYS ≥ 2
A13. Deprem etkilerinin tamamının <i>süneklik düzeyi yüksek</i> boşluksuz betonarme perdelerle karşılandığı binalar	6	2.5	BYS ≥ 2
A14. Deprem etkilerinin moment aktaran <i>süneklik düzeyi yüksek</i> betonarme çerçeveler ile <i>süneklik düzeyi yüksek</i> bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.4.3.4.5)	8	2.5	BYS ≥ 2
A15. Deprem etkilerinin moment aktaran <i>süneklik düzeyi yüksek</i> betonarme çerçeveler ile <i>süneklik düzeyi yüksek</i> boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.4.3.4.5)	7	2.5	BYS ≥ 2
A16. Deprem etkilerinin tamamının çatı düzeyindeki bağlantıları mafsallı olan ve yüksekliği 12 m'yi geçmeyen <i>süneklik düzeyi yüksek</i> betonarme kolonlar tarafından karşılandığı tek katlı binalar	3	2	-
<b>A2. Süneklik Düzeyi Karma Taşıyıcı Sistemler (Bkz. 4.3.4.1, 4.3.4.6)</b>			
A21. Deprem etkilerinin moment aktaran <i>süneklik düzeyi sınırlı</i> betonarme çerçeveler ile <i>süneklik düzeyi yüksek</i> bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.4.3.1.2)	6	2.5	BYS ≥ 4
A22. Deprem etkilerinin moment aktaran <i>süneklik düzeyi sınırlı</i> betonarme çerçeveler ile <i>süneklik düzeyi yüksek</i> boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz.4.3.1.2)	5	2.5	BYS ≥ 4
A23. Deprem etkilerinin moment aktaran <i>süneklik düzeyi sınırlı dolgulu (asmolen) veya dolgusuz tek doğrultulu dışli döşemeli</i> betonarme çerçeveler ile <i>süneklik düzeyi yüksek</i> bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar	6	2.5	BYS ≥ 6
A24. Deprem etkilerinin moment aktaran <i>süneklik düzeyi sınırlı dolgulu (asmolen) veya dolgusuz tek doğrultulu dışli döşemeli</i> betonarme çerçeveler ile <i>süneklik düzeyi yüksek</i> boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar	5	2.5	BYS ≥ 6
<b>A3. Süneklik Düzeyi Sınırlı Taşıyıcı Sistemler (Bkz. 4.3.4.1, 4.3.4.3, 4.3.4.7)</b>			
A31. Deprem etkilerinin tamamının moment aktaran <i>süneklik düzeyi sınırlı</i> betonarme çerçevelerle karşılandığı binalar	4	2.5	BYS ≥ 7
A32. Deprem etkilerinin tamamının <i>süneklik düzeyi sınırlı</i> boşluksuz betonarme perdelerle karşılandığı binalar	4	2	BYS ≥ 6
A33. Deprem etkilerinin moment aktaran <i>süneklik düzeyi sınırlı</i> betonarme çerçeveler ile <i>süneklik düzeyi sınırlı</i> boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar	4	2	BYS ≥ 6

TBDY-2018'de madde 4.5.9'a göre kat kütleleri belirlenirken sabit yüklerin tamamı ve hareketli yüklerin ise binanın kullanım amacına göre Çizelge 5' te verilen katılım katsayısına (n) göre belirli bir kısmı dikkate alınmaktadır. Ayrıca çatı katı yüklerinin ise %30'u göz önüne alınır.

**Çizelge 5.** n değerleri (TBDY-2018)

Binanın Kullanım Amacı	n
Depo, antrepo, vb.	0.80
Okul, öğrenci yurdu, spor tesisi, sinema, tiyatro, konser salonu, ibadethane, lokanta, mağaza, vb.	0.60
Konut, işyeri, otel, hastane, otopark, vb.	0.30

TBDY-2018 madde 4.5.8'e göre, dayanıma göre tasarım kapsamında betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının kesit özelliklerinin tanımlanmasında Çizelge 6'da verilen etkin kesit rijitliği çarpanları kullanılır (TBDY-2018).

**Çizelge 6.** Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının etkin kesit rijitliği çarpanları

Betonarme taşıyıcı sistem elemanı	Etkin kesit rijitliği çarpanı	
<b>Perde – döşeme (düzlem içi)</b>	<b>Eksenel</b>	<b>Kayma</b>
Perde	0.50	0.50
Bodrum perdesi	0.80	0.50
Döşeme	0.25	0.25
<b>Perde – döşeme (düzlem dışı)</b>	<b>Eğilme</b>	<b>Kesme</b>
Perde	0.25	1.00
Bodrum perdesi	0.50	1.00
Döşeme	0.25	1.00
<b>Çubuk eleman</b>	<b>Eğilme</b>	<b>Kesme</b>
Bağ kirişi	0.15	1.00
Çerçeve kirişi	0.35	1.00
Çerçeve kolonu	0.70	1.00
Perde (eşdeğer çubuk)	0.50	0.50

TBDY-2018 Madde 3.3.1.1 de verilen koşulların her ikisini de sağlayan bodrumlu binalarda bina tabanı, bodrum perdelerinin üst konundaki kat döşeme seviyesinde tanımlanır (TBDY-2018).

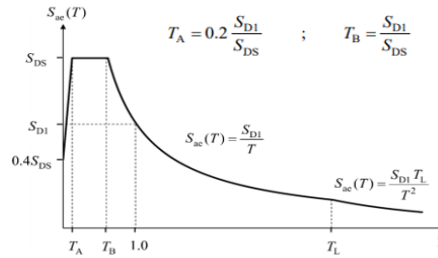
1. Bodrumun her taraftan veya en az üç taraftan rijit perdeler ile çevrilmesi
2. Bina eksenlerinin birbirine dik doğrultularındaki hâkim titreşim modunda, bodrum katlar dâhil binanın tümü için hesaplanan hâkim doğal titreşim periyodunun, aynı taşıyıcı sistemin zemin katının döşeme yükleri ve bodrum yükleri hesaba katılmadan aynı doğrultuda hesaplanan doğal titreşim periyoduna oranının 1,1'den küçük olması durumudur.

TBDY-2018'e göre herhangi bir deprem hareketi düzeyi için yatay elastik tasarım ivme spektrumu  $S_{ac}(T)$ , doğal titreşim periyoduna göre yer çekim ivmesi cinsinden

$$S_{ac}(T) = \begin{cases} \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_A}\right) S_{DS} & (0 \leq T \leq T_A) \\ S_{DS} & (T_A \leq T \leq T_B) \\ \frac{S_{D1}}{T} & (T_B \leq T \leq T_L) \\ \frac{S_{D1} T_L}{T^2} & (T_L \leq T) \end{cases}$$

denklemleri yardımıyla bulunur.

Denklemlerde görüldüğü üzere tasarım spektral ivme katsayıları  $S_{DS}$  ve  $S_{D1}$  yatay tasarım spektrumu köşe periyotlarına  $T_A$  ve  $T_B$ 'ye bağlı olarak tanımlanır. (TBDY-2018).



Şekil 1. Yatay elastik tasarım spektrumu (TBDY- 2018)

Deprem düzensizlikleri kontrol edilirken depreme karşı davranıştaki olumsuzluklar sebebiyle tasarım yapılırken dikkat edilmesi gereken düzensiz binaların tanımlanmasında, planda ve düşey doğrultuda meydana gelen düzensizliklerle ilgili durumlar Çizelge 7'de verilmiştir (TBDY-2018).

#### Çizelge 7. Düzensiz binalar (TBDY-2018)

A – PLANDA DÜZENSİZLİK DURUMLARI	İlgili maddeler
<b>A1 – Burulma Düzensizliği:</b> Birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir katta en büyük görelî kat ötelemesinin o katta aynı doğrultudaki ortalama görelî ötelemeye oranını ifade eden <i>Burulma Düzensizliği Katsayısı</i> $\eta_{bi}$ 'nin 1.2'den büyük olması durumu	3.6.2.1
<b>A2 – Döşeme Süreksizlikleri:</b> Herhangi bir kattaki döşemede; I – Merdiven ve asansör boşlukları dahil, boşluk alanları toplamının kat brüt alanının 1/3'ünden fazla olması durumu, II – Deprem yüklerinin düşey taşıyıcı sistem elemanlarına güvenle aktarılabilmesini güçleştiren yerel döşeme boşluklarının bulunması durumu, III – Döşemenin düzlem içi rijitlik ve dayanımında ani azalmaların olması durumu	3.6.2.2
<b>A3 – Planda Çıkıntılar Bulunması:</b> Bina kat planlarında çıkıntı yapan kısımların birbirine dik iki doğrultudaki boyutlarının her ikisinin de, binanın o katının aynı doğrultudaki toplam plan boyutlarının %20'sinden daha büyük olması durumu.	3.6.2.2
B – DÜŞEYDE DÜZENSİZLİK DURUMLARI	İlgili maddeler
<b>B1 – Komşu Katlar Arası Dayanım Düzensizliği (Zayıf Kat):</b> Betonarme binalarda, birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi birinde, herhangi bir kattaki <i>toplam etkili kesme alanı</i> 'nin, bir üst kattaki <i>toplam etkili kesme alanı</i> 'na oranı olarak tanımlanan <i>Dayanım Düzensizliği Katsayısı</i> $c_{\eta}$ 'nin 0.80'den küçük olması durumu.	3.6.2.3
<b>B2 – Komşu Katlar Arası Rijitlik Düzensizliği (Yumuşak Kat):</b> Birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, bodrum katlar dışında, herhangi bir i'nci kattaki ortalama görelî kat ötelemesi oranının bir üst veya bir alt kattaki ortalama görelî kat ötelemesi oranına bölünmesi ile tanımlanan <i>Rijitlik Düzensizliği Katsayısı</i> $\eta_{ki}$ 'nin 2.0'den fazla olması durumu.	3.6.2.1
<b>B3 – Taşıyıcı Sistemin Düşey Elemanlarının Süreksizliği:</b> Taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının (kolon veya perdelerin) bazı katlarda kaldırılarak kirişlerin veya guseli kolonların üstüne veya ucuna oturtulması, ya da üst kattaki perdelerin altta kolonlara oturtulması durumu.	3.6.2.4

### 3. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu bölümde TBDY 2018'e göre 4 adet farklı model için bina düzensizlikleri SAP2000 [21] programından alınan sonuçlar yardımıyla incelenmiştir. Modellemeler oluşturulurken bodrum perdelerinin ve kat perdelerinin bina davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca modellerde simetrik ve asimetric perdelerin deprem düzensizlikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

#### Uygulama 1. Etrafi Rijit Perdelerle Çevrili Bodrum Perdeli Sistem

Binanın Adana/Sarıçam'da Çukurova üniversitesi yerleşkesinde inşa edilmesi planlanmaktadır. Yerel zemin sınıfı ZC olarak belirlenmiştir.

Bina Bilgileri:

Kat adedi	: 1 Bodrum + 10 Kat
Kat Yüksekliği	: 3m
Kolon	: 80x80 cm
Kiriş	: 40x60 cm
Döşeme Kalınlığı	: 20 cm
Perde	: 40 cm
Bodrum kat bodrum perdeleri ile çevrilmiştir.	

Malzeme:

Beton	: C40/50
Donatı Çeliği	: S420

Yükler:

Normal katlar için;

Sabit (Zati) Yük : 3,5 kN/m<sup>2</sup>

Hareketli Yük : 5 kN/m<sup>2</sup>

Çatı katı için;

Sabit (Zati) Yük : 4 kN/m<sup>2</sup>

Hareketli Yük : 1,5 kN/m<sup>2</sup>

Kar yükü : 1,15 kN/m<sup>2</sup>

Binamız konut amacı ile kullanılacaktır. TBDY-2018 Çizelge 3.1'e göre bina kullanım sınıfı BKS=3 bina önem katsayısı I=1 olarak belirlenmiştir.

Deprem hareketi 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2) standart tasarım deprem yer hareketi olarak dikkate alınarak yatay elastik tasarım spektrumu oluşturulur.

DD-2 deprem düzeyi ve ZC zemin sınıfı için Türkiye Deprem Tehlike Haritasından aldığımız parametreler;

$$S_S=0,527 \quad S_I=0,130 \quad S_{DS}=0,679 \quad S_{D1}=0,195 \quad PGA=0,231 \quad PGV=11,826$$

olarak bulunmuştur.

$S_{DS}$  ve BKS kullanılarak TBDY-2018 Çizelge 2'den DTS=1 belirlenir.

TBDY-2018 Çizelge 3'ten yararlanılarak DTS ve Kat yüksekliği bilgilerini kullanarak Bina Yükseklik Sınıfı BYS=4 belirlenir.



Şekil 2. Türkiye deprem tehlike haritaları kullanıcı girdileri

## Çıktılar

$$S_S = 0.527 \quad S_1 = 0.130 \quad S_{D5} = 0.679 \quad S_{D1} = 0.195$$

$$PGA = 0.231 \quad PGV = 11.826$$

$S_0$  : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

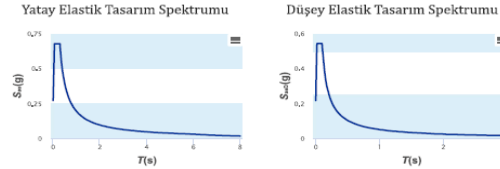
$S_1$  : 1,0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

$S_{D0}$  : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

$S_{D1}$  : 1,0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

PGA : En büyük yer ivmesi [g]

PGV : En büyük yer hızı [cm/sn]

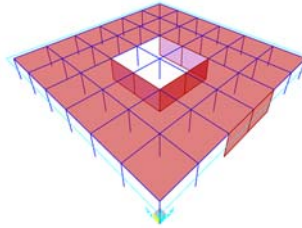


Şekil 3. Türkiye deprem tehlike haritaları çıktıları (AFAD)

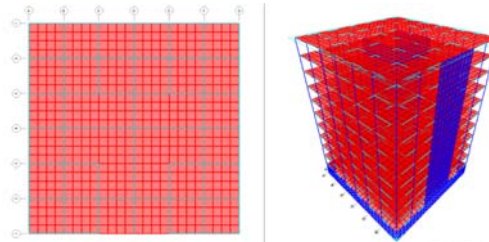
TBDY-2018 Çizelge 3.4'e göre izin verilen bina yükseklik sınıfları içerisinde  $BYS \geq 2$  ve A15. Deprem etkilerinin moment aktaran süneklik düzeyi yüksek betonarme çerçeveler ile süneklik düzeyi yüksek boşluksuz betonarmeler tarafından birlikte karşılandığı binalar için Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı  $R=7$  ve  $D=2,5$  seçilir.

SAP2000 programı yardımıyla bina modeli oluşturularak eşdeğer deprem yükü yöntemi ile analizler yapılacaktır.

Bina modelinde 1 adet merkezde olmak üzere C perde ve 1 adette binanın dış kenarında perde-bulunmakta olup bodrum katının etrafı dıştan rijit perdelerle çevrilmiştir.



Şekil 4. SAP2000 3 boyutlu kat perspektif görünüşü



Şekil 5. SAP2000 Döşeme sonlu elemanlar modeli ve bina perspektif görünüşü

Bu modelde perde elamanlarının asimetrik konumlarından dolayı bina modelinin simetrikliği bozulduğundan X ve Y yönlerinde farklı hâkim titreşim periyotları ( $T^{(x)}=0,94$  sn,  $T^{(y)}=0,70$  sn) elde edilmiştir.

TBDY-2018 Madde 4.7.3.2'ye göre binanın hesaplanan hâkim doğal titreşim periyodu  $T_{pA}=C_t H_N^{3/4}$  değerinin 1.4 katını geçmemelidir.

$C_t=0,07$  Binanın bodrum katındaki üstündeki toplam yükseklik  $H_N=30$  m için  $1,4 \times T_{pA}=1,256$  sn ( $T^{(x)}=0,94$  sn,  $T^{(y)}=0,70$  sn)  $< 1,4 \times T_{pA} = 1,256$  sn şartını sağlamaktadır.



Bina kat yüksekliğinin belirlenmesi için bodrum kat yükleri ihmal edilerek hâkim doğal titreşim periyodu değerleri bulunmalıdır.

Zemin kat döşemeleri dâhil olmak üzere tüm bodrum kat kütleleri hesaba katılmadan çözümlenen modele ait X ve Y doğrultularındaki serbest titreşim periyodları, binanın tümü için hesaplanan X ve Y doğrultusundaki periyodlarla karşılaştırdığımızda çıkan farkın çok az olduğu görülmüştür ( $T^{(x)}=0,94$  sn,  $T^{(y)}=0,70$  sn). Bu sebepten bina tabanı, bodrum katla zemin kat arasındaki kat döşemesinden tanımlanacaktır.  $H_N=30$  m olarak alınır.

Eşdeğer deprem yükü yönteminde tüm kat kütleleri kat hizasında yığılı olarak hesaplanır. Kat hizasında bulunan döşeme kiriş gibi tüm taşıyıcı yapı elemanları kat kütlelerine dâhil edilir. Fakat kolon perde gibi düşey taşıyıcı elemanların ise uzunluklarının yarısı buldukları katın kütlelerine katılır.

Buna göre üst bölüm toplam kat kütlesi 9876 ton, bodrum kat toplam kütlesi 1131 ton olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 8.** Kat kütleleri

Kat No	Kütle (Ton)
10	906
9	997
8	997
7	997
6	997
5	997
4	997
3	997
2	997
1	997
Bodrum	1131

TBDY-2018'e göre yatay tasarım spektrumu köşe periyodları hesaplanmıştır.

$$T_A = 0,2 \frac{0,195}{0,679} \Rightarrow T_A = 0,057 \text{ sn}$$

$$T_B = \frac{0,195}{0,679} \Rightarrow T_B = 0,287 \text{ sn}$$

Üst Katlar:

TBDY-2018'e göre yatay elastik tasarım spektral ivmeleri sırasıyla X ve Y doğrultularında aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır;

$$S_{ae}(T^{(x)}) = \frac{0,195}{0,94} \Rightarrow S_{ae}(T^{(x)}) = 0,207 \text{ g}$$

$$S_{ae}(T^{(y)}) = \frac{0,195}{0,7} \Rightarrow S_{ae}(T^{(y)}) = 0,278 \text{ g}$$

TBDY-2018'e göre deprem yükü azaltma katsayısı sırasıyla X ve Y doğrultularında aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$R_a(T^{(x)}) = \frac{7}{1} \Rightarrow R_a(T^{(x)}) = 7, \quad R_a(T^{(y)}) = \frac{7}{1} \Rightarrow R_a(T^{(y)}) = 7$$

TBDY-2018'e göre azaltılmış tasarım spektral ivmesi sırasıyla aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$S_{aR}(T^{(x)}) = \frac{0,207}{7} \Rightarrow S_{aR}(T^{(x)}) = 0,030 \text{ g} \quad S_{aR}(T^{(y)}) = \frac{0,278}{7} \Rightarrow S_{aR}(T^{(y)}) = 0,039 \text{ g}$$

Bodrum katı:

TBDY-2018'de  $T=0$  için elde edilen azaltılmış spektral ivme;

$$S_{aR}(0) = \frac{0,4 \times 1,198}{1,5} \Rightarrow S_{aR}(0) = 0,181 \text{ g}$$

olarak hesaplanır.

Üst Katlar:

TBDY-2018'e göre X ve Y doğrultularındaki toplam eşdeğer deprem yükü aşağıdaki şekilde bulunur.

$$V_{tE} = m_t S_{aR}(T)g \geq 0,04 m_t I S_{DS}g$$

$$V_{tE}^{(x)} = 9876 * 0,030 * 9,81 \geq 0,04 * 9875,64 * 1 * 0,679 * 9,81$$

$$V_{tE}^{(x)} = 2906 \text{ kN} \geq 2631 \text{ kN}$$

$$V_{tE}^{(y)} = 9876 * 0,039 * 9,81 \geq 0,04 * 9876 * 1 * 0,679 * 9,81$$

$$V_{tE}^{(y)} = 3778 \text{ kN} \geq 2631 \text{ kN}$$

Bodrum Kat:

$$V_{tE} = m_t S_{aR}(T)g$$

$$V_{tE}^{(x)} = 1331 * 0,181 * 9,81 = 2008 \text{ kN}$$

TBDY-2018'e göre katlara etkiyen eşdeğer deprem yükleri,

$$F_{iE} = (V_{tE} - \Delta F_{NE}) \frac{m_i H_i}{\sum_{j=1}^N m_j H_j}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada binanın tepesine etkiyen X ve Y doğrultusundaki ek eşdeğer deprem yükleri;

$$\Delta F_{NE}^{(x)} = 0,0075 N V_{tE} = 217,98 \text{ kN}$$

$$\Delta F_{NE}^{(y)} = 0,0075 N V_{tE} = 283,374 \text{ kN}$$

olarak hesaplanmıştır. Katlara etkiyen eşdeğer deprem yükleri Çizelge 9'da verilmiştir.

**Çizelge 9.** Katlara etkiye eşdeğer deprem yükleri

Kat no	h <sub>i</sub> m	H <sub>i</sub> m	m <sub>i</sub> ton	m <sub>i</sub> H <sub>i</sub> Tonm	F <sub>iE</sub> <sup>(X)</sup> (kN)	F <sub>iE</sub> <sup>(Y)</sup> (kN)
10	3	30	906	27176	670	871
9	3	27	997	26909	447	582
8	3	24	997	23919	398	517
7	3	21	997	20929	348	452
6	3	18	997	17940	298	388
5	3	15	997	14950	249	323
4	3	12	997	11960	199	258
3	3	9	997	8970	149	194
2	3	6	997	5980	99	129
1	3	3	997	2990	50	65

TBDY-2018, madde 4.5.10'a göre kat döşemlerinin rijit diyafram olarak modellenmesi durumunda, kat kütle merkezlerine etkiyen yatay deprem yükleri, göz önüne alınan deprem doğrultusuna dik doğrultudaki kat boyunun +%5 ve -%5' i kadar kaydırılarak bu durumlar için ayrıca deprem hesabı yapılacaktır.

Ele alınan bina sırasıyla "EXÜ", "EXÜ+%5", "EXÜ-%5", "EYÜ", "EYÜ+%5" ve "EYÜ-%5" yüklemeleri altında incelenmiş ve X ve Y yönleri için en olumsuz sonuçlar burulma düzensizliği (A1) kontrolleri için Çizelge 10 ve 11'de verilmiştir.

Örnek binada X doğrultusunda A1-Burulma Düzensizliğinin en elverişsiz değerleri EXÜ+%5 yükleme durumu için elde edilmiştir. Binada X doğrultusuna dik doğrultuda asimetrik perde elemanları bulunduğundan  $\eta_{bi}$  kat sayısı  $1,2 < \eta_{bi} < 2,0$  koşulu oluşmaktadır. Bu durumda TBDY-2018, madde 4.7.4'e göre X doğrultusunda uygulanan  $\pm\%5$  ek dış merkezlik, her katta hesaplanan D<sub>bi</sub> katsayısıyla çarpılarak büyütülmeli ve analiz tekrarlanarak tasarıma esas iç kuvvetler ve yer değiştirmeler hesaplanmalıdır.

**Çizelge 10.** "EXÜ+%5" yüklemesi için A1 kontrolü

Kat no	(d <sub>i</sub> ) <sub>max</sub>	(d <sub>i</sub> ) <sub>min</sub>	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>max</sub>	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>min</sub>	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub>	η <sub>bi</sub>
10	1,3902	0,26	0,0833	0,0297	0,0565	1,474
9	1,3069	0,2303	0,1045	0,0304	0,06745	1,5492
8	1,2024	0,1999	0,1249	0,0303	0,0776	1,609
7	1,0775	0,1696	0,1435	0,0297	0,0866	1,657
6	0,934	0,1399	0,159	0,0286	0,0938	1,695
5	0,775	0,1113	0,1699	0,0268	0,09835	1,727
4	0,6051	0,0845	0,1745	0,0243	0,0994	1,755
3	0,4306	0,0602	0,1704	0,0211	0,09575	1,779
2	0,2602	0,0391	0,1521	0,0177	0,0849	1,791
1	0,1081	0,0214	0,1081	0,0214	0,06475	1,669

**Çizelge 11.** “EYÜ+5” yüklemesi için A1 kontrolü

Kat no	(d <sub>i</sub> ) <sub>max</sub>	(d <sub>i</sub> ) <sub>min</sub>	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>max</sub>	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>min</sub>	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub>	η <sub>bi</sub>
10	1,038	0,7702	0,0899	0,0731	0,0815	1,103
9	0,9481	0,6971	0,1001	0,0793	0,0897	1,115
8	0,848	0,6178	0,1077	0,0831	0,0954	1,128
7	0,7403	0,5347	0,1139	0,0858	0,09985	1,140
6	0,6264	0,4489	0,1179	0,087	0,10245	1,150
5	0,5085	0,3619	0,1186	0,0857	0,10215	1,161
4	0,3899	0,2762	0,1153	0,0817	0,0985	1,170
3	0,2746	0,1945	0,107	0,0746	0,0908	1,178
2	0,1676	0,1199	0,0925	0,064	0,07825	1,182
1	0,0751	0,0559	0,0751	0,0559	0,0655	1,146

Binada EYÜ±5 yükleme durumu için ise Y doğrultusuna dik yöndeki perdeler simetrik olarak yerleştirildiğinden burulma düzensizliği katsayı η<sub>bi</sub> <1,2 koşulunu sağlamaktadır. Aynı zamanda EYÜ yükleme durumu için binanın rijitlik merkezi ve kütle merkezi aynı noktada olduğundan burulma düzensizliği katsayısı η<sub>bi</sub> = 1 olarak incelenmiştir.

Örnek binada brüt kat alanı (A): 24×24=576 m<sup>2</sup>  
 Örnek binada kat içindeki boşluk alanı (Ab): 8×8=64 m<sup>2</sup>  
 64<576/3=192 m<sup>2</sup> koşulunu sağlamaktadır.

Aynı zamanda deprem yüklerinin düşey doğrultuda sistem elemanlarına güvenle aktarılabilmesini güçleştiren yerel döşeme boşlukları bulunmadığından ve döşemenin düzlem içi rijitliği ile dayanımında ani azalmalar olmadığından binada A2 düzensizliği bulunmamaktadır.

Örnek binada kat planında balkon gibi çıkıntı yapan kısım bulunmadığından dolayı A3 düzensizliği bulunmamaktadır.

Örnek bina modelinde etkili kesme alanları katlar arası değişmediğinden B1 düzensizliği bulunmamaktadır.

Daha sonra B2-Komşu katlar arası rijitlik düzensizliği kontrolleri için binada sırasıyla “EXÜ”, “EXÜ+5”, “EXÜ-5”, “EYÜ”, “EYÜ+5” ve “EYÜ-5” yüklemeleri için çalışmalar yapılmış ve X ve Y yönleri için en olumsuz sonuçlar Çizelge 12 ve 13’de verilmiştir.

**Çizelge 12.** “EXÜ-5” yüklemesi için B2 kontrolü

Kat no	h <sub>i</sub>	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub>	(Δ <sub>i</sub> /h <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub>	η <sub>ki</sub> = (Δ <sub>i</sub> /h <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub> / ((Δ <sub>i+1</sub> /h <sub>i+1</sub> ) <sub>ort</sub> )	η <sub>ki</sub> = (Δ <sub>i</sub> /h <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub> / ((Δ <sub>i-1</sub> /h <sub>i-1</sub> ) <sub>ort</sub> )
10	300	0,05265	0,00018	-----	0,85
9	300	0,06195	0,00021	1,18	0,88
8	300	0,0703	0,00023	1,13	0,90
7	300	0,0777	0,00026	1,11	0,93
6	300	0,0835	0,00028	1,07	0,96
5	300	0,0869	0,00029	1,04	0,99
4	300	0,08735	0,00029	1,01	1,04
3	300	0,0838	0,00028	0,96	1,13
2	300	0,07405	0,00025	0,88	1,28
1	300	0,0577	0,00019	0,78	-----

**Çizelge 13.** “EYÜ-5” yüklemesi için B2 kontrolü

Kat no	h <sub>i</sub>	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub>	(Δ <sub>i</sub> /h <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub>	η <sub>ki</sub> = (Δ <sub>i</sub> /h <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub> / ((Δ <sub>i+1</sub> /h <sub>i+1</sub> ) <sub>ort</sub> )	η <sub>ki</sub> = (Δ <sub>i</sub> /h <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub> / ((Δ <sub>i-1</sub> /h <sub>i-1</sub> ) <sub>ort</sub> )
10	300	0,0815	0,00027	-----	0,91
9	300	0,0897	0,0003	1,10	0,94
8	300	0,0954	0,00032	1,06	0,96
7	300	0,09985	0,00033	1,05	0,97
6	300	0,10245	0,00034	1,03	1,00
5	300	0,10215	0,00034	1,00	1,04
4	300	0,0985	0,00033	0,96	1,08
3	300	0,0908	0,0003	0,92	1,16
2	300	0,07825	0,00026	0,86	1,19
1	300	0,0655	0,00022	0,84	-----

Çizelgeler incelendiğinde, hesaplanan η<sub>ki</sub> 2,0 sınırı değerini aşmadığından bina modelinde komşu katlar arası rijitlik düzensizliği (Yumuşak kat-B2) bulunmamaktadır.

Örnek bina taşıyıcı sistem modelinde yapı elamanlarının bazı katlarda kaldırılma ya da hareket etme gibi bir durumu olmadığından taşıyıcı elamanlarda herhangi bir süreksizlik yoktur. Örnek bina modelinde B3 düzensizliği bulunmamaktadır.

Görelî kat ötelemelerini incelediğimiz (Çizelge 14 ve 15) bu kısımda ise ele alınan modelimizin TBDY-2018 madde 4.9.1 ile tanımlanan duruma uyduğu görülmektedir.  $\kappa$  katsayısı betonarme binalarda “1” alınacaktır.  $\lambda$  katsayısı ise DD-3 deprem yer hareketinin elastik tasarım spektral ivmesinin, DD-2 deprem yer hareketinin elastik tasarım spektral ivmesine oranı olarak tanımlanmıştır.

DD-2 yer hareketi için:

$$S_{ae}(T^{(x)}) = 0,207 \text{ g} \quad ; \quad S_{ae}(T^{(y)}) = 0,278 \text{ g}$$

DD-3 yer hareketi için:

$$T_A = 0,2 \frac{0,076}{0,243} = 0,062 \text{ sn} \quad ; \quad T_B = \frac{0,076}{0,243} = 0,313 \text{ sn}$$

$$S_{ae}(T^{(x)}) = \frac{0,076}{0,94} = 0,08 \text{ g} \quad ; \quad S_{ae}(T^{(y)}) = \frac{0,076}{0,7} = 0,11 \text{ g}$$

$$\lambda^{(x)} = \frac{0,08}{0,207} = 0,386 \quad ; \quad \lambda^{(y)} = \frac{0,08}{0,207} = 0,396$$

**Çizelge 14.** “EXÜ+%5” yüklemesi için görelî kat ötelemesi kontrolü

Kat no	(d <sub>i</sub> ) <sub>max</sub>	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>max</sub>	(δ <sub>i</sub> ) <sub>max</sub>	h <sub>i</sub>	λ	$\lambda * \frac{(\delta_i)_{max}}{h_i}$
10	1,3902	0,0833	0,5831	300	0,386	0,00075026
9	1,3069	0,1045	0,7315	300	0,386	0,0009412
8	1,2024	0,1249	0,8743	300	0,386	0,00112493
7	1,0775	0,1435	1,0045	300	0,386	0,00129246
6	0,934	0,159	1,113	300	0,386	0,00143206
5	0,775	0,1699	1,1893	300	0,386	0,00153023
4	0,6051	0,1745	1,2215	300	0,386	0,00157166
3	0,4306	0,1704	1,1928	300	0,386	0,00153474
2	0,2602	0,1521	1,0647	300	0,386	0,00136991
1	0,1081	0,1081	0,7567	300	0,386	0,00097362

**Çizelge 15.** “EYÜ+%5” yüklemesi için görelî kat ötelemesi kontrolü

Kat no	(d <sub>i</sub> ) <sub>max</sub>	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>max</sub>	(δ <sub>i</sub> ) <sub>max</sub>	h <sub>i</sub>	λ	$\lambda * \frac{(\delta_i)_{max}}{h_i}$
10	1,038	0,0899	0,6293	300	0,396	0,00083068
9	0,9481	0,1001	0,7007	300	0,396	0,00092492
8	0,848	0,1077	0,7539	300	0,396	0,00099515
7	0,7403	0,1139	0,7973	300	0,396	0,00105244
6	0,6264	0,1179	0,8253	300	0,396	0,0010894
5	0,5085	0,1186	0,8302	300	0,396	0,00109586
4	0,3899	0,1153	0,8071	300	0,396	0,00106537
3	0,2746	0,107	0,749	300	0,396	0,00098868
2	0,1676	0,0925	0,6475	300	0,396	0,0008547
1	0,0751	0,0751	0,5257	300	0,396	0,00069392

Çizelgeler incelendiğinde, görelî kat ötelemesi kontrolünde 0,008 sınır değerinin aşılmadığı görülmüştür.

TBDY-2018, madde 4.9.1’e göre göz önüne alınan deprem doğrultusunda ve her bir i. katında ikinci mertebe gösterge değeri  $\theta_{II,i}$  hesaplanmıştır (Çizelge 16 ve 17).

**Çizelge 16.** “EXÜ” yüklemesi için ikinci mertebe gösterge değeri

Kat no	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub>	m <sub>i</sub> (ton)	w <sub>i</sub> (kN)	V <sub>i</sub> (kN)	h <sub>i</sub>	θ <sub>II,i</sub>
10	0,0545	905,9	8.886,6828	670	300	0,00241
9	0,06475	996,6	9.777,0384	447	300	0,00361
8	0,07385	996,6	9.777,0384	398	300	0,00462
7	0,08215	996,6	9.777,0384	348	300	0,00562
6	0,0886	996,6	9.777,0384	298	300	0,00656
5	0,09255	996,6	9.777,0384	249	300	0,00740
4	0,09335	996,6	9.777,0384	199	300	0,00806
3	0,0898	996,6	9.777,0384	149	300	0,00839
2	0,07935	996,6	9.777,0384	99	300	0,00806
1	0,06125	996,6	9.777,0384	50	300	0,00681

**Çizelge 17.** “EYÜ” yüklemesi için ikinci mertbe gösterge değeri

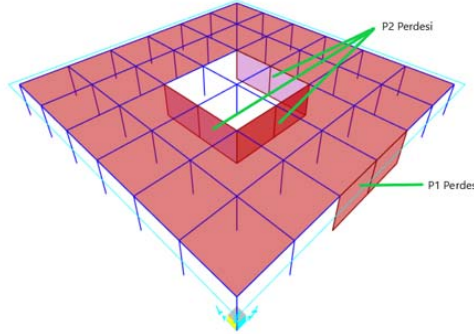
Kat no	( $\Delta_i$ ) <sub>ort</sub>	m <sub>k</sub> (ton)	w <sub>k</sub> (kN)	V <sub>i</sub> (kN)	h <sub>i</sub>	$\theta_{n,i}$
10	0,0815	905,9	8.886,6828	871	300	0,00277
9	0,0897	996,6	9.777,0384	582	300	0,00384
8	0,0954	996,6	9.777,0384	517	300	0,00459
7	0,0999	996,6	9.777,0384	452	300	0,00526
6	0,1024	996,6	9.777,0384	388	300	0,00583
5	0,1022	996,6	9.777,0384	323	300	0,00628
4	0,0985	996,6	9.777,0384	258	300	0,00654
3	0,0908	996,6	9.777,0384	194	300	0,00653
2	0,0782	996,6	9.777,0384	129	300	0,00611
1	0,0655	996,6	9.777,0384	65	300	0,00560

$\theta_{II,max} = 0,12 \frac{D}{C_{hR}}$  İkinci mertbe etkileri kontrolünde 0,085 sınır değeri aşılmamıştır.

SAP2000 Kat planı perdelerin perspektif görünüşü Şekil 6’da verilen modelimizde bina tabanında meydana gelen devrilme momenti Çizelge 18’de, perde taban devrilme momentleri ise Çizelge 19’da verilmektedir.

**Çizelge 18.** Toplam devrilme momenti

Kat no	H <sub>i</sub> (m)	F <sub>ie</sub> <sup>(X)</sup> (kN)	F <sub>ie</sub> <sup>(Y)</sup> (kN)	H <sub>i</sub> *F <sub>ie</sub> <sup>(X)</sup> (kNm)	H <sub>i</sub> *F <sub>ie</sub> <sup>(Y)</sup> (kNm)
10	30	670	871	20093	26120
9	27	447	582	12078	15701
8	24	398	517	9543	12406
7	21	348	452	7306	9498
6	18	298	388	5368	6978
5	15	249	323	3728	4846
4	12	199	258	2386	3101
3	9	149	194	1342	1745
2	6	99	129	596	775
1	3	50	65	149	194
				62589	81366



**Şekil 6.** Kat planı perdelerin perspektif görünüşü

**Çizelge 19.** Perde taban devrilme momentleri (kNm)

P1 perdesi için X-doğrultusundaki M <sub>DEV</sub> =	3897
P2 perdesi için X-doğrultusundaki M <sub>DEV</sub> =	22399
P2 perdesi için Y-doğrultusundaki M <sub>DEV</sub> =	33678

TBDY-2018, madde 4.3.2.4 (a)’ya göre taşıyıcı sistemde tek bir perdenin aldığı taban devrilme momenti M<sub>DEV</sub>, o doğrultuda binanın tümü için deprem yüklerinden meydana gelen toplam taban devrilme momenti M<sub>0</sub>’ in 1/3’ ünden fazla olmamalıdır (Çizelge 20).

**Çizelge 20.** M<sub>DEV</sub> / M<sub>0</sub> oranı

P1 perdesi için X-doğrultusundaki M <sub>DEV</sub> / M <sub>0</sub> =	6%
P2 perdesi için X-doğrultusundaki M <sub>DEV</sub> / M <sub>0</sub> =	36%
P2 perdesi için Y-doğrultusundaki M <sub>DEV</sub> / M <sub>0</sub> =	41%

Çizelge incelendiğinde P1 perdesi X doğrultusu için TBDY-2018 Madde 4.3.2.4.(a) koşulunu sağladığı ancak P1 perdesi Y doğrultusu ve P2 perdesi için bu koşulun sağlanmadığı görülmektedir.

Bu durumda taşıyıcı sistem davranış katsayısı R yerine 4/5 R alınarak tüm hesaplar tekrarlanmalıdır.

TBDY-2018 madde 4.3.4.5'e göre, perdelerin tabanında deprem yüklerinden meydana gelen devrilme momentlerinin toplamı, binanın tümü için deprem yüklerinden tabanda meydana gelen toplam devrilme momentinin %40'ından az %75'inden fazla olmamalıdır (Çizelge 21).

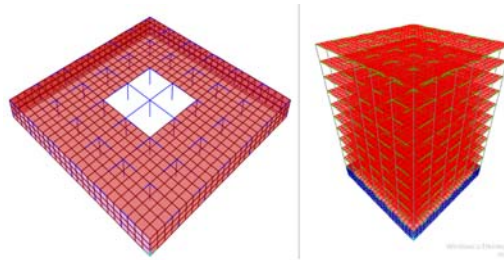
**Çizelge 21.** Toplam  $M_{DEV} / M_0$  oranı

X-doğrultusundaki toplam $M_{DEV} / M_0 =$	42%
Y-doğrultusundaki toplam $M_{DEV} / M_0 =$	41%

Model X ve Y doğrultusunda TBDY-2018 madde 4.3.4.5 koşulunu sağlamaktadır.

**Uygulama 2. Etrafı Rijit Perdelerle Çevrili Bodrum Sistem**

Model 2'de (Şekil 7.) model 1'deki bina modelinin kat perdelerini çıkartıp kat perdelerinin yapı düzensizlikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.



**Şekil 7.** SAP2000 Bina döşeme modeli ve bina perspektifi görünüşü

Yapıdan kat perdeleri çıkartıldığı için ikinci modelde daha yüksek hakim titreşim periyodu değerleri bulunmuştur. Bunun yanı sıra binada asimetrik perde bulunmadığından dolayı x ve yönlerinde aynı hâkim titreşim periyodu değerleri bulunmuştur ( $T^{(x)}=1,07$  sn,  $T^{(y)}=1,07$  sn).

Örnek binada sırasıyla “EXÜ”, “EXÜ+%5”, “EXÜ-%5”, “EYÜ”, “EYÜ+%5” ve “EYÜ-%5” yüklemeleri için işlemler yapılmış binanın X ve Y yönleri için binanın simetrik olması sebebiyle aynı değerlerin bulunduğu gözlenmiş ve en elverişsiz haldeki burulma düzensizliği durumu Çizelge 22.'de verilmiştir.

Örnek binada X ve Y doğrultusunda A1-Burulma Düzensizliği bulunmamaktadır.

Burulma düzensizliğinin en elverişsiz değerleri, X ve Y deprem doğrultularında EXÜ ve EYÜ  $\pm\%5$  yüklemeleri için hesaplanmıştır. Önceki modelimize göre perdelerin olmaması burulma düzensizliği açısından dezavantaj oluşturulurken, binanın simetrik bir modele sahip olduğundan daha elverişli  $\eta_{bi}$  değerleri elde edilmiştir.

**Çizelge 22.** “EXÜ+%5” yüklemesi için A1 kontrolü

Kat n	$(d)_{max}$	$(d)_{min}$	$(\Delta i)_{max}$	$(\Delta i)_{min}$	$(\Delta i)_{ort}$	$\eta_{bi}$
10	1,2249	0,9991	0,056	0,046	0,051	1,098
9	1,1689	0,9531	0,0779	0,0637	0,0708	1,100
8	1,091	0,8894	0,1006	0,0822	0,0914	1,100
7	0,9904	0,8072	0,1217	0,0992	0,11045	1,101
6	0,8687	0,708	0,1397	0,1137	0,1267	1,102
5	0,729	0,5943	0,1539	0,1253	0,1396	1,102
4	0,5751	0,469	0,1628	0,1324	0,1476	1,102
3	0,4123	0,3366	0,1633	0,1327	0,148	1,103
2	0,249	0,2039	0,1471	0,1195	0,1333	1,103
1	0,1019	0,0844	0,1019	0,0844	0,09315	1,093

Aynı şekilde B2 düzensizliği kontrolünde gerçekleştirilmiştir (Çizelge 23).

Çizelge incelendiğinde hesaplanan  $\eta_{ki}$  2,0 sınır değerini aşmadığından bina modelinde B2 bulunmamaktadır.



**Çizelge 23.**“EXÜ” yüklemesi için B2 kontrolü

Kat no	h <sub>i</sub>	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub>	(Δ <sub>i</sub> /h <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub>	η <sub>ki</sub> = (Δ <sub>i</sub> /h <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub> / ((Δ <sub>i+1</sub> /h <sub>i+1</sub> ) <sub>ort</sub> )	η <sub>ki</sub> = (Δ <sub>i</sub> /h <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub> / ((Δ <sub>i-1</sub> /h <sub>i-1</sub> ) <sub>ort</sub> )
10	300	0,051	0,00017	-----	0,720
9	300	0,0708	0,00024	1,388	0,774
8	300	0,0914	0,0003	1,290	0,827
7	300	0,1104	0,00037	1,207	0,870
6	300	0,1268	0,00042	1,148	0,908
5	300	0,1395	0,00047	1,100	0,944
4	300	0,1477	0,00049	1,058	0,997
3	300	0,148	0,00049	1,002	1,111
2	300	0,1332	0,00044	0,9	1,429
1	300	0,0932	0,00031	0,699	-----

Görelî kat ötelemelerini incelediğimizde (Çizelge 24.) ise DD-3 yer hareketine göre gerekli işlemler yapıldıktan sonra  $\lambda^{(xy)} = 0,390$  olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 24.** “EXÜ+5%” yüklemesi için görelî kat ötelemesi kontrolü

Kat no	(d <sub>i</sub> ) <sub>max</sub>	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>max</sub>	(δ <sub>i</sub> ) <sub>max</sub>	h <sub>i</sub>	λ	λ*(δ <sub>i</sub> ) <sub>max</sub> /h <sub>i</sub>
10	1,2249	0,056	0,448	300	0,390	0,00058
9	1,1689	0,0779	0,6232	300	0,390	0,00081
8	1,091	0,1006	0,8048	300	0,390	0,00105
7	0,9904	0,1217	0,9736	300	0,390	0,00127
6	0,8687	0,1397	1,1176	300	0,390	0,00145
5	0,729	0,1539	1,2312	300	0,390	0,0016
4	0,5751	0,1628	1,3024	300	0,390	0,00169
3	0,4123	0,1633	1,3064	300	0,390	0,0017
2	0,249	0,1471	1,1768	300	0,390	0,00153
1	0,1019	0,1019	0,8152	300	0,390	0,00106

Çizelge incelendiğinde, görelî kat ötelemesi kontrolünde 0,008 sınır değerinin aşılmadığı görülmüştür.

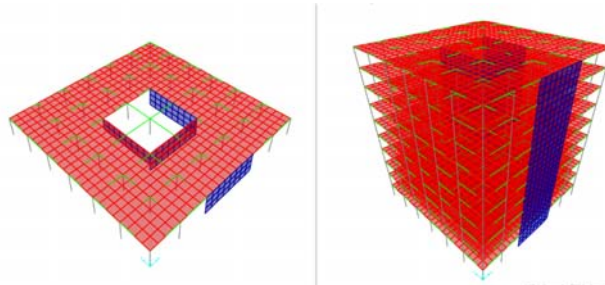
İkinci mertbe etkilerine ait değerler Çizelge 25.’de sunulmuştur. İkinci mertbe etkileri kontrolünde 0,085 sınır değeri aşılmadığı görülmüştür.

**Çizelge 25.** “EXÜ” yüklemesi için ikinci mertbe gösterge değeri

Kat no	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub>	m <sub>i</sub> (ton)	w <sub>i</sub> (kN)	V <sub>i</sub> (kN)	h <sub>i</sub> (cm)	θ <sub>pi</sub>
10	0,051	900,9	8.837,9271	506	300	0,00297
9	0,0708	967,2	9.488,1339	332	300	0,00516
8	0,0914	967,2	9.488,1339	295	300	0,00747
7	0,1104	967,2	9.488,1339	258	300	0,00986
6	0,1268	967,2	9.488,1339	221	300	0,01226
5	0,1395	967,2	9.488,1339	185	300	0,01455
4	0,1477	967,2	9.488,1339	148	300	0,01664
3	0,148	967,2	9.488,1339	111	300	0,01805
2	0,1332	967,2	9.488,1339	74	300	0,01766
1	0,0932	967,2	9.488,1339	37	300	0,01351

### Uygulama 3. Perdeli Sistem

Bu uygulamada bir adet binanın merkezinde olmak üzere ve bir adette binamızın dış kenarında perde bulunmakta olup modelde (Şekil 8) bodrum katı bulunmamaktadır. Üçüncü modelde birinci bina modelinden bodrum katı modelden çıkartılarak bodrumun hâkim titreşim periyodu ve deprem düzensizlikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 8. SAP2000 Bina döşeme modeli ve bina perspektifi görünüşü

Bu uygulamada yapıdaki etrafı rijit perdelerle çevrili bodrum katın çıkartılması sonucunda bina toplam ağırlığının azalmasından dolayı periyodların değerlerinde bir miktar düşüş yaşanmıştır. Ama aynı zamanda bina rijitliği azaldığından dolayı X ve Y doğrultularındaki hâkim titreşim periyodu değerleri arasındaki farkın büyüdüğü görülmüştür ( $T^{(x)}=0,90$  sn,  $T^{(y)}=0,64$  sn).

Ele alınan bina sırasıyla “EXÜ”, “EXÜ+%5”, “EXÜ-%5”, “EYÜ”, “EYÜ+%5” ve “EYÜ-%5” yüklemeleri altında incelenmiş ve X ve Y yönleri için en olumsuz sonuçlar burulma düzensizliği kontrolleri için Çizelge 26 ve 27’de verilmiştir.

Çizelge 26. “EXÜ+%5” yüklemesi için A1 kontrolü

Kat no	( $d_i$ ) <sub>max</sub>	( $d_i$ ) <sub>min</sub>	( $\Delta_i$ ) <sub>max</sub>	( $\Delta_i$ ) <sub>min</sub>	( $\Delta_i$ ) <sub>ort</sub>	$\eta_{bi}$
10	1,331	0,2124	0,0838	0,0263	0,05505	1,522
9	1,2472	0,1861	0,1055	0,0271	0,0663	1,591
8	1,1417	0,159	0,1262	0,0267	0,07645	1,650
7	1,0155	0,1323	0,1447	0,0261	0,0854	1,694
6	0,8708	0,1062	0,1598	0,0247	0,09225	1,732
5	0,711	0,0815	0,1694	0,0227	0,09605	1,763
4	0,5416	0,0588	0,1716	0,02	0,0958	1,791
3	0,37	0,0388	0,1632	0,0166	0,0899	1,815
2	0,2068	0,0222	0,1374	0,0131	0,07525	1,825
1	0,0694	0,0091	0,0694	0,0091	0,03925	1,768

Çizelge 27. “EYÜ+%5” yüklemesi için A1 kontrolü

Kat no	( $d_i$ ) <sub>max</sub>	( $d_i$ ) <sub>min</sub>	( $\Delta_i$ ) <sub>max</sub>	( $\Delta_i$ ) <sub>min</sub>	( $\Delta_i$ ) <sub>ort</sub>	$\eta_{bi}$
10	0,9938	0,7171	0,0915	0,0733	0,0824	1,110
9	0,9023	0,6438	0,1021	0,0797	0,0909	1,123
8	0,8002	0,5641	0,1099	0,0832	0,09655	1,138
7	0,6903	0,4809	0,116	0,0856	0,1008	1,150
6	0,5743	0,3953	0,119	0,0858	0,1024	1,162
5	0,4553	0,3095	0,1182	0,0831	0,10065	1,174
4	0,3371	0,2264	0,1124	0,0771	0,09475	1,186
3	0,2247	0,1493	0,1005	0,0671	0,0838	1,199
2	0,1242	0,0822	0,0809	0,053	0,06695	1,208
1	0,0433	0,0292	0,0433	0,0292	0,03625	1,194

Örnek binada X ve Y doğrultusunda A1-Burulma Düzensizliği bulunmaktadır. Modelden etrafı rijit perdelerle çevrili bodrum katın çıkartılması sonucu bina rijitliği azaldığından burulma düzensizliği değeri oldukça artmıştır. Burulma düzenliği katsayısının en elverişsiz değerleri “EXÜ+%5” yüklemesi için hesaplanmıştır. Bu durumda TBDY-2018, madde 4.7.4’e göre x doğrultusunda uygulanan  $\pm 0,05$  ek dışmerkezlilik, her katta hesaplanan  $D_{bi}$  katsayısıyla çarpılarak büyütülmeli ve analiz tekrarlanarak tasarıma esas iç kuvvetler ve yer değiştirmeler hesaplanmalıdır.

Ele alınan bina sırasıyla “EXÜ”, “EXÜ+%5”, “EXÜ-%5”, “EYÜ”, “EYÜ+%5” ve “EYÜ-%5” yüklemeleri altında incelenmiş ve X ve Y yönleri için en olumsuz sonuçlar B2 düzensizliği kontrolleri Çizelge 28 ve 29’da verilmiştir.

Çizelgeler incelendiğinde, hesaplanan  $\eta_{ki}$  2,0 sınır değerini aşmadığından bina modelinde B2 bulunmamaktadır.

Çizelgeler incelendiğinde, görel kat ötelemesi kontrolünde 0,008 sınır değerinin aşılmadığı görülmüştür (Çizelge 30 ve 31).

Çizelge 28. “EXÜ+%5” yüklemesi için B2 kontrolü

Kat no	$h_i$	( $\Delta_i$ ) <sub>ort</sub>	( $\Delta_i/h_i$ ) <sub>ort</sub>	$\eta_{ki} = (\Delta_i/h_i)_{ort} / (\Delta_{i+1}/h_{i+1})_{ort}$	$\eta_{ki} = (\Delta_i/h_i)_{ort} / (\Delta_{i-1}/h_{i-1})_{ort}$
10	300	0,05505	0,00018	-----	0,830
9	300	0,0663	0,00022	1,204	0,867
8	300	0,07645	0,00025	1,153	0,895
7	300	0,0854	0,00028	1,117	0,925
6	300	0,09225	0,00031	1,080	0,960
5	300	0,09605	0,00032	1,041	1,002
4	300	0,0958	0,00032	0,997	1,065
3	300	0,0899	0,0003	0,938	1,194
2	300	0,07525	0,00025	0,837	1,917
1	300	0,03925	0,00013	0,521	-----

Çizelge 29. “EYÜ+%5” yüklemesi için B2 kontrolü

Kat no	$h_i$	$(\Delta_i)_{ort}$	$(\Delta_i/h_i)_{ort}$	$\eta_{ki} = (\Delta_i/h_i)_{ort}/(\Delta_{i+1}/h_{i+1})_{ort}$	$\eta_{ki} = (\Delta_i/h_i)_{ort}/(\Delta_{i-1}/h_{i-1})_{ort}$
10	300	0,0824	0,00027	-----	0,906
9	300	0,0909	0,0003	1,103	0,941
8	300	0,09655	0,00032	1,062	0,957
7	300	0,1008	0,00034	1,044	0,984
6	300	0,1024	0,00034	1,015	1,017
5	300	0,10065	0,00034	0,982	1,062
4	300	0,09475	0,00032	0,941	1,130
3	300	0,0838	0,00028	0,884	1,251
2	300	0,06695	0,00022	0,798	1,846
1	300	0,03625	0,00012	0,541	-----

Çizelge 30. “EXÜ+%5” yüklemesi için görel kat ötelemesi kontrolü

Kat no	$(d_i)_{max}$	$(\Delta_i)_{max}$	$(\delta_i)_{max}$	$h_i$	$\lambda$	$\lambda^*(\delta_i)_{max}/h_i$
10	1,331	0,0838	0,5866	300	0,387	0,00076
9	1,2472	0,1055	0,7385	300	0,387	0,00095
8	1,1417	0,1262	0,8834	300	0,387	0,00114
7	1,0155	0,1447	1,0129	300	0,387	0,00131
6	0,8708	0,1598	1,1186	300	0,387	0,00144
5	0,711	0,1694	1,1858	300	0,387	0,00153
4	0,5416	0,1716	1,2012	300	0,387	0,00155
3	0,37	0,1632	1,1424	300	0,387	0,00147
2	0,2068	0,1374	0,9618	300	0,387	0,00124
1	0,0694	0,0694	0,4858	300	0,387	0,00063

Çizelge 31. “EYÜ+%5” yüklemesi için görel kat ötelemesi kontrolü

Kat no	$(d_i)_{max}$	$(\Delta_i)_{max}$	$(\delta_i)_{max}$	$h_i$	$\lambda$	$\lambda^*(\delta_i)_{max}/h_i$
10	0,9938	0,0915	0,6405	300	0,396	0,00085
9	0,9023	0,1021	0,7147	300	0,396	0,00094
8	0,8002	0,1099	0,7693	300	0,396	0,00102
7	0,6903	0,116	0,812	300	0,396	0,00107
6	0,5743	0,119	0,833	300	0,396	0,0011
5	0,4553	0,1182	0,8274	300	0,396	0,00109
4	0,3371	0,1124	0,7868	300	0,396	0,00104
3	0,2247	0,1005	0,7035	300	0,396	0,00093
2	0,1242	0,0809	0,5663	300	0,396	0,00075
1	0,0433	0,0433	0,3031	300	0,396	0,0004

İkinci merteye etkilerine ait değerler Çizelge 32 ve 33’de sunulmuş ve 0,085 sınır değerini aşmadığı görülmüştür.

Çizelge 32. “EXÜ” yüklemesi için ikinci merteye gösterge değeri

Kat no	$(\Delta_i)_{ort}$	$m_k(\text{ton})$	$w_k(\text{kN})$	$V_i(\text{kN})$	$h_i$	$\theta_{i,i}$
10	0,05305	905,9	8.886,6828	692	300	0,00227
9	0,06325	996,6	9.777,0384	462	300	0,00341
8	0,07255	996,6	9.777,0384	411	300	0,00439
7	0,0807	996,6	9.777,0384	360	300	0,00534
6	0,0868	996,6	9.777,0384	308	300	0,00622
5	0,0901	996,6	9.777,0384	257	300	0,00697
4	0,0897	996,6	9.777,0384	205	300	0,00749
3	0,08395	996,6	9.777,0384	154	300	0,00759
2	0,0702	996,6	9.777,0384	103	300	0,00690
1	0,03675	996,6	9.777,0384	51	300	0,00395

Çizelge 33. “EYÜ” yüklemesi için ikinci merteye gösterge değeri

Kat no	$(\Delta_i)_{ort}$	$m_k(\text{ton})$	$w_k(\text{kN})$	$V_i(\text{kN})$	$h_i$	$\theta_{i,i}$
10	0,0825	905,9	8.886,6828	960	300	0,00255
9	0,0909	996,6	9.777,0384	641	300	0,00353
8	0,0965	996,6	9.777,0384	570	300	0,00421
7	0,1008	996,6	9.777,0384	499	300	0,00481
6	0,1024	996,6	9.777,0384	427	300	0,00529
5	0,1006	996,6	9.777,0384	356	300	0,00561
4	0,0948	996,6	9.777,0384	285	300	0,00571
3	0,0838	996,6	9.777,0384	214	300	0,00547
2	0,0669	996,6	9.777,0384	142	300	0,00474
1	0,0363	996,6	9.777,0384	71	300	0,00281

Örnek modelimizde bina tabanında meydana gelen devrilme momenti ve perde taban devrilme momentleri (Çizelge 34 ve 35) verilmektedir.

**Çizelge 34.** Toplam devrilme momenti

Kat No	H <sub>i</sub> (m)	F <sub>IE</sub> <sup>(X)</sup> (kN)	F <sub>IE</sub> <sup>(Y)</sup> (kN)	H <sub>i</sub> *F <sub>IE</sub> <sup>(X)</sup> (kNm)	H <sub>i</sub> *F <sub>IE</sub> <sup>(Y)</sup> (kNm)
10	30	692	960	20762	28799
9	27	462	641	12481	17312
8	24	411	570	9861	13678
7	21	360	499	7550	10472
6	18	308	427	5547	7694
5	15	257	356	3852	5343
4	12	205	285	2465	3420
3	9	154	214	1387	1924
2	6	103	142	616	855
1	3	51	71	154	214
				64675	89711

**Çizelge 35.** Perde taban devrilme momentleri (kNm)

P1 perdesi için X-doğrultusundaki M <sub>DEV</sub> =	3994
P2 perdesi için X-doğrultusundaki M <sub>DEV</sub> =	25763
P2 perdesi için Y-doğrultusundaki M <sub>DEV</sub> =	42853

Çizelge 36'da ise Perdelere etkilenen M<sub>DEV</sub>/M<sub>0</sub> sunulmakta ve bu modelde P1 perdesi X doğrultusu için TBDY-2018 Madde 4.3.2.4.(a) koşulunu sağladığı ancak P1 perdesi Y doğrultusu ve P2 perdesi için bu koşulun sağlanmadığı görülmektedir.

**Çizelge 36.** Perdelere etkilenen M<sub>DEV</sub>/M<sub>0</sub> oranı

P1 perdesi için X-doğrultusundaki M <sub>DEV</sub> / M <sub>0</sub> =	6%
P2 perdesi için X-doğrultusundaki M <sub>DEV</sub> / M <sub>0</sub> =	40%
P2 perdesi için Y-doğrultusundaki M <sub>DEV</sub> / M <sub>0</sub> =	48%

Perdeli Sistemli modelimizde Toplam M<sub>DEV</sub>/M<sub>0</sub> oranı Çizelge 37'de verilmektedir.

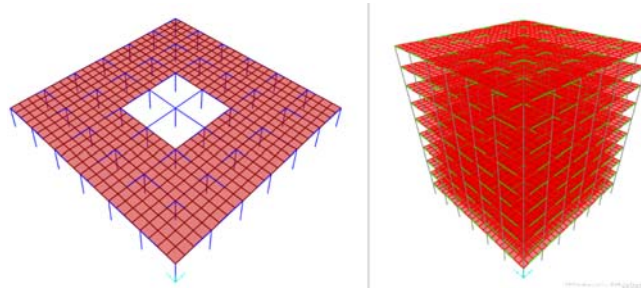
**Çizelge 37.** Toplam M<sub>DEV</sub>/M<sub>0</sub> oranı

X-doğrultusundaki toplam M <sub>DEV</sub> / M <sub>0</sub> =	46%
Y-doğrultusundaki toplam M <sub>DEV</sub> / M <sub>0</sub> =	48%

X ve Y doğrultusunda TBDY-2018 madde 4.3.4.5 koşulunun sağlandığı anlaşılmaktadır.

#### Uygulama 4. Salt Betonarme Çerçeve Sistem

Model 4'te, Uygulama 1'deki bina modelinin bodrum katı ve kat perdeleri (Şekil 9.)binadan çıkartılıp yapıdaki düzensizlikler incelenmiştir. Hâkim Doğal Titreşim Periyodunun değerleri SAP 2000 sonlu elemanlar programı yardımıyla T<sup>(x,y)</sup>=1,03 sn ve T<sub>PA</sub>=0,897 sn olarak bulunmuştur. Bu değerler T < 1,4xT<sub>PA</sub> şartını sağlamaktadır.



**Şekil 9.** SAP2000 Döşeme sonlu elemanlar modeli ve bina perspektif görünüşü

Örnek binada sırasıyla “EXÜ”, “EXÜ+%5”, “EXÜ-%5”, “EYÜ”, “EYÜ+%5” ve “EYÜ-%5” yüklemeleri için işlemler yapılmış binanın X ve Y yönleri için binanın simetrik olması sebebiyle aynı değerlerin bulunduğu gözlenmiş ve el verişsiz haldeki burulma düzensizliği durumu Çizelge 38'de verilmiştir.

**Çizelge 38.** “EXÜ+%5” yüklemesi için A1 kontrolü

Kat no	(d <sub>i</sub> ) <sub>max</sub>	(d <sub>i</sub> ) <sub>min</sub>	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>max</sub>	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>min</sub>	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub>	η <sub>bi</sub>
10	1,1941	0,9706	0,0567	0,0465	0,0516	1,098
9	1,1374	0,9241	0,079	0,0646	0,0718	1,100
8	1,0584	0,8595	0,1023	0,0834	0,09285	1,101
7	0,9561	0,7761	0,1236	0,1007	0,11215	1,102
6	0,8325	0,6754	0,142	0,1156	0,1288	1,102
5	0,6905	0,5598	0,1562	0,1269	0,14155	1,103
4	0,5343	0,4329	0,1643	0,1335	0,1489	1,103
3	0,37	0,2994	0,1623	0,1315	0,1469	1,104
2	0,2077	0,1679	0,1393	0,1127	0,126	1,105
1	0,0684	0,0552	0,0684	0,0552	0,0618	1,106

Örnek binada X ve Y doğrultusunda A1-Burulma Düzensizliği bulunmamaktadır.

B2 düzensizliği kontrolü Çizelge 39’da verilmiştir.

Çizelgeler incelendiğinde hesaplanan η<sub>ki</sub> 2,0 sınır değerini aştığından B2 düzensizliği bulunmaktadır. TBDY-2018’e göre Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi, her bir katta burulma düzensizliği katsayısının η<sub>bi</sub> ≤ 2 koşulunu sağladığı ve ayrıca B2 türü düzensizliğinin olmadığı binalarda kullanılabilir.

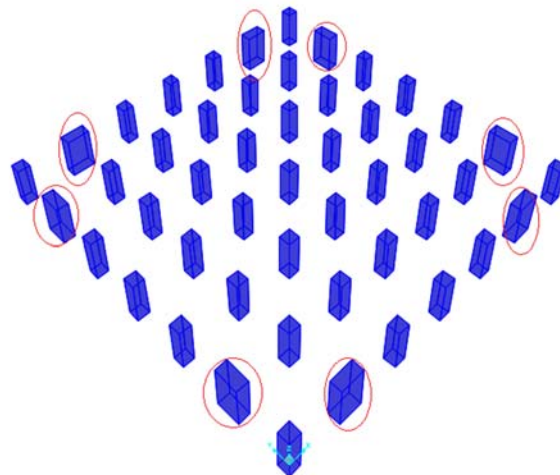
**Çizelge 39.** “EXÜ+%5” yüklemesi için B2 kontrolü

Kat no	h <sub>i</sub>	(Δ <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub>	(Δ <sub>i</sub> /h <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub>	η <sub>ki</sub> = (Δ <sub>i</sub> /h <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub> / (Δ <sub>i+1</sub> /h <sub>i+1</sub> ) <sub>ort</sub>	η <sub>ki</sub> = (Δ <sub>i</sub> /h <sub>i</sub> ) <sub>ort</sub> / (Δ <sub>i-1</sub> /h <sub>i-1</sub> ) <sub>ort</sub>
10	300	0,0516	0,00017	-----	0,718
9	300	0,0718	0,00024	1,391	0,773
8	300	0,09285	0,00031	1,293	0,827
7	300	0,11215	0,00037	1,207	0,870
6	300	0,1288	0,00043	1,148	0,909
5	300	0,14155	0,00047	1,098	0,950
4	300	0,1489	0,0005	1,051	1,013
3	300	0,1469	0,00049	0,986	1,165
2	300	0,126	0,00042	0,857	2,038
1	300	0,0618	0,00021	0,490	-----

Bu sebeple yumuşak kat düzensizliğini gidermek için modelde bazı kolon boyutları bulunduğu kenara paralel olacak biçimde büyütülecektir. Modelinde bazı kolon boyutları 80x80cm den 80x160cm’a çıkarılmıştır.

Ebatları değiştirilen kolonlar Şekil 10’da işaretlenmiştir. Kolonlardaki ebat değişikliği bina zemininden bina tepesine sürekliliği bozmadan yapılmıştır.

Gerekli işlemler yapıldıktan sonra elde edilen sonuçlar B2 düzensizliği kontrolü için Çizelge 40’da verilmiştir.



**Şekil 10.** Kat kolon planı

**Çizelge 40.** “EXÜ+%5” yüklemesi için B2 kontrolü

Kat no	$h_i$	$(\Delta)_ort$	$(\Delta/h_i)_{ort}$	$\eta_{ki} = (\Delta/h_i)_{ort}/(\Delta_{i-1}/h_{i-1})_{ort}$	$\eta_{ki} = (\Delta/h_i)_{ort}/(\Delta_{i-1}/h_{i-1})_{ort}$
10	300	0,0634	0,000211	-----	0,783
9	300	0,08095	0,00027	1,276	0,807
8	300	0,10025	0,000334	1,238	0,844
7	300	0,1187	0,000396	1,184	0,881
6	300	0,13465	0,000449	1,134	0,916
5	300	0,14695	0,00049	1,091	0,953
4	300	0,15415	0,000514	1,048	1,003
3	300	0,15355	0,000512	0,996	1,097
2	300	0,13985	0,000466	0,910	1,945
1	300	0,0719	0,00024	0,514	-----

Çizelgeler incelendiğinde, hesaplanan  $\eta_{ki}$  2,0 sınır değerini aşmadığından bina modelinde B2 düzensizliği bulunmamaktadır.

DD-3 yer hareketi düzeyine göre gerekli işlemler yapıldıktan sonra  $\lambda^{(x)} = 0,390$ ,  $\lambda^{(y)} = 0,390$  olarak hesaplanmış ve görel kat ötelemesi kontrolü Çizelge 41’de gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 41.** “EXÜ+%5” yüklemesi için görel kat ötelemesi kontrolü

Kat No	$(d_i)_{max}$	$(\Delta)_i$	$(\delta)_i$	$h_i$	$\lambda$	$\lambda^*(\delta)_i/h_i$
10	1,2805	0,0698	0,5584	300	0,390	0,0007259
9	1,2107	0,0889	0,7112	300	0,390	0,0009246
8	1,1218	0,11	0,88	300	0,390	0,001144
7	1,0118	0,1303	1,0424	300	0,390	0,0013551
6	0,8815	0,1477	1,1816	300	0,390	0,0015361
5	0,7338	0,1613	1,2904	300	0,390	0,0016775
4	0,5725	0,1693	1,3544	300	0,390	0,0017607
3	0,4032	0,1689	1,3512	300	0,390	0,0017566
2	0,2343	0,1543	1,2344	300	0,390	0,0016047
1	0,08	0,08	0,64	300	0,390	0,000832

Çizelge incelendiğinde görel kat ötelemesi kontrolünde 0,008 sınır değerinin aşılmadığı görülmüştür.

İkinci mertebe etkilerine ait değerler Çizelge 42’de sunulmuştur.

**Çizelge 42.** “EXÜ+%5” yüklemesi için ikinci mertebe gösterge değeri

Kat No	$(\Delta)_ort$	$m_i$ (ton)	$w_i$ (kN)	$V_i$ (kN)	$h_i$	$\theta_{pi}$
10	0,0634	920,5	9.030,2031	532	300	0,00359
9	0,0809	1.006,4	9.872,6859	354	300	0,00576
8	0,1002	1.006,4	9.872,6859	314	300	0,00801
7	0,1187	1.006,4	9.872,6859	275	300	0,01037
6	0,1347	1.006,4	9.872,6859	236	300	0,01273
5	0,147	1.006,4	9.872,6859	196	300	0,01500
4	0,1541	1.006,4	9.872,6859	157	300	0,01699
3	0,1536	1.006,4	9.872,6859	118	300	0,01833
2	0,1398	1.006,4	9.872,6859	79	300	0,01814
1	0,0719	1.006,4	9.872,6859	39	300	0,01020

İkinci mertebe etkileri kontrolünde 0,085 sınır değeri aşılmamıştır.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada çok katlı betonarme binaların 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği kapsamındaki hususlara göre tasarım ve analizleri yapılmıştır. Salt betonarme çerçeve sistemler, perdeli sistemler ve bodrum perdeli sistemlerin statik ve dinamik analizleri Eşdeğer deprem Yüğü Yöntemine göre incelenmiştir. Farklı modeller üzerine yapısal düzensizlikler incelenmiş ve ortaya çıkan bu düzensizliklerin giderilmesine yönelik çözüm yolları araştırılmıştır.

Yapılan incelemelerde; etrafı rijit perdelerle çevrili betonarme bodrum katlı binaların yapı düzensizlikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu anlaşılmıştır. Ele alınan betonarme modellerde kat perdelerinin yumuşak kat düzensizliği üzerinde önemli bir katkısı olduğu gözlemlenmiştir. Perdelerin eksik ya da yetersiz olduğu yapılarda yumuşak kat düzensizliği gözlenebilmektedir. Bu durumda TBDY-2018’ne göre eşdeğer deprem yükü yöntemi ile analiz yapılamamaktadır. Yumuşak kat düzensizliğinin giderilmesiyle ilgili olarak; salt betonarme karkas çerçeve sistemlerde bazı kolon boyutları iki yönde de büyütülerek yumuşak kat düzensizliği giderilebilecektir.



Sonuç olarak; çok katlı binalar üzerinde yapılan hesaplamalar ve analizler, TBDY-2018 ilkelerinin dikkatli şekilde uygulanması gerektiği ortaya konulmuştur.

## 5. KAYNAKLAR

1. Kürkçü, F., 2019. 20 katlı betonarme bir yapının Türkiye bina deprem yönetmeliği'ne göre tasarımı ve deprem performansının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 237.
2. Asıgçel, Z., 2019. Betonarme binalarda deprem etkisinin DBYBHY 2007 ve TBDY 2018 deprem yönetmeliklerine göre karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 86.
3. Hamsici, M., 2019. Çok katlı betonarme binalarda 2018 deprem yönetmeliği ile tanımlanan spektrum eğrilerinin etkisinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya, 206.
4. Kapıdaş, İ.F., 2019. Betonarme yüksek binaların TBDY 2018 kapsamında analizi. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya, 144.
5. Adar, K., 2019. 2007 deprem yönetmeliği'nin 2018 deprem yönetmeliği ile karşılaştırılması ve deprem yükü hesabındaki farklar. Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitlis, 79.
6. Kefeli, E., 2019. Planda düzensizliği bulunan betonarme binaların Türkiye bina deprem yönetmeliği 2018'e göre performanslarının değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 205.
7. Topçu, S., 2019. Betonarme yüksek bir binanın Türkiye bina deprem yönetmeliği'ne göre tasarımının irdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 141.
8. Deliktaş, M., 2020. Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik (DBYBHY 2007) ile Türkiye bina deprem yönetmeliği (TBDY 2018) revizyonlarının karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Beykent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 161.
9. Tekdemir, H., 2020. Betonarme binaların deprem performanslarının Türkiye bina deprem yönetmeliği 2018'e göre değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 83.
10. Fraidoon, A.B., 2020. Betonarme yüksek bir binanın TBDY 2018'e göre tasarımı ve deprem performansının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 190.
11. Akçora, A.A., 2020. Betonarme yüksek binaların 2018 yılı Türkiye bina deprem yönetmeliğine göre incelenmesi: 30 katlı bina örneği. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 161.
12. Özmen A., Sayın E., 2021. Deprem etkisinde çok katlı betonarme bir binanın TDY-2007 ve TBDY-2018 deprem yönetmeliklerine göre eşdeğer deprem yüklerinin karşılaştırılması. OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4(2),124-133.
13. Karaca, B., 2022. Bodrumlu betonarme binaların Türkiye bina deprem yönetmeliği 2018'e göre irdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 112.
14. Zeybek, K.F., 2022. Deprem etkisi altındaki yüksek binaların 2018 Türk deprem yönetmeliğine göre incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 114.
15. Uludağ, A.B., 2022. Türkiye bina deprem yönetmeliği'nde verilen yükseklik sınırına göre tasarım kurallarının örneklerle karşılaştırılması incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 145.
16. Seçkin, A., Doran B., 2023. Betonarme perdelerin kesme güvenliğinin TBDY-2018'e göre incelenmesi. Turkish Journal of Civil Engineering,107-127.
17. Özerdem, A., 2023. Farklı detaylara sahip betonarme çerçevelerin deprem davranışının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 76.
18. Yılmaz, M., 2024. Kat adedi farklı binaların TBDY-2018 ve Eurocode 8 deprem yönetmeliklerinin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanılarak irdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, KTO Karatay Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 115.
19. TBDY-2018. Türkiye bina deprem yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
20. AFAD, 2018. Türkiye deprem tehlike haritası. [www.afad.gov.tr](http://www.afad.gov.tr).
21. SAP2000 V20, 2019. Structural Analysis Program, Computers and Structures Inc. Berkeley, California.

## Beton Yüzey Çatlaklarının YOLOv8 Derin Öğrenme Algoritması ile Tespit Edilmesi

Muhammet Gökhan ALTUN<sup>1,a</sup>, Ahmet Hakan ALTUN<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çanakkale  
<sup>2</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bursa

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0002-9345-9907; <sup>b</sup>ORCID: 0009-0001-7142-0470

### Makale Bilgileri

Geliş : 23.07.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560104

### Sorumlu Yazar

Muhammet Gökhan ALTUN

muhammetgokhan.altun@comu.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Beton

Çatlak tespiti

Görüntü işleme

**Atf şekli:** ALTUN, M.G., ALTUN, A.H., (2024). Beton Yüzey Çatlaklarının YOLOv8 Derin Öğrenme Algoritması ile Tespit Edilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 667-678.

### ÖZ

Beton kullanım ömrü boyunca takip edilmeli, varsa hasarlar tespit edilmeli ve gerekli işlemler zamanında yapılmalıdır. Bundan dolayı doğru zamanda doğru tespit betonun dayanıklılığı açısından oldukça önemlidir. Çatlaklar, betonarme yapıların zarar gördüğünün en erken sinyalleridir. Türkiye gibi deprem riski yüksek bölgelerde yapıların dayanıklılığı ve güvenliği açısından çatlakların erken tespiti hayati öneme sahiptir. Çatlakları manuel olarak tespit etmek genellikle zaman, işgücü, maliyet, yüksek hata olasılığı ve uygulamadaki zorluklar açısından oldukça dezavantajlıdır. Manuel tespite alternatif olarak görüntü işleme teknikleri, makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı algoritmaların bu alanda kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada, Orta Doğu Teknik Üniversitesi kampüsündeki farklı binalardan elde edilen görüntülerden oluşan METU veri kümesi kullanılarak beton yüzeyindeki çatlakların görüntü işleme yöntemi ile tespit edilmesi amaçlanmıştır. Veri kümesinden 550 adet örnek görüntü seçilmiş olup bu görüntülerin 500 adedi pozitif, kalan 50 adedi ise negatif görüntüden oluşmaktadır. Veri seti çeşitli veri artırma teknikleri ile 1330 örneğe genişletilmiştir. Veri seti %88 eğitim, %8 doğrulama, %4 test kümesi olarak bölünmüştür. Sonuç olarak 1170 adet görüntü eğitim, 105 adet görüntü doğrulama ve 55 adet görüntü ise test için kullanılmıştır. Eğitim işlemi Google Colab ortamında gerçekleştirilmiştir. Model olarak YOLO serisinden YOLOv8 modeli kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre modelin çatlak tahminlerinde çok az yanlış pozitif sonuç verdiği ve farklı sınıfları ayırt etmede yüksek başarı gösterdiği tespit edilmiştir.

## Concrete Surface Crack Detection via YOLOv8 Deep Learning Algorithm

### Article Info

Received : 23.07.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560104

### Corresponding Author

Muhammet Gökhan ALTUN

muhammetgokhan.altun@comu.edu.tr

### Keywords

Concrete

Crack detection

Image processing

**How to cite:** ALTUN, M.G., ALTUN, A.H., (2024). Beton Yüzey Çatlaklarının YOLOv8 Derin Öğrenme Algoritması ile Tespit Edilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 667-678.

### ABSTRACT

Concrete should be monitored throughout its service life, any damages should be detected, and necessary repairs should be promptly carried out. Therefore timely and accurate detection is crucial for the durability of concrete. Cracks are the earliest indicators of damage in reinforced concrete structures. Especially in high seismic risk regions like Turkey, early detection of cracks is of vital importance for the resilience and safety of structures. Manual detection of cracks is generally disadvantaged in terms of time, labor, cost, high error probability, and application difficulties. As an alternative to manual inspection, image processing techniques and algorithms based on machine learning and deep learning are increasingly being utilized in this field. This study aims to detect cracks on concrete surfaces using image processing methods with the METU dataset consisting of images from various buildings on the Middle East Technical University campus. A total of 550 sample images were selected from the dataset, comprising 500 positive and 50 negative images. The dataset was expanded to 1330 examples using various data augmentation techniques. The dataset was divided into 88% training, 8% validation, and 4% test sets. Thus 1170 images were used for training, 105 for validation, and 55 for testing. The training process was conducted in the Google Colab environment using the YOLOv8 model from the YOLO series. According to the results obtained, the model produced very few false positive results in crack predictions and demonstrated high accuracy in distinguishing different classes.

## 1. GİRİŞ

Beton günümüzde en çok kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Yapıların dayanıklılığı, sağlamlığı ve ömrü betonun kalitesine ve iç yapısına bağlıdır. Yapı hizmet ömrü boyunca, değişen yüklemeler, korozyon, donma çözülme, klor difüzyonu, karbonatlaşma, biyolojik oluşumlar gibi çeşitli mekanik, fiziksel ve kimyasal etkilere maruz kalmaktadır. Bu etkiler betonun çatlamasına ve bozulmasına sebep olmaktadır. Bu bozulmalar, önlem alınmadığı takdirde, yapıların yapısal bütünlüğünü tehlikeye atmanın yanı sıra önemli insan ve mali kayıplara sebep olabilir [1-6]. Çatlaklar, betonarme yapıların zarar gördüğünün en erken sinyalleridir. Türkiye gibi deprem riski yüksek bölgelerde yapıların dayanıklılığı ve güvenliği açısından çatlakların erken tespiti hayati öneme sahiptir. Hizmet ömrü boyunca yapının performansı ve güvenliğini sağlamak için çatlakların tespit edilmesi, derinliğinin ve miktarının belirlenmesi doğru teşhisin konulması açısından oldukça önemlidir [7]. Çatlakları manuel olarak tespit etmek genellikle zaman, işgücü, maliyet, yüksek hata olasılığı ve uygulamadaki zorluklar açısından oldukça dezavantajlıdır. Son yıllarda manuel tespiti alternatif olarak görüntü işleme teknikleri, makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı algoritmaların bu alanda kullanımına yönelik araştırmaların yaygınlaştığı literatürden anlaşılmaktadır [8,9].

Rimkus ve arkadaşları (2015) tarafından yapılan çalışmada, beton yapıların sıkça karşılaştığı çatlak sorunlarını çözmek için dijital görüntü analiz sistemlerinin kullanımı önerilmiştir. Geleneksel yöntemlerin aksine dijital görüntü korelasyon teknolojisinin çatlakların yerini etkin bir şekilde belirlemede avantaj sağladığı ifade edilmiştir. Çalışmada görüntü işleme sürecinin iki aşamalı olduğu ve çatlakların dikey konumlarının tespitinde kullanıldığı belirtilmiştir. Çatlak piksellerinin tanımlanmasında hiyerarşik kümelendirme tekniği'nin kullanıldığı ve bu yöntemin etkinliğinin deneysel verilerle desteklendiği açıklanmıştır [7].

Ni ve arkadaşları (2020) tarafından yapılan çalışmada çatlak tespiti yapabilen akıllı telefon uygulaması geliştirilmiştir. Akıllı telefon zoom lensi ile beton çatlaklarının doğru tespit edilebileceği ifade edilmiştir. Kamera haricinde lazer tarama ve görüntü işlemenin birlikte kullanımı da giderek yaygınlaşmaktadır [10].

Miao ve Srimahachota (2021) tarafından yapılan çalışmada, beton yüzey çatlaklarını tespit etmek ve niceliklerini belirlemek için yarı otomatik bir sistem geliştirilmiştir. Çalışmada dört yaygın evrişimli sinir ağı (CNN) modeli test edilmiş ve GoogLeNet'in transfer öğrenme ile eğitilmiş versiyonunun iki farklı veri setinde dengeli performans sergilediği belirtilmiştir. Ayrıca "mahalle taraması" adı verilen yeni bir teknik önerilmiş ve önceki çift tarama yöntemi ile benzer performans gösterdiği tespit edilmiştir. Önerilen çatlak genişliği hesaplama yöntemi önceki yöntemlere kıyasla daha düşük ortalama göreceli hata sunmaktadır [9].

Rucka ve arkadaşları (2021) tarafından yapılan çalışmada, dijital görüntü işleme tekniği ve ultrasonik test birlikte uygulanarak poliolefin lif takviyeli beton kirişlerdeki hasarın gelişimi karakterize edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, önerilen yöntemin kırılma sürecinin gerçek zamanlı izlenmesi için, bir sistemde otonom hasar göstergeleri olarak kullanılabilirliği yazarlar tarafından bildirilmiştir [11].

Sevinç ve Özyurt (2022) tarafından yapılan çalışmada, Orta Doğu Teknik Üniversitesi kampüs binalarından toplanan veri seti kullanılarak derin öğrenme modelleri aracılığıyla beton yüzey çatlaklarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda görüntüler ResNet-50, VGG-16, Inception-V3, Xception derin CNN mimarileri ve MobileNet, ShuffleNet, EfficientNet hafif CNN mimarilerini kullanarak eğitilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında elde edilen doğruluk oranlarının başarılı ve birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir [12].

Vivekananthan ve arkadaşları (2023) tarafından yapılan çalışmada, beton köprüdeki çatlakların tespiti için geliştirilmiş OTSU yöntemi kullanılmıştır. Yöntem görüntü ön işleminde gri seviye ayrımı yaklaşımını kullanarak çatlakların tespit edilme doğruluğunu arttırmayı hedeflemektedir. Çatlakların kenar piksellerini belirlemek için Sobel filtresi kullanılmıştır. Sonuç olarak çalışmada kullanılan bu yöntemin beton köprü çatlaklarını %95'e varan bir doğruluk oranıyla tespit ettiği ifade edilmiştir [13].

Iraniparast ve arkadaşları (2023) tarafından yapılan çalışmada, beton yüzeylerdeki çatlakların tespiti ve segmentasyonu için transfer öğrenme ve çok çözünürlüklü görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Çatlak segmentasyonunda dalga dönüşümüne dayalı çok çözünürlüklü görüntü analizi uygulanmıştır. Derin evrişimli sinir ağları (DCNN) ve transfer öğrenme yöntemleri beton yüzey çatlakların tespiti için kullanılmıştır. DCNN sınıflandırıcı modellerin yüksek performans gösterdiği ve önerilen çok çözünürlüklü görüntü analizinin çatlak piksellerini %95,25 F1 skoru ile segmentleyebildiği belirlenmiştir [14].

Beton, doğru uygulama ve zamanında gerekli bakım ve onarım yapıldığında oldukça uzun ömürlü bir malzemedir. Beton kullanım ömrü boyunca takip edilmeli, varsa hasarlar tespit edilmeli ve gerekli işlemler zamanında yapılmalıdır. Bundan dolayı doğru zamanda doğru tespit betonun dayanıklılığı açısından oldukça önemlidir [15-17]. Yapının kullanım ömrü boyunca geleneksel ve manuel olarak takip edilmesi ve değerlendirilmesi süreci işgücü ve zaman açısından düşünüldüğünde yavaş ve maliyetlidir. Ayrıca kişinin bilgisine, becerisine ve tecrübesine bağlı olduğundan yeterince objektif değildir. Son yıllarda yapılan çalışmalar görüntü işleme ve makine öğrenmesi modellerinin yapısal sağlık izleme de tahribatsız metot olarak kullanılabilceğini göstermektedir [17,18]. Konu ile ilgili çalışmalar sınırlı sayıda olup farklı makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmalarının kullanıldığı çok daha fazla araştırmaya ihtiyaç bulunmaktadır. Bu çalışmada, çatlakları daha hızlı ve daha doğru tespit etmek amacıyla METU veri seti üzerinde Yolov8 derin öğrenme algoritması kullanılmış ve literatürde yapılan diğer çalışmalarla kıyaslanmıştır.

## 2. METODOLOJİ

### 2.1. Veri Seti

Bu çalışmada, Orta Doğu Teknik Üniversitesi kampüsündeki farklı binalardan elde edilen toplam 40.000 adet görüntü içeren METU veri kümesi kullanılmıştır. Veri kümesinin 20.000 adedi pozitif yani çatlak içeren görüntülerden, 20.000 adedi ise negatif yani çatlak içermeyen görüntülerden oluşmaktadır [19]. Bu çalışma için veri kümesinden 550 adet örnek görüntü seçilmiş olup bu görüntülerin 500 adedi pozitif, kalan 50 adedi ise negatif görüntüden (background) oluşmaktadır. Veri seti Roboflow sitesi üzerinden anotasyonlanmış ve çeşitli veri artırma teknikleri (dikey ve yatay döndürme, bulanıklık ekleme, gürültü ekleme, doyma, belirli açıda döndürme gibi) uygulanarak 1330 örneğe genişletilmiştir. Veri seti %88 eğitim, %8 doğrulama, %4 test kümesi olarak bölünmüştür. Sonuç olarak 1170 adet görüntü eğitim, 105 adet görüntü doğrulama ve 55 adet görüntü ise test için kullanılmıştır.

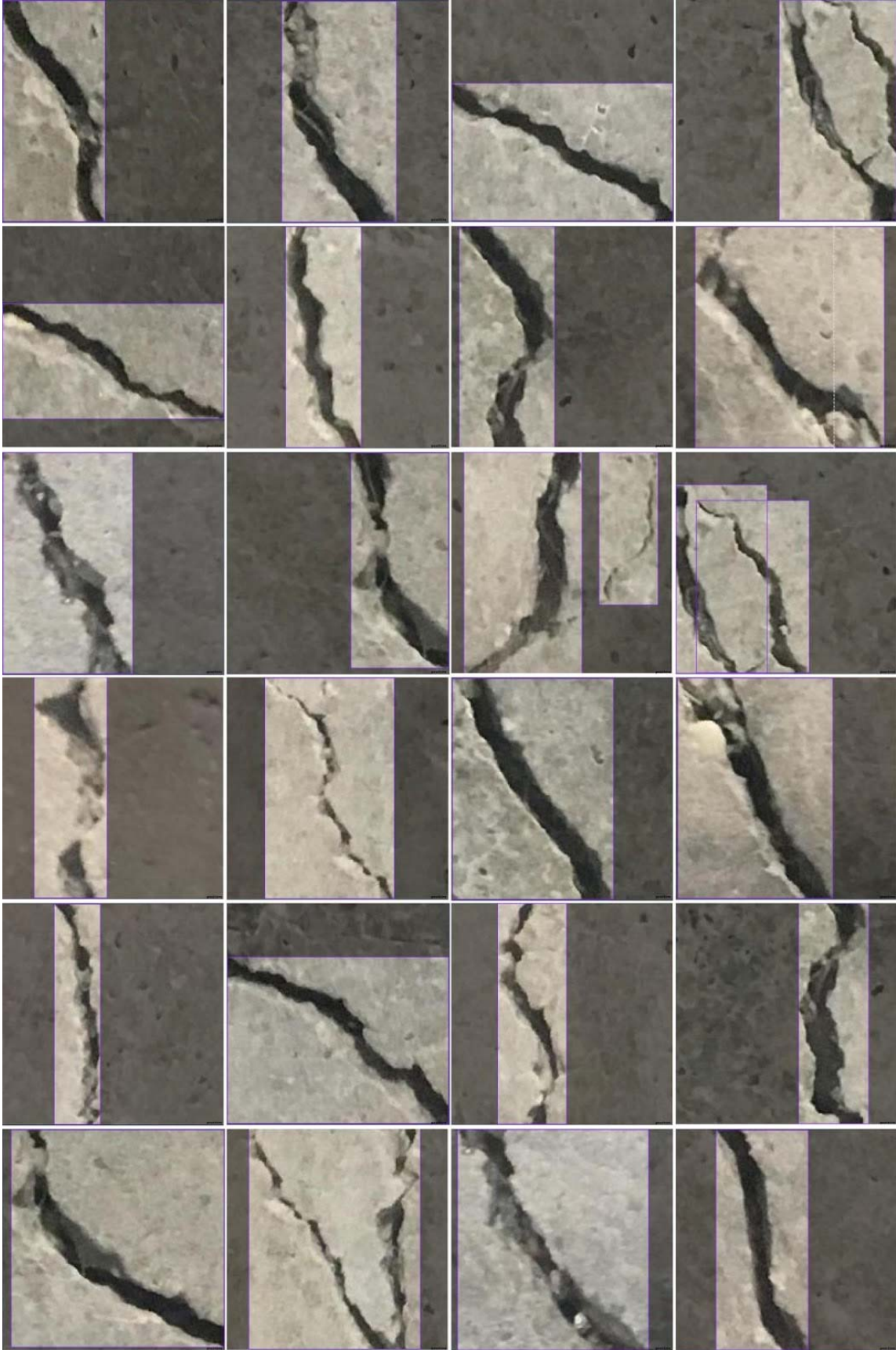
Çatlak içeren görüntüler pozitif, background olan görüntüler ise null olarak etiketlenmiştir. Null, Roboflow etiketlemesinde background olarak temsil edilmektedir [20]. Görüntü boyutları YOLO için 256x256 piksel olarak sabitlenmiş ve piksel değerleri 0 ile 1 arasında normalize edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan veri seti içerisinde yer alan bazı görüntüler Şekil 1'de gösterilmiştir.

### 2.2. Yöntem

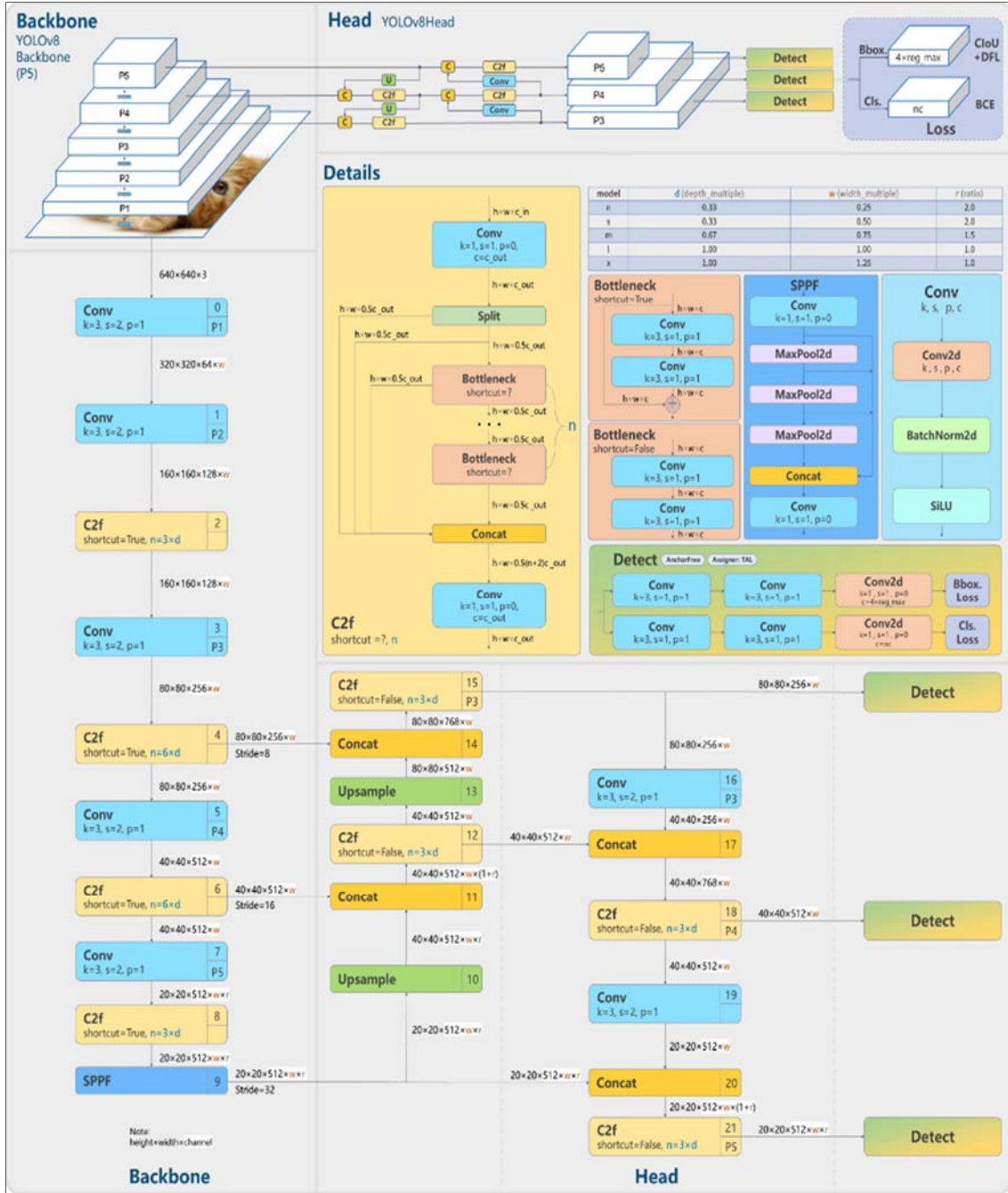
Eğitim işlemi Google Colab ortamında gerçekleştirilmiştir. Google Colab, tarayıcı üzerinden erişilebilen bulut tabanlı bir Jupyter not defteri hizmetidir. Intel CPU'larla donatılmış olup yaklaşık 12 GB RAM kapasitesine sahiptir. Ayrıca derin öğrenme gibi hesaplama yoğun işlemler için NVIDIA Tesla T4, A100, L4 ve TPU v2-8 gibi GPU ve TPU'lardan birini seçme imkanı sunmaktadır. Bu çalışmada NVIDIA Tesla T4 GPU kullanılmıştır [21].

Model olarak YOLO serisinden YOLOv8 modeli kullanılmıştır. YOLOv8'de yapılan mimari iyileştirmeler, daha derin ve etkili özellik temsilleri sağlamak üzere 3x3 filtrelerin tercih edilmesi gibi değişiklikleri içermektedir. Ayrıca, modelin ana yapı bloğu (C2f, C3) yeniden tasarlanmış ve aktivasyon fonksiyonu olarak SiLU kullanılmıştır. YOLOv8 veri artırımı teknikleriyle eğitim sırasında görüntülerin çeşitli varyasyonlarını işleyerek genellemeyi artırmayı hedeflemektedir. YOLOv8 COCO veri setinde yapılan testlerde yüksek doğruluk göstermiş ve Roboflow 100 benchmark da diğer popüler modellere göre üstün performans sergilemiştir [22]. Şekil 2'de YOLOv8'in mimarisi detaylı olarak gösterilmiştir [22,23]





Şekil 1. Veri setine ait örnek görüntüler



Şekil 2. YOLOv8'in mimarisi [22,23]

### 2.3. Değerlendirme Metrikleri

Veri seti, YOLOv8'in önceden eğitilmiş ağırlıkları üzerinde 100, 200 ve 300 dönemler boyunca eğitilmiştir. Eğitim sürecinde modelin kaybı (loss) ve doğruluğu (accuracy) gibi performans metrikleri düzenli olarak kaydedilmiş ve incelenmiştir. En iyi sonuçları elde etmek için eğitim parametreleri dikkatlice ayarlanmış ve test edilmiştir. Eğitim sürecinde kullanılan metrikler modelin doğruluğunu ve genel performansını belirlemek için kritik öneme sahiptir. Kaydedilen sonuçlar daha sonra doğruluk, duyarlılık, pozitif tahmin değeri, negatif tahmin değeri, F1 değeri, karmaşıklık matrisi gibi değerlendirme ölçütleri üzerinden incelenmiştir.



Bu ölçütler gerçek pozitif (TP), yanlış pozitif (FP), gerçek negatif (TN) ve yanlış negatif (FN) olmak üzere dört kategori üzerinden hesaplanmaktadır ve modelin performansı açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Doğruluk (accuracy) modelin doğru tahminlerinin genel veri seti içerisindeki oranını göstermektedir. Duyarlılık (recall) gerçek pozitiflerin doğru sınıflandırılma oranını ifade etmektedir. F1 değeri, doğruluk ve duyarlılık metriklerinin harmonik ortalaması olarak hesaplanmaktadır. Pozitif tahmin değeri modelin pozitif olarak tahmin ettiği örneklerin gerçekten pozitif olma oranını göstermektedir. Negatif tahmin değeri ise modelin negatif olarak tahmin ettiği örneklerin gerçekten negatif olma oranını ifade etmektedir [24]. Söz konusu metrikler Eşitlik (1-5) yardımıyla hesaplanmaktadır.

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

$$\text{Recall} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN}) \quad (2)$$

$$\text{F1 score} = 2\text{TP} / (2\text{TP} + \text{FP} + \text{FN}) \quad (3)$$

$$\text{Positive predictive value} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP}) \quad (4)$$

$$\text{Negative predictive value} = \text{TN} / (\text{TN} + \text{FN}) \quad (5)$$

### 3. ANALİZ SONUÇLARI

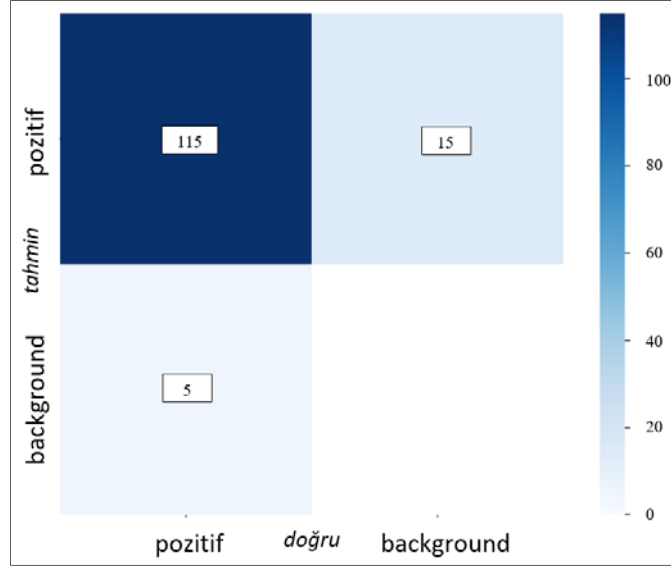
Bu çalışma, beton çatlaklarının tespiti için YOLOv8 modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eğitim süreci METU'dan elde edilen 1170 görüntü üzerinde NVIDIA Tesla T4 TPU kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelin performansını değerlendirmek için farklı eğitim dönemlerinde elde edilen değerlendirme metrikleri kullanılmıştır. Eğitim sürecinin farklı dönemlerinden elde edilen MAP (Mean Average Precision) değerleri, değerlendirme metrikleri ve zaman değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. MAP değerleri göz önüne alındığında en iyi sonucu 200. dönemin, doğruluk açısından en iyi sonucu 300. dönemin, duyarlılık açısından en iyi sonucu 100. dönemin, F1 skoru olarak 100. ve 200. dönemlerin en yüksek sonucu verdiği tespit edilmiştir. Tüm bu metrikler ve zaman açısından değerlendirildiğinde 200. dönemin genel olarak daha iyi sonuç verdiği belirlenmiş ve model 200 eğitim dönemi baz alınarak eğitilmiş ve sonuçlar bu bağlamda değerlendirilmiştir.

**Çizelge 1.** Farklı eğitim dönemlerinden elde edilen sonuçlar

Eğitim Dönemi	MAP@50	MAP@50-95	Doğruluk	Duyarlılık	F1 değeri	Zaman (saat)
100	0,965	0,841	0,958	0,934	0,95	0,350
200	0,971	0,855	0,959	0,933	0,95	0,645
300	0,970	0,859	0,964	0,894	0,93	0,970

Bunun nedeni, modelin 200. döneme kadar öğrenme sürecinde uygun bir denge yakalaması yani hem eğitim verileri üzerinde yeterli öğrenmeyi gerçekleştirmesi hem de aşırı uyuma (overfitting) eğilimini minimize etmesidir. Eğitim sürecini daha da arttırmak modelin eğitim verisine daha fazla uyum sağlamasına dolayısıyla ezberleme eğilimine yol açabilmektedir.. Bu modelin genel performansını ve gerçek dünya verileri üzerindeki genelleme yeteneğini olumsuz etkileyebilmektedir. Eğitim sürecinin artırılması her zaman daha iyi güvenlik veya performans sağlamaz, bu yüzden hiperparametre ayarlamaları ve erken durdurma (early stopping) gibi stratejiler kullanılarak optimal eğitim süresi belirlenmelidir [25-27]. Modelin performansının kötü gittiğinden emin olmak için 300. döneme kadar testler yapılmıştır.

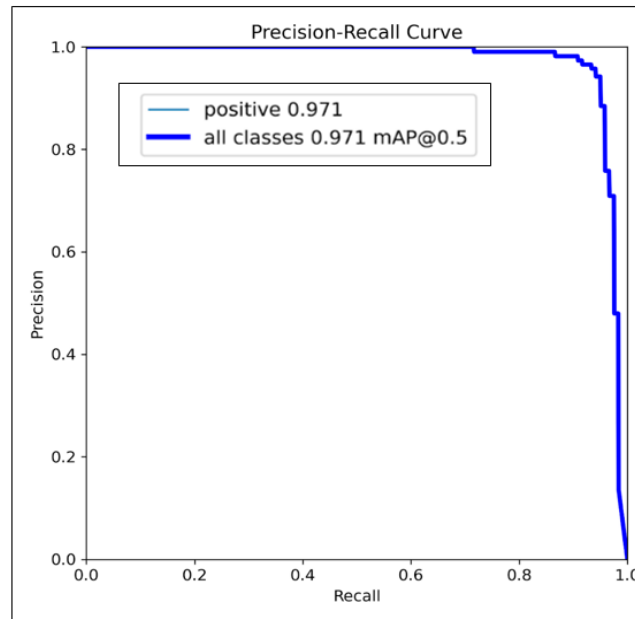
Şekil 3'de modelin karmaşıklık matrisi verilmiştir. Karmaşıklık matrisi modelin başarısını doğru şekilde ölçmek ve değerlendirmek için oldukça önemlidir. Bu matris yardımıyla farklı performans metriklerinin değerleri belirlenmekte ve böylece modelde iyileştirmeler yapmak ve gerçeğe en yakın tahminler üretebilmek mümkün olabilmektedir [24]. Buna göre modelin doğru bir şekilde çatlak olarak tespit ettiği örnek sayısı yani doğru pozitif değeri 115'tir. Çatlak olmayan alanları yanlışlıkla çatlak olarak sınıflandırdığı örnek sayısı yani yanlış pozitif sayısı 15'dir. Modelin tespit edemediği gerçek çatlak sayısı yani doğru negatif sayısı ise 5'tir. Modelin yüksek gerçek pozitif değeri çatlakları etkin bir şekilde tespit edebildiğini göstermektedir.



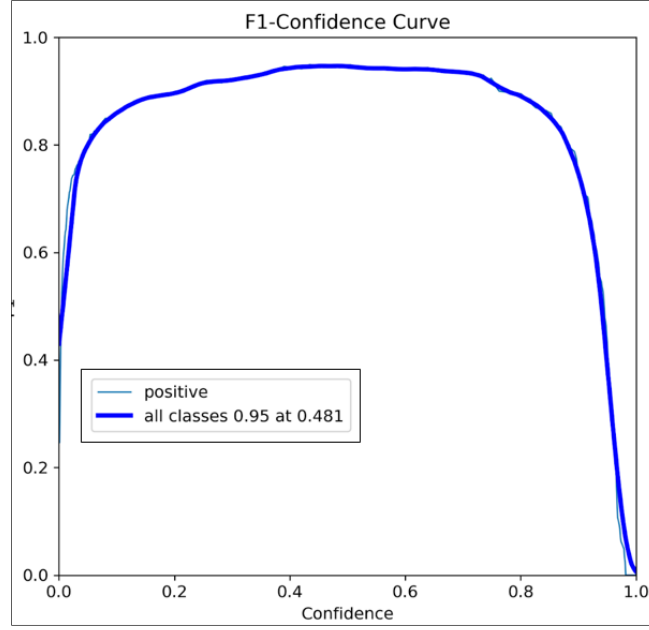
Şekil 3. Karmaşıklık matrisi

Modelin doğruluk-duyarlılık (P-R) eğrisi Şekil 4'te gösterilmiştir. Eğriye göre model pozitif olarak etiketlenen çatlakları %96,9 oranında kesinlikle doğru bir şekilde tespit etmektedir. Tüm sınıflar için ortalama kesinlik (MAP) değeri de %96,9 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar modelin çatlak tahminlerinde çok az yanlış pozitif sonuç verdiğini ve farklı sınıfları ayırt etmede yüksek başarı gösterdiğini ifade etmektedir. Modelin yüksek kesinlik puanı gerçek pozitifleri (çatlakları) tespit etmede güvenilir olduğunu göstermektedir.

Modelin F1 skoru Şekil 5'de gösterilmiştir. En yüksek F1 skoru yaklaşık 0,626 güven eşik değerinde 0,93'tür. Güven eşik değeri 0,8 civarında iken F1 skoru azalmaya başlamakta ve 1,0'e yaklaştıkça keskin bir azalma görülmüştür. Bunlara göre model belirtilen güven eşik değerinde en iyi dengeli doğruluk ve hatırlama oranına sahiptir ancak yüksek güven eşiklerinde yanlış negatifleri artırabileceğine işaret etmektedir. Çeşitli düzenleme teknikleri (Dropout, L2 düzenleme), veri çeşitlendirme ve artırma, erken durdurma (early stopping) ve çapraz doğrulama gibi yöntemler ile modelin aşırı uyuma eğilimi azaltılarak, genelleme yeteneği ve güvenilirliği artırılarak performansı iyileştirilebilmektedir [25-27].

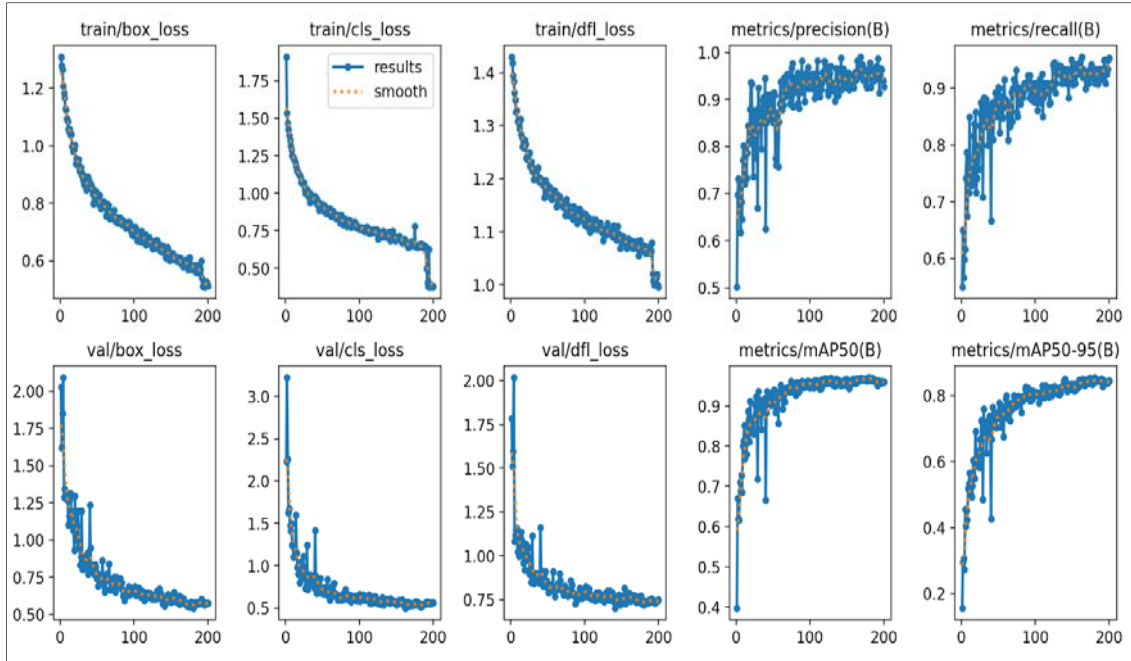


Şekil 4. Doğruluk-duyarlılık (P-R) eğrisi

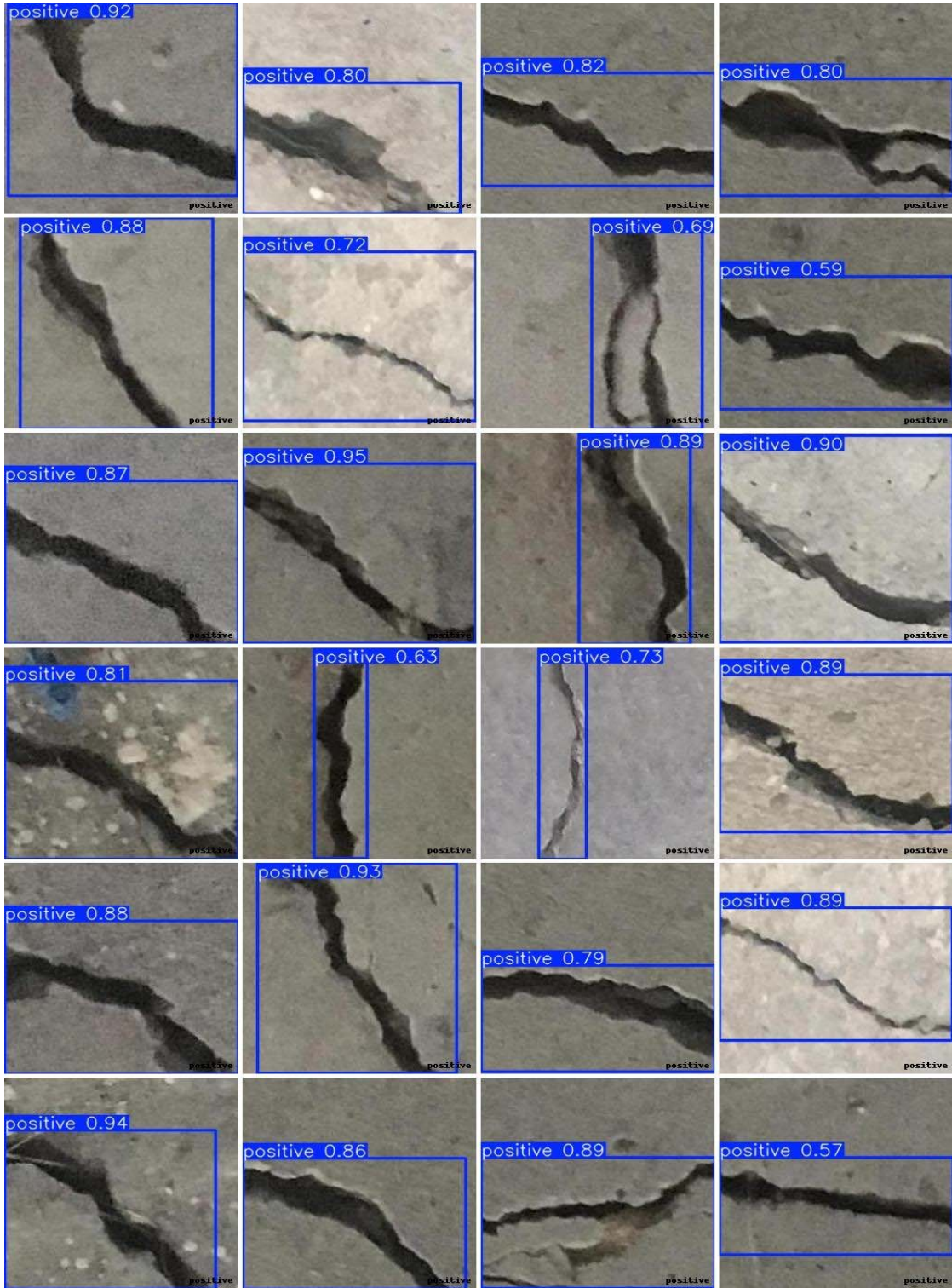


Şekil 5. F1 güvenilirlik eğrisi

Modelin eğitim sonuç grafikleri Şekil 6’da, modelin tahmin örnekleri Şekil 7’de verilmiştir. Bu grafiklere göre eğitim kayıplarında azalma görülmektedir. Bu modelin zamanla daha iyi öğrendiğini ve performansının arttığını göstermektedir. Eğitim süresi boyunca modelin performansı belirli aralıklarla test edilmekte ve genellikle öğrenme eğrileri kullanılarak analiz edilmektedir. Düşük dönem sayısı ile modelin veri setini tam öğrenememesi yani eksik öğrenme ve modelin performansının yetersiz olması anlamına gelmektedir. Yüksek dönem sayısı ise aşırı uyuma neden olabilmekte yani model eğitim verisine fazla uyum sağlayıp genelleme yeteneğini kaybedebilmektedir. Bu nedenle ideal eğitim süresi genellikle performans metriğinin en yüksek olduğu döneme göre belirlenmektedir [25-27]. Doğruluk grafiğindeki yükseliş çatlakların doğru tespit edilme oranının arttığını göstermektedir. MAP (ortalama kesinlik) grafiğindeki yükseliş çatlak tespitindeki ortalama kesinliğin arttığını işaret etmektedir. Doğrulama kayıplarındaki düşüş eğilimi modelin doğrulama seti üzerinde de iyi performans gösterdiğini ve geliştirme yeteneğinin olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. Modelin eğitim sonuç grafikleri



Şekil 7. Modelin tahmin örnekleri

Çatlak tespitine yönelik yapılan çalışmalarda çoğunlukla Inception V3, Alexnet, VGG16 ve ResNet derin öğrenme tabanlı algoritmalar kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde kullanılan modellerin doğru tahmin etme yeteneğinin %80 ile %99 arasında değiştiği tespit edilmiştir [14,28-46]. Bu çalışmada Yolov8 algoritması kullanılarak elde edilen doğruluk değeri %95,6, literatürdeki diğer çalışmalar ile kıyaslandığında modelin doğru tahmin etme yeteneğinin oldukça iyi olduğu belirlenmiştir.



Yapı malzemelerinin düzenli bakımı, dayanıklı, güvenli ve uzun ömürlü yapılar için vazgeçilmezdir. Deprem, aşırı yüklenme, zemin kaynaklı ya da çevresel faktörlerden kaynaklı yapıda veya yapının bir bölümünde oluşan hasarlar çeşitli yöntemler kullanılarak dayanım ve dayanıklılığının artırılması amacıyla onarılması gerekmektedir. Beton ve betonarme yapılarda bozulmaların başladığı ilk olarak çatlakların gözlemlenmesi ile anlaşılmaktadır. Dolayısıyla yapının hizmet ömrü boyunca performansının ve güvenliğinin sağlanması için çatlakların hızlı ve doğru tespit edilmesi, çatlak karakterizasyonunun doğru analiz edilmesi ve yapısal bakımın zamanında gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir. Sonuç olarak yapı sağlığı ve güvenliği açısından ilk aşama olan çatlak tespitinin, hızlı, doğru, objektif ve otomatik olarak tespit edilmesi hayati öneme sahiptir.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, Orta Doğu Teknik Üniversitesi kampüsündeki farklı binalardan elde edilen görüntülerden oluşan METU veri kümesi kullanılarak beton yüzeyindeki çatlakların görüntü işleme yöntemi ile tespit edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, model yüksek gerçek pozitif değeri çatlakları etkin bir şekilde tespit edebilmektedir. Modelin çatlak tahminlerinde çok az yanlış pozitif sonuç verdiği ve farklı sınıfları ayırt etmede yüksek başarı gösterdiği tespit edilmiştir. Modelin yüksek kesinlik puanı gerçek pozitifleri (çatlakları) tespit etmede güvenilir olduğunu göstermektedir. Model belirtilen güven eşik değerinde en iyi dengeli doğruluk ve hatırlama oranına sahiptir ancak yüksek güven eşiklerinde yanlış negatifleri artırabilme ihtimali söz konusudur. Modelin zamanla daha iyi öğrendiği ve performansının arttığı belirlenmiştir. Doğrulama kayıplarındaki düşüş eğilimi modelin doğrulama seti üzerinde de iyi performans gösterdiğini ve genelleştirme yeteneğinin olduğunu göstermektedir.

Farklı makine ve derin öğrenme algoritmaları ile daha geniş veri setleri kullanılarak çalışmaların yapılması ve çok daha hızlı ve doğru tahmin yeteneği olan uygulamaların geliştirilmesi yapısal sağlık izleme açısından oldukça önemli olacaktır.

Çatlak tespiti haricinde dijital görüntü işleme tekniklerinin dayanım tahmini, segregasyon, agrega yüzey özelliklerinin belirlenmesi, beton yüzeyinde oluşan hata deliklerinin tespit edilmesi, karbonatlaşma derinliğinin tespit edilmesi, korozyon gibi betonun farklı özelliklerinin belirlenmesinde kullanılarak zaman, hız, işgücü, enerji, objektiflik açısından avantaj sağlayacak modellerin ve uygulamaların geliştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Hamishebahar, Y., Guan, H., So, S., Jo, J., 2022. A comprehensive review of deep learning-based crack detection approaches. *Applied Sciences*, 12(3), 1374.
2. Valença, J., Puente, I., Júlio, E.N.B.S., González-Jorge, H., Arias-Sánchez, P., 2017. Assessment of cracks on concrete bridges using image processing supported by laser scanning survey. *Construction and Building Materials*, 146, 668-678.
3. Gaur, A., Kishore, K., Jain, R., Pandey, A., Singh, P., Wagri, N.K., Roy-Chowdhury, A.B., 2023. A novel approach for industrial concrete defect identification based on image processing and deep convolutional neural networks. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02392.
4. Rahai, M., Esfandiari, A., Bakhshi, A., 2020. Detection of structural damages by model updating based on singular value decomposition of transfer function subsets. *Structural Control and Health Monitoring*, 27(11), e2622.
5. Yu, Y., Rashidi, M., Samali, B., Mohammadi, M., Nguyen, T.N., Zhou, X., 2022. Crack detection of concrete structures using deep convolutional neural networks optimized by enhanced chicken swarm algorithm. *Structural Health Monitoring*, 21(5), 2244-2263.
6. Scott, M., Rezaizadeh, A., Delahaza, A., Santos, C.G., Moore, M., Graybeal, B., Washer, G., 2003. A comparison of nondestructive evaluation methods for bridge deck assessment. *NDT & International*, 36(4), 245-255.
7. Rimkus, A., Podvieszko, A., Gribniak, V., 2015. Processing digital images for crack localization in reinforced concrete members. *Procedia Engineering*, 122, 239-243.
8. Ali, R., Chuah, J.H., Talip, M.S.A., Mokhtar, N., Shoaib, M.A., 2022. Structural crack detection using deep convolutional neural networks. *Automation in Construction*, 133, 103989.

9. Miao, P., Srimahachota, T., 2021. Cost-effective system for detection and quantification of concrete surface cracks by combination of convolutional neural network and image processing techniques. *Construction and Building Materials*, 293, 123549.
10. Ni, T., Zhou, R., Gu, C., Yang, Y., 2020. Measurement of concrete crack feature with android smartphone app based on digital image processing techniques. *Measurement*, 150, 107093.
11. Rucka, M., Wojtczak, E., Knak, M., Kurpińska, M., 2021. Characterization of fracture process in polyolefin fibre-reinforced concrete using ultrasonic waves and digital image correlation. *Construction and Building Materials*, 280, 122522.
12. Sevinç, A., Özyurt, F., 2022. Beton yüzey çatlaklarının tespitinde derin öğrenme mimarilerin kullanılması. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 6(2), 318-325.
13. Vivekananthan, V., Vignesh, R., Vasanthaseelan, S., Joel, E., Kumar, K.S., 2023. Concrete bridge crack detection by image processing technique by using the improved OTSU method. *Materials Today: Proceedings*, 74, 1002-1007.
14. Iraniparast, M., Ranjbar, S., Rahai, M., Nejad, F.M., 2023. Surface concrete cracks detection and segmentation using transfer learning and multi-resolution image processing. In *Structures*, 54, 386-398.
15. Balageas, D., Fritzen, C.P., Güemes, A., 2010. *Structural health monitoring*. John Wiley & Sons.
16. Neville, A.M., 1997. *Properties of concrete*. London: Wiley
17. Sohn, H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shunk, D.D., Stinemates, D.W., Nadler, B.R., Czarnecki, J.J., 2003. A review of structural health monitoring literature: 1996-2001. Los Alamos National Laboratory, USA, 1, 16.
18. Kabir, S., 2008. Image processing in concrete applications: review and prospective. In *2nd International Structural Specialty Conference on Partnership for Innovation: Instrumentation and Monitoring of Structures*, CSCE Annual Conference, Quebec City.
19. Özgenel, Ç.F., 2019. Concrete crack images for classification. *Mendeley Data*, 2, 2019.
20. <https://docs.roboflow.com/annotate/use-roboflow-annotate>
21. <https://research.google.com/colaboratory>
22. <https://blog.roboflow.com/whats-new-in-yolov8/>
23. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A., 2016. You only look once: unified, real-time object detection. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 779-788.
24. Erickson, B.J., Kitamura, F., 2021. Magician's corner: 9. performance metrics for machine learning models. *Radiology: Artificial Intelligence*, 3(3), e200126.
25. Ying, X., 2019. An overview of overfitting and its solutions. In *Journal of Physics: Conference Series* 1168, 022022. IOP Publishing.
26. Dietterich, T., 1995. Overfitting and undercomputing in machine learning. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 27(3), 326-327
27. Li, H., Li, J., Guan, X., Liang, B., Lai, Y., Luo, X., 2019. Research on overfitting of deep learning. In *2019 15th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS)*, 78-81, IEEE.
28. Li, S., Zhao, X., 2023. High-resolution concrete damage image synthesis using conditional generative adversarial network. *Automation in Construction*, 147, 104739.
29. Bukhsh, Z.A., Jansen, N., Saeed, A., 2021. Damage detection using in-domain and cross-domain transfer learning. *Neural Computing and Applications*, 33(24), 16921-16936.
30. Dhakal, N., Zihan, Z.U., Elseifi, M.A., Mousa, M.R., Gaspard, K., Fillastre, C.N., 2021. Surface identification of top-down, bottom-up, and cement-treated reflective cracks using convolutional neural network and artificial neural networks. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 147(1), 04020080.
31. Kung, R.Y., Pan, N.H., Wang, C.C., Lee, P.C., 2021. Application of deep learning and unmanned aerial vehicle on building maintenance. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1-12.
32. Yang, H., Ni, J., Gao, J., Han, Z., Luan, T., 2021. A novel method for peanut variety identification and classification by improved VGG16. *Scientific Reports*, 11(1), 15756.
33. Dorafshan, S., Azari, H., 2020. Evaluation of bridge decks with overlays using impact echo, a deep learning approach. *Automation in Construction*, 113, 103133.
34. Gong, Y., Luo, J., Shao, H., He, K., Zeng, W., 2020. Automatic defect detection for small metal cylindrical shell using transfer learning and logistic regression. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 39, 1-13.
35. Liang, J., 2020. Image classification based on RESNET. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1634(1), 012110, IOP Publishing.



36. Wang, Z., Xu, G., Ding, Y., Wu, B., Lu, G., 2020. A vision-based active learning convolutional neural network model for concrete surface crack detection. *Advances in Structural Engineering*, 23(13), 2952-2964.
37. Zhu, J., Zhang, C., Qi, H., Lu, Z., 2020. Vision-based defects detection for bridges using transfer learning and convolutional neural networks. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(7), 1037-1049.
38. Zhu, J., Song, J., 2020. An intelligent classification model for surface defects on cement concrete bridges. *Applied Sciences*, 10(3), 972.
39. Dung, C.V., 2019. Autonomous concrete crack detection using deep fully convolutional neural network. *Automation in Construction*, 99, 52-58.
40. Feng, C., Zhang, H., Wang, S., Li, Y., Wang, H., Yan, F., 2019. Structural damage detection using deep convolutional neural network and transfer learning. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23, 4493-4502.
41. Hüthwohl, P., Lu, R., Brilakis, I., 2019. Multi-Classifer for reinforced concrete bridge defects. *Automation in Construction*, 105, 102824.
42. Hung, P.D., Su, N.T., Diep, V.T., 2019. Surface classification of damaged concrete using deep convolutional neural network. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 29(4), 676-687.
43. Słoński, M., 2019. A comparison of deep convolutional neural networks for image-based detection of concrete surface cracks. *Computer Assisted Methods in Engineering and Science*, 26(2), 105-112.
44. Soni, A.N., 2019. Crack detection in buildings using convolutional neural network. *Journal for Innovative Development in Pharmaceutical and Technical Science*, 2(6), 54-59.
45. Özgenel, Ç.F., Sorguç, A.G., 2018. Performance comparison of pretrained convolutional neural networks on crack detection in buildings. In *Isarc. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 35, 1-8, IAARC Publications.
46. Silva, W.R.L.D., Lucena, D.S.D., 2018. Concrete cracks detection based on deep learning image classification. In *Proceedings*, 2(8), 489, MDPI.

## Performance Modeling of the Fenton Process Used as a Single Unit for Treating Raw Textile Effluent

Selman TURKES<sup>1,a</sup>, Hakan GÜNEY<sup>1,b</sup>, Bülent SARI<sup>1,c</sup>, Olcayto KESKINKAN<sup>1,d</sup>

<sup>1</sup>*Cukurova University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, Adana, Türkiye*

<sup>a</sup>*ORCID*: 0000-0001-6420-1002; <sup>b</sup>*ORCID*: 0009-0003-6991-2569; <sup>c</sup>*ORCID*: 0000-0002-5171-9491;  
<sup>d</sup>*ORCID*: 0000-0001-8995-756X

### Article Info

Received : 10.05.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560112

### Corresponding Author

Selman TURKES

sidarselman@gmail.com

### Keywords

Raw wastewater treatment

Fenton process

ANN

NARX-ANN models

Textile industry

**How to cite:** TURKES, S., GÜNEY, H., SARI, B., KESKINKAN, O., (2024). Performance Modeling of the Fenton Process Used as a Single Unit for Treating Raw Textile Effluent. *Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering*, 39(3), 679-693.

### ABSTRACT

This study investigates the direct application of the Fenton Oxidation Process (FOP) to untreated textile wastewater, specifically from a woven fabric production facility. Under optimized conditions (pH 3, 0.7 g/L Fe<sup>2+</sup>, 2 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), the process achieved significant removal efficiencies: 81% Chemical Oxygen Demand (COD), 80% Suspended Solids (SS), and 93% color removal. Artificial Neural Networks (ANN) and NARX-ANN were utilized in Matlab R2020a to model FOP performance, employing Levenberg-Marquardt (trainlm) and Scaled Conjugate Gradient (trainscg) algorithms. With a 9-20-3 network topology, the ANN model demonstrated superior predictive capability, achieving an R<sup>2</sup> of 0.9843.

## Ham Tekstil Atık Sularının Arıtılması İçin Tek Bir Ünite Olarak Kullanılan Fenton Prosesinin Performans Modellemesi

### Makale Bilgileri

Geliş : 10.05.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560112

### Sorumlu Yazar

Selman TURKES

sidarselman@gmail.com

### Anahtar Kelimeler

Ham atıksu arıtma

Fenton prosesi

YSA

NARX-YSA modelleri

Tekstil endüstrisi

**Atf şekli:** TURKES, S., GÜNEY, H., SARI, B., KESKINKAN, O., (2024). Performance Modeling of the Fenton Process Used as a Single Unit for Treating Raw Textile Effluent. *Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering*, 39(3), 679-693.

### ÖZ

Bu çalışma, Fenton Oksidasyon Prosesinin (FOP) doğrudan arıtılmamış tekstil atık suyuna uygulanmasını, özellikle dokuma kumaş üretim tesisinden gelen atık suyu hedef olarak incelemektedir. Optimize edilmiş koşullar (pH 3, 0.7 g/L Fe<sup>2+</sup>, 2 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) altında, proses %81 Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), %80 Askıda Katı Madde (AKM) ve %93 renk giderimi gibi önemli verimlilikler sağlamıştır. FOP performansını modellemek amacıyla Matlab R2020a'da Yapay Sinir Ağları (YSA) ve NARX-YSA modelleri, Levenberg-Marquardt (trainlm) ve Ölçeklenmiş Eşlenik Gradyan (trainscg) algoritmaları kullanılarak oluşturulmuştur. 9-20-3 ağ topolojisine sahip YSA modeli, 0.9843 R<sup>2</sup> değeri ile yüksek bir tahmin yeteneği göstermiştir.

## 1. INTRODUCTION

Needs for clothing and shelter come right after basic needs such as air, water, and food, which are necessary for the survival of humanity. The increasing demand for textile products for these needs on a global scale has resulted in the textile industry being included in the top five major industrial sectors in the inter-industry classification [1,2]. In addition, as a result of the modeling, it is estimated that the consumption of textile products will increase 3 times worldwide by 2050 [3]. The textile industry, which traditionally consists of stages such as yarn, weaving, spinning, knitting, washing, bleaching, dye-printing, and finishing processes, consumes significant amounts of water and energy. According to studies conducted in recent years, stated that over 3 billion tons of [4] wastewater are discharged annually in the textile industry worldwide [5,6]. Textile wastewater is usually processed using procedures such as coagulation, filtration, biological treatment by aerobic means (activated sludge), and adsorption [7,8]. Due to these processes' low efficiency, excessive sludge formation, high initial investment, and operating costs, and an ongoing decline in developed and developing countries' discharge standards (particularly regarding colors), researchers have been working harder over the past 25 years on creating and implementing new and more suitable technology. [9]. One of the areas where these efforts concentrate is Advanced Oxidation Processes (AOP) [10]. (AOPs continue to develop as a highly efficient process, especially for toxic, colored, and biologically treatable wastewater such as textile wastewater. AOPs are efficient, cost-effective, and environmentally friendly treatment processes. It is widely known that AOPs are used in advanced or pretreatment. Researchers and plant operators will be more interested in these procedures when they are used as single-unit systems for wastewater treatment, and this will help to preserve natural water supplies [8,11]. Commonly used AOPs are Fenton, photo-Fenton, ozonation, photocatalysis, radiation, electrochemical oxidation, and sonolysis [12,13]. These procedures are based on the production of hydroxyl radicals (HO•), which have an extremely high 2.80 V oxidation potential. Most organic and pigment compounds can be partially or fully mineralized by radicals [14]. Among these processes, Fenton oxidation stands out with its effectiveness and promising results [14-16]. Henry J. Fenton discovered the Fenton oxidation process (FOP) in 1894. During the 1960s, studies and research on the process were conducted, with a focus on the oxidation of biological pollutants in water, as shown by Equation 1-4 [17-21].



The FOP begins when divalent iron ( $\text{Fe}^{2+}$ ) in an aqueous solution reacts with hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) to form  $\text{HO}\cdot$  (Reaction 1). Reaction 2 and Reaction 3 produce intermediate products ( $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$ ) and end products (oxidized organic materials in wastewater) respectively, as a result of the generated  $\text{HO}\cdot$ . A connected reaction cycle is created during oxidation, which further offers  $\text{Fe}^{2+}$  regeneration,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , and  $\text{Fe}^{3+}$  reactions (Reaction 4). [16,20,22]. When the Fenton process is compared with other AOPs; It has many advantages such as being simple to apply, not requiring special ambient conditions, high speed and amount of  $\text{HO}\cdot$  formation, high oxidation capacity, relatively low cost, the wide area of use and being environmentally friendly [16,21]. In addition, the ferrous sewage that develops in the final phase is the main drawback of the FOP. Separation and disposal of this sludge cause additional costs [23]. In addition, dissolved  $\text{Fe}^{2+}$  remaining in treated water can cause problems during water reuse, especially in the textile industry, and may require additional treatment processes [24].

Numerous factors including pH,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , and  $\text{Fe}^{2+}$  dose, interaction and reacting period, the flow rate, reactor quantity, temperature outside, and effluent quality all affect how well FOP performs when used in the advanced treatment of textile wastewater. The complexity of the reactor's response phases and a wide range of factors make it difficult to estimate efficiency and optimize the FOP using conventional approaches, wasting time and raising the cost of process design and scaling [25-28]. To make the design and operation of the FOP highly effective, applicable, current, and future-oriented, as well as more economical, optimization and modeling studies are becoming increasingly important [27,29]. The environmental engineering discipline has extensively studied and applied modeling techniques in water and wastewater treatment operations. Adaptive Neural Fuzzy Control System (ANFIS), the Surface Responsive Method (RSM), the method of Multiple Linear Regression (MLR), and Artificial Neural Networks (ANN), among

others, are the most often used [8]. ANN is one of the most significant models used nowadays, particularly in the scientific and engineering domains, to establish the connection among operating factors influencing numerous procedures and equipment outputs [25,26,28,30]. Based on the organic neuron system, artificial neural networks (ANN) are statistical methods of modeling that aim to provide novel information using brain-specific skills [28,29,31]. In terms of generating algorithms for existing information not requiring over previous layout and modification [8], simplification of modeling, calculation, as well as predicting [25], illuminating the relationships between factors and the outcomes [26], adaptability, forecasting efficiency, and user-friendliness, this approach is thought to be a promising tool [29]. One of the time-series studies is the Nonlinear External Input Autoregressive Artificial Neural Networks (NARX-ANN) model, in addition to the ANN approach. One form of dynamic filter is the time series evaluation, which uses past data to forecast future data. Numerous systems, including heat exchangers, wastewater treatment, manufacturing equipment, processes related to chemicals, automation, and aviation mechanisms, are subject to evaluation, modeling, tracking, and operation using this software [32,33].

The FOP is typically used for enhanced or prior treatment, in which case the treatment plants will produce both chemical and biological sludge. Only chemical sludge will occur when the FOP is utilized for only one process for treatment in basic textile waste stream treatment; overall, sludge formation will likely be lower than with combination treatment alternatives. The experimental results regarding the FOP process's ability to remove COD, SS, and color in unprocessed wastewater from textiles are provided in this study. FOP has simple and fast reactions, low cost and environmental friendliness. In addition, models that can predict the performance of processes have been developed and compared by artificial intelligence models (ANN and NARX-ANN), which are one of the areas of focus in studies on AOPs in recent years. Seldom is a study conducted in the literature that treats raw wastewater from textile manufacturing using the FOP as only one component and compares the process's performance to that of ANN and, in particular, NARX-ANN models. The study's findings provide crucial information for the global treatment of textile wastewater in the interest of sustainable development. As a result, investigators and managers in treatment facilities may be interested in this research.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Raw Textile Effluent

Table 1 lists the general features of the unprocessed wastewater from textile industries and the statistical assessment of each sample utilized in the FOP. A local textile plant that was established in Adana, Turkey, and produced woven fabrics provided the untreated textile effluent used in the study.

**Table 1.** Heterogeneous pollutant features and statistical analysis of untreated water used for fabric waste in the FOP

	pH	COD	SS	Color	Temp	EC
Sample number	20	20	20	20	20	20
Mean	9.80	1341.15	100.05	1395.00	45.00	1463.00
Median	9.80	1341.50	99.50	1396.00	45.00	1464.50
<b>Mode</b>	<b>9.80</b>	<b>1341.00</b>	<b>97.00<sup>a</sup></b>	<b>1396.00</b>	<b>45.00<sup>a</sup></b>	<b>1462.00<sup>a</sup></b>
Std. dev.	0.12140	10.09051	5.65197	6.00877	2.02614	12.66574
Variance	0.015	101.818	31.945	36.105	4.105	160.421
Minimum	9.50	1315.00	89.00	1382.00	41.00	1437.00
Maximum	10.00	1357.00	117.00	1408.00	48.00	1492.00
Sum	196.00	26823.00	2001.00	27900.00	900.00	29260.00

<sup>a</sup> There are several modes. The value that is the smallest is displayed.

### 2.2. Analytical Method

The MERCK brand of analytical purity chemicals is utilized in the experimental investigation, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> as oxidant and FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O as a catalyst in the FOP process; NaOH and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> for pH adjustments; For COD analysis, K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, 1.10-Phenontrolline monohydrate, HgSO<sub>4</sub> and Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> were used. Fast mixing, slow mixing and settling were carried out in the Jar-Test device (MTOPS SF4). pH measurements were made with

OHAUS, WTW conductivity meter was utilized to determine electrical conductivity (EC), DS/890 colorimeter was used with color measurements, HACH LANGE DR 6000 was applied in COD

measurements, and Whatman GF/C was employed as SS measurements. All analyses were conducted using techniques based on Standard Procedures [34]; three repetitions of the analyses were carried out, and the arithmetic mean of the data was used. The methods applied were COD (5220 C), AKM (2540 D), Color (2120 C), pH (4500-H+ B), Temperature (2550 B), and Electrical Conductivity EI (2510 B).

### 2.3. FOP Experiments

Under laboratory circumstances, FOP experimental studies were conducted in a jar testing setup depicted in Fig. 1. To prevent light from affecting the experimental setup, it was housed in a cardboard box that was covered in aluminum foil. Five minutes of fast mixing (250 rpm), sixty minutes of slow mixing (50 rpm), and sixty minutes of settling times were used in studies filling bottles containing 700 mL of untreated fabric waste with a volume of 1000 mL. pH was adjusted at intervals of 2.0–7.5; Fe<sup>2+</sup> was added at 0.15–1.05 g/L; and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> was added at 1–12 mM. To start oxidation, the catalyst (Fe<sup>2+</sup>) and oxidant (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) were added to the beaker quickly. 1N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NaOH solutions were then used to correct the ambient pH. After the oxidation step, the pH was raised to 8.5 to guarantee sufficient slow stirring & flocculation itself were carried out, and precipitation was used to finish the FOP process.

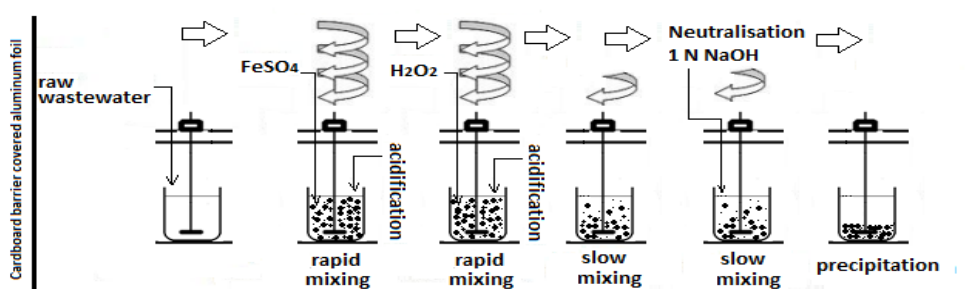


Figure 1. Schematic of the FOP experimental steps

Following the precipitation process, samples were taken from the beaker's top phase, and each assessment group was carried out on three separate occasions with COD, SS, and color analyses performed. The entire procedure was conducted at 25±2 °C ambient temperature and pressure in the air.

### 2.4. Methods for ANN and NARX-ANN

Table 2 displays the model technique scheme used in this investigation.

Figures 2 and 3 illustrate the architecture of the ANN and NARX-ANN, respectively, showcasing the interplay between input and output layers. Following the outlined methodology, the FOP inputs for both models encompass pH, Fe<sup>2+</sup> concentration (g/L), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dosage (mM), treatment duration (min), temperature (°C), fast and slow mixing rates (rev/min), sample volume (mL), and electrical conductivity (EC) measured in μS/cm. Meanwhile, the outputs comprise COD, AKM, and Color parameters. In the models, tested with neuron counts ranging from 2 to 20 in increments of 2, a total of 396 (9x44) inputs and 132 (3x44) output datasets were incorporated for ANN and NARX-ANN, respectively. These datasets were divided into three categories: training (70%), validation (15%), and testing (15%).

Table 2. The framework of the FOP model technique

Unprocessed Waste from Fabrics		
COD, SS, and Color in the Fenton Method		
Model	ANN	NARX-ANN
Directives	nntool	nnstart-ntstoll
Category of network	Feedforward backprop	Feedback Loop
Algorithm for training	Trainlm, Trainscg	Trainlm, Trainscg
Adaptive learning process	LEARNGDM	LEARNGDM
Network attribute	%70 Training, %15Validation, %15 Test	%70 Training, %15Validation, %15 Test
Performance function	MSE	MSE
Regression	R	R
The number of layers	2	2
Quantity of neurons	2-20 (2 each)	2-20 (2 each)
Transfer function	TANSIG, LOGSIG	TANSIG



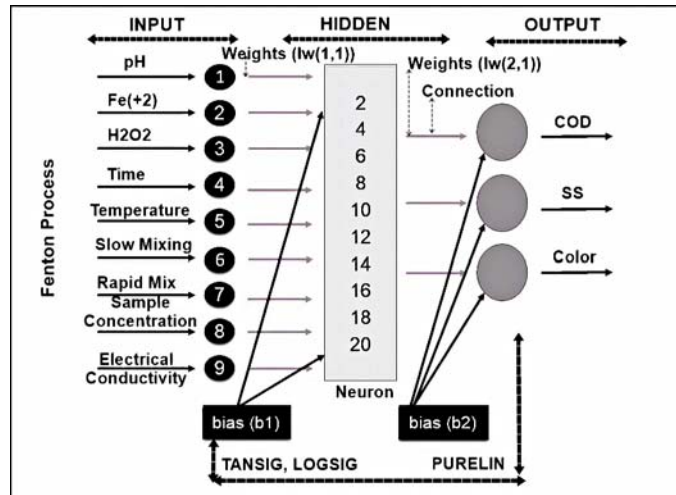


Figure 2. Illustrates the architecture of the constructed ANN model

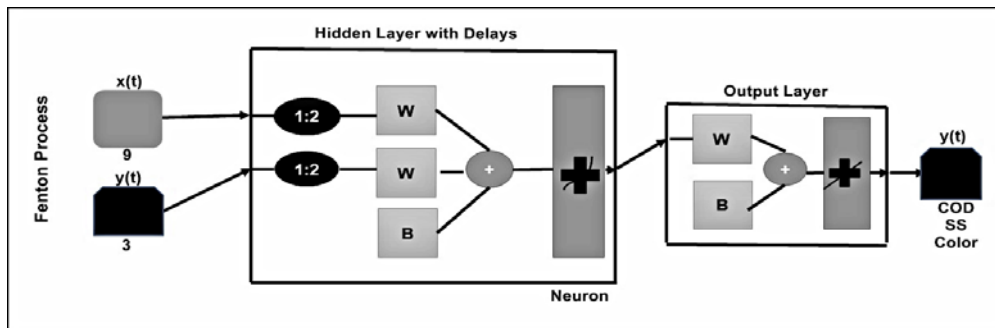


Figure 3. Illustrates how the resulting NARX-ANN algorithm was designed

Several activation functions were used in the study at various neural network levels. In particular, the Purelin function was used in the output layer of the ANN, and in the unseen layer, Tansig as well as Logsig algorithms were employed. In the same way, Purelin functions were employed in the output layer and Tansig functions in the hidden layer of the NARX-ANN model. In the training phase, 1000

epochs of weight and trend adjustments were performed by comparing two different algorithms, "trainlm" and "trainscg." To enhance convergence and manage nonlinearities, momentum-weighted descent of gradients and a biased learning function (LEARNGDM) were added to the ANN and NARX-ANN training processes.

Notably, "trainlm," renowned for its rapid and stable convergence [35-38], is adept at solving nonlinear challenges based on the Hessian Matrix (equation 5) [33,39,40].

$$\Delta w = [J^T(w)J(w) + \lambda I]^{-1} J^T(w) e(w) \quad (5)$$

In Equation 1, The mass of the vector is represented by  $w$ ;  $J$ , Jacobian matrix;  $J^T$ , overturned;  $Iw$ , identity matrix;  $\lambda$  is the value of the learning stable, while with represents an error vector, Equation 1 is adjusted iteratively to find the minimum error. As discovered by Møller [41], the Scaled Conjugate Gradient (trainscg) weight can train any network as long as its net input and transfer functions have derivative functions [41-43]. According to the equation adapted by Du and Stephanus [40,44];

$$\Delta w = w_k - w_{k-1} = \alpha_k d_{k-1} \quad (6)$$

In Equation 6, the number that represents the number of iterations is  $k$ ;  $\alpha_k$  is defined as the stride length in the  $k$  iteration and  $d_{k-1}$  is the search direction.

Equation 7 in the range of "mapminmax" (-1,1) was used in the scaling optimization of the inputs and outputs in the models [45]:

$$y = \frac{(y_{max}-y_{min})(x-x_{min})}{(x_{max}-x_{min})} + y_{min} \tag{7}$$

In Equation 7,  $x_{max}$  and  $x_{min}$  reflect the data's highest and lowest values, while  $y_{max}$  and  $y_{min}$  take the values 1 and -1, respectively.  $y$  is the normalization of  $x$ . The problem definition of the NARX-ANN model is expressed by Equation 8 [40,46].

$$y(t) = f(x(t - 1), x(t - d), y(t - 1)y(t - d)) \tag{8}$$

In the equation,  $x(t-d)$  represents the input,  $y(t-d)$  represents the network outputs;  $d$  indicates the value of the past inputs and outputs to be used in the feedback.  $R^2$  the MSE were considered in order to assess how well the projected values in each model performed [47,48].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_{thm,i} - y_{dny,i})^2}{\sum_{i=1}^N (y_{thm,i} - y_{ort})^2} \tag{9}$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|y_{thm,i} - y_{dny,i}|)^2 \tag{10}$$

In Equations 9 and 10,  $N$  is the number of data;  $y_{thm,i}$  is the expected predictive value;  $y_{dny,i}$  represents the true value, the mean value of the true samples.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Results of FOP Experiments

##### 3.1.1. Effect of pH

Figure 4 shows how different pH values affect the Fenton oxidation procedure and how COD, SS, and color parameters change as the outcome. The study investigated pH values that extend from 2.0 to 7.5 while keeping constant  $Fe^{2+}$  and  $H_2O_2$  dosages of 0.15 g/L and 1 mM, respectively. The most significant removal rates were achieved at pH 3, resulting in 72% COD reduction, 76% SS removal, and 90% color elimination. Previous research on FOP has consistently emphasized the pivotal role of pH in influencing the process dynamics. The acidic conditions fundamental to FOP are instrumental in regulating  $HO\bullet$  formation, oxidation rates, and the simultaneous control of  $Fe^{2+}$  and  $H_2O_2$  doses.

According to Figure 4, there is a decrease in the values of the parameters measured in the wastewater as the pH 3 value goes to the left and right.

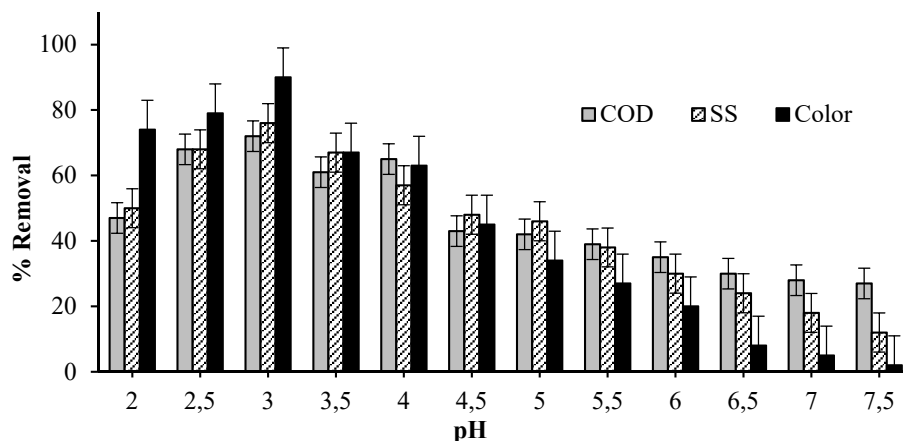


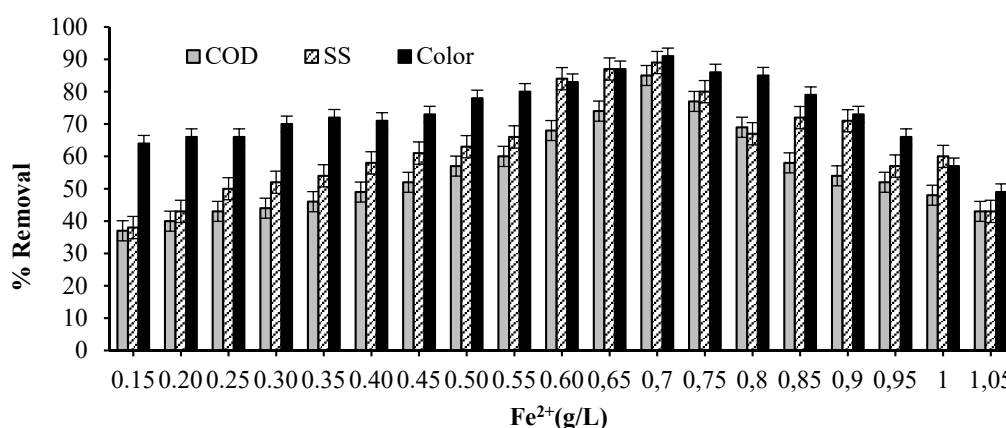
Figure 4. Graph for showing the effect of pH on FOP performance

At pH levels below 3, characterized by elevated  $H^+$  ion concentrations, there's an increased tendency for  $H_2O_2$  to convert into the oxonium ion ( $H_3O_2^+$ ). This conversion enhances the stability of  $H_2O_2$ , thereby slowing its reaction with  $Fe^{2+}$  ions. Consequently, the formation of complex iron compounds occurs instead of  $Fe^{3+}$ , disrupting the  $[Fe(H_2O)_6]^{2+}$ -FOP cycle. Moreover, according to Pliego et al. [57], heightened  $H^+$  ion concentrations hinder  $HO\cdot$  radical formation due to their scavenging effect. Conversely, at pH levels above 3, the reaction rate between  $Fe^{2+}$  and  $H_2O_2$  diminishes, resulting in the formation of  $Fe(OH)_3$ . This formation impedes  $Fe^{2+}$  regeneration and diminishes the catalyst's presence in the environment, consequently reducing treatment efficiency. Furthermore, Roudi et al. [50] pointed

out that  $H_2O_2$  becomes more unstable in alkaline solutions, which could cause it to break down into molecules of water and oxygen and impair the FOP's ability to oxidize. In light of this information, the study's findings align meaningfully with existing literature, providing valuable insights into the process.

### 3.1.2. Impact of $Fe^{2+}$ Content

The measurements of COD, SS, and Color detected in the effluent were utilized to assess the impact of  $Fe^{2+}$  material on FOP performance. This was accomplished by studying several  $Fe^{2+}$  concentration ranges (0.15-1.05 g/L) at constant pH and  $H_2O_2$  concentrations (pH 3 and 1 mM  $H_2O_2$ ) (Figure 5).



**Figure 5.**  $Fe^{2+}$  concentrations' impact on textile wastewater's ability to remove color, SS, and COD

Fenton-like Oxidation Process (FOP) treatment of untreated textile effluent at 0.7 g  $Fe^{2+}$ /L was shown to be the ideal concentration based on research findings. At this concentration, notable clearance

rates of 80% for COD, 79% for SS, and 91% for color were attained. Figure 5 illustrates how increasing the  $Fe^{2+}$  dosage from 0.15 g/L to 0.7 g/L resulted in enhanced removal rates for COD, AKM, and color, elevating them from 40-60% to 80-90%. This trend underscores the heightened generation of  $HO$  radicals with increased  $Fe^{2+}$  dosage, consistent with findings by Abedinzadeh et al. [59] and Roudi et al. [50]. Conversely, a decline in removal rates to 50-60% was observed at  $Fe^{2+}$  doses between 0.7-1.05 g/L. This decrease is attributed to the inhibition of  $HO$  radicals by excess  $Fe^{2+}$  concentrations exceeding 0.7 g/L, in line with studies by [32,49,50]. Furthermore, as noted by Sevimli et al. [60], the formation of  $Fe^{3+}$  (Equation 1) in the Fenton process can react with  $H_2O_2$  to generate  $Fe^{2+}$  and hydroperoxyl radicals ( $HO_2\cdot$ ) (Equation 4), thereby depleting  $H_2O_2$  concentration and impeding  $HO\cdot$  formation and efficacy. Hence, excessive  $Fe^{2+}$  utilization leads to unnecessary chemical consumption, excessive sludge formation, and compromised process efficiency.

### 3.1.3. Effect of $H_2O_2$ Concentration

When  $Fe^{2+}$  is catalyzed and the environment is acidic,  $H_2O_2$  in the FOP forms a greater  $HO\cdot$  radical than it does. That being said, one of the key factors influencing the effectiveness of the procedure is the concentration of  $H_2O_2$ . The effective concentration was ascertained in this work by testing a range of  $H_2O_2$  values, from 1 to 12 mM, at a fixed pH and  $Fe^{2+}$  concentration (pH 3 and 0.7 g/L) (Fig. 6). For COD, SS, and color at 2 mM  $H_2O_2$  concentration, the greatest efficiency of removal was 81%, 80%, and 93%. There

was a double rise in the concentration that was effective at the start (from 1 mM to 2 mM), which led to increases in COD removal of 12%, SS reduction of 73%, and color elimination of 20%.

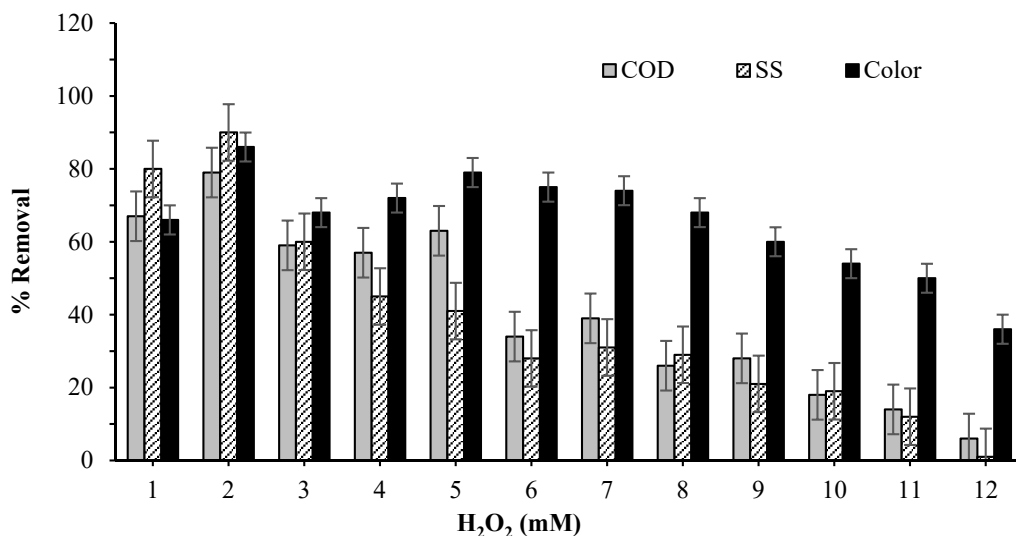


Figure 6. FOP performance: effect of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentrations

The color parameter of the untreated water employed in this study, which had an average original color concentration of 1395 Pt-Co, drops to about 98 Pt-Co as a result of the 93% color removal. It follows that nearly all of the discharge requirements listed in Table 3 can be satisfied with FOP.

Table 3. Guidelines related to a particular brand and minimum color levels for discharge waters regulated by different nations [61]

Countries and companies	Regulation limits
Turkey (fabric),	280 Pt-Counits
Taiwan (fabric),	550 Pt-Counits
India (dye and dye business),	400 Pt-Counits
Malaysia (industrial, used for drinking water),	100 Pt-Counits
Vietnam (textile, used for drinking water),	50 Pt-Counits
Vietnam (industrial, used for domestic water),	20 Pt-Counits
China (textile, direct discharge),	Follows a dilution method not Pt-Counits
Italy (industrial)	Follows a dilution-method not Pt-Counits
India (industrial, surface waters),	Absent of color
Thailand (textile),	Not objectionable
South Korea (industrial, type I area),	200 chromaticitydegree
Nike,	150 Pt-Counits
C&A (follows BSR),	150 Pt-Counits
H&M (follows BSR),	150 Pt-Counits
New Balance (follows BSR),	150 Pt-Counits
Levi Strauss &Co.,	Not offensive

The elimination effectiveness increases in tandem with the initial H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration. This suggests that a large and swift production of the HO<sub>2</sub>• radical is needed for the oxidative degradation of contaminants in raw textile effluent [32,49]. Nevertheless, as Fig. 6 illustrates, there was no evidence of a fully linear correlation between this rise and the effectiveness of removal. In a range of 2–12 mM, a non-uniform declining trend in removal rates was noted at H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentrations. Addressing the topic, Abedinzadeh et al., [59] claimed there was a decline, while Mousavi et al., [49] claimed that raising the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration, did not significantly alter the removal rates. The explanation for this decrease is that using more H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> than necessary leads to generating hydroperoxyl radical (OOH•), which has a lesser oxidation capacity. As a result, the rate of HO• radical formation declines [55,59,62,63].

The greatest efficiency of the process in this investigation was achieved at pH 3, 0.7 Fe<sup>2+</sup> g/L, and 2 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentrations, with 81% COD, 80% SS, and 93% color removal. Examining the research on FOP, it becomes clear that SS is not the main focus—rather, organic matter (as COD) and dyestuff (Color) oxidation dominate. The primary cause of this is that, rather than using actual textile effluent, the research reported in the literature was conducted using synthetic wastewater or water dye solutions. FOP is a three-step process that involves the flocculation and precipitation phases. It is based on the oxidation process. An important factor to consider while evaluating is the efficacy of the flocculation and subsequent settling processes, particularly the quantity of suspended solids (SS). This work closes some of the existing information gaps in the sector by using untreated textile wastewater alongside SS for wastewater monitoring. It will make it possible to use the collected data more suitably and helpfully.

### 3.3. Building a Model and Accurate Predictions

The following tables provide comparative statistical parameters of the ANN and NARX ANN models that were created utilizing the Fenton process variables: Tables 4, 5, and 6. To determine the ideal number of neurons, a range of 2 to 20 was added to the models, as there is no set network architecture or neuron count. Traditional training algorithms used in ANN and NARX-ANN; Scaled Conjugate Gradient (SCG), Bayesian Regularization (BR), Broyden-Fletcher Goldfarb-Shanno (BFGS) and Levenberg-Marquardt (LM). For the most part, studies have chosen to use logistic regression (LM), one of the most used classical training techniques that uses quadratic derivatives [30,64,65]. The LM and SCG algorithms were applied and contrasted in this work. A 70% training, 15% validation, and 15% test set of data were employed for the LM and SCG algorithms. This study compared ANN and NARX-ANN using MSE and R<sup>2</sup> values. When R<sup>2</sup> is assessed between 0 and 1, it indicates, in percentage terms, how well the values of the variables identified or targeted at each stage of the model were estimated. The model is more efficient when the value is near 1. The prediction efficiency increases with the MSE's proximity to zero, so it's usually positive [31,45,66,67].

**Table 4.** Results of ANN model LM learning algorithm

Using the fenton ANN-nntool-levenberg marquardt algorithm (trainlm), COD-SS-Color, and MSE-R											
ANN structure	Epoch	TANSIG function					LOGSIG function				
		MSE	Regression ( R )				MSE	Regression ( R )			
			Training	Validation	Test	All		Training	Validation	Test	All
9-2-3	1000	68.9	0.9233	0.94716	0.88982	0.92261	43.5	0.92757	0.84043	0.87202	0.89855
9-4-3	1000	18.0	0.91235	0.85262	0.89784	0.88768	32.8	0.93799	0.24007	0.93373	0.88649
9-6-3	1000	2.98	0.98184	0.72014	0.97021	0.94832	8.29	0.76041	0.98667	0.9409	0.82135
9-8-3	1000	60.2	0.94065	0.80909	0.67778	0.90468	3.65	0.98135	0.97238	0.94669	0.97814
9-10-3	1000	0.432	0.99224	0.94334	0.934	0.97889	754	0.56349	0.68857	0.69365	0.59943
9-12-3	1000	0.0642	0.99689	0.93356	0.9243	0.98247	0.0379	0.99148	0.99304	0.95511	0.98836
9-14-3	1000	666	0.60259	0.70777	0.16507	0.57516	650	0.56708	0.38652	-0.22918	0.47728
9-16-3	1000	0.0998	0.96974	0.9816	0.99863	0.97725	0.143	0.90397	0.98503	0.83596	0.91054
9-18-3	1000	72.1	0.81896	0.8486	0.90431	0.83191	0.108	0.92509	0.9826	0.93881	0.93184
9-20-3	1000	1.08e+03	0.5138	0.53508	0.34276	0.45442	8.84e-09	0.99709	0.96609	0.98737	0.99212

**Table 5.** ANN model SCG learning algorithm results

COD-SS-Color and MSE-R using fenton ANN-nntool-scaled conjugate gradient algorithm (trainscg)											
ANN structure	Epoch	TANSIG function					LOGSIG function				
		MSE	Regression ( R )				MSE	Regression ( R )			
			Training	Validation	Test	All		Training	Validation	Test	All
9-2-3	1000	61.7	0.8921	0.85079	0.63952	0.86375	49.4	0.92873	0.92432	0.82046	0.91973
9-4-3	1000	17.4	0.97109	0.94654	0.59935	0.91747	50.5	0.83116	0.97472	0.96669	0.86839
9-6-3	1000	11.2	0.90876	0.95556	0.96914	0.9267	9.63	0.94734	0.92528	0.78838	0.92888
9-8-3	1000	10.1	0.96419	0.98484	0.79142	0.92116	6.55	0.97421	0.98278	0.73807	0.95169
9-10-3	1000	6.8	0.9582	0.56225	0.87667	0.90487	4.96	0.96365	0.93871	0.99427	0.96753
9-12-3	1000	4.29	0.94725	0.97105	0.99097	0.9585	6.79	0.9608	0.86381	0.96715	0.94128
9-14-3	1000	3.41	0.99138	0.99393	0.99624	0.99272	3.12	0.95884	0.97424	0.88232	0.9489
9-16-3	1000	3.39	0.97723	0.98715	0.94778	0.9734	3.88	0.97372	0.99593	0.94391	0.97675
9-18-3	1000	833	0.62612	-0.29346	0.40781	0.53607	3.81	0.96981	0.99603	0.87859	0.96686
9-20-3	1000	3.91	0.97401	0.98419	0.9864	0.97774	2.19	0.97204	0.93112	0.99214	0.97336



**Table 6.** NARX-ANN model LM and SCG learning algorithm results

NARX-ANN structure	MSE-R and fenton NARX-ANN-nnstart-COD-SS-Color											
	Levenberg marquardt algorithm (trainlm)						Scaled conjugate gradient algorithm (trainscg)					
	TANSIG-purelin function											
	Regression ( R )						Regression ( R )					
Epoch	MSE	Training	Validation	Test	All	Epoch	MSE	Training	Validation	Test	All	
9-3-2-3	9	62	0.78246	0.81323	0.83693	0.79986	46	106	0.87087	0.90221	0.65224	0.82195
9-3-4-3	20	8.08	0.99044	0.93793	0.58931	0.92036	22	74.2	0.90912	0.77757	0.74079	0.8729
9-3-6-3	18	1.81	0.99467	0.93253	0.78738	0.94379	15	70.9	0.90137	0.90617	0.64499	0.85801
9-3-8-3	12	0.737	0.98136	0.90008	0.79946	0.94637	22	57.2	0.92437	0.89967	0.68175	0.89028
9-3-10-3	9	17.1	0.92927	0.62293	0.79562	0.88813	18	75.8	0.89808	0.6937	0.84686	0.86214
9-3-12-3	10	1.62	0.96286	0.87354	0.83727	0.92575	22	55.1	0.92983	0.96254	0.68709	0.87708
9-3-14-3	10	6.46	0.51673	0.54831	0.39359	0.51071	84	4.46	0.99298	0.94068	0.79606	0.93628
9-3-16-3	9	0.613	0.9702	0.8487	0.97289	0.96314	41	29.3	0.95914	0.97759	0.22099	0.87169
9-3-18-3	10	1.09	0.95511	0.42037	0.89501	0.83782	18	39.9	0.93737	0.46815	0.78382	0.86966
9-3-20-3	12	10.1	0.96922	0.63541	0.64176	0.82724	21	35.7	0.93631	0.79207	0.78648	0.89421

When the developed ANN (Table 4-5) model is compared considering the MSE and R<sup>2</sup> results. in the Logsig transfer function of the Levenberg-Marquardt learning algorithm in the 9-20-3 network topology; R<sup>2</sup> values for MSE 8.84e<sup>-9</sup>. Training, Validation, Test and All were calculated as 0.9942, 0.9333, 0.9748, 0.9843, respectively. For the NARX-ANN model (Table 6). MSE 0.613 in 9-3-16-3 network topology. and R<sup>2</sup> values are calculated as 0.9412, 0.7202, 0.9465 and 0.9276 for the same algorithm respectively. Figures 7 and 8. respectively. display the regression (R) graphs created for the developed models. The graphs have estimated values on the Y-axis and experimental data on the X-axis. The fit line illustrates the correlation between the estimated value and the input data. The goal line or Y=T line is reached when the estimated and actual values are equal. The COD, color, and SS parameter values that were acquired from the experimental FOP are represented numerically as the "Data" indicator [68]. Considering Figure 7-8. the experimental performance of the Fenton process in raw textile wastewater and the performance estimation made using the created models are summarized in Table 7 for the COD, SS, and Color parameters.

As can be seen in Table 7 the experimental, and estimated removal results in the developed ANN model are more compatible than NARX-ANN. It is also seen that H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> is more effective in Fenton process performance than pH and Fe<sup>+2</sup>. Similarly, Huo et al. [69], stated that the effective removal in the Fenton process would be very poor without the addition of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Because H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ion provides HO radical formation. which is the main element of the Fenton oxidation process under Fe<sup>+2</sup> catalysis and acidic conditions [16,50,63]. Yu et al. [70], obtained an estimation ranging from 0.91-0.99 R<sup>2</sup> with the ANN model they developed in 5-4-1 net structure for the estimation of COD and Color removal from synthetic textile wastewater with FOP. Accordingly, it is possible to say that the ANN model with 0.9843 R<sup>2</sup> and 8.84e-9 MSE obtained in this study in the 9-20-3 net topology for the performance estimation of FOP for raw textile wastewater treatment is successful.

The NARX-ANN model developed in the 9-3-16-3 network topology in the study has 0.9276 R<sup>2</sup> and 0.613 MSE. The difference between the experimental and estimation results is higher for pH, Fe<sup>+2</sup> and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> than for the ANN. According to the direction of information flow and processing. ANNs are organized in layers with a one-way information flow in feedforward neural networks (FNN). while in networks with repetitive features such as NARX-ANN. information can be directed both forward and backward. allowing connections between neurons in the same or previous layers flows [32,40,71,72]. Therefore, the NARX-ANN estimation performance is considered to be weaker due to the high number of input/output parameters, the reuse of the output data together with the input data, the repetitive neuron networks in the training of the model, and the low number of epochs.

Although there are no ANN and NARX-ANN modelling studies in the treatment of raw textile wastewater with the FOP in the literature. studies have been found for estimating the thermal damping effect in underground vertical shafts [73], and estimating the groundwater level [40]. In both studies, it was reported that MSE values close to zero and R<sup>2</sup> values above 0.9 were obtained. The prediction performances obtained as a result of the application of the NARX-ANN model in different areas show that the model is within acceptable limits.

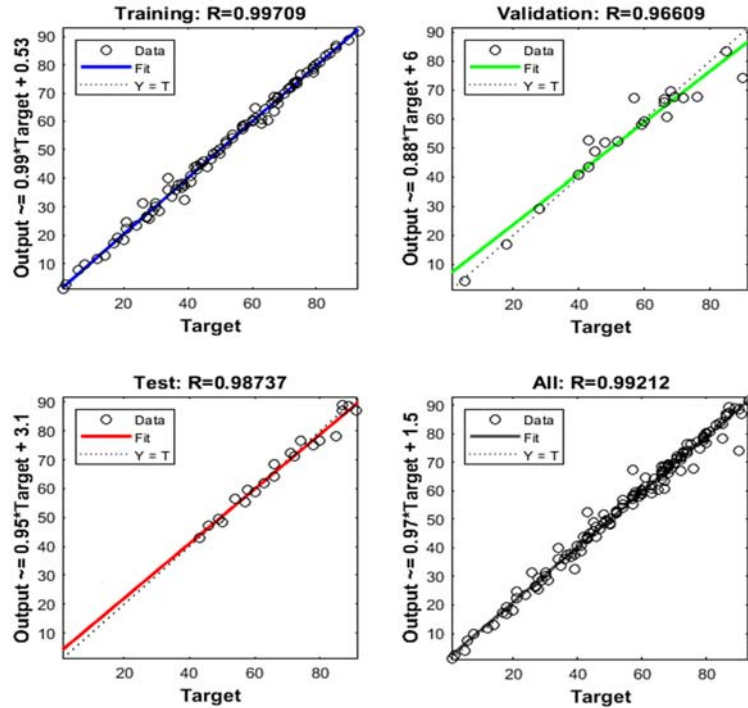


Figure 7. LM algorithm regression results of ANN

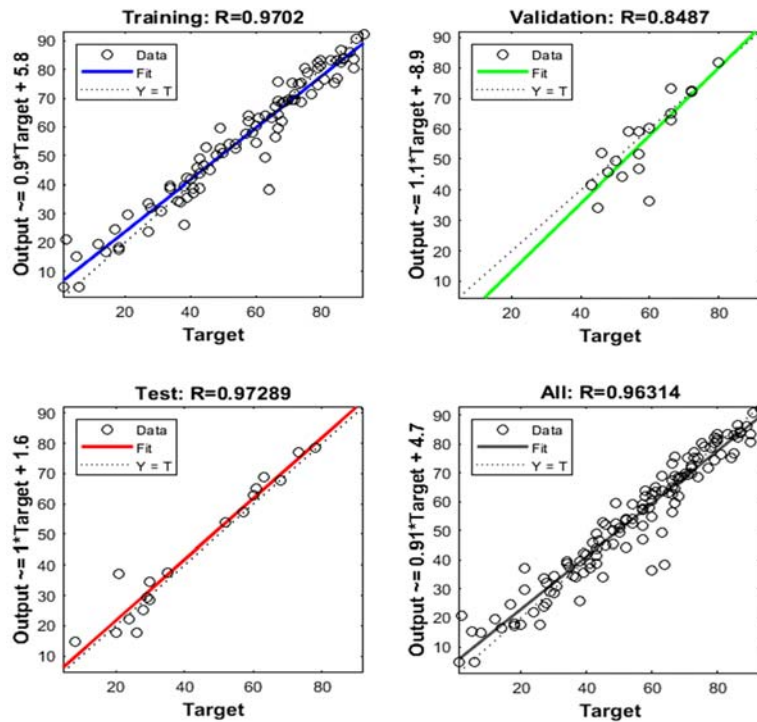


Figure 8. LM algorithm regression results of NARX-ANN

Table 7. Fenton process performance and estimation in unprocessed textiles waste

pH	Fe <sup>+2</sup> (g/L)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mM)	Actual removal (%)			Predict removal (ANN) (%)			Predict removal (NARX-ANN) (%)		
			COD	SS	Color	COD	SS	Color	COD	SS	Color
3	0.15	1	72	76	90	67.14	67.79	74.12	80.26	80.57	86.59
3	0.7	1	80	79	91	78.22	88.75	87.04	76.44	83.30	92.04
3	0.7	2	81	80	93	80.80	79.98	91.72	63.20	57.63	63.77

#### 4. CONCLUSION

To ascertain the effective removal effectiveness of FOP applied to raw textile wastewater and to forecast the performance efficiency, the following study constructed and compared the ANN and NARX-ANN models. The FOP operated at its peak efficiency at pH 3, 0.7 Fe<sup>2+</sup> g/L and a 2 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration. Under these circumstances, 81%, 80%, and 93% of the COD, SS, and color were removed, respectively. COD, SS, and color removal increased from 40–60% to 80–90% with the increase in Fe<sup>2+</sup> dose from 0.15 g/L to 0.7 g/L. However, at dosages between 0.7 and 1.05 g/L, the removal rates decreased from 80–90% to 50–60%. Excessive sludge development and needless chemical usage are the results of using too much Fe<sup>2+</sup>. It has been established that the application of FOP as a single unit can satisfy the receiving environment discharge standards specified for wastewater from the textile sector. taking into account the properties and treatment efficiencies of basic textile wastewater. Furthermore. it was found that the Artificial Neural Network model performed better and with greater

reliability when the MSE and R<sup>2</sup> values of the ANN and NARX-ANN models created for FOP were compared. For ANN. the R is 0.9843 and the MSE is 8.84e-9. The experimentally observed removal rates show a good agreement with the model estimations. Further research can be conducted to compare the prediction performances of regression models with ANN models by analyzing the data and models.

#### 5. ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by the Çukurova University Scientific Research Projects Unit with the project number FYL-2018-9993.

#### 6. REFERENCES

1. ABIT, 2018. Brazilian textile and apparel industry association. Brazilian Textile and Apparel Industry. Brasília, 44.
2. Sher, F., Hanif, K., Iqbal, S.Z., Imran, M., 2020. Implications of advanced wastewater treatment: electrocoagulation and electroflocculation of effluent discharged from a wastewater treatment plant. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 101101.
3. Alkhagen, M., Samuelsson, Å., Aldaeus, F., Gimåker, M., Östmark, E., Swerin, A., 2015. Roadmap 2015 to 2025. Textile Materials from Cellulose. RISE–Research Institutes of Sweden.
4. He, X., Qi, Z., Gao, J., Huang, K., Li, M., Springael, D., Zhang, X.X., 2020. Nonylphenol ethoxylates biodegradation increases estrogenicity of textile wastewater in biological treatment systems. *Water Research*, 184, 116137.
5. Li, Y., Wang, Y., 2019. Double decoupling effectiveness of water consumption and wastewater discharge in china's textile industry based on water footprint theory. *PeerJ*, 7, e6937.
6. Antczak, A., Greta, M., Kopeć, A., Otto, J., 2019. Characteristics of the textile industry of two Asian powers: China and India. Prospects for Their Further Development on Global Markets. *Fibers & Textiles in Eastern Europe*.
7. Mikac, L., Marić, I., Štefanić, G., Jurkin, T., Ivanda, M., Gotić, M., 2019. Radiolytic synthesis of manganese oxides and their ability to decolorize methylene blue in aqueous solutions. *Applied Surface Science*, 476, 1086-1095.
8. Asgari, G., Shabanloo, A., Salari, M., Eslami, F., 2020. Sonophotocatalytic treatment of AB113 dye and real textile wastewater using ZnO/Persulfate: modeling by response surface methodology and artificial neural network. *Environmental Research*, 184, 109367.
9. Jorfi, S., Pourfadakari, S., Kakavandi, B., 2018. A new approach in sono-photocatalytic degradation of recalcitrant textile wastewater using MgO@Zeolite nanostructure under UVA irradiation. *Chemical Engineering Journal*, 343, 95-107.
10. Giwa, A., Yusuf, A., Balogun, H.A., Sambudi, N.S., Bilad, M.R., Adeyemi, I., Curcio, S., 2021. Recent advances in advanced oxidation processes for removal of contaminants from water: a comprehensive review. *Process Safety and Environmental Protection*.
11. Doumic, L.I., Soares, P.A., Ayude, M.A., Cassanello, M., Boaventura, R.A., Vilar, V.J., 2015. Enhancement of a solar photo-fenton reaction by using ferrioxalate complexes for the treatment of a synthetic cotton-textile dyeing wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 277, 86-96.

12. Garrido-Cardenas, J.A., Esteban-García, B., Agüera, A., Sánchez-Pérez, J.A., Manzano-Agugliaro, F., 2020. Wastewater treatment by advanced oxidation process and their worldwide research trends. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(1), 170.
13. Ma, S., Lee, S., Kim, K., Im, J., Jeon, H., 2021. Purification of organic pollutants in cationic thiazine and azo dye solutions using plasma-based advanced oxidation process via submerged multi-hole dielectric barrier discharge. *Separation and Purification Technology*, 255, 117715.
14. Sampaio, E.F., Rodrigues, C.S., Lima, V.N., Madeira, L.M., 2021. Industrial wastewater treatment using a bubble photo-fenton reactor with continuous gas supply. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(6), 6437-6449.
15. Ribeiro, J.P., Marques, C.C., Portugal, I., Nunes, M.I., 2020b. AOX removal from pulp and paper wastewater by fenton and photo-fenton processes: a real case study. *Energy Reports*, 6, 770-775.
16. Liu, R., Chiu, H.M., Shiau, C.S., Yeh, R.Y.L., Hung, Y.T., 2007. Degradation and sludge production of textile dyes by fenton and photo-fenton processes. *Dyes and Pigments*, 73(1), 1-6.
17. Fenton, H.J.H., 1894. LXXIII-oxidation of tartaric acid in presence of iron. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 65, 899-910.
18. Walling, C., 1975. Fenton's reagent revisited. *Accounts of Chemical Research*, 8(4), 125-131.
19. Zhang, H., Choi, H.J., Huang, C.P., 2005. Optimization of fenton process for the treatment of landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 125(1-3), 166-174.
20. Rodrigues, C.S., Neto, A.R., Duda, R.M., de Oliveira, R.A., Boaventura, R.A., Madeira, L.M., 2017. Combination of chemical coagulation, photo-fenton oxidation and biodegradation for the treatment of vinasse from sugar cane ethanol distillery. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3634-3644.
21. Barros, V.G., Rodrigues, C.S.D., Botello-Suarez, W.A., Dudu, R.M., Oliveira, R.A., Silva, E.S., Faria, J.L., Boaventura, R.A.R., Madeira, L.M., 2020. Treatment of biodigested coffee processing wastewater using fenton's oxidation and coagulation/flocculation. *Environmental Pollution*, 259, 113796.
22. Yu, X., Somoza-Tornos, A., Graells, M., Pérez-Moya, M., 2020. An experimental approach to the optimization of the dosage of hydrogen peroxide for fenton and photo-fenton processes. *Science of the Total Environment*, 743, 140402.
23. Ribeiro, J.P., Marques, C.C., Portugal, I., Nunes, M.I., 2020a. Fenton processes for AOX removal from a kraft pulp bleaching industrial wastewater: optimization of operating conditions and cost assessment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 104032.
24. Silva, L.G., Moreira, F.C., Cechinel, M.A.P., Mazur, L.P., de Souza, A.A.U., Souza, S.M.G.U., Vilar, V.J., 2020. Integration of fenton's reaction based processes and cation exchange processes in textile wastewater treatment as a strategy for water reuse. *Journal of Environmental Management*, 272, 111082.
25. Elmolla, E.S., Chaudhuri, M., Eltoukhy, M.M., 2010. The use of artificial neural network (ANN) for modeling of COD removal from antibiotic aqueous solution by the fenton process. *Journal of Hazardous Materials*, 179(1-3), 127-134.
26. Radwan, M., Alalm, M.G., Eletriby, H., 2018. Optimization and modeling of electro-fenton process for treatment of phenolic wastewater using nickel and sacrificial stainless steel anodes. *Journal of Water Process Engineering*, 22, 155-162.
27. Talwar, S., Verma, A.K., Sangal, V.K., 2019. Modeling and optimization of fixed mode dual effect (photocatalysis and photo-fenton) assisted metronidazole degradation using ANN coupled with genetic algorithm. *Journal of Environmental Management*, 250, 109428.
28. Gholizadeh, A.M., Zarei, M., Ebratkhahan, M., Hasanzadeh, A., 2021. Phenazopyridine degradation by electro-fenton process with magnetite nanoparticles-activated carbon cathode, artificial neural networks modeling. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104999.
29. Baştürk, E., Alver, A., 2019. Modeling azo dye removal by sono-fenton processes using response surface methodology and artificial neural network approaches. *Journal of Environmental Management*, 248, 109300.
30. Mohammadi, F., Bina, B., Karimi, H., Rahimi, S., Yavari, Z., 2020. Modeling and sensitivity analysis of the alkylphenols removal via moving bed biofilm reactor using artificial neural networks: comparison of levenberg marquardt and particle swarm optimization training algorithms. *Biochemical Engineering Journal*, 161, 107685.
31. Ahmad, Z.U., Yao, L., Islam, F., Zappi, M.E., Gang, D.D., 2020. The use of artificial neural network (ANN) for modeling the adsorption of sunset yellow onto neodymium-modified ordered mesoporous carbon. *Chemosphere*, 256, 127081.

32. Bousalah, D., Zazoua, H., Boudjemaa, A., Benmounah, A., Bachari, K., 2020. Degradation of indigotine food dye by fenton and photo-fenton processes. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-14.
33. MathWorks, 2020. Matlab deep learning toolbox release 2020a. Natick, Massachusetts, United States. License Number, 968398.
34. APHA, 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). American Public Health Association. Washington DC. ISSN, 55-1979.
35. Levenberg, K., 1944. A Method for the solution of certain nonlinear problems. *Q. Appl. Math.*, 2, 164-168.
36. Yu, H., Wilamowski, B.M., 2011. Industrial electronics handbook. Levenberg-Marquadt Training.
37. Khaki, M., Yusoff, I., Islami, N., 2015. Application of the artificial neural network and neuro-fuzzy system for assessment of groundwater quality. *Clean-Soil, Air, Water*, 43(4), 551-560.
38. Alsumaiei, A.A., 2020. A nonlinear autoregressive modeling approach for forecasting groundwater level fluctuation in urban aquifers. *Water*, 12(3), 820.
39. Bishop, C.M., 1995. Neural networks for pattern recognition. Oxford University Press. ISBN:978 0-19-853864-6.
40. Di Nunno, F., Granata, F., 2020. Groundwater level prediction in apulia region using NARX neural network. *Environmental Research*, 190, 110062.
41. Møller, M.F., 1993. A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning [J]. *Neural Networks*, 6(4), 525-534.
42. Sharma, B., Venugopalan, K., 2014. Comparison of neural network training functions for hematoma classification in brain CT images. *IOSR J. Comput. Eng.*, 16(1), 31-35.
43. Chitsazan, M., Rahmani, G., Neyamadpour, A., 2015. Forecasting groundwater level by artificial neural networks as an alternative approach to groundwater modeling. *Journal of the Geological Society of India*, 85(1), 98-106.
44. Du, Y.C., Stephanus, A., 2018. Levenberg-marquardt neural network algorithm for degree of arteriovenous fistula stenosis classification using a dual optical photoplethysmography sensor. *Sensors*, 18(7), 2322.
45. Jawad, J., Hawari, A.H., Zaidi, S., 2020. Modeling of forward osmosis process using artificial neural networks (ANN) to predict the permeate flux. *Desalination*, 484, 114427.
46. Zhang, T., Barthorpe, R.J., Worden, K., 2020. On treed gaussian processes and piecewise-linear NARX modelling. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 144, 106877.
47. Bararpour, S.T., Feylizadeh, M.R., Delparish, A., Qanbarzadeh, M., Raeiszadeh, M., Feilizadeh, M., 2018. Investigation of 2-nitrophenol solar degradation in the simultaneous presence of  $K_2S_2O_8$  and  $H_2O_2$ : using experimental design and artificial neural network. *Journal of Cleaner Production*, 176, 1154-1162.
48. Kalantary, R.R., Moradi, M., Pirsahab, M., Esrafil, A., Jafari, A.J., Gholami, M., Dragoi, E.N., 2019. Enhanced photocatalytic inactivation of *E. coli* by natural pyrite in presence of citrate and EDTA as effective chelating agents: experimental evaluation and kinetic and ANN models. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 102906.
49. Mousavi, S.A., Vasseghian, Y., Bahadori, A., 2020. Evaluate the performance of fenton process for the removal of methylene blue from aqueous solution: experimental, neural network modeling and optimization. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 39(2).
50. Roudi, A.M., Kamyab, H., Chelliapan, S., Ashokkumar, V., Kumar, A., Yadav, K.K., Gupta, N., 2020. Application of response surface method for total organic carbon reduction in leachate treatment using fenton process. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 101009.
51. Göde, J.N., Hoefling Souza, D., Trevisan, V., Skoronski, E., 2019. Application of the fenton and fenton-like processes in the landfill leachate tertiary treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7, 103352.
52. Bello, M.M., Raman, A.A.A., Asghar, A., 2020. Activated carbon as carrier in fluidized bed reactor for fenton oxidation of recalcitrant dye: oxidation-adsorption synergy and surface interaction. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 101001.
53. Xing, L., Kong, M., Xie, X., Sun, J., Wei, D., Li, A., 2020. Feasibility and safety of papermaking wastewater in using as ecological water supplement after advanced treatment by fluidized-bed fenton coupled with large-scale constructed wetland. *Science of the Total Environment*, 699, 134369.
54. Masalvad, S.K.S., Sakare, P.K., 2020. Application of photo-fenton process for treatment of textile congo-red dye solution materials today, *Proceedings*.



55. Wu, C., Chen, W., Gu, Z., Li, Q., 2021. A review of the characteristics of fenton and ozonation systems in landfill leachate treatment. *Science of the Total Environment*, 762, 143131.
56. Zhai, J., Ma, H., Liao, J., Rahaman, M.H., Yang, Z., Chen, Z., 2018. Comparison of fenton, ultraviolet-fenton and ultrasonic-fenton processes on organics and colour removal from pre-treated natural gas produced water. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(11), 2411-2422.
57. Pliego, G., Zazo J.A., Garcia-Muñoz, P., 2015. Trends in the intensification of the fenton process for wastewater treatment: an overview. *Crit Rev Environ Sci Technol*, 45, 2611-2692.
58. Tamimi, M., Qourzal, S., Barka, N., Assabane, A., Ait-Ichou, Y., 2008. Methomyl degradation in aqueous solutions by fenton's reagent and the photo-fenton system. *Separation and Purification Technology*, 61(1), 103-108.
59. Abedinzadeh, N., Shariat, M., Monavari, S.M., Pendashteh, A., 2018. Evaluation of color and COD removal by fenton from biologically (SBR) pre-treated pulp and paper wastewater. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 82-91.
60. Sevimli, M.F., Deliktacs, E., Sahinkaya, S., Güçlü, D., 2014. A comparative study for treatment of white liquor by different applications of fenton process. *Arab. J. Chem.* 7, 1116-1123.
61. ZDHC Programme, 2016. Zero discharge of hazardous chemicals programme. Textile industry wastewater quality guideline. Literature Review. Revision 1, 1-84.
62. Brink, A., Sheridan, C.M., Harding, K.G., 2011. The fenton oxidation of biologically treated paper and pulp mill effluents: performance and kinetic study. *Process Saf. Environ Prot.*, 107, 206-215.
63. Askarniya, Z., Sadeghi, M.T., Baradaran, S., 2020. Decolorization of congo red via hydrodynamic cavitation in combination with fenton's reagent. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 150, 107874.
64. Gadekar, M.R., Ahammed, M.M., 2019. Modeling dye removal by adsorption onto water treatment residuals using combined response surface methodology-artificial neural network approach. *Journal of Environmental Management*, 231, 241-248.
65. Besliu-Ionescu, D., Talpeanu, D.C., Mierla, M., Muntean, G.M., 2019. On the prediction of geoeffectiveness of CMEs during the ascending phase of SC24 using a logistic regression method. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 193, 105036.
66. Ghaedi, A.M., Karamipour, S., Vafaei, A., Baneshi, M.M., Kiarostami, V., 2019. Optimization and modeling of simultaneous ultrasound-assisted adsorption of ternary dyes using copper oxide nanoparticles immobilized on activated carbon using response surface methodology and artificial neural network. *Ultrasonics Sonochemistry*, 51, 264-280.
67. Koçak, Y., Şiray, G.Ü., 2021. New activation functions for single layer feedforward neural network. *Expert Systems with Applications*, 164, 113977.
68. Erdem, F., 2019. *S. cerevisiae* ile Remazol Sarı (RR) giderimine yapay sinir ağı (YSA) Yaklaşımı. *Uludağ University J. Fac. Eng.* 24(2), 289-298.
69. Huo, S., Necas, D., Zhu, F., Chen, D., An, J., Zhou, N., Ruan, R., 2021. Anaerobic digestion wastewater decolorization by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-enhanced electro-fenton coagulation following nutrients recovery via acid tolerant and protein-rich chlorella production. *Chemical Engineering Journal*, 406, 127160.
70. Yu, R.F., Chen, H.W., Cheng, W.P., Hsieh, P.H., 2009. Dosage control of the fenton process for color removal of textile wastewater applying ORP monitoring and artificial neural networks. *Journal of Environmental Engineering*, 135(5), 325-332.
71. ASCE., 2000. Task committee on application of artificial neural networks in hydrology. *J. Hydrol. Eng.* 5(2). 115-123.
72. Yetkin, M., Kim, Y., 2019. Time series prediction of mooring line top tension by the NARX and volterra model. *Applied Ocean Research*, 88, 170-186.
73. Roghanchi, P., Kocsis, K.C., 2019. Quantifying the thermal damping effect in underground vertical shafts using the nonlinear autoregressive with external input (NARX) algorithm. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(2), 255-262.



## Examination of Thermal Dispersion and Airflow within a Refrigerator

Nima MOLANI<sup>1,a</sup>, Haydar KEPEKCI<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Arçelik, Research and Development Department, Eskisehir, Türkiye

<sup>2</sup>Istanbul Gelişim University, Faculty of Engineering-Architecture, Department of Mechatronics Engineering, Istanbul, Türkiye

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0001-9517-2574; <sup>b</sup>ORCID: 0000-0002-0037-8332

### Article Info

Received : 18.03.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560131

### Corresponding Author

Haydar KEPEKCI

hikepekci@gelisim.edu.tr

### Keywords

Blast freezer

Computational fluid dynamics

Temperature distribution

Airflow

**How to cite:** MOLANI, N., KEPEKCI, H., (2024). Examination of Thermal Dispersion and Airflow within a Refrigerator. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 695-707.

### ABSTRACT

A blast freezer, characterized by its capability to diminish the core temperature of cooked food from 100 °C to -18 °C within 270 minutes, constitutes a critical component in this preservation process. This study endeavors to model a blast freezer system employing Computational Fluid Dynamics (CFD) methodologies, subsequently validating the CFD analysis through empirical investigations. The pressure-based k-ε turbulence model is employed to solve the Navier-Stokes and energy equations. The ensuing analyses encompass airflow assessments and temperature evaluations for unloaded and fully loaded blast freezers. Results gleaned from experiments and analyses indicate a temperature escalation within the cabin as it approaches the enclosure walls. Maximum velocities of 31.1 m/s and 26.9 m/s are recorded for unloaded and fully loaded freezers. The average disparity between the CFD and experimental models is computed as -0.7 °C, signifying a close alignment between the simulated and actual outcomes.

## Şok Dondurucunun Isı Dağılımı ve Hava Akışının İncelenmesi

### Makale Bilgileri

Geliş : 18.03.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560131

### Sorumlu Yazar

Haydar KEPEKCI

hikepekci@gelisim.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Şok dondurucu

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

Sıcaklık dağılımı

Hava akışı

**Öz:** MOLANI, N., KEPEKCI, H., (2024). Examination of Thermal Dispersion and Airflow within a Refrigerator. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 695-707.

### ÖZ

Pişmiş gıdanın çekirdek sıcaklığını 270 dakika içinde 100 °C'den -18 °C'ye düşürme kapasitesiyle karakterize edilen bir şok dondurucu, muhafaza sürecinin kritik bir bileşenini oluşturur. Bu çalışma, hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodolojilerini kullanarak bir şok dondurucu sistemini modellemeyi ve ardından deneysel araştırmalarla CFD analizlerini doğrulamayı amaçlamaktadır. Çalışmadaki nümerik analizlerde k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Hem boş hem de tam yükte dolu olan şok dondurucular için deneysel ve CFD hesaplamaları yapılarak elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Deneylerden ve analizlerden elde edilen sonuçlar, kabin duvarlarına yaklaştıkça kabin içindeki sıcaklığın arttığını göstermektedir. Boş ve tam dolu dondurucular için maksimum hızlar sırasıyla 31,1 m/s ve 26,9 m/s olarak elde edilmiştir. CFD ve deneysel modeller arasındaki ortalama farklılık -0,7 °C olarak hesaplanmıştır. Bu durum da, simüle edilen ve gerçek sonuçlar arasında yakın bir uyum olduğunu gösterir.

## 1. INTRODUCTION

The most common methods of food preservation are drying, salt brining, canning and cooling. However, losses in nutritional values are quite high in both drying, brine, or canning processes. For these reasons, the cooling method is the most effective method in terms of applicability to many foods, preservation of nutritional/quality values, and ease of application. The most efficient cooling system within today's technological possibilities is deep-freezing technology [1]. Blast Freezer, which are used for rapid cooling of cooked food without losing their nutritional value and preventing bacterial growth, have gained importance in the food industry in many countries in recent years [2].

Although its use is compulsory in many countries, especially in the European Region, due to health-related regulations, the number of global manufacturers in this field is insufficient. The development of designs for homogeneous temperature distribution in the cabinet is a subject that has been studied intensively. It is seen that the temperatures are higher in the upper parts of the freezer as a result of the downward movement of the cold air and the rise of the warm air [3]. The inhomogeneous temperature distribution in the freezer decreases the performance of the freezer and increases energy consumption. Fans are used to provide homogeneous temperature and airflow in the freezer [4]. In addition, the distribution of velocity vectors at the front and rear of each fan and temperature changes in the blowing directions are important issues [5]. Analyzing the fans correctly within the scope of numerical methods and obtaining the CFD results is a very important work base.

CFD analyzes were made using different parameters for freezer cabinet design by Pakdil [6]. In addition, the experimental setup was set up and the results were compared. In this study, the position of the coldest packages was determined and the parameters affecting the temperature in the freezer cabinet were examined. Dempsey and Bansal (2012) determined with their CFD analysis that the blowing direction in double fan blast freezers has a great effect on the cooling efficiency of the food in the freezer cabinet [2]. They also saw that the distance of the evaporator from the fans is a very important factor in Blast Freezer designs. They concluded that the distance between the fan and the evaporator is a parameter that prevents frost in unnecessary places. Alonso and Andersen (2011) investigated the exit of the flow from the evaporator and its circulation in the cabinet in horizontal type freezers. In this study, they also investigated the effect of the distance between the walls and the evaporator on the velocity of the flow. As a result, they determined that the flow at the wall edge has a high velocity [7]. Shih et al. (2011) conducted numerical analyzes on the heat transfer of the air passing over the evaporator in a conventional freezer [8]. It aimed to make improvements in energy consumption by increasing heat transfer performance. They used turbulent kinetic energy equations in their analysis. As a result, they saw that the heat transfer rate decreased along the path of the air. Chourasia et al. (2007) investigated the heat transfer and moisture loss in the freezer in order to preserve the potatoes chosen as food without spoiling in their study [9]. The study was carried out both experimentally and numerically. Assuming that the airflow inside the cooler remains constant, the airflow is stated as a steady-state. Numerical analyzes were performed using a 2D model. In the results of the numerical analyzes, the average temperature value was achieved with a difference of 0.5 °C compared to the experimental study results. In addition, the moisture loss obtained with the numerical solution is 0.61% higher than that obtained with the experimental results. Amara et al. (2008) investigated the hydrodynamic boundary layer thickness formed during natural convection in a domestic freezer and the flow movements of vertical walls depending on the boundary conditions [10]. For this, they made both experimental and numerical analyzes. They used the PIV (Particle Image Velocity) technique for the experiments. While doing the numerical solution, they created the simulation of the cabinet with Fluent software. They used the global heat transfer coefficient for the walls in the analyzes where the outside temperature was considered constant. They also have laminar airflow dissolved because it dissolves natural convection. In the model he built by ignoring the evaporator, they defined a constant temperature on the back wall where the evaporator is located and provided cooling inside the cabinet from this wall. They defined these temperatures as -10 °C and 0 °C, respectively, based on the experimental data of the compressor running and stopping times. As a result, the results of the 3D simulation and experimental study were close to each other. Ding et al. (2004) explored the correlation between the temperature dispersion within the freezer and the spatial dimensions, specifically the gap separating the shelves from both the evaporator and the door. p[11]. They made both experimental and numerical analyzes for these two different cases. The first of the models he established is the model in which natural convection is dominant, and the second is the model in which forced convection is dominated by the fan and air duct. Numerical analyzes

were performed with Star-CCM+ software. As a result of the analyzes and experiments they have done, it has been seen that the shorter distances ensure that the temperatures in the cabinet are more regular.

Mirade et al. (2002) aimed to ensure that the airflow reaches all parts of the cabinet in a homogeneous state and to optimize the design in terms of energy efficiency [12]. In this study, a turbulence model was created with the finite volume method and CFD analyzes were performed. Lacerda et al. (2005) investigated the temperature distribution of a freezer against forced convection using CFD and experimental models [13]. The importance of this study is the comparison of the internal flow in the unloaded and full-loaded of the freezer. In the experimental study carried out by Poyraz (2011), the freezer compartment of a two-door freezer was examined [14]. The evaporator temperature and the airflow rate passed through the evaporator and blown into the cabin were selected as the parameters affecting the energy consumption. By determining the effect of these parameters on the freezer operating rate, energy consumption inference can be made. As a result of the experimental studies, it was determined how the evaporation temperature and the airflow rate affect the freezer energy consumption. Rodezno et al. (2013) examined the effect of a blast freezer in the food mass center in their study [1]. Experimental analyzes were carried out in this study. The refrigerant in the first experiment was helium and the refrigerant in the second experiment was air. As a result of these experiments, in the analyzes made on fish, the loss of weight of the meals was measured in a lower amount when air shocked and based on the results, it was determined that shock freezing with air was much more efficient.

Within the scope of this study, fan, outer construction, and insulation group designs were made for a blast freezer to increase the air circulation inside the cabinet. Then, cooling analyzes were carried out with the CFD technique. Blast freezer systems are produced with a very different technical infrastructure compared to conventional freezers. In this context, the most basic difference compared to existing freezers is that the temperature of the food mass center can be reduced from 100 °C to -18 °C in 270 minutes. The main feature that distinguishes this study from the previous literature is that it examines the turbulent flow formed by the effect of fans in the numerical analysis of the study and shows how efficient this flow is in terms of design. The results of data logger measurements and climate chamber tests, which were used as experimental methods, were used to verify the numerical results of the model. The data logger records all the desired or undesired changes of the device in one minute intervals. In these studies, with the help of data loggers, temperature measurements of the packages in the freezer were recorded in one minute intervals during the experiment. Following the numerical analysis, peak velocity magnitudes of 31.1 m/s and 26.9 m/s were identified for the empty and fully-loaded freezers, respectively. Regarding freezer temperature, the mean deviation between the Computational Fluid Dynamics (CFD) and experimental models was calculated at -0.7 °C. This shows that the data obtained from the CFD analysis are compatible with the experimental results.

In the material and methods section of the paper, information about the working principle of the blast freezer is given and the details of the experiment conducted for this study are mentioned. In the numerical method section, numerical analyses were performed for the designed blast freezer. Firstly the geometries to be used in the analyses were drawn and then the mesh process was performed. Detailed information was given about the quality of the created mesh structure and the boundary conditions used in the analyses were mentioned. In the Results section, the data obtained from CFD analyzes and experiments were examined comparatively. These examinations were made separately for 60, 120, 180 and 240 minutes. In the Conclusions section, the important data obtained from this study are interpreted briefly.

## 2. MATERIALS AND METHOD

### 2.1. Working Principle of Blast Freezer

The cooling process in a freezer is provided by the thermodynamic refrigeration cycle. The basic principle in the blast freezer is to increase the convection heat transfer coefficient with the fan power and thus to provide rapid heat transfer [15]. A classical thermodynamic refrigeration cycle has four main elements. These are evaporator, compressor, condenser, and capillary tube [16]. The air supply system in blast freezer cabinets consists of fans. The fan in the freezer used in this study sucks the air inside the cabinet from inside and sends it to the area where the evaporator is located. The air-cooled in the area where the evaporator is located is given back into the cabinet from the sides and thus the packages are cooled [17]. One of the advantages of blast freezers is that the frost-icing phenomenon seen in conventional freezers does not occur.



The passing of the air over the evaporator by the force of the fan ensures that the frosting event does not appear. In this way, bad appearance and volume shrinkage due to snow and icing in the cabin are prevented [18].

## 2.2. Preparation of the Experiments

Energy consumption in freezers should be measured under certain standards. These standards have contents such as ambient temperature, cabinet position, and placement of packages. Freezers are tested in climate chambers in order to keep the temperature of the environment tested at the desired. After the freezer is taken into the experiment room, packages of different sizes representing the food are placed according to the cooling capacity. According to the standard of the European Union numbered EN 16825:2015, the distance between the sidewalls of the blast freezer and the walls of the experiment room is set to a minimum of 150 cm. The sensors measuring humidity and temperature were placed at a distance of 50 cm from the walls of the experiment room, and radial fans have been used on the side walls to distribute the temperature and humidity homogeneously. In addition, with the use of the data logger, the temperatures of each package have been measured in an unlimited range. Data loggers are devices that can record information according to pre-set time intervals. Data logger device keeps all desired or undesired changes in its memory every one minute. In these studies, the core temperature of the 14 packages has been measured once every minute. The measuring range of the device is between -30 and +190 °C. There are 14 shelves in the blast freezer used in the experiment, and a 1 kg package is placed on each shelf. The experimental arrangement is depicted in Figure 1 and 2, illustrating the configured setup for the study.



Figure 1. The blast freezer

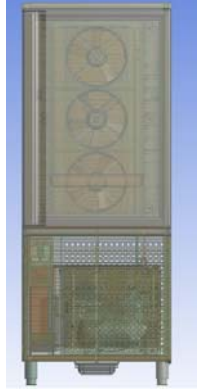


Figure 2. Placing the packages into the blast freezer

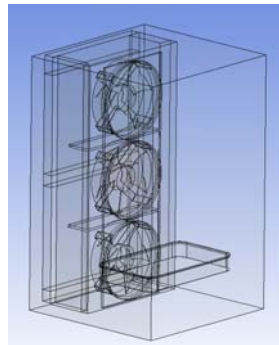
## 3. NUMERICAL METHODS

The results obtained from the experiments for blast freezers have been compared with the CFD analyzes. Figure 3 shows the CAD model of the interior of the cabinet. The model has been prepared with the SolidWorks program. Since it would be difficult to create a numerical solution network for the CAD model, the model has been simplified, and the analysis model is shown in Figure 4. After it has been combined with the fans that were also modeled. The interior dimensions of this cabinet are 67.5×68.1×107.8 cm. The

thickness of the side, rear and upper walls is 6 cm and the thickness of the lower wall is 14 cm. The insulation material is polyurethane in 0.5 mm stainless steel. In the analysis model, 3 axial fans with 40 cm diameter and 5 blades have been used. Then, package models representing the food have been created in accordance with the package layout plan.



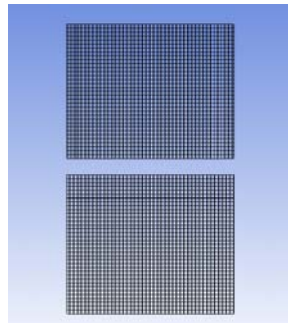
**Fig. 3.** CAD drawing model of blast freezer



**Figure 4.** CAD simplified model of blast freezer

### 3.1. CFD Application for Unloaded Blast Freezer

In conjunction with the cabin featuring airflow volume, the air supply system has been meticulously modeled. Notably, the fan has been intricately incorporated into the air supply system model, whereas the fin elements on the evaporator have been excluded from the modeling process. This is because these elements are very small in size. In this study, with the rotation of the fan, the airflow velocity in the cabinet and the cooler performance of the cabinet have been investigated. Ansys Fluent V16 [19] commercial software has been used to create the mesh file and to perform the numerical solution. The mesh structure of the evaporator region has been formed from hexahedral grids and is shown in Figure 5.



**Figure 5.** The mesh zone of the evaporator (rear view)

Due to the complex geometry of the fan and the high velocities around it, it is aimed to create cells with a lower skewness value in this region. Since the fan blades are very thin, superficial celling is done instead of volumetric celling. A volume has been created to only contain the fan, and this volume has been

determined as the “moving reference frame”. With this method, the rotation of the fan is simulated. All of the grid cells created in all the fans are of a tetrahedral type and the mesh zone is shown in Figure 6. In addition, the size of the fan surface and the surrounding elements is given as 0.8mm, which will be lower than the other regions.



Figure 6. The mesh zone of the [19]

The main criterion in determining the quality of the solution mesh of the model is the skewness value. The high skewness value creates the risk of making wrong solutions. On the other hand, in Fluent software, this value should not be greater than 0.95 for a solution to be made. As seen in Table 1, in this study, there were no cells with skewness in the range of 0.9-1.0, which is the maximum critical range. The highest skewness is 0.863 and is located in the fan region. In this case, it can be said that the solution network is of good quality.

Table 1. Distribution of the number of elements according to the skewness value

Skewness range	Number of elements	Percent
0 ----- 0.1	1314205	31.12
0.1 ----- 0.2	374623	8.87
0.2 ----- 0.3	675552	16
0.3 ----- 0.4	1054824	24.98
0.4 ----- 0.5	424808	10.06
0.5 ----- 0.6	248883	5.89
0.6 ----- 0.7	109773	2.6
0.7 ----- 0.8	19514	0.46
0.8 ----- 0.9	44	0
0.9 ----- 1	0	0

After the mesh file created for this study is finished, a thorough assessment of orthogonal alignment has been carried out to confirm its accuracy. The precision and fluidity of the geometric relationships between the mesh network's parts are referred to as the orthogonal quality. An increased orthogonal quality indicates better element alignment and a more seamless connection [20]. This, in turn, establishes a foundation for more exact and dependable analytical outcomes. Within the domain of finite element analysis, orthogonal quality is important since a poor mesh network can lead to erroneous conclusions and forecasts. To clarify, a mesh network with low orthogonal quality could ignore or distort important information like load distribution or stress concentration. Closeness to 1 in the maximum values denotes an excellent orthogonal quality, suggesting that the pieces connect at around 90-degree angles [21]. This closeness to unity is a desired quality for accuracy in findings, highlighting the significance of well-connected element surfaces. Table 2 provides the orthogonal quality range values of the generated grids.

Table 2. Distribution of the number of elements according to the orthogonal quality value

Orthogonal quality range	Number of elements	Percent
0 ----- 0.1	0	0
0.1 ----- 0.2	0	0
0.2 ----- 0.3	0	0
0.3 ----- 0.4	0	0
0.4 ----- 0.5	0	0
0.5 ----- 0.6	109777	2.6
0.6 ----- 0.7	870623	20.62
0.7 ----- 0.8	1111712	26.33
0.8 ----- 0.9	1221912	28.94
0.9 ----- 1	908201	21.51

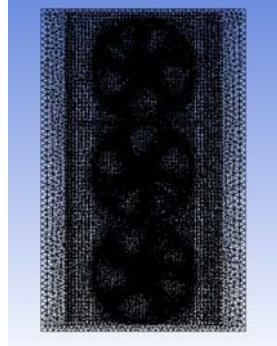
The mesh file created for the blast freezer model exhibits an appropriate orthogonal quality range of its grids when Table 2 is examined.

In the CFD analysis, air was selected as the working fluid for the blast freezer. The reason is harmless to the environment and safer than other refrigerants. At the same time, the cost of air is much cheaper than other working fluids. The physical properties of air are provided in Table 3.

**Table 3.** Properties of the air

Properties	Value
Density	1.177 (kg/m <sup>3</sup> )
Specific heat capacity	1004 (J/kg.K)
Thermal conductivity	0.02625 (W/m.K)
Dynamic viscosity	1.845E-05 (kg/m.s)

4.2 million grids have been used to create the entire mesh structure of the blast freezer. The mesh structure is shown in Figure 7. The computer used in the analysis is eight-core, its processor is Intel Core i7 and its speed is 3.70 GHZ.



**Figure 7.** Mesh structure of unloaded blast freezer

Real experimental conditions are given as boundary conditions in the solution method of the models. The following Navier-Stokes equations are used in this technique. In the next steps, Energy equations have been used for temperature analysis. k-ε realizable is used as turbulence model. In this model, "k" denotes the kinetic energy of the turbulence, and "ε" denotes the propagation of the turbulence. In order to obtain more precise results in CFD analysis, the second-order upwind spatial method is generally preferred. In this study, the first-order upwind spatial method has been preferred to save solution time. At the beginning of this study, two methods have been tried separately and it has been seen that there was no difference between the results. For this reason, there has been no problem in using the first-order upwind spatial method to spend less time on solutions. The equations of the turbulence model are as follows.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (2)$$

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (3)$$

$$\eta = S \frac{k}{\epsilon} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (5)$$

1500 rpm, which was measured in the experimental results, has been accepted as the number of revolutions of the fan. In addition, the sidewalls, the walls of the place where the blast freezer is located, and the upper and lower sides are applied as boundary conditions. For this, the side, rear, and upper walls have been applied as a boundary condition with a 6 cm insulation and a 14 cm insulation for the lower wall. The

outdoor temperature has been taken as +35 °C as in the experimental analysis. Since the analysis aims to measure the cooling status at the end of the 60, 120, 180, and 240 minutes periods of the blast freezer, it has been run depending on time. The transient scheme has been used in Fluent.

### 3.2. CFD Application for Full-loaded Blast Freezer

Package models representing foods have been created in accordance with the package layout plan and the properties of the materials have been applied to the CFD program as a boundary condition. The dimensions of the packages are shown in Figure 8 and their placement in Figure 9.

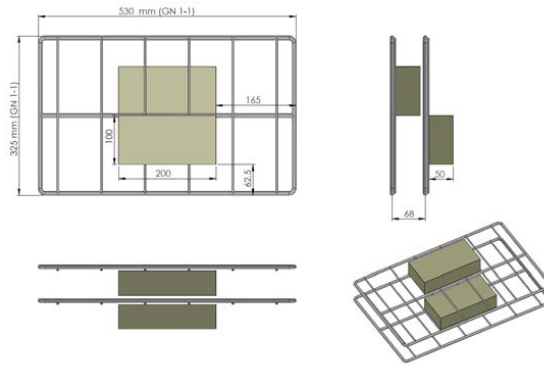


Figure 8. CAD drawing of packages tested

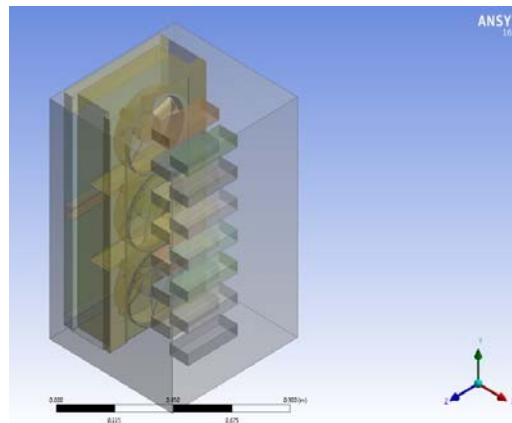


Figure 9. Simplified solid model of blast freezer with full loaded package

The mesh structure and boundary conditions for the model are presumed to be consistent with those utilized in the analysis of the unloaded freezer. The mesh structure used in the analysis is shown in Figure 10.

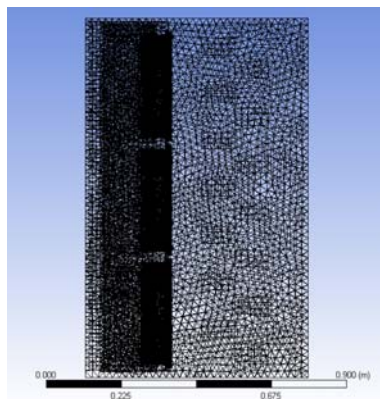


Figure 10. Mesh structure of full loaded blast freezer



## 4. RESULTS

### 4.1. CFD Application for Unloaded Blast Freezer

The rotation of the fan has been investigated in the analysis. Depending on the rotation direction of the motor, the fan rotates counterclockwise when viewed from the opposite side of the cabinet. As seen in Figure 11, the flow has been more intense around the fans. Especially in the middle fan, it is more concentrated than the other fans. This is because the middle fan is open from both sides (top and bottom). In the analyzes made, it has been observed that the region with the highest air flow rate has been the region of the middle fan. In this region, the velocity reaches 31 m/s.

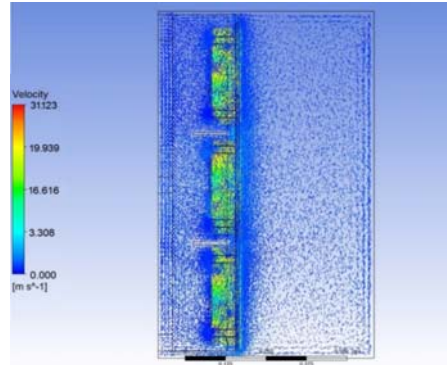


Figure 11. Velocity distribution in the unloaded blast freezer

### 4.2. CFD Application for Full-loaded Blast Freezer

In the analyzes made, it has been observed that the region with the highest air flow rate has been the fan region. In this region, the velocity reaches 26 m/s. The effect of counterclockwise rotation of the fan is observed in Figure 12.

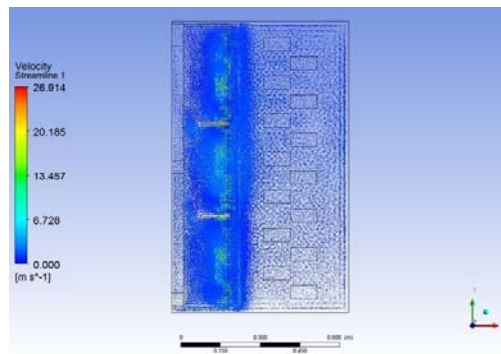


Figure 12. Velocity distribution in the full loaded blast freezer

Tables 4 and 5 show the maximum velocity distribution in the X, Y, and Z directions at the outlet and inlet points of the middle fan. The velocity value at the outlet of the fan has been calculated in the experimental analysis.

Table 4. Maximum velocity components at the outlet of the middle fan

Velocity in the X direction	Velocity in the Y direction	Velocity in the Z direction
24,5 m/s	8.8 m/s	4.3 m/s

Table 5. Maximum velocity components at the inlet of the middle fan

Velocity in the X direction	Velocity in the Y direction	Velocity in the Z direction
6.6 m/s	2.1 m/s	1.8 m/s

Another issue examined in the study is the temperatures of the packages in the blast freezer. The temperature distribution of the packages observed in the experimental study is shown in Table 6. The initial temperatures are the values measured for the packages at the moment the blast freezer starts operating. The final temperatures are the values measured from the packages when the blast freezer stops. In addition, the temperature is recorded every 60 minutes. Temp1 denotes the temperature of the package positioned on the uppermost shelf of the freezer, whereas Temp14 signifies the temperature of the package located on the lowest shelf.

**Table 6.** The temperatures of the packages taken from every 60 minutes in the experimental results

Package number	Initial temp. (°C)	60 min. (°C)	120 min. (°C)	180 min. (°C)	240 min. (°C)
1	71.1	0.2	-27.6	-35.8	-36
2	69.2	0.3	-27.4	-35.4	-36
3	69.8	0.2	-27.6	-35.8	-36.9
4	71	0.3	-27.4	-36	-36.8
5	69.9	0.2	-27.4	-36.1	-37.1
6	75	0.4	-27.6	-36.7	-37.4
7	75.5	0.2	-27.8	-36.8	-37.7
8	74.2	0.3	-27.4	-36.4	-35.9
9	76.1	0.4	-27.6	-35.9	-36.7
10	75.3	0.3	-27.3	-35.8	-36.9
11	77.8	0.4	-27.4	-35.8	-36.9
12	76.6	0.3	-27.4	-36.1	-36.4
13	78	0.4	-27.4	-36.2	-36
14	78.2	0.4	-27.4	-35	-35.4

When the experimental results are examined it has been observed that the package on the bottom shelf is the hottest and the package on the middle shelf is the coldest. Similar results have been also found in CFD analysis. In the packages located on the middle shelves, more cooling has been observed with the effect of both the middle fan and the lower and upper fans. The CFD results of the same situation are shown in Table 7. A comparison of experimental and CFD results is shown in Table 8.

**Table 7.** The temperatures of the packages taken from every 60 minutes in the CFD results

Package number	Initial temp. (°C)	60 min. (°C)	120 min. (°C)	180 min. (°C)	240 min. (°C)
1	71.1	0.0	-28.6	-37	-37.1
2	69.2	-0.1	-28.4	-36.5	-37.3
3	69.8	0.0	-28.6	-36.8	-37.6
4	71	0.1	-28.2	-36.8	-37.7
5	69.9	0.0	-27.9	-37	-37.8
6	75	0.0	-28.1	-36.2	-37.8
7	75.5	-0.2	-28.9	-37.1	-37.9
8	74.2	-0.1	-28.2	-36.9	-36.7
9	76.1	0.1	-28.5	-36.7	-37.7
10	75.3	0.1	-28.4	-36.9	-37.3
11	77.8	-0.1	-27.9	-36.2	-37.7
12	76.6	0.1	-28.1	-36.9	-37.5
13	78	0.3	-28.2	-36.9	-36.9
14	78.2	0.2	-28	-36.2	-36.4

**Table 8.** Comparison of experimental and CFD results

Package number	60 min. ΔT (°C)	120 min. ΔT (°C)	180 min. ΔT (°C)	Final temp. ΔT (°C)
1	0.2	1	1.2	1.1
2	0.4	1	1.1	1.3
3	0.2	1	1	0.7
4	0.2	0.8	0.8	0.9
5	0.2	0.5	1.5	0.8
6	0.4	0.3	0.5	0.1
7	0.4	1.1	0.3	0.5
8	0.4	0.8	0.5	1.1
9	0.3	1.1	0.8	1
10	0.2	1.1	1.1	0.4
11	0.5	0.5	0.4	0.8
12	0.2	0.7	0.8	1.1
13	0.1	0.8	0.7	0.9
14	0.2	0.6	1.2	1

Upon scrutinizing the average temperatures of the packages, it is evident that congruent outcomes are observed in the CFD results. The examination of individual packages reveals an average discrepancy of approximately 0.7 °C between the experimental and CFD results. This implies a close alignment between the CFD and experimental outcomes, thereby instilling confidence in the reliability of the CFD methodology. Consequently, the potential to predict blast freezer results without resorting to experimental procedures is feasible, achieved by manipulating boundary and initial conditions within the CFD analysis. Figures 13, 14, 15, and 16 visually present the package results derived from both experimental and CFD analyses at the conclusion of each 60-minute interval, distinctly showcasing the proximity of results obtained from both methodologies.

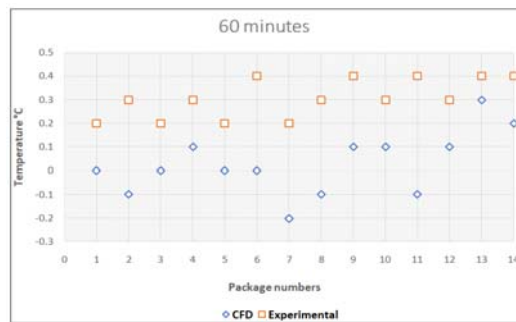


Figure 13. Comparison of experimental and CFD results (after 60 minutes)

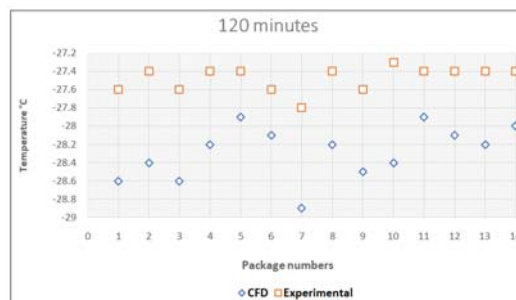


Figure 14. Comparison of experimental and CFD results (after 120 minutes)

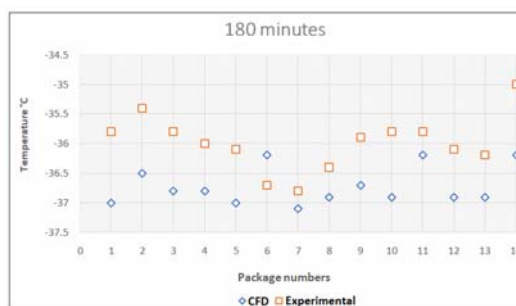


Figure 15. Comparison of experimental and CFD results (after 180 minutes)

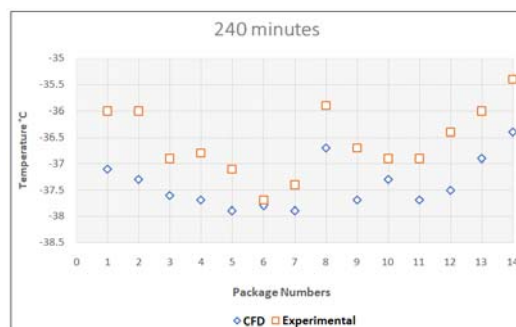


Figure 16. Comparison of experimental and CFD results (after 240 minutes)

## 5. CONCLUSIONS

This investigation involved a comparative analysis between numerical simulations and experimental findings for a blast freezer. A comprehensive CAD model of the blast freezer was developed, and its simplified version was subjected to Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis. Airflow patterns were examined in the unloaded blast freezer, revealing the highest airflow velocity at the fan outlets. Subsequently, the blast freezer was loaded with one package on each of the 14 shelves, and a new mesh was generated. The mass, momentum, and energy equations were then solved to address the heat transfer problem. The resulting maximum temperatures of the packages were compared with experimental data. Notably, the temperatures obtained through CFD analyses were, on average, 0.6 °C lower than those observed experimentally. Given the negligible nature of this difference, the validity of the CFD analyses was affirmed. Future extensions of this research could involve employing different turbulence models for further analyses.

## 6. ACKNOWLEDGEMENTS

This study extends its gratitude to Prof. Dr. Melike Nikbay for her invaluable contributions, enriched by her experience.

## 7. REFERENCES

1. Rodezno, E., Sundararajan, S., Solval, K., Chotiko, A., Li, J., Zhang, J., Alfaro, L., Bankston, D., Sathivel, S., 2013. Cryogenic and air blast freezing techniques and their effect on the quality of catfish fillets. *Food Science and Technology*, 54, 377-382.
2. Dampsey, P., Bansal, P., 2012. The art of air-blast freezing design and efficiency considerations. *Applied Thermal Engineering Journal*, 41, 71-83.
3. Badri, D., Toubanc, C., Rouaud, O., Havet, M., 2021. Review on frosting, defrosting and frost management techniques in industrial food freezers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111545.
4. Angane, M., Guptab, S., Fletcher, G., Summers, G., Hedderley, D., Quek, S., 2020. Effect of air blast freezing and frozen storage on *Escherichia coli* survival, n-3 polyunsaturated fatty acid concentration and microstructure of Greenshell mussels. *Food Control*, 115, 107284.
5. Tan, F., Fok, S., 2009. Freezing of tilapia fillets in an air blast freezer. *International Journal of Food Science and Technology*, 44, 1619-1625.
6. Pakdil, M., 2011. Investigation of temperature distribution and airflow in the freezer of no frost problem. Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Istanbul Technical University, 95.
7. Alonso, M., Andersen, T., 2011. Improvements of airflow distribution in a freezing tunnel using Airpak. 11th International Congress on Engineering and Food, New York, USA.
8. Shih, T., Liou, W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, J., 2011. Numerical study of heat transfer performance on the air side of evaporator for a domestic freezer. *Computer Fluids*, 24(13), 227-238.
9. Chourasia, M., Goswami, T., 2007. Steady state CFD modeling of airflow, heat transfer and moisture loss in a commercial potato cold store. *International Journal of Refrigeration*, 30, 672-689.
10. Amara, S., Laguerre, O., Mojtabi, C., Latrigne, B., Flick, D., 2008. PIV measurement of the flow field in a domestic freezer model comparison with 3D simulations. *International Journal of Refrigeration*, 31, 1328-1340.
11. Ding, G., Qiao, H., Lu, Z., 2004. Ways to improve thermal uniformity inside a freezer. *Applied Thermal Engineering*, 24, 1827-1840.
12. Mirade, P., Kondjoyan, A., Daudin, J., 2012. Three-dimensional CFD calculations for designing large food chillers. *Computers and Electronics in Agriculture Journal*, 34, 67-88.
13. Lacerda, V., Melo, C., Barbosa, J., Duarte, P., 2015. Measurements of the air flow field in the freezer compartment of a top mount no-frost domestic freezer: the effect of temperature. *International Journal of Refrigeration*, 28, 774-783.
14. Poyraz, O., 2011. Investigation of the parameters affecting the working rate in the freezer compartment of freezers. Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Y.T.U., 125.
15. Panchal, R., Jadhav, G., Shinde, G., Dhatunde, S., Nikam, N., Mane, P., 2017. Design development of blast freezer. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 4(1), 142-159.

16. Tang, Z., Wu, C., Liu, C., Xu, X., Liu, J., 2021. Thermodynamic analysis and comparison of a novel dual-ejector based organic flash combined power and refrigeration cycle driven by the low-grade heat source. *Energy Conversion and Management*, 239, 114205.
17. Boonsumrej, S., Chaiwanichsiri, S., Tantratian, S., Suzuki, T., Takai, R., 2017. Effects of freezing and thawing on the quality changes of tiger shrimp (*Penaeus monodon*) frozen by air-blast and cryogenic freezing. *Journal of Food Engineering*, 80, 292-299.
18. Chourot, J., Macchi, H., Fournaison, L., Guilpart, J., 2003. Technical and economical model for the freezing cost comparison of immersion, cryomechanical and air blast freezing processes. *Energy Conversion and Management*, 44, 559-571.
19. ANSYS, 2016, Inc. ANSYS Fluent V16 User's Guide.
20. Jiang, X., Zhou, C., Su, J., Jin, G., Shen, R., 2023. Injection parameter design to improve the high-speed gear heat dissipation: CFD simulation and regression orthogonal experiment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 128, 102795.
21. Chen, J., Zheng, Y., Zhang, L., He, G., Zou, Y., Xiao, Z., 2022. Optimization of geometric parameters of hydraulic turbine runner in turbine mode based on the orthogonal test method and CFD. *Energy Reports*, 8, 14476-14487.





## Time Series Installed Capacity Forecasting with Deep Learning Approach for Türkiye

Zeynep ALTIPARMAK <sup>1,a</sup>, İnanet Özge AKSU <sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Computer and Informatics,  
Department of Artificial Intelligence Engineering, Adana, Türkiye

<sup>a</sup>ORCID: 0009-0005-5887-0898; <sup>b</sup>ORCID: 0000-0002-0963-2982

### Article Info

Received : 25.07.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560142

### Corresponding Author

İnanet Özge AKSU

oaksu@atu.edu.tr

### Keywords

Deep learning

Future prediction

Installed capacity

Time series

**How to cite:** ALTIPARMAK, Z., AKSU, İ.Ö., (2024). Time Series Installed Capacity Forecasting with Deep Learning Approach for Türkiye. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 709-718.

### ABSTRACT

Deep learning methods have been developed to solve different problems due to the complex nature of real-world problems. Accurate future forecasting of a country's installed capacity is also crucial for developing a good energy sustainability strategy for the country. In this paper, three different time series forecasting methods are used for forward forecasting of installed capacity: Gated Recurrent Unit (GRU), Convolutional Neural Network (CNN) and Long Short-Term Memory (LSTM). Installed power values for the years 1923-2021 were used in the study. Then, future forecasts are made until 2030. The GRU model achieved the best RMSE in the testing phase compared to the LSTM and CNN models. Although CNN is successful during training, it has a higher RMSE during testing compared to GRU. While all models predict a potential increase in electricity capacity by 2030, GRU and LSTM predict a more significant increase up to this point compared to CNN.

## Türkiye için Derin Öğrenme Yaklaşımı ile Zaman Serisi Kurulu Kapasite Tahmini

### Makale Bilgileri

Geliş : 25.07.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560142

### Sorumlu Yazar

İnanet Özge AKSU

oaksu@atu.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Derin öğrenme

İleri tahmin

Kurulu güç

Zaman serileri

**Atıf şekli:** ALTIPARMAK, Z., AKSU, İ.Ö., (2024). Time Series Installed Capacity Forecasting with Deep Learning Approach for Türkiye. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 709-718.

### ÖZ

Gerçek dünya problemlerinin karmaşık yapısı nedeniyle farklı problemleri çözmek için derin öğrenme yöntemleri geliştirilmiştir. Ülkelere ait kurulu gücün doğru şekilde ileri tahmini de ülkenin iyi bir enerji sürdürülebilirliği stratejisi geliştirilmesi için büyük önem taşımaktadır. Bu makalede, kurulu gücün ileri tahmini için üç farklı zaman serisi tahmin yöntemi kullanılmıştır: Kapılı Tekrarlayan Birim (GRU), Evrişimli Sinir Ağı (CNN) ve Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM). Çalışmada 1923-2021 yıllarına ait kurulu güç değerleri kullanılmıştır. Daha sonra 2030 yılına kadar gelecek tahminleri yapılmıştır. GRU modeli, test aşamasında LSTM ve CNN modellerine göre, en iyi RMSE'yi elde ederek en doğru model olarak ortaya çıkmıştır. CNN eğitim sırasında başarılı olmasına rağmen, test sırasında GRU'ya kıyasla daha yüksek RMSE sergilemiştir. Tüm modeller 2030 yılına kadar elektrik kapasitesinde potansiyel bir artış öngörürken GRU ve LSTM, CNN'e kıyasla bu noktaya kadar daha belirgin bir artış öngörmüştür.

## 1. INTRODUCTION

Accurate forecasting of energy production and consumption is crucial for effective energy planning and management. Artificial Neural Networks (ANNs) are preferred for such forecasting problems due to their ability to model complex relationships in data. However, the advent of deep learning techniques has significantly advanced this field. Deep learning methods, including Convolutional Neural Networks (CNNs), Long Short-Term Memory (LSTM) networks, and Gated Recurrent Units (GRU), have demonstrated superior performance in handling complex and high-dimensional data, leading to more accurate and robust forecasting models. Bilgili et al. [1] focused on forecasting renewable energy generation (REG) using two methods: ANFIS with FCM, and LSTM neural networks. Both models performed well, with LSTM showing particular strength in handling daily fluctuations in energy data. The study highlights the effectiveness of these methods for short-term REG forecasting in Türkiye.

Similarly, Sun et al. [2] used RNN and CNN models for real-time turbine power forecasting with 719 days of DCS data. The RNN model provided the best balance of accuracy and efficiency, outperforming traditional models. Their findings highlight the potential of deep learning for enhancing turbine power prediction and aiding in turbine control and predictive maintenance. Expanding on these approaches, Wan et al. [3] proposed a CNN-LSTM model that combines CNN and LSTM methods for short-term electrical load forecasting. In addition, they improved their work to deal with the information loss in long time series data and added attention mechanisms. As a result, the proposed model has led to improvements in cogeneration systems. When the results are analyzed, it is evident that better prediction results are obtained compared to traditional LSTM models. Meanwhile, Agga et al. [4] introduced a CNN-LSTM model for PV power forecasting in Rabat, Morocco, combining CNN's spatial analysis with LSTM's temporal analysis. This hybrid approach outperformed traditional methods, offering improved accuracy and stability, with potential applications in optimizing power systems and future research in wind power and energy cost forecasting.

Chang et al. [5] introduced the TESDL method for forecasting renewable energy, enhancing the integration of large-scale photovoltaics into the grid. Their deep learning-based model improved accuracy and managed energy volatility effectively, offering better efficiency and robustness, which could reduce costs for photovoltaic farms. Anu Shalini et al. [6] developed a grid-connected hybrid system with solar and wind inputs, using a modified Z source converter and also battery storage. They employed a CNN-BiLSTM deep learning algorithm for power prediction, achieving low harmonic distortion and consistent power supply. The ANN controller and SVPWM method were most effective in reducing harmonic currents and managing energy. Al-Ali et al. [7] developed a solar energy forecasting model using a hybrid CNN-LSTM-Transformer approach. They enhanced accuracy and reduced complexity through clustering and self-organizing maps for feature selection. Their model outperformed existing methods, showing high accuracy in solar power predictions and potential for long-term forecasting and broader energy applications. Additionally, Sözen et al. [8] developed equations for prediction of Türkiye's net energy consumption (NEC) using Artificial Neural Network. They utilized two models. Both models showed high accuracy in training and testing, indicating that ANN can effectively predict future energy consumption. The study highlights the flexibility of the ANN technique and its potential to aid in energy policy planning by providing mathematical equations for future consumption trends. Warkad et al. [9] developed an ANN-based method for predicting day-ahead electricity nodal prices, improving decision-making by managing price volatility. In the IEEE 30-bus system and Indian market simulations, the approach demonstrated accurate predictions using a multilayer feed-forward neural network with back propagation. The Levenberg-Marquardt algorithm provided fast convergence and low errors, making it practical for developing countries to enhance market strategies.

Olca et al. [10] developed models to predict how environmental factors impact solar power plants (SPPs). Using data from a Turkish solar plant, they applied Random Forest Regression (RFR) and LSTM networks. The LSTM model outperformed RFR in accuracy, showing better capability in handling complex dependencies, thus improving the reliability of energy forecasts in SPPs. Aksu [11] used the LSTM networks method to predict short-term solar irradiance in Türkiye, highlighting its solar potential. The study compared LSTM with ANN and found that LSTM offered more accurate predictions, especially at peak values. Aksu suggested that future research could benefit from combining LSTM with CNN for improved accuracy.

Installed power forecasting in the energy sector plays an important role in strategic planning and operational decisions. Recently, a lot of work has been done on advanced forecasting techniques to improve forecasting accuracy in this area. Luo et al. [12] introduced a new grey prediction model that enhanced the forecasting of wind power installed capacity (WPIC). They combined Particle Swarm Optimization (PSO) with parameter optimization to improve accuracy. Their model outperformed traditional grey models, although they noted some limitations, including the influence of abnormal data points and the need for further parameter refinement. Li et al. [13] compared four forecasting models for coal-fired power installed capacity in China: ARIMA, NMGM, GM-ARIMA and MGM. Their results showed high forecasting accuracy, with a predicted slower growth rate but higher annual added capacity compared to the previous decade. They recommended improving thermal power utilization and increasing renewable energy to balance growth and reduce carbon emissions. Chen et al. [14] introduced a novel grey model with fractional order accumulation, abbreviated as FOGM (1,1), to accurately forecast China's installed generation capacity, which includes wind power, hydroelectric, nuclear, and thermal. After calibrating model using data from 2000 to 2015, they used it to predict the capacity from 2016 to 2020. Their findings suggest that the FOGM (1,1) model is well-suited for this task, showing that wind power capacity in China is expected to rapidly increase in the coming decades, playing an increasingly significant role in the energy mix.

Recently, deep learning methods have been frequently used for solving complex systems. In this study, three different methods popular in the field of deep learning are used to solve a real-time problem. The LSTM method is one of the recurrent method types. The advantage of this method is that it can memorize previous states. This allows it to learn long-term dependencies and model structures. Compared to the LSTM, the GRU method has a faster training time and lower computational effort. The CNN method is successful in capturing similar patterns in consecutive time steps. This study builds on these developments by investigating deep learning techniques to estimate Türkiye's installed capacity. By incorporating and extending methods used in recent studies, we aim to enhance the accuracy and reliability of energy forecasts, thereby contributing to more effective energy planning and management.

## 2. METHODS

### 2.1. Long Short-Term Memory (LSTM)

Long Short-Term Memory (LSTM) networks represent a specialized approach within deep learning for handling and modeling sequential data. Unlike standard Recurrent Neural Networks (RNNs), which often struggle with long-term dependencies, LSTMs are designed to address these challenges effectively. The fundamental unit of an LSTM is the memory cell, which preserves a vector of internal state information to retain past data. Each memory cell is controlled by three distinct gates: the forget gate, which determines the portion of the past data to be discarded; the input gate, which controls the extent to which new data is incorporated into the memory cell; and the output gate, which manages how the stored information is used to produce the final output. This structure enables LSTMs to excel in tasks such as time series prediction, language modeling, text classification, and translation. As a result, LSTMs have become integral to both advanced research and practical applications in deep learning. LSTM networks rely on several key components that collaboratively manage and process sequential data. These components include the input gate, forget gate, hidden state, cell state, candidate cell state and output gate. Each component plays a role in maintaining and updating the network's memory, which is a key building block for the method's success.

#### *Forget gate*

The forget gate decides how much influence past information has on the cell state. The extent to which this information is removed from the cell state is decided in this gate structure. It outputs a value between 0 and 1, determining how much of the previous memory is retained. The mathematical expression for the forget gate is given by:

$$f_t = \sigma(W_{x_f}x_t + W_{h_f}h_{t-1} + b_f) \quad (1)$$

here,  $f_t$  represents the output of the forget gate,  $W_{x_f}$ ,  $W_{h_f}$  and  $b_f$  are the weight and bias parameters,  $h_{t-1}$  is the hidden state from the previous time step, and  $x_t$  is the current input.  $\sigma$  is a sigmoid function,  $\sigma = 1$  denotes keeping something, and  $\sigma = 0$  denotes getting rid of it.

### Input gate

The input gate manages the amount of new information that is integrated into the cell state. It outputs a value between 0 and 1, specifying the proportion of new data to be added. The mathematical expression for the input gate is:

$$i_t = \sigma(W_{xi} x_t + W_{hi} h_{t-1} + b_i) \quad (2)$$

where  $i_t$  represents the output of the input gate, and  $W_{xi}$ ,  $W_{hi}$  and  $b_i$  are the corresponding weight and bias parameters.

### Candidate cell state

This component determines which new information will be incorporated into the cell state. It combines new data with the input gate's output to update the memory. The formula for the candidate cell state is:

$$z_t = \tan h(W_{xz} x_t + W_{hz} h_{t-1} + b_z) \quad (3)$$

here  $z_t$  represents the candidate cell state, while  $W_{xz}$ ,  $W_{hz}$  and  $b_z$  are the weight and bias parameters involved in the memory update process.

### Cell state

The cell state represents the updated memory, which is computed by combining the previous cell state, the input gate's contribution, the candidate cell state and the forget gate's output. The formula for the updated cell state is:

$$c_t = f_t * c_{t-1} + i_t * z_t \quad (4)$$

where  $c_t$  denotes the updated cell state and  $c_{t-1}$  is the previous cell state.

### Output gate

The output gate determines how the cell state information is used to generate the network's output. It produces a value between 0 and 1, which influences the final output. The formula for the output gate is:

$$o_t = \sigma(W_{xo} x_t + W_{ho} h_{t-1} + b_o) \quad (5)$$

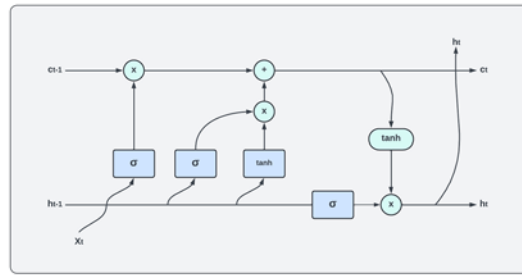
where  $o_t$  is the output of the output gate, and  $W_{xo}$ ,  $W_{ho}$  and  $b_o$  are the weight and bias parameters.

### Hidden state

The hidden state conveys the information from the cell state to the subsequent layers of the network. It is computed using:

$$h_t = o_t * \tan h(c_t) \quad (6)$$

where  $h_t$  represents the hidden state at the current time step. The structure of the LSTM method is illustrated in Figure 1. LSTM is designed to eliminate the problem of vanishing gradients, which is a major problem for RNNs. To solve this problem, the method uses gates and a special cell structure as shown in the figure. The equations of the gates are given visually in the figure, which increases the comprehensibility of the structure of the method. These gates and the cell state in the structure of the LSTM enable the model to process long-term information efficiently and effectively in the learning process. These features make the LSTM a powerful tool for sequential data and time series analysis.

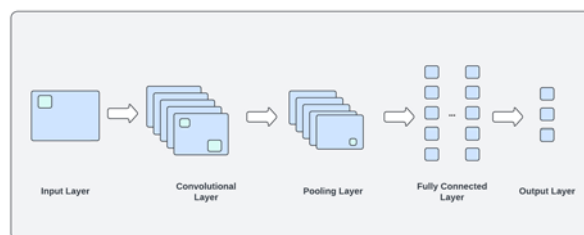


**Figure 1.** The structure of the Long Short-Term Memory (LSTM) neural network.

## 2.2. Convolutional Neural Networks (CNN)

Convolutional Neural Networks (CNNs) are a specialized class of deep neural networks designed to process and analyze spatial data. They excel in tasks such as image recognition and classification due to their ability to automatically and adaptively learn spatial hierarchies of features. A typical CNN comprises several core components: convolutional layers, which apply learnable filters to extract spatial patterns; activation functions, such as ReLU, which introduce non-linearity to improve learning; pooling layers, which downsample feature maps to reduce dimensionality and enhance computational efficiency; and fully connected layers, which integrate learned features for high-level reasoning and classification. By leveraging these components, CNNs have revolutionized computer vision and are also making significant strides in other fields, such as audio processing and natural language understanding. The basic structure of the CNN is shown in Figure 2. The overall architecture of a CNN structure usually consists of a number of layers, where each layer has the ability to learn and extract different aspects of the data. The basic components of a CNN, as shown in the figure, include: pooling layers, fully connected layers and convolutional layers. Convolutional layers learn local features by applying filters (kernels) on the input data. These processes capture patterns and features in each region of the data. Pooling layers reduce the feature maps from the convolutional layers and summarize the most important information. This reduces the computational cost of the model and helps prevent overlearning (overfitting). Fully connected layers use high-level features for classification or regression tasks. These layers make the final predictions using the network's learned features.

This architecture of CNN is designed to work effectively with high-dimensional inputs such as visual data. In particular, convolutional layers are powerful for capturing local relationships within the data, allowing the network to learn various features of the images. Pooling layers improve computational efficiency, by reducing the data size and strengthening the generalization capacity of the model. Fully connected layers perform final classification or prediction using these learned features. These layer structures of the CNN model enable the network to extract features with high performance, making the method applicable in many different fields.



**Figure 2.** Basic structure of a Convolutional Neural Network (CNN).

## 2.3. Gated Recurrent Units (GRU)

The Gated Recurrent Unit (GRU) is a simplified variant of the Long Short-Term Memory (LSTM) network, designed to address the vanishing gradient problem and improve the efficiency of RNNs in modeling sequential data. The GRU accomplishes this through its gating mechanisms, specifically the update gate and the reset gate, which manage the flow of information through the network. The following equations describe the functioning of these gates and the overall update of the hidden state in the GRU:



**Update Gate**

$$f_t = \sigma(W_{xf} x_t + W_{hf} h_{t-1} + b_f) \tag{7}$$

The update gate  $f_t$  determines the extent to which the previous hidden state  $h_{t-1}$  should be preserved and passed to the current hidden state  $h_t$ . It combines the current input  $x_t$  with the previous hidden state  $h_{t-1}$ , applying a sigmoid activation function  $\sigma$  to regulate the update. Where,  $W_{xf}$  and  $W_{hf}$  are the weight parameters, and  $b_f$  is the bias parameter.

**Reset Gate**

$$r_t = \sigma(W_{xr} x_t + W_{hr} h_{t-1} + b_r) \tag{8}$$

The reset gate  $r_t$  controls the degree to which the previous hidden state  $h_{t-1}$  contributes to the candidate activation  $z_t$ . By modulating the influence of the past state,  $r_t$  allows the model to effectively "forget" irrelevant information, making room for more pertinent data. Here  $W_{xr}$  and  $W_{hr}$  are the weight parameters, and  $b_r$  is the bias parameter.

**Candidate Activation**

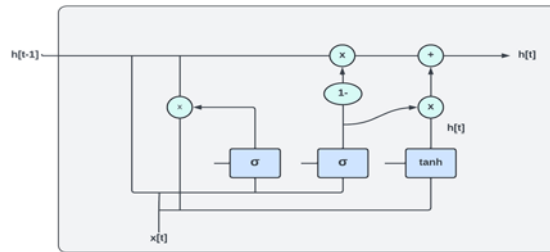
$$z_t = \tanh(W_{xz} x_t + W_{hz}(r_t * h_{t-1}) + b_z) \tag{9}$$

The candidate activation  $z_t$  represents the proposed update to the hidden state based on the current input  $x_t$  and the reset gate's modulation of the previous hidden state. The hyperbolic tangent function  $\tanh$  is applied to ensure that the candidate activation values remain within a bounded range. Where,  $W_{xz}$  and  $W_{hz}$  are the weight parameters, and  $b_z$  is the bias parameter.

**Hidden State Update**

$$h_t = f_t * h_{t-1} + (1 - f_t) * z_t \tag{10}$$

Finally, the hidden state  $h_t$  is updated by a linear interpolation between the previous hidden state  $h_{t-1}$  and the candidate activation  $z_t$ , controlled by the update gate  $f_t$ . This equation ensures that the network can retain relevant past information while incorporating new information as needed. The architecture of the GRU cell is demonstrated in Figure 3. As shown in the figure, the GRU architecture is similar to the LSTM architecture. GRU's cell architecture, together with the gates that control how information is stored and updated, allows for learning long-term dependencies, as in the LSTM method. However, GRU's structure is designed to provide simpler and faster computations, making it preferable for large data sets and time series problems.



**Figure 3.** Structure of a GRU cell

**3. RESULTS AND DISCUSSIONS**

In this study, we analyzed the performance of GRU, CNN, and LSTM models on a dataset [15] of Türkiye's annual installed capacity spanning from 1923 to 2021, consisting of 99 observations. The dataset was preprocessed by applying 0-1 normalization, scaling each value between 0 and 1 using the formula:

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

Dataset was divided into 79 data points (approximately 80%) for training and 20 (approximately 20%) for testing, with predictions extended 9 steps ahead to 2030. To effectively capture temporal dependencies, a look-back period of 3 was utilized, meaning that each model predicted future values based on the three preceding data points, resulting in the first three data points being excluded from the predictions. As given in Table 1, the results revealed that the GRU model achieved the lowest RMSE during testing, with a value of 2.51, outperforming both CNN and LSTM. The CNN model had an RMSE of 5.02 during testing and performed better during training with an RMSE of 0.49. The LSTM model had the 2.78 RMSE values during testing and 0.74 during training.

**Table 1.** Estimation results using different deep learning methods

Model	RMSE (Training phase)	RMSE (Testing phase)
GRU	0.67	2.51
LSTM	0.74	2.78
CNN	0.49	5.02

These results show that the look-back mechanism significantly improves the model's ability to predict future values. The look-back mechanism is a strategy that allows the model to remember patterns and information from past data. Through this mechanism, the model can better understand and predict current and future situations using past data. Especially in time series analysis, effective processing of historical data plays a critical role in improving the accuracy of future forecasts. Therefore, the capacity of the model to learn long-term dependencies by taking into account historical data directly affects the accuracy of forecasts. In particular, the GRU (Gated Recurrent Unit) model shows the highest forecast accuracy among the other models tested, suggesting that the GRU effectively uses this look-back mechanism. The gates in GRU's design are optimized to appropriately store and update historical information. This structural advantage enhances the model's ability to extract meaningful information from historical data and use this information in future predictions. As a result, GRU's high forecast accuracy clearly demonstrates the effectiveness of the look-back mechanism and the model's capacity to learn long-term dependencies. This highlights why the GRU is such a powerful tool in time series data and other sequential data analysis.

**Table 2.** Forecast results for Türkiye's installed capacity data (GW) between 2022 and 2030

Years	CNN	LSTM	GRU
2022	98.45	105.56	105.95
2023	100.67	110.51	111.05
2024	101.95	115.59	116.52
2025	102.90	121.23	122.43
2026	104.30	126.62	128.21
2027	105.49	132.18	134.23
2028	106.69	137.89	140.38
2029	107.93	143.52	146.58
2030	109.14	149.21	152.89

Following the evaluation of the models' performance, the analysis was extended to forecast future electricity capacity up to the year 2030, with the results being presented in Table 2. Lower values were consistently predicted by the CNN model compared to both LSTM and GRU, with the predicted capacity in 2030 reaching 109.14 GW. In contrast, slightly higher future capacities were forecasted by the LSTM and GRU models, with a peak value of 149.21 GW in 2030 being predicted by LSTM, and 152.89 GW in 2030 being predicted by GRU. These predictions, which examine the future trends of electricity generation capacity, reveal a clear development until 2030. Projections by three different models-GRU, LSTM and CNN-generally signal a potential plateau in electricity generation capacity by 2030. However, each of these models exhibits marked differences in forecasts, reflecting annual growth trends in a different way. In the period up to 2030, the observed gradual increase in electricity generation capacity points to an overall sustained growth. However, the trend and pace of this growth differ depending on the structural features of the model used and the way it processes temporal information.

The prediction results of the CNN model for the training and testing phase are shown in Figure 4. The CNN model closely follows the actual data during both the training and testing phases. Forward prediction results up to 2030 are also given in this figure. In the future prediction segment, there is a slight divergence, with the CNN model predicting a more gradual increase in capacity compared to the actual trend. This suggests that while the CNN model captures the general trend effectively, it may slightly underestimate the rate of growth in the later years.

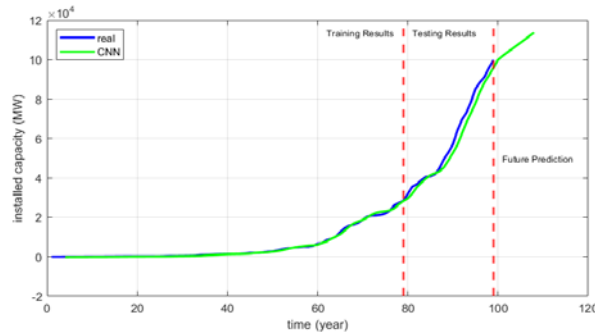


Figure 4. Results for the real and predicted values with CNN model.

Figure 5. illustrates the LSTM model's results. The LSTM model exhibits a strong correlation with the real data throughout the training and testing phases, mirroring the actual trend with high accuracy. In the future prediction period, the LSTM model shows a more pronounced increase in capacity, aligning closely with the observed trend.

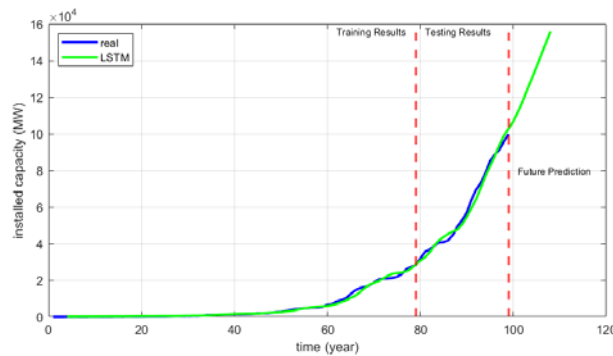


Figure 5. Results for the real and predicted values with LSTM model.

Figure 6. presents the GRU model's performance. The GRU model demonstrates a very close fit to the real data during both training and testing phases, like the LSTM model. In the future prediction section, the GRU model forecasts a continued and consistent increase in capacity, which aligns well with the actual trend. This result suggests that the GRU model not only accurately captures the historical data but also provides reliable future predictions, potentially offering the most stable performance among the three models.

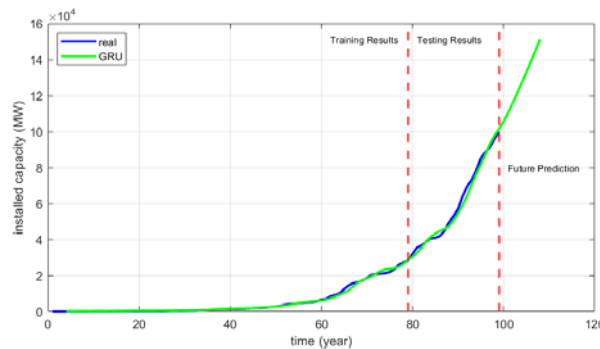


Figure 6. Results for the real and predicted values with GRU model.

The GRU and LSTM models present a steeper growth curve compared to the CNN model, meaning that these models predict a faster capacity growth. This trend is due to the fact that GRU and LSTM process temporal information more intensively and learn long-term dependencies more efficiently. This suggests that these models tend to predict a sharper and faster increase in the future based on past data. The CNN model, on the other hand, processes temporal information differently and tends to better capture local patterns and short-term trends, thus predicting a smoother and more gradual increase. This approach of the CNN allows it to take more explicit account of short-term fluctuations and local characteristics in the time series data, but it is more conservative on long-term trends.

These differences reflect the underlying structures and methodologies of how each model processes temporal information. The GRU and LSTM models predict future growth potential more aggressively, thanks to their capacity to learn long-term dependencies in sequential data, while the CNN model's approach, which prioritizes local characteristics and short-term patterns, leads to a more cautious growth forecast.

While the projections of these three models suggest that a plateau in electricity generation capacity is likely to be reached by 2030, the different trends presented by each model provide important insights for decision makers. Taking these different trends into account can help develop more comprehensive and flexible strategies for energy planning. Models that aggressively predict long-term growth potential may be suitable for scenarios that require faster capacity expansion, while models that predict a smoother ramp-up may be a better guide for risk management and gradual development plans.

#### 4. CONCLUSIONS

This study assessed the forecasting performance of GRU, CNN, and LSTM models on annual electricity capacity data spanning from 1923 to 2021. The GRU model demonstrated the best performance in terms of predictive accuracy, achieving the lowest RMSE during testing. The CNN model, while performing well during training, showed a higher RMSE during testing compared to the other methods.

The results suggest that the look-back mechanism was effective in capturing temporal dependencies, with GRU proving to be the most robust in predicting future values. All models indicated a potential plateau in electricity capacity by 2030, but GRU and LSTM predicted a more pronounced increase leading up to that year, compared to CNN.

This study highlights the importance of selecting appropriate forecasting models based on their performance in capturing both short-term and long-term trends. The GRU model's superior performance underscores its suitability for accurate predictions in long-term capacity forecasting. Future research could build on these findings by incorporating additional data or exploring hybrid models to further enhance forecasting accuracy and address the nuances observed in these predictions.

#### 5. REFERENCES

1. Bilgili, M., Yildirim, A., Ozbek, A., Celebi, K., Ekinci, F., 2021. Long short-term memory (LSTM) neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) approach in modeling renewable electricity generation forecasting. *International Journal of Green Energy*, 18(6), 578-594.
2. Sun, L., Liu, T., Xie, Y., Zhang, D., Xia, X., 2021. Real-time power prediction approach for turbine using deep learning techniques. *Energy*, 233, 121130.
3. Wan, A., Chang, Q., Khalil, A. B., He, J., 2023. Short-term power load forecasting for combined heat and power using CNN-LSTM enhanced by attention mechanism. *Energy*, 282, 128274.
4. Agga, A., Abbou, A., Labbadi, M., El Houm, Y., Ali, I.H.O., 2022. CNN-LSTM: An efficient hybrid deep learning architecture for predicting short-term photovoltaic power production. *Electric Power Systems Research*, 208, 107908.
5. Chang, R., Bai, L., Hsu, C.H., 2021. Solar power generation prediction based on deep learning. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101354.
6. Anu Shalini, T., Sri Revathi, B., 2023. Hybrid power generation forecasting using CNN based BILSTM method for renewable energy systems. *Automatika: Časopis za Automatiku, Mjerenje, Elektroniku, Računarstvo i Komunikacije*, 64(1), 127-144.

7. Al-Ali, E.M., Hajji, Y., Said, Y., Hleili, M., Alanzi, A.M., Laatar, A.H., Atri, M., (2023). Solar energy production forecasting based on a hybrid CNN-LSTM-transformer model. *Mathematics*, 11(3), 676.
8. Sozen, A., Arcaklioglu, E., Ozkaymak, M., 2005. Modelling of Turkey's net energy consumption using artificial neural network. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 22(2-3), 130-136.
9. Warkad, S.B., Khedkar, M.K., Dhole, G.M., 2012. Day-ahead AC-DC OPF-based nodal price prediction by artificial neural network (ANN) in a restructured electricity market. *International Journal of Power and Energy Conversion*, 3(1-2), 54-76.
10. Olcay, K., Tunca, S.G., Özgür, M.A., 2024. Forecasting and performance analysis of energy production in solar power plants using long short-term memory (LSTM) and random forest models. *IEEE Access*.
11. Aksu, İ.Ö., 2023. Next-month prediction of hourly solar irradiance based on long short-term memory network. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(1), 225-232.
12. Luo, X., Zeng, B., Li, H., Zhou, W., 2021. Forecasting Chinese wind power installed capacity using a novel grey model with parameters combination optimization. *Journal of Mathematics*, 2021(1), 9200560.
13. Li, S., Yang, X., Li, R., 2018. Forecasting China's coal power installed capacity: A comparison of MGM, ARIMA, GM-ARIMA, and NMGM models. *Sustainability*, 10(2), 506.
14. Chen, L., Liu, Z., Ma, N., 2019. Prediction and analysis of generation installed capacity in China. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 237(6), 062020, IOP Publishing.
15. Turkish Electricity Transmission Corporation, 2024. <https://www.teias.gov.tr>.

## Farklı Kesit Geometrilerine Sahip İnce Duvarlı Sac Metal Çarpışma Kutularının Darbe Performanslarının Nümerik İncelenmesi

Oğuz DOĞAN<sup>1,a</sup>, Muhammed Safa KAMER<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0003-4203-8237; <sup>b</sup>ORCID: 0000-0003-3852-1031

### Makale Bilgileri

Geliş : 29.06.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560152

### Sorumlu Yazar

Oğuz DOĞAN

oğuzdogan@ksu.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Darbe performansı

Kesit etkisi

Sonlu elemanlar metodu

Darbe analizi

**Atf şekli:** DOĞAN, O., KAMER, M.S., (2024). Farklı Kesit Geometrilerine Sahip İnce Duvarlı Sac Metal Çarpışma Kutularının Darbe Performanslarının Nümerik İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 719-728.

### ÖZ

Bu çalışmada, farklı kesit geometrilerine sahip ince duvarlı sac metalden tasarlanan çarpışma kutularının darbe performansları nümerik olarak incelenmiştir. Öncelikle eşit kesit alanı ve boya sahip beş farklı kesit geometrisinde (kare, daire, üçgen, beşgen, altıgen) çarpışma kutuları tasarlanmıştır. Tasarlanan çarpışma kutuları, darbe simülasyonlarının gerçekleştirilebilmesi için ANSYS Workbench programına aktarılmıştır. Darbe analizleri 400 kg'lık bir kütlenin 10 m/s hızla çarpışma kutularına çarpıtılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Darbe analizleri sonucunda çarpışma kutularında meydana gelen maksimum kuvvet, sönmülenen enerji miktarı ve farklı darbe indikatörleri incelenerek en iyi kesit geometrisi belirlenmiştir. Darbe analiz sonuçlarına göre en yüksek darbe kuvveti ve sönmülenen enerji miktarı daire kesite sahip çarpışma kutularında elde edilmiştir. Diğer taraftan en düşük darbe kuvveti ve sönmülenen enerji miktarı üçgen kesite sahip çarpışma kutularında görülmüştür. Sonuç olarak kesitteki kenar sayısı artışı ile birlikte yapının enerji sönmüleme kabiliyetinin de arttığı tespit edilmiştir.

## Numerical Investigation of the Impact Performance of Thin-walled Sheet Metal Crash Boxes with Different Cross-section Geometries

### Article Info

Received : 29.06.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560152

### Corresponding Author

Oğuz DOĞAN

oğuzdogan@ksu.edu.tr

### Keywords

Impact performance

Section effect

Finite element method

Impact analysis

**How to cite:** DOĞAN, O., KAMER, M.S., (2024). Farklı Kesit Geometrilerine Sahip İnce Duvarlı Sac Metal Çarpışma Kutularının Darbe Performanslarının Nümerik İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 719-728.

### ABSTRACT

This study numerically investigates the impact performance of crash boxes designed from thin-walled sheet metal with different cross-sectional geometries. Initially, crash boxes with five different cross-sectional geometries (square, circle, triangle, pentagon, hexagon) were designed, each having equal cross-sectional area and length. The designed crash boxes were imported into the ANSYS Workbench program to perform impact simulations. The impact analyses were conducted by simulating the collision of a 400 kg mass impacting the crash boxes at a speed of 10 ms<sup>-1</sup>. As a result of the impact analyses, the maximum force, absorbed energy, and various impact indicators were examined to determine the best cross-sectional geometry. According to the impact analysis results, the highest impact force and absorbed energy were observed in crash boxes with circular cross-sections. On the other hand, the lowest impact force and absorbed energy were observed in crash boxes with triangular cross-sections. In conclusion, it was determined that as the number of edges in the cross-section increases, the energy absorption capability of the structure also increases.



## 1. GİRİŞ

Darbe yükleri altında yüksek performansın gerektiği durumlarda ince duvarlı sac metal yapılar tercih edilmektedir. Bu yapılar özellikle otomobillerde olası bir çarpışma sırasında darbe enerjisini sönmölemek için kullanılırlar. Otomotiv endüstrisinde bu yapılar çarpışma kutuları adını almaktadır. Çarpışma kutuları çarpışma esnasında aracın ana parçalarına gelebilecek zararı en aza indirerek, yolcuları çeşitli yaralanmalardan koruyacak şekilde tasarlanmaktadır. Literatür incelendiğinde de çarpışma kutuları üzerine birçok nümerik ve deneysel çalışmanın olduğu görülmektedir. Zhang ve arkadaşları [1], farklı kalınlıklara sahip konik boruların çarpışma performansını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Dairesel boruların enerji emme kapasitesi ve verimliliği, borunun daha hafif kütleyle azaltılmasından sonra %120'den fazla arttırılmıştır. Büzölme sırasında malzemenin sertleşmesinin, çarpışma dayanıklılığı performansının büyük ölçüde artmasına yol açan en önemli faktör olduğu tespit edilmiştir. Usta ve arkadaşları [2], alüminyum alaşımından yapılmış aksel yükü iç içe çarpma tüplerinin çarpma dayanıklılık özelliklerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada farklı senaryolardaki çarpışma tüplerinin darbe davranışları incelenmiştir. Çalışma sonucunda petek dolgu çift iç içe tüp yapıları çarpışma kutusu tasarımının en uygun seçim olabileceği belirtilmiştir. Yu ve arkadaşları [3], elytra böceğinden esinlenerek yüksek verimli enerji soğurma yeteneklerine sahip bir tür, trabeküler-bal peteği biyomimetik yapı önermişlerdir. Önerilen geometriler üretilerek basma ve darbe testlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca nümerik çalışmalar da gerçekleştirilerek önerilen geometrilerin enerji sönmöleme özellikleri araştırılmıştır. İnce ve arkadaşları [4], alüminyum ve çelik malzemelerinden özel kaynak yöntemi ile birleştirilerek ürettikleri çarpışma kutularının darbe özelliklerini incelemişlerdir. Üretilen yeni hibrit çarpışma kutularının %17,5 ağırlık kazancı sağladığını tespit etmişlerdir.

Çarpışma kutularında kesit geometrisi, sönmölenen enerji miktarını ve çarpışma kuvvetini etkileyen önemli parametrelerden bir tanesidir. Bu nedenle literatürde birçok araştırmacının farklı kesit geometrilerinin çarpışma kutularının darbe özelliklerine olan etkisini deneysel ve nümerik olarak incelediği görülmektedir. Hussain ve arkadaşları [5], cam elyaf takviyeli plastik çarpışma kutuları için farklı geometrilerle birlikte etkinliğini darbe testi kullanılarak araştırmışlardır. Dört farklı kesit geometrisine (kare, daire, altıgen ve ongen) sahip çarpışma kutuları aynı koşullarda darbe testine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre en yüksek enerji sönmöleme kapasitesi ongen kesit geometrisinde gözlenirken, en düşük sönmöleme kapasitesi ise kare kesit geometrisine sahip çarpışma kutularında gözlemlenmiştir. Yuan ve arkadaşları [6], bazıları konik bir şekil alan kare, dikdörtgen ve çokgen kesitli bir origami çarpışma kutusu numuneleri tasarlayıp darbe özelliklerini incelemişlerdir. Origami sanatından esinlenerek tasarlanan çarpışma kutuları, geleneksel çarpışma kutusuyla karşılaştırıldığında birim kütle başına enerji emiliminde maksimum %107,1 artış ve başlangıç tepe kuvvetinde maksimum %68,3 azalma meydana gelmiştir. Köseadağ ve arkadaşları [7], otomobil çarpışma kutuları için, iki farklı malzeme ve dört farklı kesit geometrisine sahip çarpışma kutuları tasarlayıp darbe analizleri gerçekleştirmişlerdir. En yüksek enerji sönmöleme kapasitesinin altıgen kesit yapısına sahip çarpışma kutusunda olduğu tespit edilmiştir. Çelik malzemenin üretilen çarpışma kutularının alüminyumdan üretilenlere göre 10 kat daha fazla enerji sönmölediği tespit edilmiştir. Kale ve arkadaşları [8], ve Davoudi ve arkadaşları [9], farklı kesit geometrilerine sahip otomotiv çarpışma kutularının darbe özelliklerini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Her iki çalışmada da kesit üzerindeki kenar sayısı artışının sönmölenen enerji miktarını önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir.

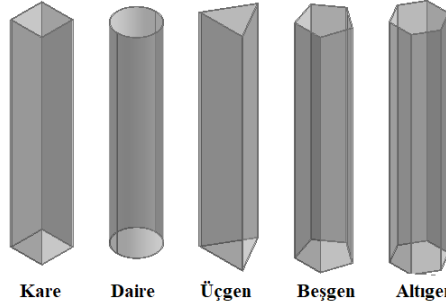
Çarpışma kutularında sönmölenen enerji miktarının arttırılması amacıyla tek hücreli yapılar yerine çok hücreli yapılar tercih edilmektedir. Ayrıca çarpışma kutularının boyutlarının belirlenmesinde günümüzde çeşitli optimizasyon yöntemleri de sıklıkla kullanılmaktadır. Albak [10] ve Ceyhan ve arkadaşları [11], otomotivde kullanılan çok hücreli çarpışma kutularının darbe davranışlarını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Ayrıca, optimizasyon çalışmaları yapılarak darbeye karşı en uygun çok hücre yapısı tespit edilmiştir. Fang ve arkadaşları [12], on farklı hücre sayısına sahip çok hücreli tüplerin hem aksel hem de eğik yükler altında çarpışma davranışlarını kapsamlı bir şekilde araştırmışlardır. Az hücreli tüplerin geniş açılı eğik yüklere karşı daha dayanıklı olduğunu, ancak saf aksel yük altında daha fazla hücreli tüplere göre daha kötü performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Wang ve arkadaşları [13], katlanma deformasyonuna sahip biyonomik çarpışma kutusunun tasarımını ve çok amaçlı optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Kaktüs bitkisinden ilham alınarak yeni bir çarpışma kutusu tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar geleneksel çarpışma kutusuyla karşılaştırıldığında, optimize edilmiş biyonomik çarpma kutusu kütlelerinin %41,1 oranında azaldığı, sönmölenen enerji miktarının da %69,9 oranında arttırıldığı tespit edilmiştir. Tanlak ve arkadaşları [14], yüksek hızlı aksel darbe yükleri altında çalışan ince duvarlı boruların optimum şekil tasarımını nümerik yöntemler kullanarak gerçekleştirmişlerdir.

Sun ve arkadaşları [15] işlevsel olarak derecelendirilmiş kalınlığa sahip ince duvarlı çarpışma kutuları için çarpışma analizi ve çok amaçlı optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Li ve arkadaşları [16] rastgele ve aralık belirsizlikleri olan köpük dolgulu ince duvarlı çarpışma kutularının çarpışma dayanıklılığı tasarımı için çok amaçlı optimizasyon prosedürü önermişlerdir. Özgül enerji emilimi ve tepe darbe kuvvetini amaç olarak, ortalama çarpışma kuvveti ise kısıt olarak belirlenmiştir. Önerilen optimizasyon prosedürünün köpük dolgulu yapılar için çarpışma dayanıklılığı tasarımında etkili olduğu kanıtlanmıştır. Reddy ve arkadaşları [17] dört farklı kesit geometrisine sahip (kare, altıgen, sekizgen ve on iki köşeli) ince duvarlı sac metal çarpışma kutularının darbe özelliklerini teorik, nümerik ve deneysel olarak ayrı ayrı incelemişlerdir. Üç farklı yöntem ile hesaplanan verilerin birbirini doğruladığı görülmekle birlikte en iyi çarpışma özellikleri on iki köşeli kesitte en kötü çarpışma özellikleri ise kare kesite sahip çarpışma kutularında olduğu tespit edilmiştir. Tanlak ve arkadaşları [18] farklı kesit geometrilerine sahip yüksek hızlı eksenel darbe yükleri altında ince duvarlı boruların optimum şekil tasarımını nümerik olarak gerçekleştirmişlerdir.

Bu çalışmada, beş farklı kesit geometrisine sahip çarpışma kutularının darbe performansları nümerik olarak incelenmiştir. Beş farklı kesit geometrisinde tasarlanan çarpışma kutuları ANSYS ortamında darbe testlerine tabi tutulmuştur. Darbe analizleri sonucunda kuvvet, sönmülenen enerji ve çeşitli darbe indikatörleri yardımıyla en iyi darbe performansına sahip kesit geometrisi belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek kuvvet enerji sönmüleme kabiliyeti daire kesite ait olmasına rağmen, kırılma kuvveti verimliliği bakımından en iyi geometrinin altıgen kesit olduğu tespit edilmiştir. En düşük darbe kuvveti ve sönmülenen enerji miktarının ise üçgen kesite sahip çarpışma kutularında görülmüştür.

## 2. YÖNTEM

Bu çalışmada öncelikle farklı kesit geometrisine sahip çarpışma kutularının tasarımları gerçekleştirilmiştir. Her farklı kesit geometrisine sahip çarpışma kutuları Solidworks 2022 programında, 250 mm yüksekliğinde ve 156 mm<sup>2</sup> taban alanına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır [9]. Şekil 1'de farklı kesit geometrisi, eşit yüzey alanı ve eşit yüksekliğe sahip ince duvarlı sac metal kutuların tasarımları görülmektedir.

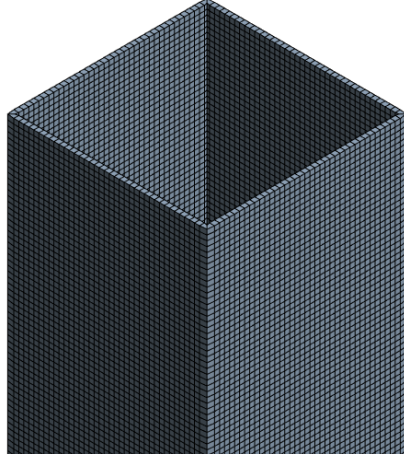


Şekil 1. Farklı kesit geometrisine sahip çarpışma kutularının tasarımı

Tasarımları tamamlanan geometriler sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmek üzere ANSYS Workbench 2022 R2 programının Explicit Dynamics modülüne aktarılmıştır. Analiz programında öncelikle ince duvarlı sac metal kutuların malzeme tanımları gerçekleştirilmiştir. Malzeme olarak ANSYS program kütüphanesinden explicit malzemeler arasından 4340 çeliği seçilmiştir. 4340 malzemesine ait malzeme özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. 4340 Çeliğine ait malzeme özellikleri

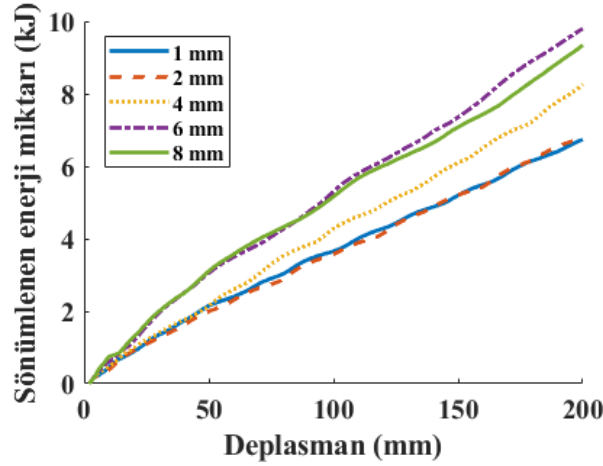
Özellik	Değer
Akma sınırı	792 MPa
Esneklik modülü	159000 MPa
Kayma modülü	81800 MPa
Johnson-Cook özellikleri	
Sertleşme sabiti	510 MPa
Sertleşme üssü	0,26
Gerilme oranı sabiti	0,014
Termal yumuşama üssü	1,03
Erime sıcaklığı	1519,9 °C
Referans gerilme oranı (/s)	1



Şekil 2. Kare kesit için oluşturulan ağ yapısı

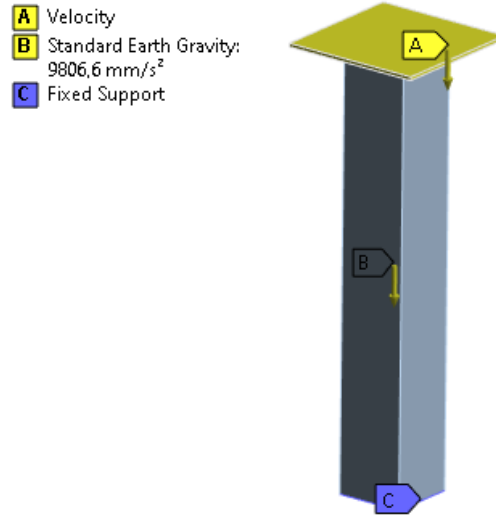
Malzeme tanımı yapıldıktan sonra modelin ağ yapısı oluşturulmuştur. Çözümün daha hızlı gerçekleşmesi için model iki boyutlu olarak tasarlanmıştır. Bu nedenle model 2 mm boyutunda yüzey elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. 2 mm boyutunda eleman kullanılması durumunda modelde yaklaşık 10000 düğüm noktası ve 9800 elemandan oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 2’de kare kesit için oluşturulan ağ yapısının genel durumu görülmektedir.

Oluşturulan ağ yapısının güvenilirliğinin belirlenmesi ve modelin ağdan bağımsız çözümler vermesi için ağdan bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiştir. Ağdan bağımsızlık çalışmasında oluşturulan model, 8 mm eleman boyutundan başlanarak sırasıyla 8-6-4-2 ve 1 mm eleman boyutları için çözdürülmüştür. Elde edilen çözümler sonucunda sönmelenen enerji miktarı-deplasman grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 3). Çizdirilen grafikler sonucunda 2 mm eleman boyutuna inildikten sonra ağ yapısını 1 mm’ye indirsek bile üst üste çakışan grafikler elde edilmiştir. Bu nedenle gerek hızlı çözüm, gerekse de model için gerekli depolama boyutunun düşük olması için 2 mm eleman boyutu sabit olarak tüm farklı kesit geometrisine sahip analizlerde aynı olacak şekilde kullanılmıştır.



Şekil 3. Ağdan bağımsızlık çalışması

Ağ yapısının oluşturulmasından sonra modelin sınır şartları tanımlanmıştır. Şekil 4’de bu çalışmadaki modelin sınır şartları görülmektedir. Sac metal kutunun alt yüzeyi tüm eksenlerden sabit olacak şekilde sabitlemiştir. A kütlesi ise özkütlesi artırılarak 400 kg’lık bir yükü temsil edecek hale getirilmiş ve sabit 10 m/s hızla sac metal kutu ile çarpışması sağlanmıştır. Ayrıca standart yer çekimi tanımı da şekilde görüldüğü gibi eklenmiştir. Tüm tanımlamalar tamamlandıktan sonra model çözdürülmüştür. Her bir model yaklaşık olarak 1,5 saat süre sonucunda çözüme ulaşmıştır (Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2650 v3 2.30GHz 2.30 GHz 2 işlemci – 64GB Ram). Çözümün tamamlanmasından sonra elde edilen veriler incelenerek kesit profilinin darbe özelliklerine olan etkisi çeşitli indikatörler vasıtasıyla araştırılmıştır.



Şekil 4. Sonlu elemanlar modelinin sınır şartları

Enerji sönümleyen yapıların performanslarının incelenmesi için çeşitli indikatörler bulunmaktadır. Bu indikatörler sönümlenen enerji miktarı (SEM), özel sönümlenen enerji miktarı (ÖSEM), maksimum kırılma kuvveti (MKK), ortalama kırılma kuvveti (OKK) ve kırılma kuvveti verimliliği (KKV) olarak sıralanabilir.

SEM çarpışma sırasında metal kutunun sönümlendiği enerji miktarıdır. MKK çarpışma sırasında okunan en yüksek kuvvet değeridir. ÖSEM birim kütle başına sönümlenen enerji miktarını ölçmek için kullanılır.

$$\text{ÖSEM} = \frac{\text{SEM}}{\text{Kütle}} \quad (1)$$

Bu çalışmada kullanılan sac metal çarpışma kutularının yüzey alanları eşit olduğundan, SEM ile ÖSEM arasındaki oran eşit olacaktır. Sadece SEM'in incelenmesi yeterli olacaktır. OKK, SEM'in toplam kırılma uzunluğuna (x) oranı şeklinde hesaplanmaktadır.

$$\text{OKK} = \frac{\text{SEM}}{x} \quad (2)$$

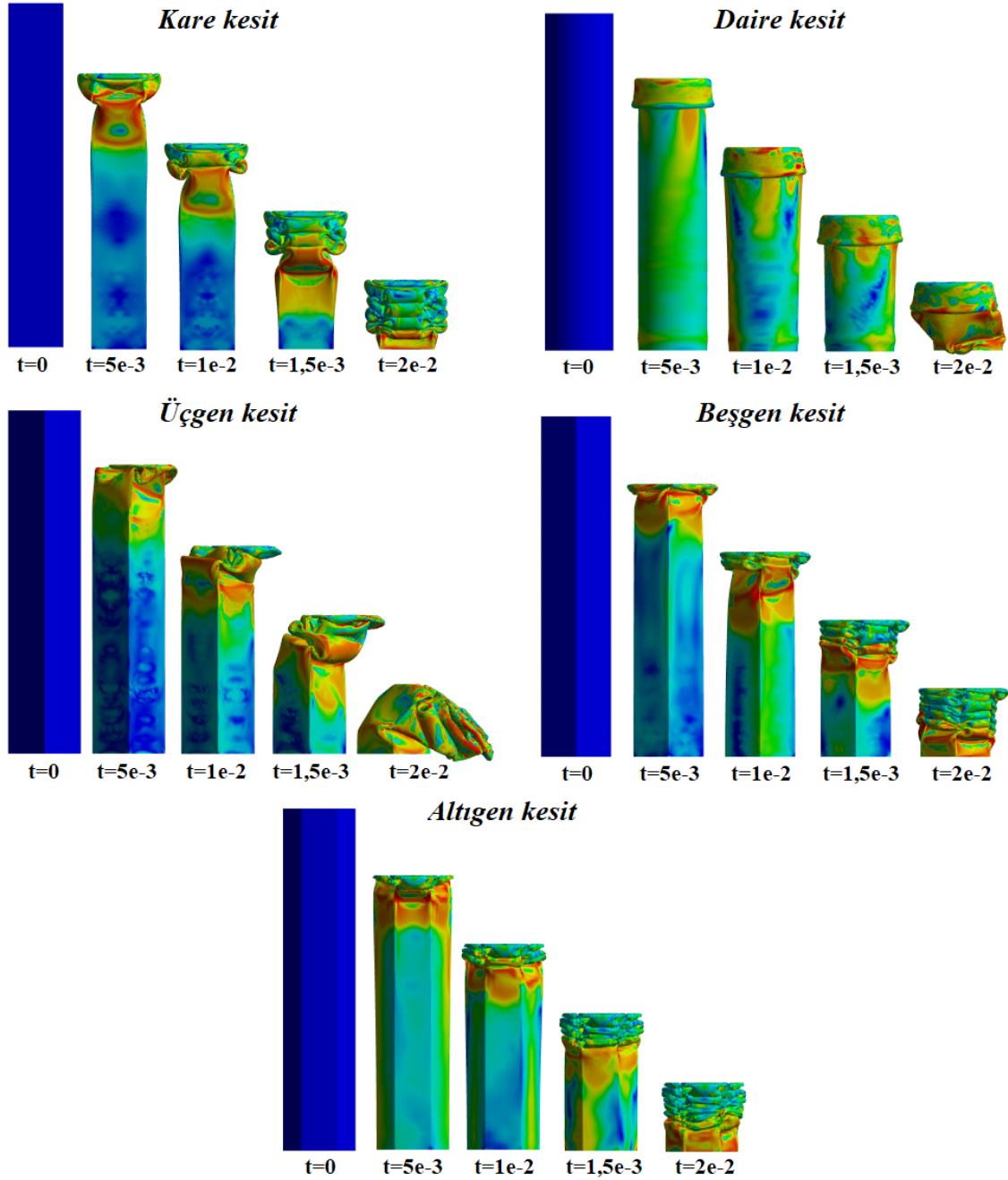
KKV, OKK'nin MKK'ne oranı ile hesaplanmaktadır.

$$\text{KKV} = \frac{\text{OKK}}{\text{MKK}} \quad (3)$$

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Beş farklı kesit geometrisine sahip ince duvarlı sac metal kutularıyla gerçekleştirilen darbe testleri sunucunda, her bir geometri için kuvvet-zaman grafikleri, sönümlenen enerji miktarı-zaman grafikleri ve darbe indikatörlerinin değişimi incelenmiştir. Bu sayede en iyi darbe sönümleme performansına sahip olan kesit geometrisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Şekil 5'te farklı kesit geometrilerine sahip ince duvarlı sac metal kutuların darbe yükü altında zaman içerisinde gerilme ve deformasyon değişimleri görülmektedir.  $t=0$  anında yük henüz uygulanmadığından metal kutular üzerinde herhangi bir gerilme oluşmamıştır. Yükün uygulanmasıyla birlikte kutuların üzerinde gerilmeler meydana gelmiştir. Üçgen kesit incelenecek olursa gerilmenin eşit dağılmadığı, sadece üst bölgede toplandığı görülmektedir. Benzer şekilde kare kesitte de gerilmenin tüm kutu boyunca dağılmadığı üst bölgede yoğunlaştığı görülmektedir. Beşgen, altıgen ve daire kesitlerde ise gerilmenin tüm kutu boyunca diğer kesitlere göre daha homojen dağıldığı görülmektedir. Bunun sebebi kenar sayısı arttıkça kenarların yapıyı daha dirençli hale getirerek gerilmeyi daha düzgün dağıtmasıdır.



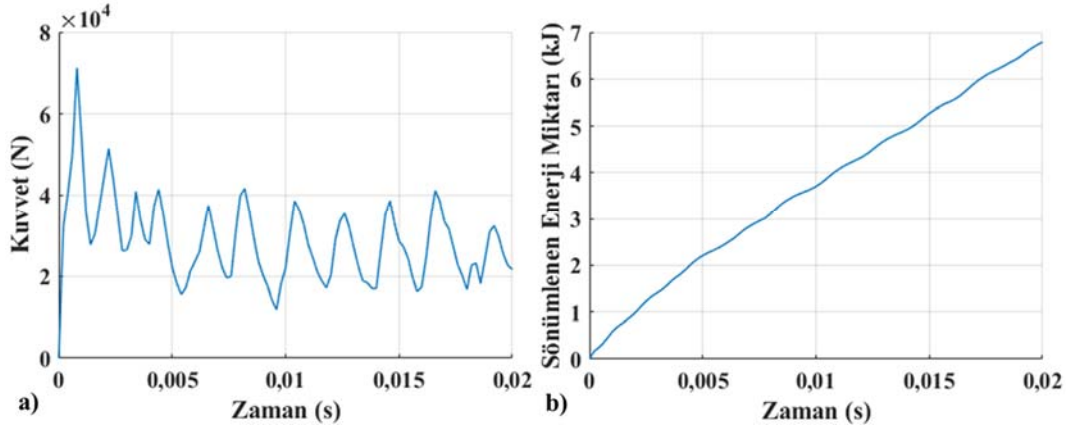
Şekil 5. Farklı kesite sahip sac metal kutularının eşit zaman aralıklarındaki çarpışma davranışları

$t=0,01$  sn'den sonra üçgen kesitte meydana gelen katlanmaların diğer kesitlere göre çok daha düzensiz hale geldiği, burkulmanın meydana geldiği görülmektedir. Bu nedenle üçgen kesit için dayanım ve sönümün diğer kesitlere göre daha düşük olacağı öngörülebilir. En düzgün katlanma şeklinin ise daire kesitte olduğu görülmektedir. Şekilde tam olarak görülmemekle birlikte, daire kesitli metal kutuda diğer kesit geometrilerine sahip metal kutulara göre daha fazla kıvrılma meydana gelmiştir. Bu da bu kesitin daha fazla enerjisi sönümleyeceği anlamına gelmektedir.

Şekil 6'da kare profil için çarpışma zamanına bağlı olarak kuvvet ve sönümlenen enerji değişimi görülmektedir. Şekil incelendiğinde kare profil için maksimum darbe kuvvetinin 70000 N civarında olduğu görülmektedir. Çarpışma esnasında zamanla kutu üzerinde meydana gelen katlanmalarla birlikte kuvvetin artıp azaldığı görülmektedir (Şekil 6a). Çarpışma esnasında ortalama kuvvetin ise yaklaşık olarak 25000 N civarında olduğu söylenebilir. Çarpışma esnasında sönümlenen enerji miktarının ise yaklaşık olarak lineer

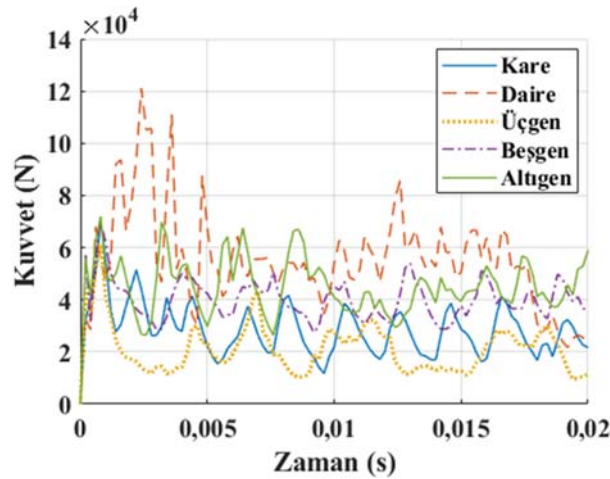


arttığı görülmektedir (Şekil 6b). Kare kesit geometrisine sahip çarpışma kutusu için toplamda 6,7 kJ'lük enerjinin sönmüldüğü tespit edilmiştir.



Şekil 6. Kare profil için çarpışma testi sonuçları a) kuvvet-zaman, b) sönmümlenen enerji-zaman değişimi

Kesit geometrisinin darbe kuvvetine olan etkisi Şekil 7'de gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde tüm kesitlerde belli zaman aralıklarında katlanmalar meydana gelmektedir. Üçgen kesite sahip çarpışma kutularında kuvvetin beş kez yükselip alçaldığı görülmektedir. Diğer kesitlerde ise çok daha fazla katlanmanın olduğu görülmektedir. En yüksek kuvvet değerinin daire kesitte ( $123000$  N) olduğu görülmektedir.

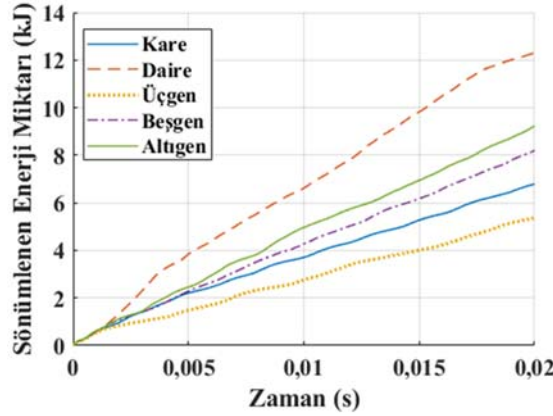


Şekil 7. Kesit geometrisinin darbe kuvvetine olan etkisi

Dairesel kesite sahip çarpışma kutularında kenar olmadığından, katlanma sayısının daha çok olması nedeniyle diğerlerine göre daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Çarpışma kutularında kuvvetin bu şekilde ani olarak yükselmesi istenilen bir durum değildir. Çünkü araç içerisinde oturan canlılara da bu kuvvet iletilmiş olacaktır. Kare, üçgen, beşgen ve altgen kesite sahip çarpışma kutularında ise maksimum kuvvetin birbirine yakın ve yaklaşık  $65000 \sim 70000$  N arasında değiştiği görülmektedir. Ortalama kuvvet sıralaması göz önüne alındığında, en yüksek ortalama kuvvetten en düşüğe sırasıyla daire, altgen, beşgen, kare ve üçgen kesite sahip çarpışma kutuları olduğu görülmektedir. Bu durumun Şekil 7 ile de uyumlu olduğu görülmektedir.

Kesit geometrisinin sönmümlenen enerji miktarına olan etkisi Şekil 8'de gösterilmektedir. Darbe süresince en az enerji sönmümlenen kesit geometrisinin  $5,3$  kJ ile üçgen kesit olduğu tespit edilmiştir. En yüksek enerji sönmümlenme kabiliyetinin ise  $12,3$  kJ ile daire kesit ile tasarlanan çarpışma kutularına ait olduğu görülmektedir. Sönmümlenen enerji bakımından kesitler büyükten küçüğe doğru sırasıyla daire, altgen, beşgen, kare ve üçgen kesit olarak sıralanmaktadır. Bu sıralamanın darbe anında ortalama kuvvet sıralaması ile aynı olduğu görülmektedir (Şekil 7). Kesit üzerindeki kenar sayısı arttıkça sönmümlenen enerji miktarının da arttığı söylenebilir. Elde edilen sonuçların literatürle de uyumlu olduğu görülmektedir [8-9].





Şekil 8. Kesit geometrisinin sönmölen enerji miktarına etkisi

Çizelge 2’de farklı kesit geometrilerine sahip çarpışma kutularının darbe analizleri sonucunda elde edilen indikatör değışimleri görölmektedir. ÖSEM ve OKK değeri birbiri ile özdeş sonuçlar verdiği görölmektedir. Hem ÖSEM hem de OKK değeri incelediğinde, iyi kesit geometrisinin daire olduğu en kötü geometrinin ise üçgen olduğu tespit edilmiştir. KKV açısından ise daire kesitte meydana gelen çok yüksek ani kuvvetten dolayı verimlilik düşmektedir. KKV değeri bakımından en iyi kesitin altıgen kesit olduğu tespit edilmiştir. Dairesel kesitin ise KKV bakımından üçüncü sırada kaldığı görölmektedir.

Çizelge 2. Kesit geometrisinin indikatörlere olan etkisi

Profil/İndikatör	ÖSEM [kJ/kg]	OKK [kJ/m]	KVV
Kare	22,03	33,95	0,47
Daire	39,92	61,5	0,5
Üçgen	17,42	26,85	0,44
Beşgen	26,61	41	0,59
Altıgen	30,34	46,75	0,65

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada eşit kesit yüzey alanına ve farklı kesit geometrilerine (kare, daire, üçgen, beşgen, altıgen) sahip ince duvarlı çarpışma kutularının darbe performansları sayısal olarak incelenmiştir. Belirtilen özelliklerde tasarlanan çarpışma kutuları darbe analizleri için ANSYS programına aktarılmıştır. ANSYS programında malzeme tanımı, ağ yapısının oluşturulması, ağdan bağımsızlık çalışması, sınır şartlarının tanımlanması gibi genel sonlu elemanlar analiz prosedürü uygulanmış ve darbe analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerin sonucunda, kuvvet-zaman, sönmölen enerji-zaman ve çeşitli indikatörlerin değışimi ile kesit değışiminin çarpışma kutularının darbe performansı üzerine olan etkisi incelenmiştir. Gerçekleştirilen sonlu elemanlar darbe analizleri sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

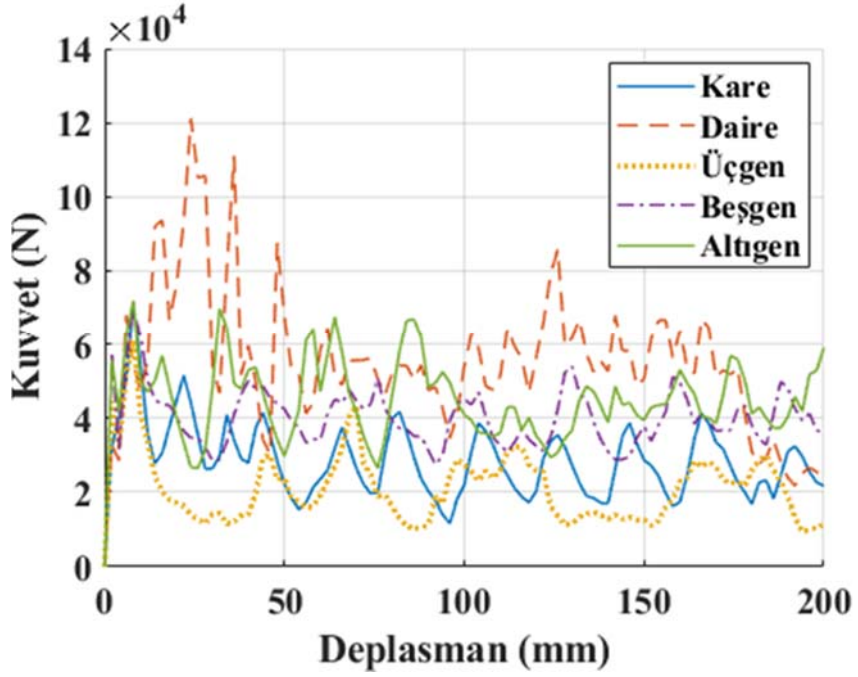
- Darbe esnasında en büyük kuvvet değeri 123000 N ile daire kesite sahip çarpışma kutularında gözlenirken, en düşük kuvvet değeri 60000 N ile üçgen kesite sahip çarpışma kutusunda gözlemlenmiştir.
- Darbe esnasında oluşan ortalama kuvvet değeri büyükten küçüğe doğru sırasıyla daire, altıgen, beşgen, kare ve üçgen kesite sahip çarpışma kutularında olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak sönmölen enerji miktarlarının ortalama darbe kuvveti ile doğru orantılı olarak değıştiği belirlenmiştir.
- KKV bakımından kesitler incelendiğinde en verimli kesitin altıgen kesit olduğu tespit edilmiştir. En yüksek kuvvet ve enerji sönmöleme kapasitesine sahip olan daire kesit ise verimlilik bakımından üçüncü sırada kalmıştır.
- Kesit geometrisi üzerindeki kenar sayısının artmasıyla birlikte yükün darbe esnasında taşınımı daha homojen olmuştur. Bu nedenle bu tarz çarpışma kutularının tasarımında kenar sayısı çok olan kesit tiplerinin belirlenmesi uygun çözüm olacaktır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre eşit yüzey alanına sahip kesitlerde kenar sayısının artmasıyla birlikte darbe performansının arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçtan hareketle standart olmayan kesitler için düşünüldüğünde kenar sayısı büyük (alan atalet momenti büyük) olan kesitlerin darbe performansının daha iyi olacağı öngörülmektedir. Bu çalışmanın ardından standart olmayan kesitler için de benzer çalışmalar yürütülecek ve elde edilen sonuçlar bu çalışma ile kıyaslanacaktır.

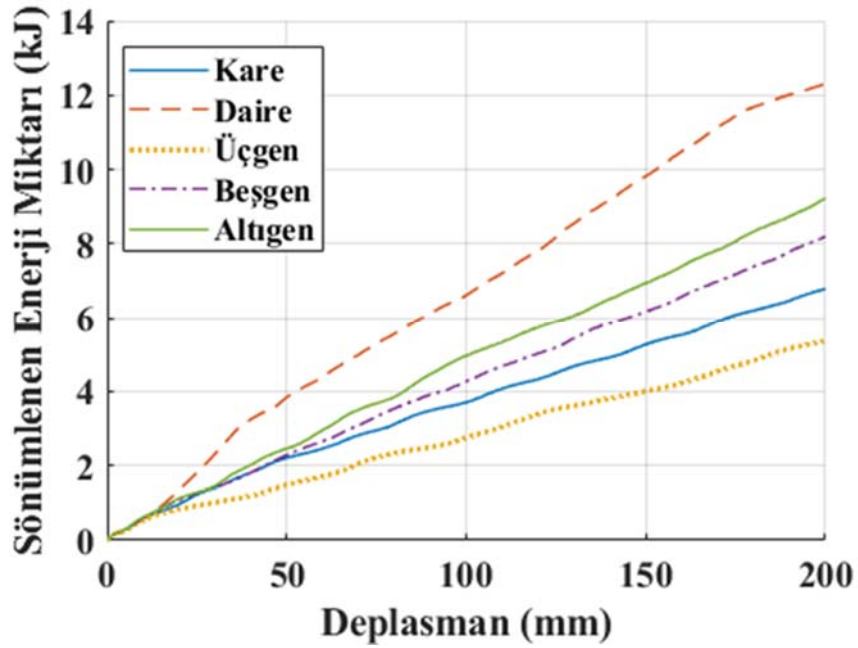
## 5. KAYNAKLAR

1. Zhang, H., Zhang, X., 2016. Crashworthiness performance of conical tubes with nonlinear thickness distribution. *Thin-Walled Structures*, 99, 35-44.
2. Usta, F., Türkmen, H.S., 2019. Experimental and numerical investigation of impact behavior of nested tubes with and without honeycomb filler. *Thin-Walled Structures*, 106256.
3. Yu, X., Pan, L., Chen, J., Zhang, X., Wei, P., 2019. Experimental and numerical study on the energy absorption abilities of trabecular-honeycomb biomimetic structures inspired by beetle elytra. *Journal of Materials Science*, 54, 2193-2204.
4. İnce, F., Türkmen, H.S., Mecitoğlu, Z., Uludag, N., Durgun, İ., Altınok, E., Örenel, H., 2011. A numerical and experimental study on the impact behavior of box structures. *Procedia Engineering*, 10, 1736-1741.
5. Hussain, N.N., Regalla, S.P., Rao, Y.V.D., Dirgantara, T., Gunawan, L., Jusuf, A., 2021. Drop-weight impact testing for the study of energy absorption in automobile crash boxes made of composite material. *Proc IMechE Part L: J Materials: Design and Applications*, 235(1), 114-130.
6. Yuan, L., Shi, H., Ma, J., Zhong, Y., 2019. Quasi-static impact of origami crash boxes with various profiles. *Thin-Walled Structures*, 141, 435-446.
7. Köseadağ, E., İşler, D., 2023. Effect of section geometry and material type on energy absorption capabilities of crash boxes. *Karaelmas Fen ve Müh. Dergisi*, 13(1), 42-51.
8. Kale, B.S., Bhole, K.S., Mandhare, N.A., Patil, S.V., 2023. Finite element analysis and deployment of analytical hierarchical process for design of the structural framework formicro-actuators of vehicle crash box. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 1-11.
9. Davoudi, M., Kim, K., 2022. Energy absorption capability of thin-walled structures with various cross sections under oblique crash. *International Journal of Steel Structures*, 22(6), 1786-1797.
10. Albak, E.İ., 2021. Multi-objective crashworthiness optimization of thin-walled multi-cell tubes with different wall lengths. *International Journal of Crashworthiness*, 26(4), 438-455.
11. Ceyhan, M., Yıldız, B.S., 2023. Investigation of crash performance of multi-cell crash-boxes. *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 38(3), 613-621.
12. Fang, J., Gao, Y., Sun, G., Qiu, N., Li, Q., 2015. On design of multi-cell tubes under axial and oblique impact loads. *Thin-Walled Structures*, 95, 115-126.
13. Wang, C.Y., Lu, G., Zhao, W., Wang, Y., 2020. Modeling and multi-objective optimization of a bionic crash box with folding deformation. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 61, 283-299.
14. Tanlak, N., Sonmez, F.O., 2014. Optimal shape design of thin-walled tubes under high-velocity axial impact loads. *Thin-Walled Structures*, 84, 302-312.
15. Sun, G., Xu, F., Li, G., Li, Q., 2014. Crashing analysis and multiobjective optimization for thin-walled structures with functionally graded thickness. *International Journal of Impact Engineering*, 64, 62-74.
16. Li, F., Sun, G., Huang, X., Rong, J., Li, Q., 2015. Multiobjective robust optimization for crashworthiness design of foam filled thin-walled structures with random and interval uncertainties. *Engineering Structures*, 88, 111-124.
17. Reddy, S., Abbasi, M., Fard, M., 2015. Multi-cornered thin-walled sheet metal members for enhanced crashworthiness and occupant protection. *Thin-Walled Structures*, 94, 56-66.
18. Tanlak, N., Sonmez, F.O., 2014. Optimal shape design of thin-walled tubes under high-velocity axial impact loads. *Thin-Walled Structures*, 84, 302-312.

## 6. EKLER



Ek 1. Farklı kesit geometrileri için kuvvet – deplasman değişimi



Ek 2. Farklı kesit geometrileri için sönümlenen enerji miktarı – deplasman değişimi

## Toprakkale (Osmaniye) Bölgesi Bazaltik Kayaçlarının Jeolojik, Petrografik ve Mineralojik Özellikleri

Nil YAPICI<sup>1,a</sup>, Nusret NURLU<sup>2,b</sup>, Hande SONSUN<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Adana

<sup>2</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Adana

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0001-9761-9122; <sup>b</sup>ORCID: 0000-0002-3293-150X; <sup>c</sup>ORCID: 0000-0003-4784-5070

### Makale Bilgileri

Geliş : 13.05.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560161

### Sorumlu Yazar

Nusret NURLU

nusretnurlu@gmail.com

### Anahtar Kelimeler

Osmaniye

Bazalt

Cüruf

Masif

Toprakkale

**Atf şekli:** YAPICI, N., NURLU, N., SONSUN, H., (2024). Toprakkale (Osmaniye) Bölgesi Bazaltik Kayaçlarının Jeolojik, Petrografik ve Mineralojik Özellikleri. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 729-740.

### ÖZ

Çalışmanın amacı Osmaniye İli, Toprakkale ilçesi, Türkmen beldesi'nde yüzeyleyen bazaltik cüruf ve lavların detaylı jeolojik, petrografik ve mineralojik incelemeleridir. Gerçekleştirilen çalışmalarda bu kayaçların mineralojik, petrografik bileşimi ve dokusal özellikleri ortaya konmuş ve mevcut mineralojik bileşenleri tanımlanmıştır. Çalışma alanındaki bazik bileşimli kayaçlar genellikle piroklastik, gaz boşluklu bazaltlar (cüruf) ve kolon debili (masif) olarak üç tipte bulunmaktadır İlk tip olarak gözlemlenen bazik karakterli piroklastik kayaçlar genellikle çapı yaklaşık 1 m'ye kadar olan volkanik cüruf, tüf ve volkan bombalarından oluşmaktadır. Bölgedeki ikinci tip volkanik ürün, gaz boşluklu (cüruf) seviyeleridir. Cüruf içerikli kayaçlarının alt seviyelerinde ise yer yer masif yapıları olduğu tespit edilmiştir. Bazaltların (cüruf-masif) genellikle intergranüler porfirik dokuda ve ofitik dokuya sahip olduğu ve cüruf türü kayaçların bol miktarda soğuma gaz boşlukları içerdiği belirlenmiştir. Bununla beraber boşluk içermeyen masif tipteki bazik volkanik kayaçlar ise olivin, piroksen ve plajiyoklaz mikrolitlerinden oluşmakta ve cüruf tipinde gözlenen volkanik kayaçların üzerinde ortalama 1,5-2,2 metre kalınlıkta gözlenmektedirler.

## Geological, Petrographic, and Mineralogical Characteristics of Basaltic Rocks in the Toprakkale (Osmaniye) Region

### Article Info

Received : 13.05.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560161

### Corresponding Author

Nusret NURLU

nusretnurlu@gmail.com

### Keywords

Osmaniye

Basalt

Pumice

Massive

Toprakkale

**How to cite:** YAPICI, N., NURLU, N., SONSUN, H., (2024). Toprakkale (Osmaniye) Bölgesi Bazaltik Kayaçlarının Jeolojik, Petrografik ve Mineralojik Özellikleri. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 729-740.

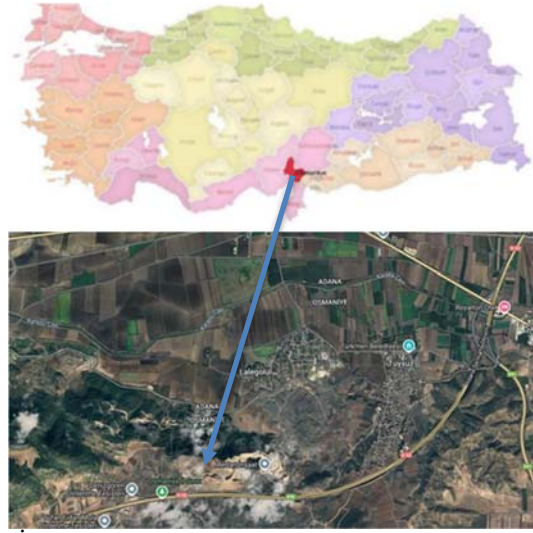
### ABSTRACT

The aim of the study is to conduct detailed geological, petrographic, and mineralogical examinations of the basaltic scoria and lavas outcropping in Turkmen village, Toprakkale district, Osmaniye Province. The mineralogical and petrographic compositions, as well as textural characteristics of these rocks, have been revealed, and the existing mineralogical components have been identified in the conducted studies. Basic composition rocks in the study area are generally found in three types: pyroclastic, vesicular basalt (scoria), and columnar basalt (massive). The first type of basic character pyroclastic rocks observed typically consist of volcanic scoria, tuff, and volcanic bombs with diameters of up to approximately 1 m. The second type of volcanic product in the region is the vesicular (scoria) levels. It has been determined that beneath the scoria-containing rocks, there are occasionally massive structures. Basalts (scoria-massive) generally exhibit an intergranular porphyritic texture and an ophitic texture, and it has been determined that scoria-type rocks contain abundant cooling gas voids. Conversely, massive-type basic volcanic rocks devoid of voids consist of olivine, pyroxene, and plagioclase microlites and are observed to have an average thickness of 1,5-2,2 meters over the observed volcanic rocks in scoria type.

## 1. GİRİŞ

Araştırma alanı, Osmaniye İli, Toprakkale ilçesi, Türkmen beldesi sınırları içerisinde bulunmaktadır. Çalışma bölgesine en yakın yerleşim birimleri; Türkmen beldesi, Lale gölü, Sazlık beldesi yer almaktadır. Çevresi volkanik kütlelerle sınırlanmış olan sahanın en yüksek noktası Deli Halil Tepesi (456 m.) olup burası bir volkanik küttedir. Bu küttelin etrafında küçük parazit koni olarak yükselen Tüysüz (320 m.), Deli Halil Tepesinin kuzeydoğu yamacında yer alır. Deli Halil Tepesinden güney, batı, güneydoğu, güneybatı, doğu ve kuzeye doğru ova tabanına doğru azalan bir eğimle lav akıntıları yer alır. Deli Halil Tepesinin karşı istikametinde (Toprakkale'nin kuzeybatısında) Üçtepeler volkanik küttesi (132 m.) ne ait eğimli lav akıntıları yer alır. Ovanın güney doğusunda ise çok yüksek olmayan fakat oldukça geniş arazi kaplayan dağlık kütle mevcuttur. Bu dağlık küttelin en yüksek noktası 314 metre ile Kafalı Tepedir. Bu küttelyle aynı istikamette fakat ovanın kuzey doğusunda 300 m. yükseltisi ile Bahadır Tepe bulunmaktadır. Bahadır tepenin kuzeyinde ise 147 m. ile Topraktepe ve 162 m. ile Küçükger Tepesi vardır.

Çalışma alanında bazaltik Cüruf kayaçların mineralojik ve litolojik özelliklerinin detaylandırılması ve litoloji haritasının çizilmesi yapılmıştır. Bölgede bulunan kayaçların katma değere etkisinin araştırılması ve endüstriyel kullanılabilirliğinin detaylandırılması amacı ile madencilik faaliyetlerinin ruhsatlandırılması esasında kayaç mineral determinasyonunun tespiti yapılmıştır.



Şekil 1. İnceleme alanı yer bulduru haritası (Google Earth, 2024)

## 2. MATERYAL VE METOD

Çalışma alanının mevcut litoloji haritasının çizimi ve kayaç mineral içeriklerine göre litoloji tayini adına arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Arazideki yarmalardan ve yüzey lokasyonlarından kayaç örneklerinin lupla, kırıcıdan geçirilerek milimetrik boyuta indirgenmiş hali binoküler mikroskop ile ve ince kesit haline getirilen örnekler ise stereo mikroskop ile incelenerek mineralojik içerik ve petrografik özellikler saptanmıştır. Bulunan sonuçlara göre kayaç ismi verilmiştir. Kayacın dokusal ve yapısal özellikleri ile organik madde içeriği ortaya konmuştur. Petrografik tanımlama çıplak göz, lup, zoomlu stereo mikroskop ile ve hazırlanmış ince kesitler üzerinde ise polarizan mikroskop kullanılarak standartta (TS EN 12407 TS 10088 EN 932-3-A1/Nisan 2006) belirtildiği şekilde yapılmıştır. Yapılan petrografik analiz ile kayacı oluşturan mineraller, kayacın doku-yapısı, minerallerin petrografik özellikleri, özellikle kayacın mikroskobik olarak alterasyona uğrayıp uğramadığı, çatlak, kırık özellikleri belirlenmiş ve kayaç adı tanımlaması yapılmıştır.

### 2.1. Saha Çalışmaları

İnce kesit yapım ve tanımlama işlemlerini gerçekleştirmek adına arazideki yarmalardan ve yüzey lokasyonlarından kayaç örnekleri alınmıştır. Arazi örnek alım lokasyonları koordinat bilgisi ve haritası Şekil 2,3 ve Çizelge 1'de verilmiştir.





Şekil 2. Çalışma alanından derlenen örnek lokasyonlarının uydu görüntüsü (Google Earth, 2024)

Çizelge 1. Çalışma alanından derlenen örneklerin lokasyon bilgileri

Örnek	X	Y
OB-1	241867.00 d D	4099199.00 m K
OB-2	241734.00 d D	4099309.00 m K
OB-3	241688.00 d D	4099242.00 m K
OB-4	241645.00 d D	4099352.00 m K
OB-5	241680.00 d D	4099373.00 m K
OB-6	241542.00 d D	4099302.00 m K
OB-7	241390.00 d D	4099248.00 m K
OB-8	241144.00 d D	4099336.00 m K
OB-9	241053.00 d D	4099338.00 m K
OB-10	240975.00 d D	4099328.00 m K
OB-11	240872.00 d D	4099416.00 m K
OB-12	240972.00 d D	4099587.00 m K
OB-13	240941.00 d D	4099619.00 m K
OB-14	240880.00 d D	4099770.00 m K
OB-15	241028.00 d D	4099940.00 m K
OB-16	240876.00 d D	4100191.00 m K

Her gruptan 10 ar kayaç örneği alınmış ve petrografik incelemeleri yapılmıştır. Her bir yarmadan alınan kayaç örneklerinin kayaç tanımlanması ile düşey stratigrafik kayaç tanımlanması yapılarak dikme kesitleri çizilmiştir.



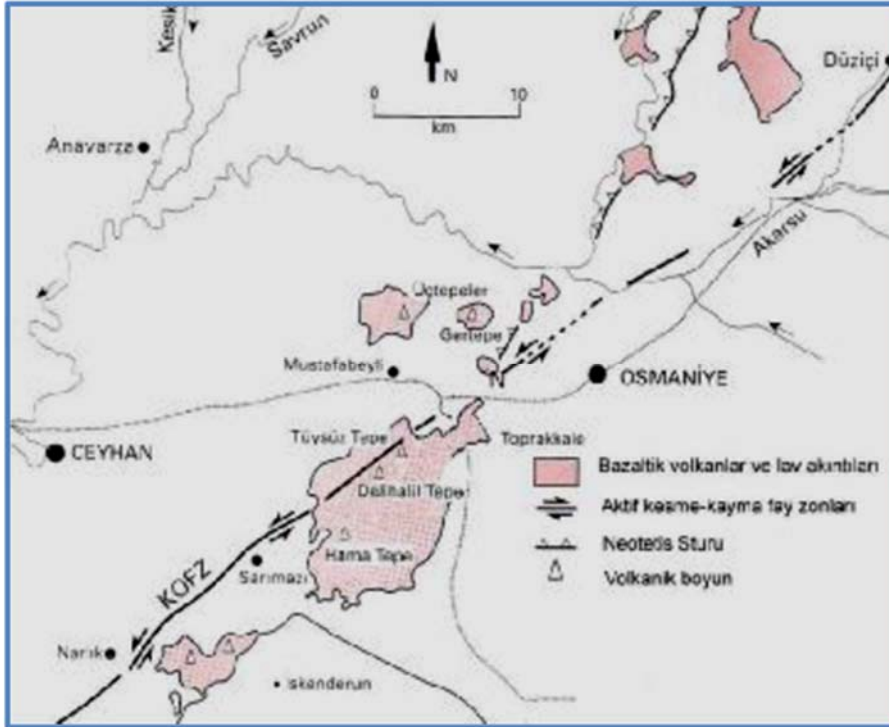
Şekil 3. İnceleme alanı arazi görünümü



### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

#### 3.1. İnceleme Alanının Jeolojisi

İnceleme alanı, güneyde İskenderun Körfezi ve kuzeyde ise Ceyhan Nehri'nin dirsek yaptığı kısımlar arasında yer alır. Bu alanda, genç bazaltik volkanik yüzlekler oluşur ve genellikle kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda uzanır. Çalışma alanını kaplayan tüm kaya birimleri, Kuvaterner yaşlı plato bazaltları ile örtülüdür. Bölgedeki Senozoyik yaşlı kaya birimlerine gelince; en altta, Üst Lütesiyen - Alt Miyosen (Akitaniyen) yaşlı karmaşık bir birim olan Andırın Formasyonu yer alır. Bu karmaşık, genellikle kumtaşı, marn-kumlu kireçtaşı ardalanmalarından oluşan filiş içerir ve bazen olistostromal nitelik gösterir, bunun yanı sıra irili ufaklı olistolitler de içerebilir. Çalışma alanındaki Kuvaterner yaşlı bazaltlar, yaklaşık olarak kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda lekeler halinde yüzeylenmektedir (Şekil 2,4).



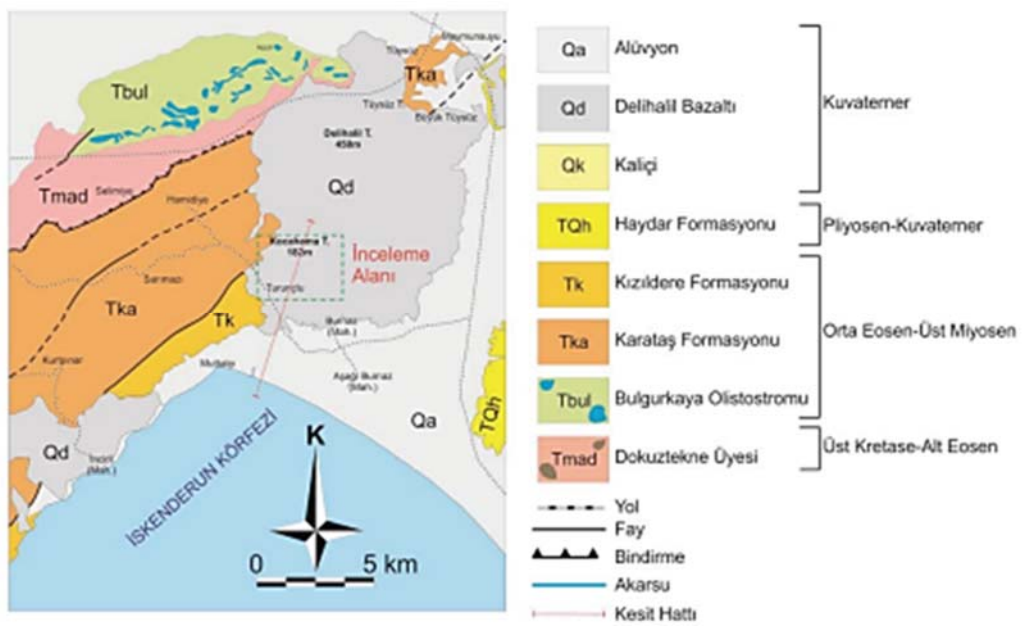
Şekil 4. Osmaniye-Ceyhan bölgesindeki Kuvaterner bazaltların dağılımı [1,2].

Pembe renkli ve gevşek olan bu tüfler, bazaltik lavların öncüleridir. Üç tepe konisi, Deli Halil Tepe gibi bazaltik cüruflar ve piroklastiklerden oluşmuştur. Karataş Tepe ve Küçükger Tepe civarlarında, bazaltik lavlar Pliyo-Kuvaterner yaşlı konglomeralar üzerinde akıntılar biçiminde bulunur. Düdenbaşı Tepe çevresindeki lavlar ise, Haruniye Ovası'nda akmaktadır ve alt zonlarında Pliyo-Kuvaterner konglomeralar bulunmaktadır.

Çalışma alanı, Türkiye'nin plaka tektoniği açısından son derece ilginç bir bölgededir. Şekil 2'de görülebileceği gibi, Arabistan plakası, Afrika plakası ve Ege-Anadolu plakalarının kesişim noktasındadır. Doğu Akdeniz ve Türkiye'ye ilişkin plaka tektoniği çalışmaları son yıllarda yoğunlaşmış ve pek çok araştırmacı çelişkili fikirler ortaya atmıştır. Ancak araştırmacıların çoğunluğunun birleştikleri konu bu bölgedeki plaka sınırlarıdır. Anadolu'nun güneydoğu parçası, Arap plakasının bir devamı şeklindedir ve Afrika plakası ile Arap plakası kuzeye doğru hareket etmektedir. Doğu Anadolu ise bir sıkışma bölgesi şeklindedir. Ege-Anadolu plakası ise kuzeyde "Kuzey Anadolu transform fayı" ve güneyde Girit adasının güneyinden geçen ve Marmaris-Kıbrıs boyunca devam eden yitim zonu ile sınırlanmaktadır. Bu yitim zonu doğuya doğru izlendiğinde, Kıbrıs'ın güneyinden geçtiği ve doğuya doğru dönerek çalışma alanına ulaştığı, daha sonra bir transform fay şeklinde (Doğu Anadolu fayı) Ege-Anadolu plakasını, Van plakasından ayırdığı belirtilmiştir. Ayrıca Arap ve Afrika plakalarını sınırlayan "Ölü deniz transform fayı" da güneyden çalışma alanına kadar uzanmaktadır. KD-GB uzanımlı sol yönlü doğrultu atımlı Karataş-Osmaniye Fay zonu boyunca Neojen seriyi kesen bazik bileşimli kayaçlar gözlenmektedir. Bunlar; Hama Tepe, Delihalil

Tepe, Üç Tepeler ve Gertepe olmak üzere dört farklı bölgede yoğunlaşmıştır. Bazik bileşimli kayaçların çıkış noktaları, bu dört bölgedeki volkanik bacalar olarak gösterilmektedir [2].

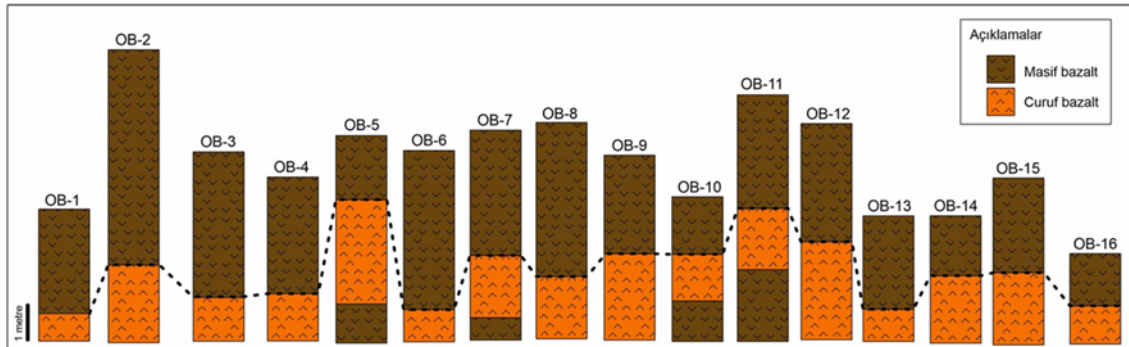
Toprakkale'nin batısındaki Delihalil Tepe'de bu bazik volkaniklerin çıkış merkezlerine ait volkan konileri gözlemlenebilmektedir. Birimin isimlendirmesi Osmaniye ili sınırları içerisinde kalan Delihalil Tepe'den alarak yapılmıştır [3]. Birim, geniş bir bölgede yüzeylenmektedir. Genelde genç tektonik hatlar boyunca yarık erüpsiyonu olarak ortaya çıkan bu bazik bileşimli kayaçlar gözenekli, siyah renkli bazaltlar ve kırmızımsı-gri ve siyah renkli tüflerin ardalanması şeklindedir. Yer yer Kuvaterner alüvyonları tarafından örtülü olan birimin erüpsiyon yaşı olarak Üst Pliyosen'in hemen sonrası olacağı belirtilmiştir [4]. Bölge ve yakın civarının genelleştirilmiş jeoloji haritası Şekil 5 de verilmiştir. En geniş yüzeylenme Delihalil Tepe civarında görülür ve Delihalil Tepe ana volkan bacasıdır; etrafında birkaç parazit koni bulunur. Bu bazaltlar, Delihalil Bazaltı olarak bilinen, üç tepeyi de tek bir volkan konisi oluşturan koni olmayan lav akıntıları biçiminde sunarlar. Bu formasyonlar, plato bazaltı olarak adlandırılan diğer tüm formasyonların üzerine yerleşmiştir. Delihalil Tepe, bir koni grubu olarak bulunur ve 2-3 büyük baca, birkaç parazit bacaya sahiptir. Volkan konileri genellikle bazaltik cürüflardan oluşur. Bazaltik yüzeylerin en güney sınırında bulunan Arnavut Tepe ve Hayıtlı Tepe'de, lav akıntılarının altında yatay tabakalı tüfler vardır.



Şekil 5. Çalışma alanının jeoloji haritası ([1] ve [3]'den alınmıştır)

### 3.2. Petrografik Çalışmalar

Şekil 2 ve Çizelge 1'de sunulan OB1-OB16 yarmalarının her seviyelerinden alınan örneklerden toplam 64 adet kayaç tanımlanması gerçekleştirilmiş, ince kesit görüntüleri ve açıklamaları verilmiştir (Şekil 6).

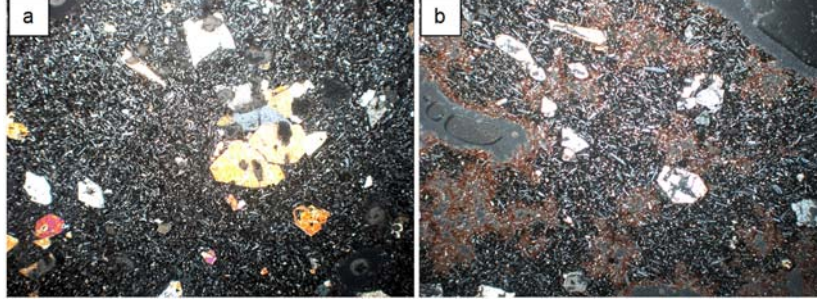


Şekil 6. Çalışılan koordinatlardan alınan örnekler üzerinde kayaç tanımlanmasına göre çizilen dikme kesit

### 3.2.1. Koordinatlardan Sistematik Derlenen Numunelerin Petrografik İncelenmesi

#### OB1 koordinatından alınan numunenin mineralojik incelemesi

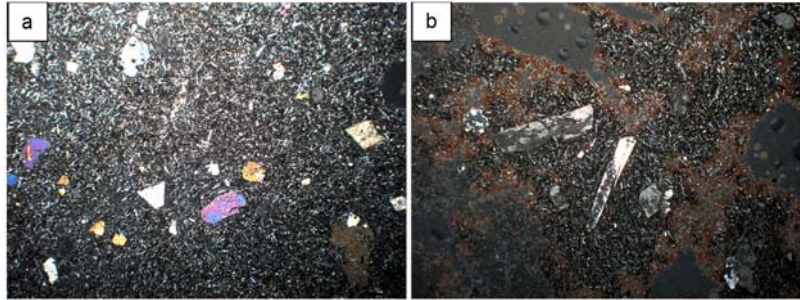
Mineralojik bileşim: Masif bazalt örneği %11-13 olivin, %6-8 ortopiroksen, %39-41 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %1-2 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır. Cüruf bazalt örneği %4-6 olivin, %1-2 ortopiroksen, %38-40 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %25-27 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır (Şekil 7).



Şekil 7. OB1 koordinatından alınan örneğin ince kesit görünümü a) masif bazalt b) cüruf

#### OB2 koordinatından alınan numunenin mineralojik incelemesi

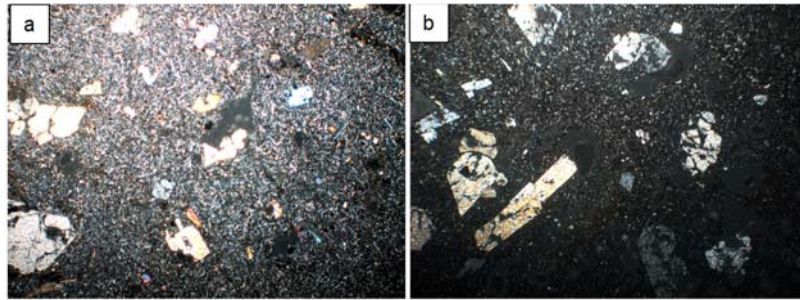
Mineralojik bileşim: Masif bazalt örneği %7-9 olivin, %3-4 ortopiroksen, %55-57 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %1-2 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır. Cüruf bazalt örneği %7-8 olivin, %1-2 ortopiroksen, %29-31 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %35-37 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır (Şekil 8).



Şekil 8. OB2 koordinatından alınan örneğin ince kesit görünümü a) masif bazalt b) cüruf

#### OB3 koordinatından alınan numunenin mineralojik incelemesi

Mineralojik bileşim: Masif bazalt örneği %15-17 olivin, %5-6 ortopiroksen, %40-42 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %2-3 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır. Cüruf bazalt örneği %8-10 olivin, %3-5 ortopiroksen, %32-34 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %22-24 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır (Şekil 9).

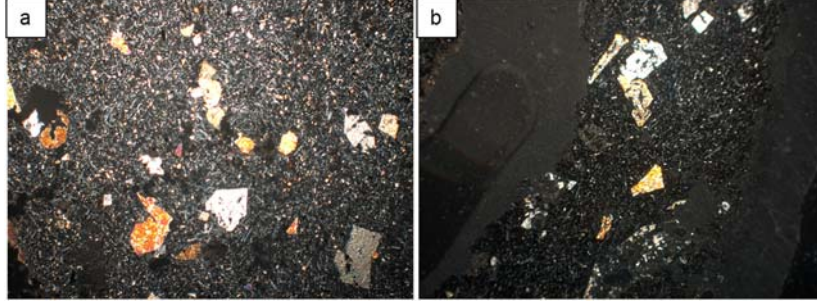


Şekil 9. OB3 koordinatından alınan örneğin ince kesit görünümü a) masif bazalt b) cüruf



**OB4 koordinatından alınan numunenin mineralojik incelemesi**

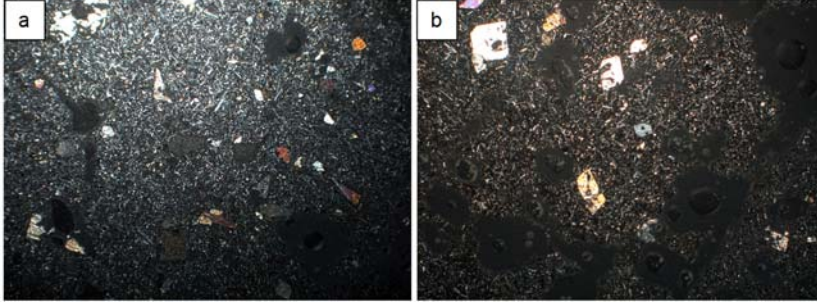
Mineralojik bileşim: Masif bazalt örneği %13-15 olivin, %4-5 ortopiroksen, %43-45 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %2-3 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır. Cüruf bazalt örneği %10-11 olivin, %2-3 ortopiroksen, % 34-36 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve % 32-34 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır (Şekil 10).



Şekil 10. OB4 koordinatından alınan örneğin ince kesit görünümü a) masif bazalt b) cüruf

**OB5 koordinatından alınan numunenin mineralojik incelemesi**

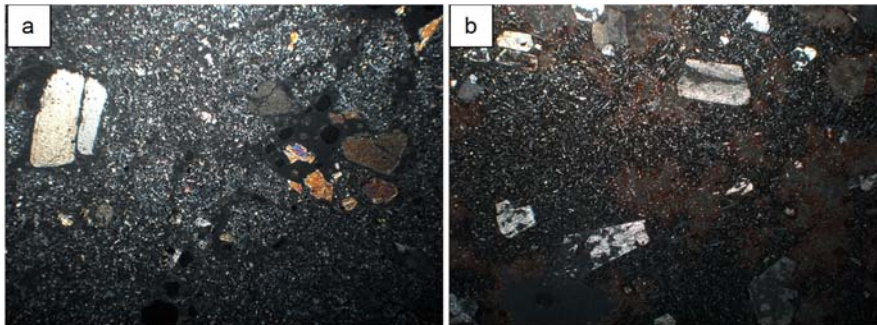
Mineralojik bileşim: Masif bazalt örneği %5-7 olivin, %2-3 ortopiroksen, %52-54 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve % 1-2 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır. Cüruf bazalt örneği %8-10 olivin, %2-3 ortopiroksen, %33-35 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %23-25 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır (Şekil 11).



Şekil 11. OB5 koordinatından alınan örneğin ince kesit görünümü a) masif bazalt b) cüruf

**OB6 koordinatından alınan numunenin mineralojik incelemesi**

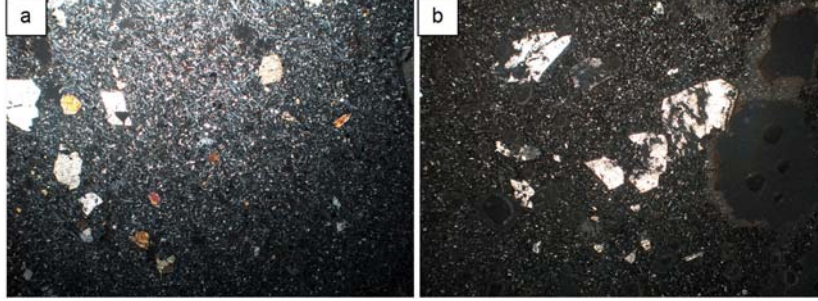
Mineralojik bileşim: Masif bazalt örneği %11-13 olivin, %3-4 ortopiroksen, %45-47 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %1-2 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır. Cüruf bazalt örneği % 4-5 olivin, % 7-9 ortopiroksen, % 27-29 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve % 25-27 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır (Şekil 12).



Şekil 12. OB6 koordinatından alınan örneğin ince kesit görünümü a) masif bazalt b) cüruf

#### OB7 koordinatından alınan numunenin mineralojik incelemesi

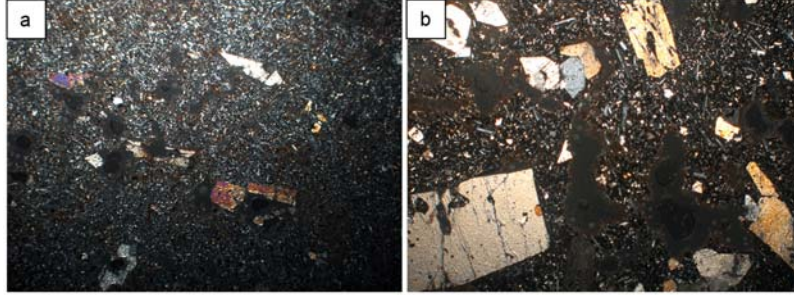
Mineralojik bileşim: Masif bazalt örneği %9-11 olivin, %3-4 ortopiroksen, %55-57 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %1-2 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır. Cüruf bazalt örneği %10-11 olivin, %2-4 ortopiroksen, %27-29 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %33-35 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır (Şekil 13).



Şekil 13. OB7 koordinatından alınan örneğin ince kesit görünümü a) masif bazalt b) cüruf

#### OB8 koordinatından alınan numunenin mineralojik incelemesi

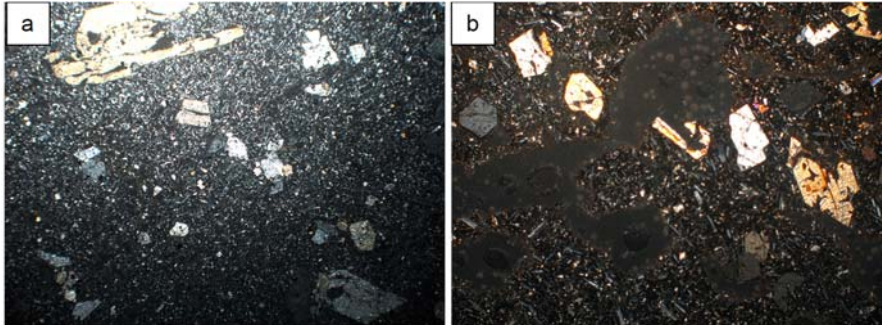
Mineralojik bileşim: Masif bazalt örneği %13-15 olivin, %3-5 ortopiroksen, %44-46 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %2-3 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır. Cüruf bazalt örneği %14-16 olivin, %4-6 ortopiroksen, %31-33 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %35-37 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır (Şekil 14).



Şekil 14. OB8 koordinatından alınan örneğin ince kesit görünümü a) masif bazalt b) cüruf

#### OB9 koordinatından alınan numunenin mineralojik incelemesi

Mineralojik bileşim: Masif bazalt örneği %14-16 olivin, %3-4 ortopiroksen, %42-43 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %1-2 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır. Cüruf bazalt örneği %10-12 olivin, %1-3 ortopiroksen, %26-28 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %37-39 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır (Şekil 15).

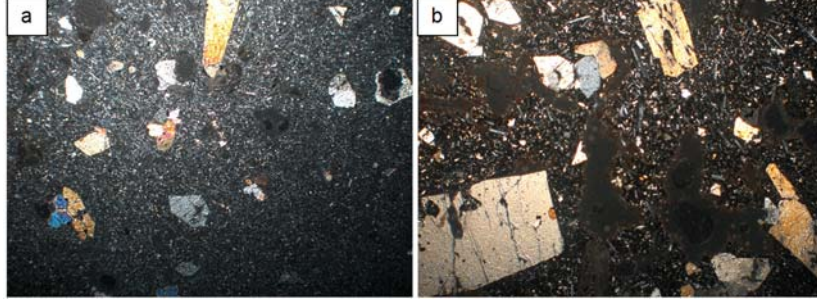


Şekil 15. OB9 koordinatından alınan örneğin ince kesit görünümü a) masif bazalt b) cüruf



**OB10 koordinatından alınan numunenin mineralojik incelemesi**

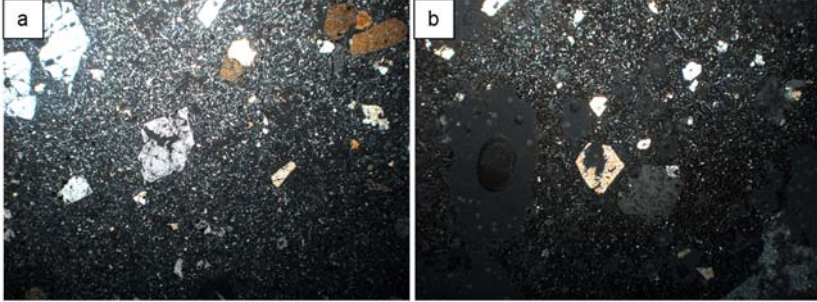
Mineralojik bileşim: Masif bazalt örneği %13-15 olivin, %4-6 ortopiroksen, %45-47 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %2-3 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır. Cüruf bazalt örneği %17-19 olivin, %3-5 ortopiroksen, % 18-22 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve % 33-35 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır (Şekil 16).



Şekil 16. OB10 koordinatından alınan örneğin ince kesit görünümü a) masif bazalt b) cüruf

**OB11 koordinatından alınan numunenin mineralojik incelemesi**

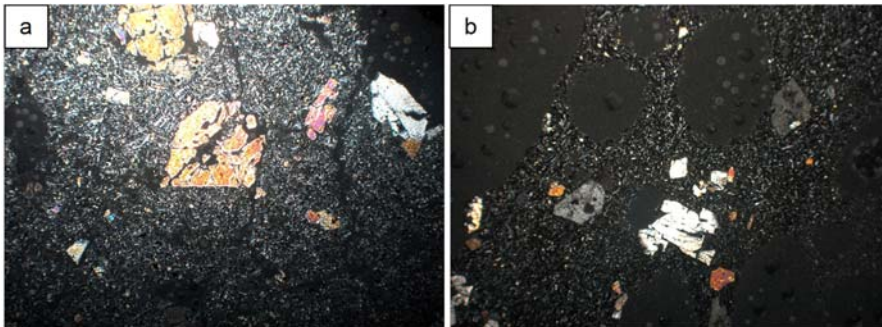
Mineralojik bileşim: Masif bazalt örneği %12-14 olivin, %5-6 ortopiroksen, %43-45 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %1-3 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır. Cüruf bazalt örneği %5-7 olivin, %2-3 ortopiroksen, % 45-47 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve % 33-35 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır (Şekil 17).



Şekil 17. OB11 koordinatından alınan örneğin ince kesit görünümü a) masif bazalt b) cüruf

**OB12 koordinatından alınan numunenin mineralojik incelemesi**

Mineralojik bileşim: Masif bazalt örneği %16-18 olivin, %5-6 ortopiroksen, % 38-41 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve % 2-3 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır. Cüruf bazalt örneği %5-7 olivin, %3-5 ortopiroksen, %24-26 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve % 28-40 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır (Şekil 18).

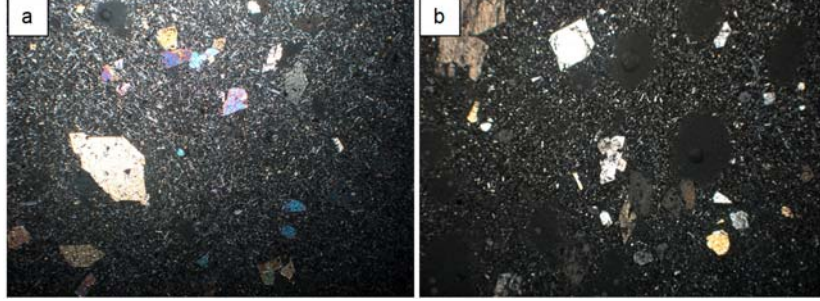


Şekil 18. OB12 koordinatından alınan örneğin ince kesit görünümü a) masif bazalt b) cüruf



#### OB13 koordinatından alınan numunenin mineralojik incelemesi

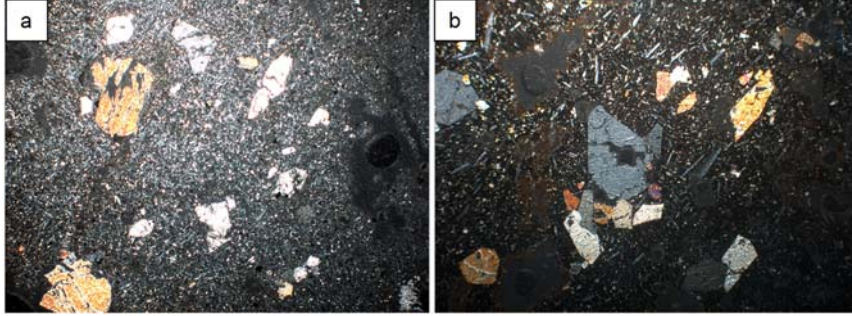
Mineralojik bileşim: Masif bazalt örneği %14-16 olivin, %5-6 ortopiroksen, %41-43 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve % 2-3 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır. Cüruf bazalt örneği %9-11 olivin, %3-5 ortopiroksen, %34-36 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %24-26 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır (Şekil 19).



Şekil 19. OB13 koordinatından alınan örneğin ince kesit görünümü a) masif bazalt b) cüruf

#### OB14 koordinatından alınan numunenin mineralojik incelemesi

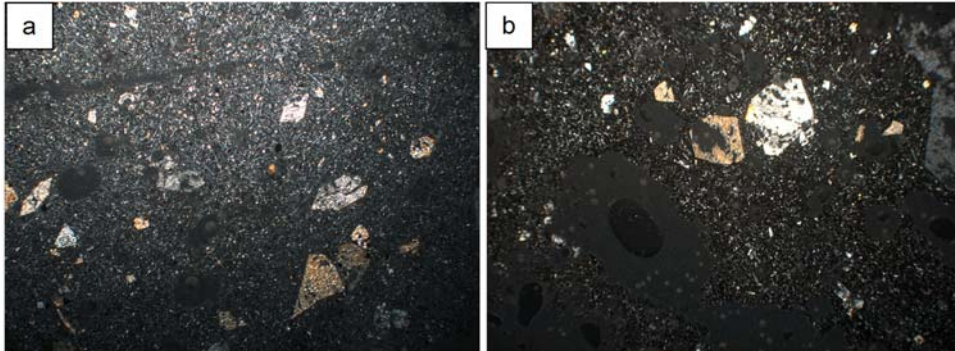
Mineralojik bileşim: Masif bazalt örneği %16-18 olivin, %5-6 ortopiroksen, %46-48 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %1-3 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır. Cüruf bazalt örneği % 15-17 olivin, % 3-5 ortopiroksen, % 18-21 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve % 33-35 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır (Şekil 20).



Şekil 20. OB14 koordinatından alınan örneğin ince kesit görünümü a) masif bazalt b) cüruf

#### OB15 koordinatından alınan numunenin mineralojik incelemesi

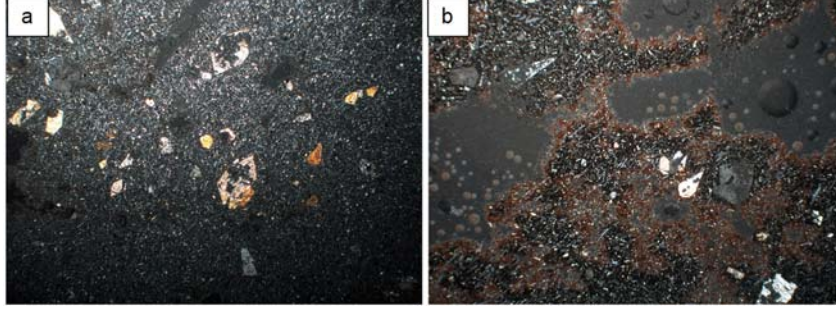
Mineralojik bileşim: Masif bazalt örneği %8-11 olivin, %3-5 ortopiroksen, %49-51 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %2-3 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır. Cüruf bazalt örneği %5-7 olivin, %3-5 ortopiroksen, %24-26 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %29-31 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır (Şekil 21).



Şekil 21. OB15 koordinatından alınan örneğin ince kesit görünümü a) masif bazalt b) cüruf

### OB16 koordinatından alınan numunenin mineralojik incelemesi

Mineralojik bileşim: Masif bazalt örneği %6-8 olivin, %3-4 ortopiroksen, %55-57 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %2-3 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır. Cüruf bazalt örneği %3-4 olivin, %1-2 ortopiroksen, %42-44 plajiyoklaz mikrolitleri, volkanik cam içermektedir ve %30-32 mertebesinde vesikül (boşluk) sunmaktadır (Şekil 22).



Şekil 22. OB16 koordinatından alınan örneğin ince kesit görünümü a) masif bazalt b) cüruf

## 4. SONUÇLAR

Çalışma alanındaki bazik bileşimli volkanik kayalar genellikle piroklastik, gaz boşluklu bazaltlar (cüruf) ve kolonlu debili (masif) olarak üç tipte gözlenmektedir. Kırmızımsı, siyah ve gri renklerde gözlenen piroklastik malzemeler, Tüysüz Tepe, Deli Halil Tepe ve Kocahama Tepe arasında yer almaktadır. Bu kayalar genellikle volkanik cüruf, tuf ve çapı yaklaşık 1 m'ye kadar ulaşan volkan bombalarından oluşmaktadır. Çalışma bölgesinin bazı kesimlerinde piroklastik kayalar masif lav akıntısı üzerinde görülmektedir. Bu da volkanik faaliyetin birden fazla aşamada gerçekleştiğini göstermektedir. Bölgedeki ikinci tip volkanik ürün, kahverengi renkte ayrışma yüzeylerine sahip olup, taze yüzeyleri siyah renkli gaz boşluklu (cüruf) seviyelerdir. Gaz boşluklu (cüruf) seviyeler genellikle alanın tamamında bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, yüzeyden yaklaşık 4 m derinliğe kadar gaz boşluklu (cüruf) seviyeler bulunmuş, bu seviyenin üzerinde ise masif özellikte bazaltik akıntılara rastlanmıştır. Cüruf seviyesinin daha derinlerine inildiğinde ise yer yer masif seviyelerin tekrar ettiği not edilmiştir. Bu durum, bölgedeki volkanik aktivitenin tek bir aşamada gerçekleşmediğine işaret etmektedir. Bu volkanik birimin yaşı yumurtalık bölgesinde gerçekleştirilen çalışmada Serravaliyen olarak verilmiştir [5,6]. Bölgedeki bazaltlar iki grup altında cüruf ve masif olarak ele alınmış ve petrografik özellikleri ortaya konulmuştur. Çok sayıda örneğin ince kesitlerinin incelenmesi sonucunda, bazaltların (cüruf-masif) genellikle intergranüler porfirik dokuda ve ofitik dokuda olduğu ve cüruf türü kayaların bol miktarda soğuma gaz boşlukları içerdiği belirlenmiştir. Kayaç matriksinde ayrıca mikro oluşumlar halinde opak mineral ve çok az miktarda kalsit bulunmaktadır. Opak mineraller demir içermektedir. Nadiren ojit ve olivin fenokristallerinde biyotit içeren inklüzyonlar bulunmaktadır. Petrografik incelemeler sonucunda lavların (hem cüruf hem de masif) bazalt olduğu belirlenmiştir. Masif bazaltların esas olarak plajiyoklas, olivin ve ortopiroksen fenokristallerinin, yine aynı kristallerden meydana bir kayaç matriksi maddesi içinde yer aldığı saptanmıştır. Plajiyoklasların sönme açıları ölçülmüş ve hemen hemen tamamının labrador bileşiminde olduğu, olivin fenokristallerinin ise %18-22 arasında yer aldığı ortaya konulmuştur. Masif bazaltlar içerisinde gözlenen olivin kristallerinde ayrışma hemen hemen hiç gözlenmezken yer yer kırık ve çatlaklar raporlanmıştır. Bu kayalar içerisinde ortalama olarak %1-2 oranında vesikül (boşluk) gözlenirken kayaç matriksinde gözlenen volkanik camın çoğunlukla ayrışmamış olduğu yer yer bozunmalar olduğu saptanmıştır. Çalışma alanında incelenen ikinci grup kayaç cüruf bazalt olarak adlandırılmıştır. Cüruf bazaltların ana bileşenlerini plajiyoklas, olivin ve ortopiroksen fenokristalleri meydana getirmektedir ve aynı kristallerden meydana bir kayaç matriksi maddesi ve volkanik cam içinde yer aldığı belirtilmiştir. Plajiyoklasların sönme açılarına dayanılarak bu kayaların da barındırdığı feldispatların hemen hemen tamamının labrador bileşiminde olduğu, olivin fenokristallerinin ise %16-17 arasında yer aldığı gözlenmiştir. Cüruf bazaltlar içerisinde gözlenen olivin kristallerinde ayrışma yer yer demirli ayrışım türünde gözlenirken çoğunlukla bozunmamış vaziyette gözlenmiştir. Cüruf türü kayalar içerisinde ortalama olarak %23-27 oranında vesikül (boşluk) gözlenirken kayaç matriksinde gözlenen volkanik camın çoğunlukla ayrışmamış olduğu, yer yer bozunmalar olduğu saptanmıştır. Bölgede çalışılan cüruf bazaltların ortalama kalınlığı 1,8-2,1 metre olarak ölçülürken, masif bazaltların ortalama kalınlığı ise 3,3- 3,5 metre olarak ölçülmüştür ve cüruf bazaltların masif bazalt

seviyesinin altında devamlı bir seviye sunduğu ortaya konulmuştur. Misis Dağlarının çalışma alanında, Kıbrıs adasıyla yapısal olarak benzerlik gösteren bir deniz altı sırtının bir parçası olduğu öne sürülmüştür [7].

Son yıllarda yapılan çalışmalarla bölgede sıkışma tektoniğinin etkin olduğu ve Arabistan plakasının Orta Miyosen 'de Ege-Anadolu plakası ile çarpıştığı, sıkışmanın ilerleyen aşamalarında Doğu Anadolu fayı ve Kuzey Anadolu fayının gelişmesiyle batıya doğru itilen Anadolu plakasında D-B yönlü sıkışma kuvvetlerinin ortaya çıktığı belirlenmiştir [8]. Sıkışma tektoniğinin hala etkin olduğu çalışma alanında, KD-GB yönlü ikincil kırık hatlarının oluşturduğu zayıflık bölgelerinden, mantodan yükselerek yeryüzüne ulaşan toleyitik bazaltik lavlar, yer yer kirlenerek potasyum içeriği artmış ve hafif alkali nitelik kazanmışlardır. Bu tür kıtasal toleyitik plato bazaltları, yeryüzünde pek çok yerde görülmektedir.

## 5. TEŞEKKÜR

Çalışmayı, FBA-2023-15770 numaralı proje ile finansal olarak destekleyen Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (BAP) desteklerinden dolayı teşekkür ederiz. Rusat alanında akademik çalışma yapmamıza olanak sağlayan Mar-Taş İnşaat Maden San. Tic. Ltd. Şti ye teşekkür ederiz. Ayrıca makalenin son halini almasında değerli katkılar sunan iki hakeme ve dergi editörlerine teşekkürleri borç biliriz.

## 6. KAYNAKLAR

1. Bilgin, Z., Ercan, T., 1981. Ceyhan–Osmaniye yöresindeki kuvaterner bazaltların petrolojisi. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 24, 22-30.
2. Yurtmen, S., Rowbotham, G., İşler, F., Floyd, P.A., 2000. Petrogenesis of basalts from Southern Turkey: The Plio-Quaternary volcanism to the North of İskenderun Gulf. Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area. Geological Society, London, Special Publications, 173, 489-512.
3. Kozlu, H., 1982. İskenderun baseni jeolojisi ve petrol olanakları. TPAO Rapor no: 1921, Ankara.
4. Kozlu, H., 1997. Doğu Akdeniz Bölgesinde yer alan neojen basenlerinin (İskenderun, Misis-Andırın) tektono-stratigrafi birimleri ve bunların tektonik gelişimi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 189.
5. Akıncı, A.C., Nurlu, N., Güney, A., 2023. Origin and geodynamic implications of basaltic rocks intercalated with Miocene turbidites around the İskenderun Basin (Eastern Mediterranean/Turkey). Journal of African Earth Sciences, 198, 104780, 1-19.
6. Akıncı, A.C., Nurlu, N., Güney, A., 2023. Origin and geodynamical implications of basaltic rocks intercalated in the Miocene turbiditic deposits around the İskenderun Basin (Eastern Mediterranean/Turkey). 7th International Mediterranean Science and Engineering Congress, 29, 94-94.
7. Stride, A.V., Belderson, R.H., Kenyon, N.H., 1977, Evolving miogeanticlines of the East Mediterranean (Hellenic, Calabrian and Cyprus outter ridgls): Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., 284, 1316- 1326.
8. Gözübol, A.M., Gürpınar, O., 1980. Kahramanmaraş kuzeyinin jeolojisi ve tektonik evrimi. Türkiye 5. Petrol Kong. Tebliğ Kitabı, 20.



## Adana Seyhan Barajının Yıkılma ve 2 Boyutlu Taşkın Yayılımının HEC-RAS ile Modellenmesi

Mehmet ARDIÇLIOĞLU<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup>Emekli Öğretim Üyesi, AR-GE Danışmanlık-İnşaat, Kayseri

<sup>a</sup>ORCID: 0009-0008-7487-3193

### Makale Bilgileri

Geliş : 30.04.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560170

### Sorumlu Yazar

Mehmet ARDIÇLIOĞLU

mehmet.ardiclioglu@gmail.com

### Anahtar Kelimeler

Baraj göçmesi

Seyhan barajı

2B taşkın

HEC-RAS

Tehlike bölgesi

**Atf şekli:** ARDIÇLIOĞLU, M., (2024). Adana Seyhan Barajının Yıkılma ve 2 Boyutlu Taşkın Yayılımının HEC-RAS ile Modellenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 741-752.

### ÖZ

Bu çalışmada Seyhan barajının olası deprem nedeniyle yıkılması durumunda meydana gelecek taşkının mansapta Adana kent merkezi ve çevresine etkisi incelenmiştir. Baraj göçme analizinde HEC-RAS 6.4 paket programı kullanılarak borulanmaya bağlı gövdede oluşacak gediklenme ve buna bağlı iki boyutlu taşkın yayılımı ele alınmıştır. İki farklı senaryo için gediklenme parametreleri belirlenmiş ve taşkın yayılım süreleri ve tehlike derecelendirmesi DEFRA ya göre yapılmıştır.  $Q_0$  ve  $Q_{100}$  debilerinde göçmeye bağlı oluşan taşkınların Adana kent merkezine 6 saat sürede ulaşacağı ve özellikle Seyhan nehri yakınlarında su derinliğinin 15m ye kadar yükselebileceği belirlenmiştir. Birinci senaryoya göre ( $Q_0$ ) baraj gövdesinin göçmesi durumunda toplamda 1042,61 km<sup>2</sup> alan sular altında kalmakta, bu alanların %35,4'i, çok yüksek tehlikeli bölge olarak belirlenmiştir.  $Q_{100}$  debisi ile birlikte barajda maksimum seviyede su bulunması halinde göçme gerçekleşir ise 1331,81 km<sup>2</sup> alan sular altında kalmakta, bu alanların %40,1'i, çok yüksek tehlikeli bölge olarak hesaplanmıştır.

## Modeling the Failure and 2D Flood Propagation of Adana Seyhan Dam with HEC-RAS

### Article Info

Received : 30.04.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560170

### Corresponding Author

Mehmet ARDIÇLIOĞLU

mehmet.ardiclioglu@gmail.com

### Keywords

Dam failure

Seyhan dam

2D flood

HEC-RAS

Hazard zone

**How to cite:** ARDIÇLIOĞLU, M., (2024). Adana Seyhan Barajının Yıkılma ve 2 Boyutlu Taşkın Yayılımının HEC-RAS ile Modellenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 741-752.

### ABSTRACT

In this study the effect of the flood that will occur in case of failure of the Seyhan dam due to possible earthquake at the Adana city center and its surroundings was examined. In the dam failure analysis, the possible breach in the body due to piping and resulting two-dimensional flood propagation were discussed by using HEC-RAS 6.4 package program. Breach parameters were determined for two different scenarios and flood propagation times and hazard rating were made according to the DEFRA. It has been determined that floods caused by collapse at  $Q_0$  and  $Q_{100}$  flow rates will reach Adana city center in about 6 hours and the water depth may rise up to 15m, especially near the Seyhan river. According to the first scenario ( $Q_0$ ), if the dam collapses a total of 1042,61 km<sup>2</sup> area will be flooded and 35,4% of these areas are determined as very high hazard zone. If the dam collapses at the maximum level of water with the  $Q_{100}$  flow rate, an area of 1331,81km<sup>2</sup> will be flooded, and 40,1% of these areas are calculated as a very high hazard zone.

## 1. GİRİŞ

Barajlar, evsel ve endüstriyel su ihtiyaçlarını karşılamak, tarımsal sulama, hidroelektrik enerji üretimi sağlamak, gibi faydalar yanı sıra taşkın kontrolü, sediment tutma amacıyla akarsular üzerine inşa edilen hidrolik yapılardır. Barajlar sağladığı bu büyük faydaların yanında, olası göçme-yıkılma durumunda büyük felaketlere neden olacaktır. Barajlar birçok nedene bağlı olarak yıkılma tehlikesiyle karşı karşıya kalabilirler. Baraj gövdesinde oluşabilecek borulanma-siltasyon ve taşkın dalgalarının gövde üzerinden aşması nedeniyle barajlarda yıkıcı hasarlar meydana gelebilir. Toprak dolgu barajların gövdesinde ve temelinden oluşan sızıntıların hızı ve miktarı baraj işletme süresince takip edilmelidir. Sızıntı, kontrol edilmezse, ince toprak malzeme, mansap şevinde veya temelde aşınabilmekte ve bu aşınma memba şevine doğru devam ederse boşluk oluşturarak borulanmaya sebep olabilmektedir. Bu durum barajın komple yıkılmasına yol açacaktır. Ayrıca depremler, rezervuarın içine doğru, oluşabilecek heyelanlarda baraj gövdesinde hasara neden olabilir. Barajın yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgası yayılımının belirlenmesi, barajın mansabında yer alan konut, ticari veya tarım alanlarındaki risklerin belirlenmesinde önemli ve gerekli bir çalışmadır.

Dünyanın değişik bölgelerinde yıkılan yaklaşık 900 barajın yıkılma şekli analiz edilerek bu barajların %65,5'inin toprak-kaya dolgu, %7,5'inin beton, %6,7'sinin ise taş barajlar olduğu belirtilmiştir. Toprak dolgu barajların yıkılma sebepleri arasında %42,5 oranda teknik kusur, %36,5 taşma nedeniyle yıkımın gerçekleştiği, teknik kusurların ise %58,3'ünün gövdede borulanma, %18,3'ünün heyelan ve %9,1'inin de dolu savaktaki yetersizlikler kaynaklı olduğu belirtilmiştir [1].

Afet yönetimi için baraj yıkılma analizi başlıklı çalışmada Bozkuş [2], betonarme ağırlık tipi barajların kısmi yıkılma eğilimi gösterdiklerini, betonarme kemer barajların ise tamamen yıkılma eğiliminde olup birkaç dakikada yıkıldıklarını belirtmiştir. Sayıları çok daha fazla olan toprak ve kaya dolgu barajların yüksekliği, dolguda kullanılan malzemenin cinsi, sıkıştırma miktarı gibi farklı parametrelere bağlı olarak saatler içerisinde ve gövde genişliğinin nispeten az bir kısmında göçmenin gerçekleştiğini ifade etmiştir.

Ülkemizde DSİ tarafından riskli barajların belirlenmesi amacıyla yapılan bir çalışmada [3] yüksekliği 15m'den büyük ve 5-15m arasında olup rezervuar hacmi  $3\text{hm}^3$  'ten büyük olan barajlar incelenmiştir. İncelenen barajların yıkılmaları halinde oluşacak kayıpların %42'sinin en yüksek risk derecesinde, %43'ünün de önemli risk derecesine sahip olduğu belirlenmiştir. Yapılacak planlama, yıkılma sonrası oluşacak muhtemel akım hızlarını ve taşkın dalgasının mansapta ne zaman nereye ulaşacağını tahminini içermesi ve mansapta yaşayan insanlarda felaketin muhtemel etkileri için farkındalık yaratabilmesi gerekliliği belirtilmiştir.

Çağatay ve Kocaman [4] baraj yıkılmasına bağlı mansapta oluşacak taşkın su yüzü profillerini NWS FLDWAY bilgisayar programı ile incelemişler, farklı Manning pürüzlülük değerleri için Kozan barajı üzerinde uygulama yaparak barajın yıkılması halinde Kozan ilçesinin büyük bir kısmının taşkından zarar göreceğini bildirmişlerdir.

Dursun ve Gül [5], toprak dolgu baraj olan Malatya, Sürgü Barajı'nın deprem veya farklı bir nedenle yıkılması durumunda oluşabilecek zararların boyutlarını ortaya koymak amacıyla HEC-RAS ile yıkılma analizi yaparak iki boyutlu taşkın yayılım haritaları elde etmişlerdir. Sürgü Barajı mansabında bulunan yerleşim birimlerinin ve tarım arazilerinin baraj yıkılmasından nasıl etkilenebileceği tahmin edilmeye çalışılarak risk haritaları oluşturmuşlardır.

Paşa ve ark. [6] İstanbul Anadolu yakasında ardışık iki baraj olan Elmalı 1 ve 2 barajlarının olası yıkılmalarını çeşitli senaryolar altında HEC-RAS programı ile analiz ederek taşkın tehlike haritaları oluşturmuşlardır. Yoğun yerleşim bölgesi ve trafiğin olduğu çalışma alanında, mambada yer alan Elmalı 2, beton payandalı bir baraj ve mansaptaki Elmalı 1'de toprak dolgu bir baraj olarak inşa edilmiştir. En kötü senaryoya göre taşkın tehlike haritası oluşturulmuştur. Hesaplanan taşkın haritaları, yüksek nüfus yoğunluğuna sahip hassas alanların, olası su baskınlarından önemli ölçüde etkilenebileceğini göstermiştir. Çalışmanın taşkın bölgelerindeki insanlar için acil durum ve tahliye planlarının hazırlanması yanı sıra erken uyarı sistemi kurulması gibi tedbirlerin alınmasına yardımcı olacağı öngörülmüştür.

Bu çalışmada zonlu toprak dolgu bir baraj olan Adana Seyhan barajının olası deprem ve benzeri nedenler sonucu gövdede oluşacak kırılma ve çatlamalara bağlı yıkılma analizi ele alınmıştır. Baraj gövdesindeki

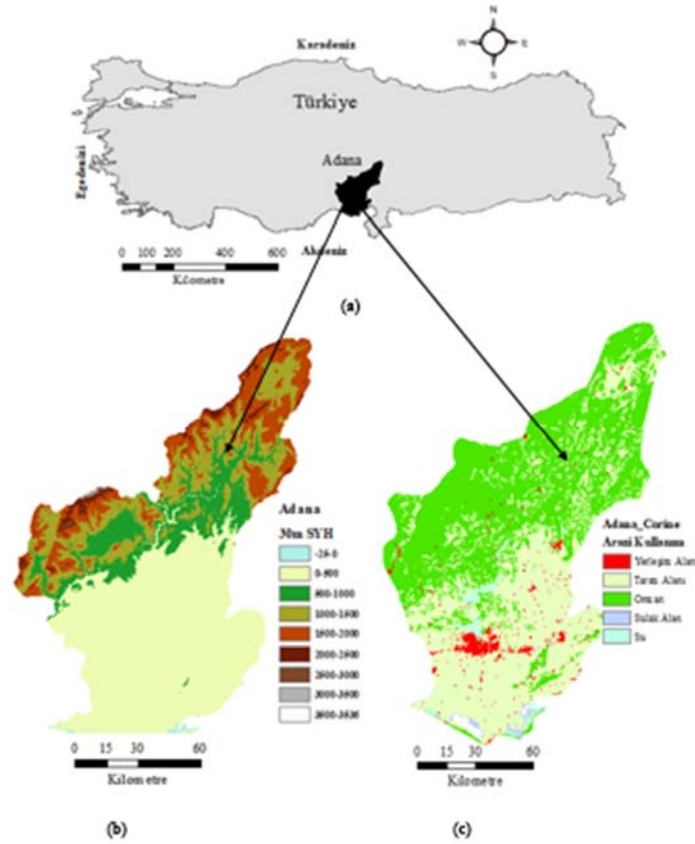


deformasyonlar nedeniyle dolguda oluşacak borulanma ve buna bağlı göçme analizi HEC-RAS 6.4 paket programı ile iki farklı senaryo için incelenmiştir. Barajın olası göçme durumunda, taşkın dalgalarının etkileyeceği bölgeler iki boyutlu modelleme yapılarak belirlenmiştir. Söz konusu bölgelerdeki taşkın yayılım süresi, akım hızı ve derinliğe bağlı tehlike durumu incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Adana İli ve Seyhan Barajı

Adana ili Anadolu yarımadasının güneyinde, Akdeniz kıyısında 36°30-38°25 kuzey enlemleri ile 34°48-36°41 doğu boylamları arasında yer almaktadır. Adana'nın yüzölçümü 13.844 km<sup>2</sup> ve alan olarak Türkiye'nin %1,77'lik kısmını oluşturmaktadır Şekil 1(a). 2023 TÜİK verilerine göre Adana nüfusu 2.270.298 olmak üzere Türkiye'nin %2,66'lık kısmını kapsar ve Türkiye'nin 7. kalabalık ilidir. Adana il merkezi jeomorfolojisi, kuzey ve güney olmak üzere iki bölümde incelenir. Kuzey kısmı Post Miyosen aşımın yüzeyleri ile sırtlar ve dik yamaçlardan meydana gelir.



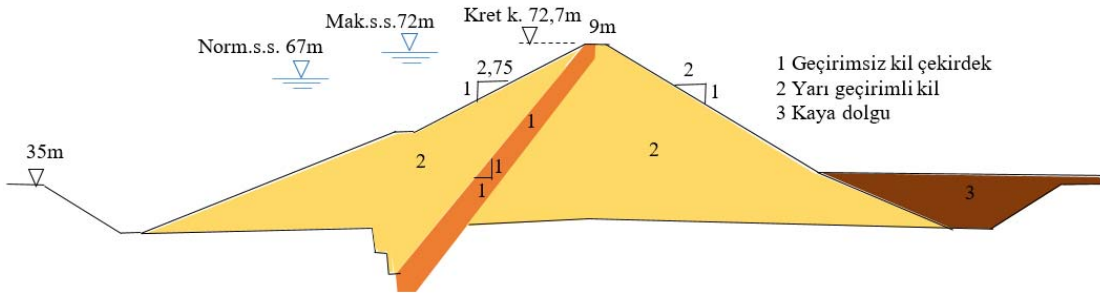
Şekil 1. Adana ili SYH ve Corine arazi kullanımı

Güney kesiminde ise delta çökellerinin oluşturduğu alüvyonlar ile Seyhan Nehri'nin zamanla yatak değiştirmesinden oluşan geniş taşkın alanı, kopuk menderesler, lagünler, karasallaşmış lagünler, geçici ve daimi göller, burun seti depoları, kraveseler ile akarsu sekilerinden oluşur [7]. Adana iline ait Sayısal Yükseklik Haritası (SYH), USGS (ABD Yerbilimsel Araştırma Kurumu) web sayfasından alınmıştır [8]. Haritaların projeksiyonu UTM-WGS 1984-Northern Hemisphere (Kuzey Yarımküre) ve 'zone 36N.prj' olarak seçilmiştir. Şekil 1(b) de 30mx30m çözünürlükteki yükseklik haritası gösterilmiştir.

Seyhan Nehri yağış alanı Akdeniz ve İç Anadolu coğrafi bölgelerinde yer almakta ve her iki bölgenin iklim özelliklerini taşımaktadır. Bölgede gözlenmiş taşkınlar Aralık-Mayıs aylarında yağmur veya yağmur ve kar erime akışı birleşimine bağlı oluşmaktadır. Mera, orman ve fundalıkların toplam alanı havzanın önemli bir kısmını oluşturur. Arazi kullanım şekli yıldan yıla özellikle sulu tarım alanlarının, kuru tarım alanları aleyhine genişlemesi, yerleşim alanlarının büyümesi, yeni baraj göllerinin havzada önemli yer kaplaması

ve artması gibi nedenlerle hızlı bir değişim içerisinde [9]. Arazi kullanımına ait sayısal haritalar, Çevre ve Orman Bakanlığından elde edilen CORINE Arazi Sınıflandırma Sistemi esas alınarak hazırlanmıştır. CORINE Sınıflandırma Sistemi, Coordination of Information on the Environment (Çevresel Bilginin Koordinasyonu) projesi kapsamında oluşturulmuştur [10] ve 1990 yılından beri tüm AB üye ülkelerinde kullanılan ortak sınıflandırma sistemidir. CORINE arazi örtüsü sınıflandırma sistemi, Avrupa Çevre Ajansı tarafından belirlenen üç hiyerarşik seviyeden oluşmaktadır. Birinci seviyede; Yapay Bölgeler, Tarım Alanları, Orman ve Yarı Doğal Alanlar, Sulak Alanlar, Su Kütleleri olmak üzere 5 ana grup yer almaktadır. Adana iline ait birinci seviye arazi kullanımı Şekil 1(c) de gösterilmiştir.

Seyhan Nehri, İç Anadolu'nun doğu kesiminde, Uzunyayla yöresinden doğan Zamantı Irmağı ile bunun doğusunda Doğu Anadolu sınırları içerisinde doğan Gökso Nehri'nin birleşmesiyle meydana gelir ve Çukurova'yı geçerek Akdeniz'e dökülür. Seyhan havzasının toplam yüzölçümü yaklaşık 20.000km<sup>2</sup> ve nehrin uzunluğu 500km kadardır. Seyhan barajı, Seyhan nehri üzerinde, Adana şehir merkezinin 15km kuzeyinde yer almakta olup, 1956 yılında eğik kil çekirdekli toprak dolgu tipi bir baraj olarak inşa edilmiştir (Şekil 2). Çukurova'yı Seyhan Nehri'nin sebep olabileceği su baskınından korumak amacıyla yanı sıra sulama ve hidroelektrik enerji üretim amaçlı bir barajdır. Gövde hacmi 7.500.000m<sup>3</sup>, akarsu yatağından yüksekliği 53,20m, normal su kotunda göl hacmi 1.200,00hm<sup>3</sup>, normal su kotunda gölalanı 67,82km<sup>2</sup>'dir. Baraj sayesinde 174.000hektar arazi sulanabilmektedir. On sekizer MW'lık üç üniteye sahip Hidroelektrik santral, 54MW güç ile yılda toplam 350 milyon KWh elektrik enerjisi üretebilmektedir.



Şekil 2. Seyhan baraj kesiti

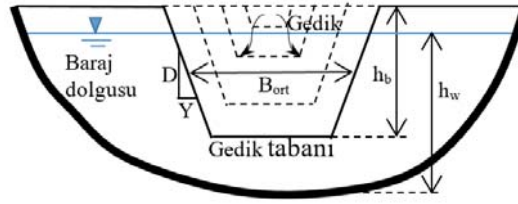
## 2.2. Dolgu Barajlarda Borulanmaya Bağlı Göçme

Akarsular üzerinde fazla yağışlara bağlı olarak taşkınların meydana gelmesi doğal bir süreç olarak karşımıza çıkar. Barajlar için ise, inşa aşamasındaki bazı hesaplama yanlışlıkları, beklenmedik uzun ve yoğun süren yağışlar ve/ya sahanın depresivitesi gibi değişik nedenlere bağlı olarak baraj gövdesinin zarar görmesiyle ortaya çıkan maksimum düzeydeki akımlarla bütün alt havzalardaki alanlar risk altında kalabilmektedir. Bu nedenle, baraj inşa edilen akarsular üzerinde, değişik senaryolarla oluşabilecek taşkınlar ve etkileri üzerine çalışılmalı ve risk yönetimi oluşturulmalıdır [11].

Betonarme, toprak ve kaya dolgu barajların yıkılma mekanikleri tam anlaşılabilmiş değildir. Sayıları diğer baraj tiplerinden çok daha fazla olan toprak ve kaya dolgu barajlar ani olarak veya tamamen yıkılma eğilimi göstermezler. Dolgu barajlarda rezervuardaki büyük su kütlesi nedeniyle malzeme özelliklerine bağlı gövdeye doğru sızma kaçınılmazdır. Suyun dolgu içerisindeki bu hareketi basınçlı orifis akımı olarak modellenebilir. Gövde içerisinde oluşan borulanma arttıkça etrafındaki malzemeler çökerek hareket etmeye başlar ve bu göçme membaya doğru gittikçe artarak yarılmaya genişler. Dolgu aşındıkça bu süreç hızlanarak devam eder. Borulanma ile birlikte mansap yüzeyinde aşınma ve toprak kaymaları meydana gelir. Baraj gövdesinde oluşan nihai gedik genişliği barajın toplam genişliğinden çok daha kısadır. Ayrıca gedik oluşması çok ani olmayıp değişik parametrelere bağlı olarak belirli bir süreç içerisinde gerçekleşir.

Baraj yıkılma analizi birçok araştırmacı tarafından geçmiş baraj yıkılma verileri kullanılarak incelenmiş ve yıkılma süresini ve gedik akışını tahmin etmek için birçok ampirik denklemler üretilmiştir [12]. Çıkış hidrograflarının ve mansap su baskınının doğru tahminini yapmak için gedik yerinin, boyutunun ve gelişme süresinin tahmini kritik öneme sahiptir. Toprak veya kaya dolgu zonlu barajlarda gedik şekli genellikle trapez kesitli kabul edilir. Gedik geometrisi; gedik yüksekliği ( $h_b$ ), ortalama gedik genişliği ( $B_{ort}$ ) ve yan

kenar eğimleri (Yatay: Düşey) ile tanımlanır. Baraj gediklenmesinde; su yüksekliği de ( $h_w$ ), kullanılan önemli bir parametredir. Bu parametreler gedik büyüklüğünü gösterir (Şekil 3).



Şekil 3. Baraj gediklenme parametreleri

Baraj yıkılma parametrelerini tahmin etmek için Froehlich 1995 yılında 63 adet baraj, 2008 yılında ise 74 adet baraj yıkılma olayları üzerinde yapmış olduğu çalışmada, ortalama gedik genişliği, gedik şev eğimleri ve göçme süresi için ifadeler geliştirmiştir. Ortalama gedik genişliği ve yıkılma zamanı için aşağıdaki ifadeleri önermiştir.

$$B_{ort} = 0,27 K_0 V_w^{0,32} h_b^{0,04} \quad (1)$$

$$t_f = 63,2 \sqrt{\frac{V_w}{gh_b^2}} \quad (2)$$

Bu ifadelerde;  $B_{ort}$ : Ortalama gedik genişliği (m),  $K_0$ : Sabit,  $V_w$ : Göçme anında rezervuar hacmi ( $m^3$ ),  $h_b$ : Göçme sonunda gedik yüksekliği (m),  $g$ : Yerçekimi ivmesi ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ),  $t_f$ : Göçme süresini (sn) göstermektedir. Froehlich [13], bu çalışmada borulanma ile göçme için ortalama şev eğimini 0,7Y:1D olarak önermiştir.

### 2.3. HEC-RAS Programı ile 2 Boyutlu Taşkın Yayılımının Modellenmesi

Baraj yıkılmasına bağlı oluşan taşkın dalgasının mansapta ötelenerek etki alanlarının ve gücünün belirlenmesi birçok hesap aşamalarını gerektirmektedir. Bu amaçla geliştirilen birçok yazılım bulunmakla birlikte en yaygın kullanılan HEC-RAS (Hidrolojik Mühendislik Merkezi, Nehir Analiz Sistemi) paket programıdır. Program kararlı ve kararsız akımlarda su yüzü profili hesaplamaları, sediment taşınım/hareketli taban hesaplamaları, su kalitesi analizleri ve birçok hidrolik yapı hesaplamalarını yapabilen, herkesin kullanımına açık bir yazılımdır. HEC-RAS 6.4 paket programı, Coğrafi Bilgi Sistemleri ile bütünleşmiş bir şekilde hidrolojik ve arazi bilgilerinden yararlanarak kararsız akım durumlarında, baraj yıkılma analizlerini bir ve iki boyutlu modelleme yaparak taşkın haritalaması yapılabilmektedir [14].

Taşkın dalgasının topoğrafya üzerindeki yayılımının belirlenmesinde kullanılan temel denklemler süreklilik ve momentum (Navier-Stokes) denklemleridir. İki boyutlu (2B) HEC-RAS taşkın modellemelerinde, süreklilik ve Momentum denklemlerinin Saint Venant veya Sığ Su (SW) denklemleri olarak adlandırılan sadeleştirilmiş formları kullanılmaktadır. Akış sıkıştırılmaz, yoğunluk ve hidrostatik basınç üniform kabul edilir [14]. Süreklilik denkleminin diferansiyel formu aşağıdaki şekilde verilmektedir;

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (3)$$

Burada H:su yüzeyi kotunu, h:su derinliğini, x ve y yatay düzlemleri, t:zamanı, u ve v: x ve y düzlemlerindeki hızları, q: giren/çıkan akımı temsil etmektedir. Sığ su denklemleri x ve y doğrultusunda sırasıyla aşağıdaki gibi gösterilebilir;

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \vartheta_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - C_f u + f_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \vartheta_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - C_f v + f_y \quad (5)$$

Burada; g: yerçekimi ivmesi,  $\vartheta_t$ : eddy viskozite katsayısı,  $C_f$ : taban sürtünme katsayısını, f: Coriolis parametresini ifade etmektedir. Analizde kullanılan 2 boyutlu kararsız akım denklemleri kapalı sonlu hacim algoritması kullanılarak çözümlenir.

## 2.4. Baraj Göçmesine Bağlı Taşkın Tehlike Analizi

Baraj göçmesine bağlı mansapta oluşacak taşkına ait tehlike haritalarının hazırlanması, olası can ve mal kayıplarının en aza indirilmesi için gerekli bir çalışmadır. Bu çalışmalar ile taşkınların şiddeti, sayısı ve yayılım alanları belirlenerek acil durum stratejileri oluşturulabilir. Taşkın tehlike haritalarının hazırlanmasında farklı yaklaşımlar ve yöntemler bulunmaktadır.

Bu çalışmada Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından önerilen, İngiltere Tarım ve Çevre Bakanlığı Yöntemi, DEFRA ve bu yöntemle göre tehlike seviyeleri belirlenmiştir [15]. DEFRA taşkınlar sırasında insanların ne yapması ve ne yapmaması gerektiğine dair bilgileri içeren “insanlar için risk” rehberinde taşkın tehlike seviyelerini açıklamıştır. Taşkın tehlike derecelendirmesi (TTD) hesabında aşağıdaki ifade kullanılmaktadır:

$$TTD = d * (v + 0,5) + DF \quad (6)$$

Bu ifadede d(m) derinlik, v(m/s) hız ve DF debris (enkaz) faktörünü göstermektedir. Taşkın zamanında suyla beraber taşınan malzeme (debris) miktarı akımın derinliğine bağlı olarak değişiklik gösterir. Enkaz-debris faktörü Çizelge 1’de verilmiş olup taşkın derinlik ve hız faktörüne bağlı 3 farklı sınıf için tanımlanmıştır.

**Çizelge 1.** Derinlik, hız ve arazi kullanımına göre DF değerleri

Derinlik ve Hız	DF		
	Çayır/tarım	Orman/ağaçlık	Şehir
0-0,25	0	0	0
0,25-0,75	0	0,5	1
d>0,75m ve/ya v>2m/s	0,5	1	1

Taşkın derinlik ve hızına bağlı taşkın tehlike sınıfları Çizelge 2’deki gibi verilmiştir.

**Çizelge 2.** Derinlik ve hızla bağlı taşkın tehlike sınıfları

TTD	Tehlike derecesi	Açıklama
<0,75	Düşük	Sığ akan su veya derin durgun su bölgesi Dikkat edilmeli
0,75-1,25	Orta	Derin veya hızlı su mevcut Çocuk ve yaşlılar için tehlikeli
1,25-2,5	Yüksek	Hızlı ve derin su mevcut Çoğunluk için tehlikeli
>2,5	Çok Yüksek	Çok derin ve çok hızlı su mevcut. Bütün insanlar ve yapılar için tehlikeli

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 3.1. Seyhan Barajı Yıkılma Analizi ve İki Boyutlu Hidrolik Modelleme

Adana kent merkezi, jeolojik olarak aktif tektonik hatları barındıran ve sürekli orta şiddette depremler üretme potansiyeli bulunan bir bölgedir. 1996 yılında Bayındırlık ve İskân Bakanlığı tarafından yayınlanmış olan Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasına göre şehir II. derece deprem bölgesinde yer almıştır. Bu çalışmada Adana, Seyhan barajının muhtemel depreme bağlı, baraj gövdesinde oluşabilecek çatlama ve bunun neden olabileceği borulanma ve göçme analizi ele alınmıştır. Baraj gövdesindeki göçme (gediklenme) buna bağlı mansapta oluşacak taşkın dalgasının yayılımı iki farklı senaryo için incelenmiştir. Birinci senaryoda baraja giren akım ihmal edilerek, sadece normal göl seviyesinde (67m) oluşabilecek göçmeye bağlı taşkın durumu ele alınmıştır ( $Q_0$ ). İkinci senaryoda ise barajın tam dolu olduğu maksimum su seviyesinde (72m) 100 yıllık taşkın hidrografının gelmesiyle ( $Q_{100}=955m^3/s$ ) birlikte dolgunun yıkılması durumu ele alınmıştır [16]. Her iki senaryoda mansaptaki taşkın etkileri ve taşkın dalgasının oluşturacağı taşkın tehlike derecelendirmesi (TTD) belirlenmiştir. Geçmişte toprak ve kaya dolgu barajların yıkımında en çok gözlenen taşkın dalgasının gövde üzerinden aşması durumu Seyhan barajı için dikkate alınmamıştır. Seyhan barajının sağ sahilinde bulunan doğal savak nedeniyle taşkın dalgasının gövde üzerinden aşma ihtimalinin düşük olacağı öngörülmüştür.

Seyhan barajının borulanma ile yıkılma senaryosuna göre gedik parametre değerleri belirlenmiştir. Bu amaçla Çizelge 3’de verilen baraj özellikleri, HEC-RAS geometri veri penceresinde, *SA/2D* ve *Breach (plan data)* menüleri yardımıyla açılan pencerede, *Parameter Calculator* menüsünde tanımlanmıştır. Bu pencerede ayrıca gedik taban kotu 40m, borulanma katsayısı 0,5 olarak alınmıştır. Program 5 farklı yöntemle göre gedik parametrelerini hesaplayarak seçilen bir yöntemi dikkate almaktadır. Bu çalışmada Froehlich (2008) yöntemiyle hesaplanan gedik parametreleri dikkate alınmıştır. Baraj gölü normal su seviyesi ve maksimum su seviyelerinde borulanmaya bağlı hesaplanan gediklenme parametreleri çizelgenin altında verilmiştir.

Baraj gövdesindeki gediklenmeye bağlı mansapta oluşacak taşkın dalgasına ait doğru bir hidrodinamik model kurmak ve tutarlı sonuçlar elde edebilmek için yüksek çözünürlüklü bir arazi modeline sahip olmak esastır. Bu amaçla USGS web sitesinden indirilen 30mx30m çözünürlükteki bölgeye ait sayısal yükseklik haritası kullanılmıştır. HEC-RAS ile yapılan analizlerde 2 boyutlu akış alanının ağ boyutu model kararlılığına göre seçilebilmektedir. Taşkın su baskını için 100m’lik ızgaraların ağ boyutunun, nispeten düz ve geniş taşkın yatakları dikkate alındığında genellikle yeterli olduğu bildirilmiştir [17]. HEC-RAS iki boyutlu model oluştururken RAS Mapper ara yüzü ve/ya Geometri veri penceresi kullanılabilir. Pencerede çalışma alanının sınırları poligon olarak belirlenir. Seyhan nehri Adana-Mersin il sınırında Akdeniz’e döküldüğünden bu bölgede 2B çalışma alanı geniş tutulmuştur. Çalışma alanı 100mx100m boyutunda ızgara elemanlarına bölünmüş ve program tarafından 196.240 adet göz oluşturulmuştur. Baraj mansabında Seyhan nehri üzerinde bulunan ikinci regülatör köprüye kadar olan bölgede sağ ve sol sahillere için sedde (kırılma çizgileri) tanımlanmıştır. Çalışma alanı içerisindeki diğer yapılar dikkate alınmamıştır (Şekil 4).

**Çizelge 3.** Seyhan barajı gövde gediklenme parametreleri

Parametreler	Seyhan Barajı	
Akarsu	Seyhan Nehri	
Kret kotu	72,7m	
Kret genişliği	9m	
Baraj gölü normal su seviyesi / hacmi	67m / 482.730 bin m <sup>3</sup>	
Maksimum su seviyesi / hacmi	72.0m / 738.267 bin m <sup>3</sup>	
Menba/Mansap şev eğimleri	2,75/2	
Yıkılma şekli	Borulanma	
Borulanma katsayısı	0,5	
Baraj tabanının yıkılma kotu	40m	
Borulanmanın başlama kotu	67m	72m
Froehlich, 2008	Q <sub>0</sub> =0	Q <sub>100</sub> =955m <sup>3</sup> /s
Gedik taban genişliği	164m	191m
Yıkılma süresi	3,77saat	4,66saat
Gedik şev eğimi, Memba/Mansap	0,7(Yatay/Dikey)	0,7(Yatay/Dikey)



**Şekil 4.** HEC-RAS da belirlenen taşkın alanı ve ızgara yapısı



HEC-RAS iki boyutlu modelde hidrolik hesaplamaların gerçekleşmesi için memba ve mansap sınır şartlarının tanımlanması gerekir. Kararsız akım ile modelleme yapıldığında memba sınır şartı olarak ya akım hidrografi ya da seviye hidrografi kullanılabilir. Mansap sınır şartı olarak ise normal derinlik varsayımı kullanılarak 2B taşkın alanına ait sürtünme eğimi  $S=0,0011$  olarak tanımlanmıştır.

2B çalışma alanına ait yukarıda bahsedilen CORINE arazi kullanımına bağlı 5 farklı bölge için Çizelge 4’de verilen Manning pürüzlülük katsayıları kullanılmıştır.

**Çizelge 4.** Adana ili CORINE arazi kullanımı ve Manning pürüzlülük katsayısı

CORINE arazi kullanımı	Manning pürüzlülük katsayısı
Yerleşim alanı	0,12
Tarım alanı	0,04
Orman	0,10
Sulak alan	0,035
Su	0,035

Taşkın senaryosu ve akım bilgileri düzenlendikten sonra HEC-RAS programındaki Run menüsünden “Unsteady Flow Analysis” aracı yardımıyla taşkın modelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. HEC-RAS iki boyutlu modellemede model kararlılığı ve sonuçların doğruluğu için hesaplama zaman adımının uygun seçilmesi önemlidir. Saint-Venant ve difüzyon dalga denklemleri için hesaplama zaman aralığının seçiminde aşağıda verilen yöntem kullanılabilir.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{V} \quad (C=1,0 \text{ için}) \quad (7)$$

Burada; C; Courant sayısı,  $\Delta t$ ; hesaplama zaman aralığı (s),  $\Delta x$ ; ızgara hücre boyutu (m), V; taşkın dalga hızı(m/s) dir. Brunner'e [17] göre baraj yıkma çalışmaları için hesaplamalı zaman adımının 1 ile 60 saniye arasında seçilmesi uygundur. Bu çalışmada Courant koşulunu sağlamak için hesaplama zaman adımı 60 saniye olarak alınmıştır.

### 3.2. Taşkın Yayılım Süresi ve Tehlike Haritası

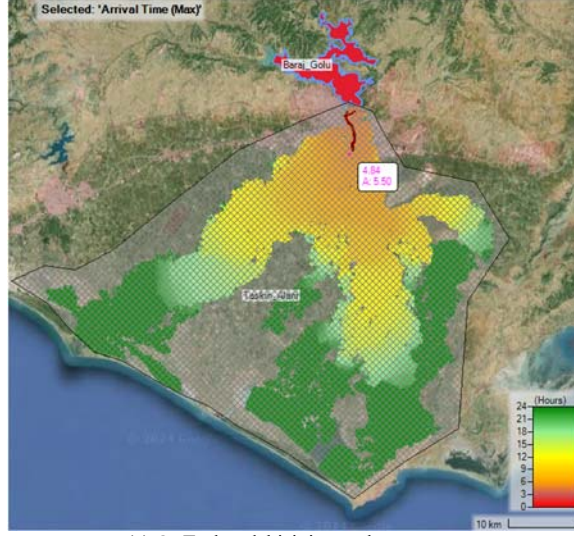
Seyhan Barajı'nın borulanmaya bağlı nedenle yıkılması HEC-RAS'ta iki farklı senaryo ile ele alınmış ve 2B taşkın yayılım haritaları elde edilmiştir. Modelleme çalışmasında önce baraj gölüne giren akım ihmal edilerek, normal göl seviyesi olan 67m de oluşacak trapez şeklindeki gediklenme durumu incelenmiştir. Bu durumda gediklenmenin normal su seviyesinden başlayarak 40m kotuna kadar devam edeceği, oluşacak yüksek debili ve uzun zaman aralığında sönmülenecek taşkın dalgasının etkileyeceği bölgeler belirlenmiştir.

Şekil 5(a) baraj yıkılmasına bağlı  $Q_0$  debisinin neden olacağı selin yerleşim bölgesi ve taşkın alanı boyunca yayılma zamanını göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere taşkın debisi ilk 6 saatte yerleşimin son bulunduğu bölgeye ulaşmakta ve Adana kent merkezini etkilemektedir. Seyhan nehri üzerindeki 2. Regülatörün hemen mansabına akım 5:50 saatte ulaşmakta ve buradaki akım derinliği 4,84m olarak hesaplanmıştır. Adana kent merkezinde oluşan taşkın derinliği özellikle Seyhan nehri yakınlarında sağ ve sol sahil boyunca 15m ye kadar ulaşabilmektedir. Nehirden uzaklaştıkça taşkın derinliği 1m'nin altına düşmektedir. Taşkın alanının mansabına doğru taşkın yayılma süresi, 12 saatten çok daha uzun sürmekte denize yakın bölgelere 72 saatte ulaşmaktadır. Bu bölgelerde taşkın derinliği 1m'nin altına düşmektedir.

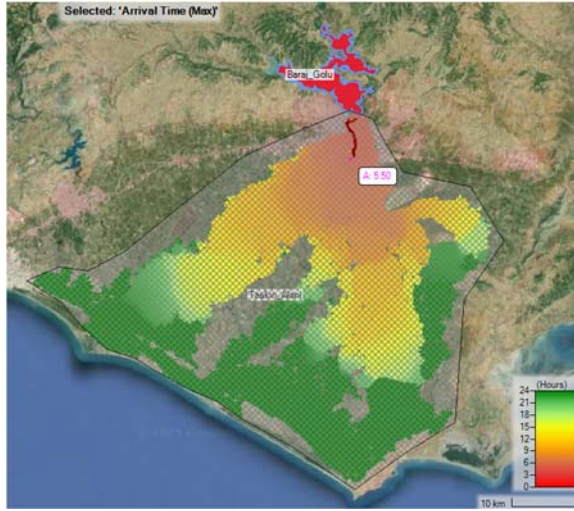
İkinci senaryoda ise barajın tam dolu olduğu maksimum su seviyesi olan 72m de 100 yıllık taşkın hidrografının gelmesiyle birlikte dolgunun borulanmaya bağlı nedenle yıkılması ele alınmıştır. Şekil 5(b) baraj yıkılmasına bağlı  $Q_{100}$  debisinin neden olacağı selin yerleşim bölgesi ve taşkın alanı boyunca yayılma zamanını göstermektedir. Önceki senaryoya benzer şekilde taşkın debisi ilk 6 saatte yerleşim bölgesini etkilemekte ve taşkın alanının mansabına ise 12 saatten çok daha uzun sürede ulaşmaktadır. Taşkın derinliği özellikle ikinci regülatöre kadar olan bölgede nehir yakınlarında yüksek olmaktadır.

Baraj göçmesine bağlı oluşacak taşkın tehlike derecelendirmesi DEFRA tarafından geliştirilen ve DSİ tarafından önerilen (6) nolu denklem ile hesaplanmıştır. Denklemde gösterilen DF debris faktörü 0,5 olarak alınmış ve her iki senaryo ( $Q_0$  ve  $Q_{100}$ ) için bölgenin TTD belirlenmiştir. ARC-GIS programında

hesaplanarak grafik haline getirilen TTD her iki senaryo için Çizelge 5’de verilmiştir. Çizelgede TTD belirlenen bölgelerin yüz ölçümü  $\text{km}^2$  olarak ve tehlike derecesi oransal olarak gösterilmiştir.



(a)  $Q_0$  Taşkın debisinin yayılma zamanı



(b)  $Q_{100}$  Taşkın debisinin yayılma zamanı

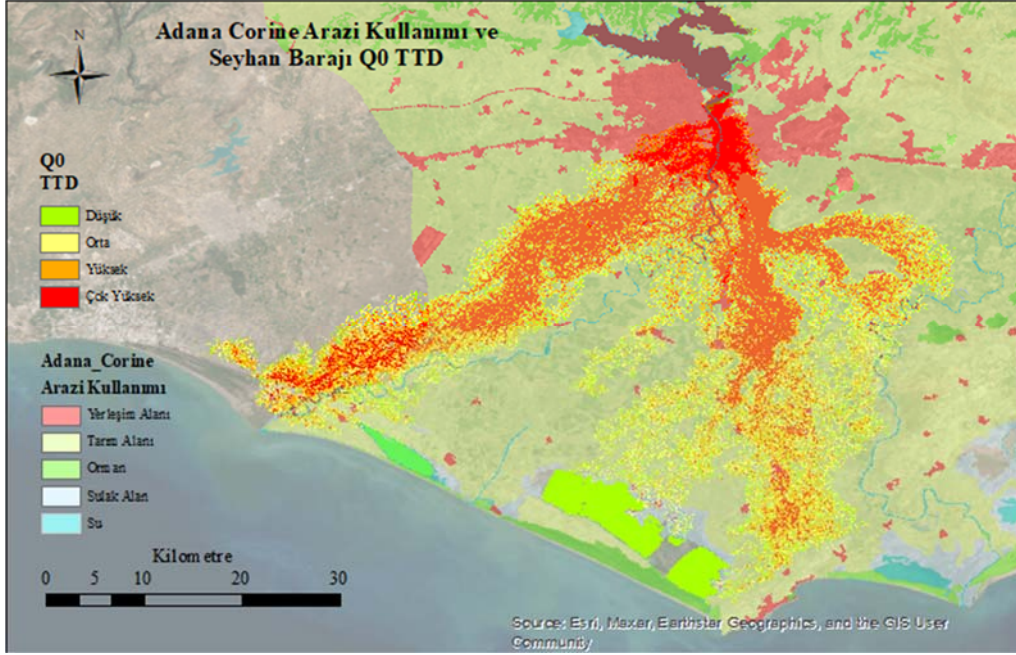
**Şekil 5.** Taşkın debisinin yayılma zamanı

Birinci senaryoya göre baraj gövdesinin borulanma ile göçmesi durumunda Çizelge 5’de görüleceği üzere toplamda  $1042,61 \text{ km}^2$  alan sular altında kalmakta, bu alanların %35,4’i, yaklaşık  $369,25 \text{ km}^2$  ‘si çok yüksek tehlikeli bölge olarak belirlenmiştir. Şekil 6(a)’da taşkın tehlike derecelendirmesine göre arazinin durumu ve kullanım şekli birlikte gösterilmiştir. Seyhan nehrinin sol ve sağ sahilinde yerleşimin olduğu bölgenin önemli bir kısmı çok yüksek tehlike altında kalmaktadır. Mansapta tarım arazilerinin olduğu bölgede özellikle Seyhan nehrinin sağ sahiline yüksek tehlike derecelendirilmesinin olduğu gözlenmektedir.

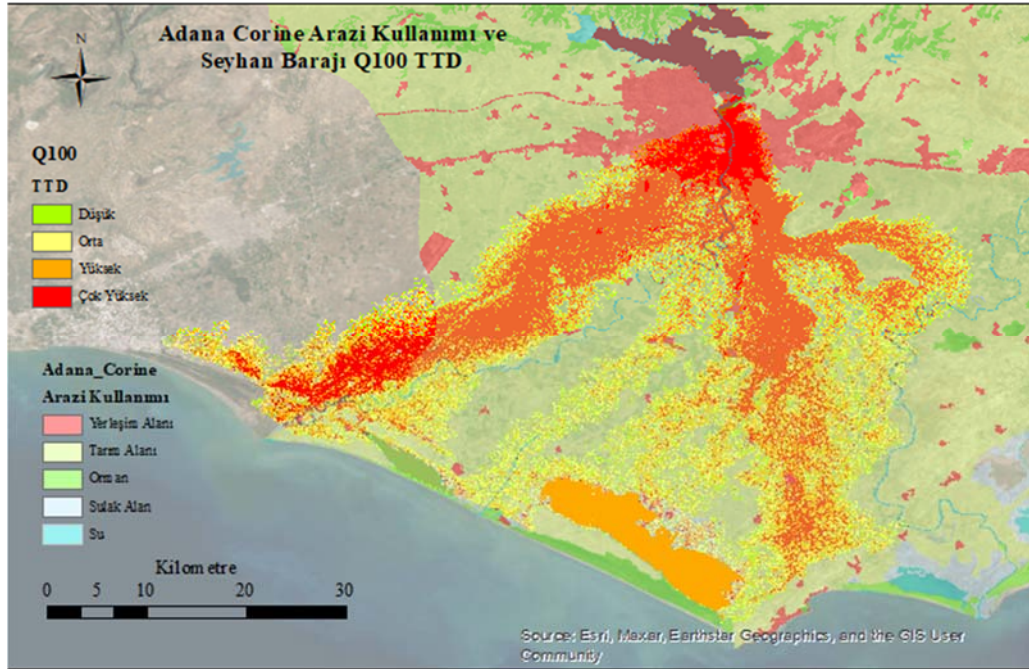
$Q_{100}$  debisi ile birlikte barajda maksimum seviyede (72m) su bulunması halinde, olası borulanma ile Seyhan barajının göçme senaryosu ve bu durumda belirlenen TTD Çizelge 5 de ayrıca verilmiştir. Çizelge 5 den görüleceği üzere toplamda  $1331,81 \text{ km}^2$  alan sular altında kalmakta, bu alanların %40,1’i, yaklaşık  $533,98 \text{ km}^2$  ‘si çok yüksek tehlikeli bölge olarak belirlenmiştir. Şekil 6(b) de yine taşkın tehlike derecelendirmesine göre arazinin durumu ve kullanım şekli verilmiştir. Seyhan nehrinin sol ve sağ sahilinde yerleşimin olduğu bölgenin önemli bir kısmı benzer şekilde çok yüksek tehlike altında kalmaktadır. Mansapta tarım arazilerinin olduğu bölgede daha fazla alanın yüksek tehlike derecelendirilmesine maruz kaldığı belirlenmiştir.

Çizelge 5. Seyhan barajı göçme senaryolarına göre TTD ve alanları

TTD	Q <sub>0</sub>		Q <sub>100</sub>	
	Km <sup>2</sup>	%	Km <sup>2</sup>	%
Düşük, <0,75	185,45	17,8	113,93	8,6
Orta, 0,75-1,25	187,55	18,0	232,36	17,4
Yüksek, 1,25-2,5	300,37	28,8	451,54	33,9
Çok Yüksek, >2,5	369,25	35,4	533,98	40,1
Toplam=	1042,61	100	1331,81	100



(a) Adana Q<sub>0</sub> TTD



(b) Adana Q<sub>100</sub> TTD

Şekil 6. Seyhan barajı göçme analizi ve TTD



#### 4. SONUÇLAR

Ülkemizde son yıllarda artan tektonik hareketlilik, birçok mühendislik yapısında olduğu gibi barajların da olası hasar ve buna bağlı oluşacak taşkınlara göre afet hazırlık çalışmalarını zorunlu kılmaktadır. Bu amaçla Seyhan nehri üzerinde ve Adana kent merkezinin hemen kuzeyinde bulunan Seyhan barajının olası yıkılma durumunda mansaptaki etkileri incelenmiştir. Depreme bağlı baraj gövdesindeki deformasyonlar nedeniyle dolguda oluşacak borulanma ve buna bağlı göçme analizi iki farklı senaryo için HEC-RAS 6.4 Paket programı ile ele alınmıştır. Birinci senaryoda baraj gölüne giren akım ihmal edilerek, normal göl seviyesi olan 67m de oluşacak trapez şeklindeki gediklenme durumu incelenmiştir. İkinci senaryoda ise barajın maksimum su seviyesi olan 72m de 100 yıllık taşkın hidrografının gelmesiyle birlikte dolgunun borulanmaya bağlı nedenle yıkılması ele alınmıştır.

Her iki senaryoya göre gediklenme taban kotu 40m ve borulanma katsayısı 0,5 olarak alınmış ve program tarafından hesaplanan gedik taban genişlikleri sırasıyla 164m ve 191m olarak, gediklenme süreleri ise 3,77 saat ve 4,66 saat olarak belirlenmiştir. Her iki durumda da gedik şev eğimi Y/D 0,7 olarak hesaplanmıştır. Barajın olası göçme durumunda, taşkın dalgalarının etkileyeceği bölgeler 2 boyutlu modelleme yapılarak 196.240 adet, 100mx100m boyutunda ızgara elemanlara bölünmüş, çalışma alanına ait Manning pürüzlülük katsayıları CORINE arazi kullanımına bağlı 5 farklı bölge için tanımlanmıştır.

$Q_0$  debisinin neden olacağı taşkın ilk 6 saatte yerleşimin son bulunduğu bölgeye ulaşarak Adana kent merkezini etkileyeceği, oluşan taşkın derinliğinin özellikle Seyhan nehri yakınlarında 15m ye kadar ulaşabileceği belirlenmiştir. Taşkın alanının mansabına, tarım arazilerinin bulunduğu bölgeye ise taşkın 12 saatte ulaşacağı ve derinliğin 1m'nin altına düşeceği hesaplanmıştır. Benzer şekilde ikinci senaryoya göre de taşkın debisi ilk 6 saatte yerleşim bölgesini etkilemekte ve taşkın alanının mansabına 12 saatten daha uzun sürede ulaşmaktadır.

Birinci senaryoya göre ( $Q_0$ ) baraj gövdesinin göçmesi durumunda toplamda 1042,61km<sup>2</sup> alan sular altında kalmakta, bu alanların %35,4'i, yaklaşık 369,25km<sup>2</sup> si çok yüksek tehlikeli bölge olarak belirlenmiştir.  $Q_{100}$  debisi ile birlikte barajda maksimum seviyede su bulunması halinde olası göçme senaryosuna göre de 1331,81km<sup>2</sup> alan sular altında kalmakta, bu alanların %40,1'i, yaklaşık 533,98km<sup>2</sup> si çok yüksek tehlikeli bölge olarak hesaplanmıştır. Seyhan nehrinin sol ve sağ sahilinde yerleşimin olduğu bölgenin önemli bir kısmı çok yüksek tehlike altında kalmaktadır. Mansapta tarım arazilerinin olduğu bölge ise yüksek tehlike derecelendirilmesine maruz kaldığı belirlenmiştir.

Bu çalışma bulguları ile Seyhan barajının hemen mansabında bulunan Adana kent merkezinin acil durum planlarının hazırlanarak olası mal ve can kayıpları azaltılabilir. Hesaplanan taşkın yayılma süresi ve TTD dikkate alınarak, yerleşim merkezlerinin uyarılması için gereken zaman belirlenip, tahliye planları hazırlanabilecek, afet yönetimine bir kılavuz olacaktır.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Zhang, L.M., Xu, Y., Jia, J.S., 2009. Analysis of earth dam failures-a database approach. Georisk, 3, 184-189.
2. Bozkuş, Z., 2004, Afet yönetimi için baraj yıkılma analizleri. İMO Teknik Dergi, 3335-3350.
3. Dinçergök, T., 2007. The role of dam safety in dam-break induced flood management. Proceedings of International Congress on River Basin Management, 682-697, Antalya-Turkey.
4. Çağatay, H., Kocaman, S., 2009. Baraj yıkılması taşkın dalgalarının mansapta oluşturacağı su yüzü profillerinin incelenmesi. Ç.Ü. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 24(1), 99-110.
5. Dursun Ö.F., Gül E., 2018. İki boyutlu baraj yıkılma modellemesi; Sürgü Barajı örneği. Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi, 30(3), 97-104.
6. Paşa, Y., Peker, İ.B., Hacı, A., Gülbaz, S., 2023. Dam failure analysis and flood disaster simulation under various scenarios, Water Science & Technology, 87(5), 1214.
7. Adana IRAP İl Afet Riski Azaltma Planı, T.C. Adana Valiliği, İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü.
8. <https://earthexplorer.usgs.gov/>, Erişim tarihi: 04.04.2024.
9. Seyhan Havzası Taşkın Yönetim Planı, 2000. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Art Çevre Teknolojileri İnş. Müh. Tur. Tic. Ltd. Şti. Eylül.
10. <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018>, Erişim tarihi: 04.04.2024.

11. Özdemir, H., 2007. Farklı senaryolara göre taşkın risk analizi: Havran Çayı örneği (Balıkesir). TMMOB Afet Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 155-166, Ankara.
12. Brunner, G., 2014. Using HEC-RAS for dam break studies. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, USA.
13. Froehlich, D.C., 2008. Embankment dam breach parameters and their uncertainties. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 134(12), 1708-1721.
14. HEC-RAS, 2010. User's manual. USACE Hydrologic Engineering Center, Davis, USA.
15. Wallingford, H.R., 2006. R&D outputs: Flood risks to people phase 2 FD2321/TR2 guidance document. Defra/Environment Agency Flood and Coastal Defence R&D Programme.
16. DSİ, 1994. The feasibility study on flood control, forecasting and warnings system for Seyhan River basin, Japan International Cooperation Agency.
17. Brunner, G.W., 2016. HEC-RAS river analysis system 2D modeling user's manual. Davis, CA.



## Monte Carlo Simülasyonu ile Yenidoğan Transportunda Fizyolojik Stabilite Risk Skor Değişiminin Tahminlemesi

Müfide NARLI<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Adana

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0001-8225-2911

### Makale Bilgileri

Geliş : 13.05.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560178

### Sorumlu Yazar

Müfide NARLI

mnarli@cu.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Monte Carlo simülasyonu

Tahminleme

Transport

Skorlama

**Atf şekli:** NARLI, M., (2024). Monte Carlo Simülasyonu ile Yenidoğan Transportunda Fizyolojik Stabilite Risk Skor Değişiminin Tahminlemesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 753-758.

### ÖZ

Yenidoğan yoğun bakım hastalarının transportu yüksek risk ve mortaliteye sahiptir. Bu nedenle transport süreci dikkatle ele alınmalı ve değerlendirilmelidir. Bu sürecin performansının değerlendirildiği transport skorlama sistemleri bulunmaktadır. Bunlardan hastanın fizyolojik stabilite risk skoru değişimini ölçen Transport Risk Index of Physiologic Stability (TRIPS) skorlaması yaygın olarak kullanılmaktadır. TRIPS skor değeri transportun ilk 15 dakika ve sonunda olmak üzere en az iki defa ölçülür. Bu çalışmada 2011-2022 yılları arasında 1117 sayıda hastanın teslim alındığında ilk TRIPS skoru ve teslim edilmeden hemen önce ölçülen TRIPS skor değerleri ile bebeklerin kayıtlı ağırlık parametre değeri alınmıştır. Retrospektif olarak yapılan bu çalışmada hastanın ağırlığına bağlı olarak ölçülen iki TRIPS skor değeri arasındaki fark, Monte Carlo simülasyon modeli ile tahminlenmiştir. Her hasta ağırlık grubu için ayrı ayrı ortalama TRIPS skor farkı taminlenerek, farklı hasta gruplarının transport süreci birbirleri ile kıyaslanarak gruplar arası farklar tespit edilmiş ve süreç analiz edilmiştir. Bu analiz sürecin iyileştirilmesi, planlanması ve kararların alınmasına katkı sağlayacaktır.

## Estimation of Physiological Stability Risk Score Change in Transport of Newborn Infants by Monte Carlo Simulation

### Article Info

Received : 13.05.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560178

### Corresponding Author

Müfide NARLI

mnarli@cu.edu.tr

### Keywords

Monte Carlo simulation

Forecasting

Transport

Scoring

**How to cite:** NARLI, M., (2024). Monte Carlo Simülasyonu ile Yenidoğan Transportunda Fizyolojik Stabilite Risk Skor Değişiminin Tahminlemesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 753-758.

### ABSTRACT

Transportation of neonatal intensive care unit patients has high risk and mortality. Therefore, the transport process should be handled and evaluated carefully. There are transport scoring systems that evaluate the performance of this process. Among these, Transport Risk Index of Physiologic Stability (TRIPS) scoring, which measures the change in the patient's physiologic stability risk score, is widely used. The TRIPS score value is measured at least twice, in the first 15 minutes and at the end of transport. In this study, the initial TRIPS score and TRIPS score values measured just before delivery and the registered weight parameter value of the infants were obtained from 1117 patients between 2011 and 2022. In this retrospective study, the difference between the two TRIPS score values measured depending on the patient's weight was estimated with the Monte Carlo simulation model. By determining the average TRIPS score difference for each patient weight group separately, the transport process of different patient groups was compared with each other, the differences between the groups were determined and the process was analyzed. This analysis will contribute to the improvement of the process, planning and decision making.

## 1. GİRİŞ

Yenidoğan transportu, hasta ve durumu kritik olan bir yenidoğanın izlem, bakım ve tedavisinin yapılabilmesi için uygun olan başka bir merkeze hava veya kara yoluyla taşınmasıdır [1]. Bebeklerin transportunda bebeğin durumuna bağlı taşıma performansının değerlendirildiği farklı skorlama sistemleri bulunmaktadır. TRIPS, Neonatal Stabilization Score (NSS), The Transport Score of Hermensen, Alberta Neonatal Transport Stabilization Score (ANTSS), Mortalite Risk at Neonatal Transport (MINT) yaygın olarak kullanılan transport skorlama sistemleridir. Bu skorlama sistemlerinden TRIPS, yenidoğan bebeklerin transportunda fizyolojik stabiliteyi değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır [2]. TRIPS skorlamasında vücut ısısı, solunum sıkıntısı, sistolik kan basıncı, uyarana yanıt parametreleri değerlendirilerek risk şiddeti öngörüsü yapılır. TRIPS skor değeri 0-10 puan arası risk yok, 11-20 puan arası hafif risk, 21-30 puan arası orta risk, 30 puan ve üzeri ise şiddetli risk olarak değerlendirilir. Yenidoğan transportunu gerçekleştiren ekip bu skor değerlerine göre hasta değerlendirilerek hızlı ve etkin müdahale gibi yaşamsal kararları verir.

Transportu yapılacak yenidoğan hastanın transport ekibi tarafından teslim alınmasında ilk 15 dakika içinde ve hastanın yenidoğan yoğun bakıma teslim edilmeden transport sonunda iki defa ölçülerek kaydedilir [2]. İlk değerlendirme ve son değerlendirme arasındaki fark nakil performansı ve bebeklerin durumunun değerlendirilmesinde rehberlik eder.

Farklı yenidoğan transport skorlama sistemlerinde farklı parametreler değerlendirilir. Bebeğin doğum ağırlığı parametresi yenidoğan transport skorlamalarından sadece MINT skorlamasında dikkate alınan bir parametredir [3]. Transport edilen yenidoğan hastalar nakil esnasında birçok parametreden etkilenebilir. Bu çalışmada hastaların doğum ağırlığı parametresi dikkate alınarak TRIPS skor değişiminin tahminlemesi yapılmıştır. Hastaları doğum ağırlığına göre kategorize edip değerlendirmek ağırlık parametresinin sürece etkisinin daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır.

Yenidoğan bebeklerle ilgili yapılan klinik çalışmalarda ve yaşamsal durumlarını etkilemesine bağlı olarak yapılan değerlendirmelerde doğum ağırlığı kategorilere ayrılmıştır. Birçok grupta doğum ağırlığı 1000 gr altı, 1000-1250, 1251-1500 ve 1501-2500 ve 2500 üstü olarak beş kategoriye ayrılmaktadır ve Çizelge 1'de gruplama verilmiştir. Doğum ağırlığı 1500 gram veya daha az olan bebekler çok düşük doğum ağırlığı (Very Low Birth Weight - VLBW) olan bebeklerdir. Doğum ağırlığı 1000 gram veya daha az olan bebekler ise aşırı derece düşük doğum ağırlıklı (Extremely Low Birth Weight - ELBW) olarak ifade edilir [4-6].

**Çizelge.1.** Yenidoğan bebeklerin ağırlık grupları

Doğum Ağırlık Grubu	Ağırlık (Gr)
Grup I	<1000
Grup II	1000 -1250
Grup III	1251- 1500
Grup IV	1501-2500
Grup V	>2500

Yenidoğan doğum ağırlığı <1000-2500+ gram aralığında değişmekte olup, hastaların bu gruplara göre yaşamsal risk ve nakilden etkilenme derecesi farklılık göstermektedir [4]. Bu nedenle çalışmada hastaların doğum ağırlığı gruplandırılarak ağırlığa bağlı iki TRIPS skor değeri arasındaki fark tahminlenmiştir.

Tahminlemede veri türü ve belirsizlik düzeyine bağlı olarak zaman serileri analizi, çok değişkenli regresyon analizi, Monte Carlo simülasyonu ve yapay zeka gibi birçok metod kullanılmaktadır. Monte Carlo simülasyonu 1940 yıllarda nükleer silah geliştirilen Manhattan Projesinde çalışan J.Von Neumann, Stanislaw Ulam ve Nicholas Metropolis adlı bilim adamları tarafından bulunmuş ve geliştirilmiştir. Monte Carlo simülasyonu finans, mühendislik ve sağlık gibi farklı disiplinlerde uygulanmaktadır. Monte Carlo simülasyonu belirsizliğin ve rastgeleliğin olduğu analitik çözümün zor olduğu, deney yapmanın maliyetli ve zaman alıcı olduğu problemlerde tercih edilen bir yöntemdir. Sağlık ile ilgili çalışmalarda belirlenen hava yolu ile bulaşan bulaşıcı hastalıkların bulaşmasının taminlenmesinde [7], hastanede sırada bulunan hasta sayısını tahminlenmesinde [8], hastalıklara bağlı maliyetlerin modellenmesi ve tahminlenmesinde [9-12] uygulanmıştır.

Bu çalışmada hasta ağırlığına bağlı olarak iki TRIPS skor değeri arasındaki farkın hasta ağırlığına bağlı değişimi Monte Carlo simülasyonu ile tahminlenmiştir. Bu tahminleme ile iki TRIPS skor değeri arasındaki farkın beklenen farktan sapması durumunda transport koşulları gözden geçirilerek hastanın ve nakil sürecinin değerlendirilecektir.

## 2. YÖNTEM

Adana bölgesinde özel sağlık hizmeti veren ve özel yenidoğan yoğun bakım hasta ambulansına sahip hastanenin bu ambulans ile 2011-2022 yılları arasında transportu gerçekleştirilen 1117 yenidoğan yoğun bakım hastalarına ait iki TRIPS skor değeri ve hastaların doğum ağırlık verileri alınmıştır. Monte Carlo simülasyon metodu ile yapılan tahminleme Microsoft Excel @RISK programı kullanılarak uygulanmıştır. Monte Carlo Simülasyonunda aşağıdaki adımlar izlenir [13]:

- Monte Carlo simülasyonunda ilk adımda çözülecek problem tanımlanır ve problemi etkileyen parametreler ve çıktı belirlenir.
- İkinci adımda ise simülasyon için gerçek süreci temsil eden bir matematiksel veya istatistiksel model oluşturulur.
- Üçüncü adımda ise, simülasyonda kullanılacak değişken girdi parametreleri için olasılık dağılımları belirlenir.
- Bu dördüncü adımda ise girdi değişkenler ile belirli iterasyonda simülasyon gerçekleştirilir ve çıktı parametresi elde edilir.
- Sonraki adım olan beşinci adımda ise simülasyon tekrar çalıştırılarak sonuçlar kaydedilir ve kıyaslanır. Bir sonraki adımda elde edilen bu sonuçlar analiz edilir.
- Son adımda ise simülasyon sonuçları raporlanır ve değerlendirilir [13]. Bu simülasyon sonuçları sürecin değerlendirilmesinde, iyileştirilmesinde, planlamasında ve süreci etkileyen veya sürecin etkilediği sistemlerle ilgili karar vermede kullanılabilir.

## 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

1. adım: Transportun başında ve sonunda ölçülen TRIPS skorları arasındaki farkın hasta ağırlık gruplarına bağlı olarak ayrı ayrı tahminlenmesi süreç içindeki değişimin gözlemlenmesi ve analizini sağlayacaktır. Çalışmada hastanın hastaneden alındığı ilk 15 dakika içerisinde ölçülen ve hastanın nakledildiği hastaneye teslim edildiği andaki TRIPS değerleri girdi parametresi olarak belirlenmiştir.

2. adım: Simülasyon için gerçek sürecini temsil eden bir matematiksel veya istatistiksel model oluşturulmalıdır. Bu tahminleme Monte Carlo Simülasyon metodu ile yapılacaktır. Bu adımda elde edilen matematiksel ilişki Eşitlik (1) ile verilmiştir.

TRIPS skor değeri transportun ilk 15 dakikasında ölçülen değer:  $TRIPS_{ilk}$   
 Transprt sonunda ölçülen TRIPS değeri:  $TRIPS_{son}$

$$TRIPS_{son} - TRIPS_{ilk} = TRIPS_{fark} \quad (1)$$

3. adım: Çizelge 1'de verilen doğum ağırlığı gruplaması dikkate alınarak yenidoğanların  $TRIPS_{son}$  değerlerine göre ANOVA analizi yapılmıştır. ANOVA analizi sonucunda %95 güvenle doğum ağırlığına bağlı oluşturulan grupların ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu belirlenmiştir (sig. değeri <0.05) [14].

Gruplararası farkın olduğu durumda, farklılığın hangi gruptan kaynaklı olduğunu tespit eden istatistik Post-Hoc olarak bilinmektedir. Bu nedenle Post-Hoc analizi yapılmıştır. % 95 güven aralığında p değeri 0.05'in altında olan grup ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmaktadır ve bu durum Çizelge 2'ye yansıtılmıştır. Çizelge 2'ye göre Grup I ile tüm gruplar arasında; Grup II ile Grup IV-V; Grup III ile Grup II arasında, Grup IV ve V'in ise Grup I-II ile arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır.

Bu durum ağırlığın TRIPS skorundaki etkisini ve ağırlığa bağlı gruplamanın gerekliliğini göstermiştir. Bu elde edilen bu sonuçlarda Grup IV ve Grup V' in birleştirilebileceği görülmektedir. Ancak sonuçların daha detaylı olarak gözlemlenebilmesi açısından grup sayısı azaltılmamıştır.

**Çizelge 2.** Gruplar arası Post-Hoc analizi

	Grup I	Grup II	Grup III	Grup IV	Grup V
Grup I		✓	✓	✓	✓
Grup II				✓	
Grup III	✓				
Grup IV	✓	✓			
Grup V	✓	✓			

Her ağırlık grubunun  $TRIPS_{ilk}$  ve  $TRIPS_{son}$  dağılımları @Risk programında yer alan input analyzer kullanılarak bulunmuş ve sonuçlar Çizelge 3’de verilmiştir. *Average log-Likelihood* performans metriği olarak seçilmiştir.

**Çizelge 3.** Grupların dağılım çizelgesi

Grup	Olasılık dağılım parametreleri		Örnekleme sayısı (adet)
	$TRIPS_{ilk}$	$TRIPS_{son}$	
Grup I	Geomet (0,035034)	Poisson (27,34)	103
Grup II	Poisson (24,307)	Poisson (23,933)	75
Grup III	Poisson (21,186)	Geomet (0,045132)	70
Grup IV	Geomet (0,046256)	Geomet (0,046112)	252
Grup V	Poisson (24,307)	Poisson (23,933)	580

4.adım: Bu adımda çalışmada tahminlenecek olan TRIPS değerleri arasındaki fark Eşitlik (1) ile elde edilmektedir. Monte Carlo simülasyonunda iterasyon sayısı 100000 olarak alınmıştır.

5. adım: 100000 iterasyonla %95 güvenle ‘ortalama’ değer için elde edilen değerler Çizelge 4’de verilmiştir.

**Çizelge 4.** Monte Carlo simülasyon çıktıları

Kilo Grupları	Kilo grup aralıkları (gr)	Her grup için beklenen $TRIPS_{fark}$ ortalaması
I	<1000	-0,203
II	1001-1250	-0,374
III	1251-1500	-0,0286
IV	1501-2500	0,0675
V	>2500	0,0639

6. adım: Çizelge 4’te Monte Carlo Simülasyonu ile elde edilen sonuçlar literatür incelemesi ve uzmanlarla yapılan görüşmelere göre değerlendirilmiştir. TRIPS skor değeri hasta yenidoğan bebeğin durumunun ve transport performansının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. TRIPS skoru hasta teslim alındığında transportun ilk 15 dakikasında ve transportun sonunda ölçülerek risk şiddeti öngörüsü yapılır. TRIPS skor değeri arttıkça hastanın risk şiddeti artar. Bu nedenle transport sırasında amaç TRIPS skor değerinin yükselmesini engellemek hatta düşmesini sağlamaya çalışmaktır. Transportun sonunda bebeğin nakledilen hastaneye/sağlık kurumuna teslim edildiğindeki skor değerinin  $TRIPS_{son}$  teslim alındığındaki  $TRIPS_{ilk}$  değerinden daha düşük olması durumunda  $TRIPS_{fark}$  negatif değer olacaktır. Çizelge 4’te görüldüğü gibi 1500 gramın altındaki bebeklerde  $TRIPS_{fark}$  negatif değer olması  $TRIPS_{son} < TRIPS_{ilk}$  olmasından kaynaklandığı için bu durum transport performansının artışı olarak değerlendirilebilir. Çok düşük (<1 500 gr) ve aşırı düşük (<1 000 gr) doğum ağırlıklı olarak gruplandırılan yenidoğan bebeklerin yaşamsal olarak kritik olmalarına bağlı olarak transporttan daha çok etkilenmesi beklenir [15].

Ancak Çizelge 4’te görüldüğü gibi elde edilen sonuçlarda doğum ağırlığı azaldıkça, nakilden etkilenme durumu beklendiği gibi olumsuz olmamıştır. Doğum ağırlığı azaldıkça, transport sürecinden olumsuz etkilenmemesi durumunun tıbbi olarak yorumlanmasında yenidoğan yoğun bakım ekibi ile bir görüşme yapılmıştır. Bu durumu üst düzey nakil hizmeti veren bir merkez olması ve özel eğitimli ve deneyimli nakil ekibi transporttaki başarısı olarak değerlendirilmiştir. Bu durum yüksek transport performansı ile ilişkilendirilmiştir. Nitekim nakilde personelin önemi birçok çalışmada bildirilmiştir [16,17]. Yenidoğan nakli deneyim ve yetkinlikler gerektiren bir ekip işidir. yenidoğan bebeğin transport sürecinin

değerlendirilmesi ve geliştirilmesi, ekip ve ekipman ile ilgili koşulların değerlendirildiği rehber çalışmalar bulunmaktadır.

Transport sürecinde doğum ağırlığı 1500 gr fazla olan bebeklerde ise  $TRIPS_{fark}$  hasta durumuna bağlı olarak transport performansının daha iyiye gitmesi beklenir. Çünkü düşük doğum ağırlıklı bebeklerin nakilden daha çok etkilendiği düşünülmektedir [15]. Bu beklenmeyen durumun analizi için uzmanlarla yapılan görüşmelerde bu kategorideki bebeklerin doğuştan kalp hastalığı gibi içinden çıkılamayan kritik vakaların erken doğum dışı nedenlerle transportun üst düzey hastanelere yapılmasından kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Bu duruma örnek olarak kalp hastalığı gibi yaşamsal riski daha fazla olan kritik bebeklerin kabul edildiği bir merkez olmasından kaynaklanabileceği belirtilmiştir.

TRIPS gibi transport değerlendirme skorlamalarında hangi parametrelerin skorlama parametresi olması gerektiği ve bu parametrelerin nasıl puanlanması gerektiği dikkatlice ele alınmalıdır. Örneğin, transport değerlendirme skorlamalarından MINT skorlamasında ağırlık parametresi doğum ağırlığı 750 gr altı olan bebekler için skor puanı 5, 751-1000 gr arası bebekler için 2, 1001-1500 gr olan bebeklere 1 ve 1500 gr. üstü için 0 puan verilmektedir [3]. Yani düşük doğum ağırlıklı bebeklerin transport performans skorlamasındaki risk şiddeti daha yüksek değer olarak alınmıştır. Transport skorlamalarında ele alınan parametrelerin belirlenmesi ve puanlaması bu açıdan değerlendirilebilir.

#### 4. SONUÇLAR

TRIPS skor farkının doğum ağırlığına bağlı olarak Monte Carlo simülasyonu ile tahmini, yenidoğan transport sürecindeki potansiyel risklerin anlaşılması ve yenidoğan bebeklerin stabilitesinin yorumlanması açısından faydalı olmuştur.

Bu tahminleme ile iki TRIPS skor değeri arasındaki fark beklenen ortalama farktan sapması durumunda nakil koşullarının ve nakli gerçekleştirilen hastaların durumunun gözden geçirilmesi açısından uyarıcı olacaktır.

Ayrıca çalışma transport performansının değerlendirildiği skorlama sistemlerinin geliştirilmesinde doğum ağırlığı gibi parametrelerin hasta durumu ve risk düzeyine etkisinin farklı bir bakış açısı ile değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bu sadece transport skorlama sistemlerinin değerlendirilmesinde değil hasta durumunun değerlendirildiği diğer tüm skorlama sistemlerinin iyileştirilmesinde ve geliştirilmesinde dikkate alınabilecek bir bakış açısı sunmaktadır.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Narli, N., Kırımı, E., Uslu, S., 2018. Turkish neonatal society guideline on the safe transport of newborn. Turkish Archives of Pediatrics/Türk Pediatri Arşivi, 53(Suppl 1), 18.
2. Lee, Sk., Zupancic, Ja., Pendray, M., Tiessen, P., Schmidt, B., Whyte, R., Shorten, D., Stewart, S., 2001. Transport risk index of physiologic stability: a practical system for assessing infant transport care. The Journal of Pediatrics, 139(2), 220-226.
3. Broughton, S.J., Berry, A., Jacobe, S., Cheeseman, P., Tarnow-Mordi, W.O., Neonatal intensive care unit study group, & Greenough, A., (2004). The mortality index for neonatal transportation score: a new mortality prediction model for retrieved neonates. Pediatrics, 114(4), e424-e428.
4. Perinatal care of the extremely preterm baby, [https://www.health.qld.gov.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0023/142259/g-viability.pdf](https://www.health.qld.gov.au/_data/assets/pdf_file/0023/142259/g-viability.pdf), Erişim tarihi: 02.05.2024.
5. <https://emedicine.medscape.com/article/975909-overview>., Erişim tarihi: 02.05.2024.
6. Hogue, C.J., Buehler, J.W., Strauss, L.T., Smith, J.C., 1987. Overview of the national infant mortality surveillance (NIMS) project--design, methods, results. Public Health Reports, 102(2), 126.
7. Beggs, C.B., Shepherd, S.J., Kerr, K.G., 2010. Potential for airborne transmission of infection in the waiting areas of healthcare premises: stochastic analysis using a Monte Carlo model. BMC Infectious Diseases, 10, 1-8.
8. Muthoni, G.J., Kimani, S., Wafula, J., 2014. Review of predicting number of patients in the queue in the hospital using Monte Carlo simulation. International Journal of Computer Science Issues (IJCSI), 11(2), 219.



9. Goswami, M., Daultani, Y., Paul, S.K., Pratap, S., 2023. A framework for the estimation of treatment costs of cardiovascular conditions in the presence of disease transition. *Annals of Operations Research*, 328(1), 577-616.
10. Cooper, N.J., Lambert, P.C., Abrams, K.R., Sutton, A.J., 2007. Predicting costs over time using Bayesian Markov chain Monte Carlo methods: an application to early inflammatory polyarthritis. *Health Economics*, 16(1), 37-56.
11. Richter, A., Mauskopf, J.A., 1998. Mml Monte Carlo simulation in health care models. *Value in Health*, 1(1), 84-85.
12. Cooper, N.J., Sutton, A.J., Mugford, M., Abrams, K.R., 2003. Use of Bayesian Markov chain Monte Carlo methods to model cost-of-illness data. *Medical Decision Making*, 23(1), 38-53.
13. Krajewski, L.J., Ritzman, L.P., Malhotra, M.K., 2014. *Operations management: processes and supply Chains* (9. Baskı). Ankara: Nobel Yayınevi.
14. Di Leo, G., Sardanelli, F., 2020. Statistical significance: p value, 0.05 threshold, and applications to radiomics-reasons for a conservative approach. *European Radiology Experimental*, 4, 1-8.
15. Kaneko, M., Yamashita, R., Kai, K., Yamada, N., Sameshima, H., Ikenoue, T., 2015. Perinatal morbidity and mortality for extremely low-birthweight infants: a population-based study of regionalized maternal and neonatal transport. *Journal of Obstetrics and Gynaecology Research*, 41(7), 1056-1066.
16. McPherson, M.L., Jefferson, L.S., Graf, J.M., 2008. A validated pediatric transport survey: How is your team performing? *Air Medical Journal*, 27(1), 40-45.
17. De Vries, S., Wallis, L.A., Maritz, D., 2011. A retrospective evaluation of the impact of a dedicated obstetric and neonatal transport service on transport times within an urban setting. *International Journal of Emergency Medicine*, 4, 1-6.

## Investigation of Surface Flow Behaviors on Wing Model Made of Different Airfoils

Selim TANGÖZ<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup>Erciyes University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Kayseri, Türkiye

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0002-8284-1326

### Article Info

Received : 03.07.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560184

### Corresponding Author

Selim TANGÖZ

stangoz@erciyes.edu.tr

### Keywords

Different airfoils

Flow behaviors

Oil visualization

Wing model

**How to cite:** TANGÖZ, S., (2024). Investigation of Surface Flow Behaviors on Wing Model Made of Different Airfoils. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 759-770.

### ABSTRACT

This article is focused on the flow behavior observed using the surface oil visualization method on a wing model consisting of four airfoils. In this way, it is aimed to contribute to the insufficient number of literature studies in which flow behaviors are examined by visualization in the wing model consisting of different profiles. The flow behaviors on the surface of the wing and the surface of airfoils forming the wing are presented at three different Reynolds numbers ( $2 \times 10^5$ ,  $3 \times 10^5$  and  $4 \times 10^5$ ) and a range of distinct attack angles ranging from 0 to 40 degrees. The tests were applied in a low-speed wind tunnel. After the surface imaging experiments, separation point, reattachment point, and bubble length values reflecting flow behavior were measured for the wing and each airfoils. The flow on surface was trying to transition from laminar to turbulent at angles of attack between 0-16 degrees and the turbulent flow attempted to spread or reattach over the entire surface at between 24-40 degrees. Increasing of the angle of attack and Reynolds number led to reducing the x/c values numerically, weakening the surface separation bubble, and inducing it to shift towards the leading edge. In terms of x/c value, the wing model generally follows a trend close to airfoil B at 0 and 8 degrees and close to airfoil A at 16 degrees. Additionally, the flow behaviors on the wing model are similar to airfoils A and B in terms of the flow phenomena.

## Farklı Profillerden Meydana Gelen Kanat Modelinde YüzeY Akış Davranışlarının İncelenmesi

### Makale Bilgileri

Geliş : 03.07.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560184

### Sorumlu Yazar

Selim TANGÖZ

stangoz@erciyes.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Kanat modeli

Farklı profiller

Akış davranışları

Yağ görselleştirme

**Atf şekli:** TANGÖZ, S., (2024). Investigation of Surface Flow Behaviors on Wing Model Made of Different Airfoils. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 759-770.

### ÖZ

Bu makalede, yüzeY yağ görselleştirme yöntemi kullanılarak dört farklı profilden oluşan bir kanat modeli üzerinde akış davranışları incelenmiştir. Kanadın ve kanadı oluşturan profillerin yüzeYindeki akış davranışları üç farklı Reynolds sayısında ( $2 \times 10^5$ ,  $3 \times 10^5$  ve  $4 \times 10^5$ ) ve 0 ile 40 derece arasında değişen farklı hücum açılarında sunulmaktadır. Deneyler düşük hızlı bir rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. YüzeY görüntüleme deneylerinden elde edilen ve akış davranışını yansıtan ayrılma noktası, yeniden bağlanma noktası ve kabarcık uzunluğu değerleri sunulmuştur. 0-16 derece arasındaki hücum açılarında yüzeYdeki akış laminerden türbülansa dönüşmeye çalışırken, türbülanslı akış ise 24-40 derece arasındaki hücum açılarında tüm yüzeYe yayılmaya ya da yeniden tutunmaya çalışmaktadır. Hücum açısının veya Reynolds sayısının artması x/c değerlerinde sayısal olarak azalmaya neden olmuş, yüzeY ayrılma balonunu zayıflatmış ve hücum kenarına doğru kaymasına neden olmuştur. X/c değeri açısından kanat modeli genel olarak 0 ve 8 derecede B profiline, 16 derecede ise A profiline yakın bir trend izlemektedir. Ayrıca kanat modelindeki akış davranışları, akış fenomenleri açısından A ve B profillerine benzediği görülmüştür.

## 1. INTRODUCTION

The flow behavior on the airfoil surface significantly affects the aerodynamic characteristics of the airfoil. The phenomena reflecting flow behavior, as can be seen in Figure 1, have been analyzed and visually presented in diverse studies [1-4].

When studies on flow behavior were examined, it was seen that different flow phenomena occur on the surface, as shown in Figure 1 and Figure 2. As laminar flow transitions to turbulent flow, it was observed that Tollmien-Schlichting waves (T/S waves) first formed in a direction perpendicular to the flow. T/S waves began to form when the Reynolds number of the current reached the indifference Reynolds number [5]. If the amplitude of the primary T/S waves was large enough, the T/S waves moved downstream due to the perturbations of the secondary instabilities.

It lead to a characteristic lambda ( $\lambda$ ) structure formation. The  $\lambda$ -vortices were replaced by turbulent points, which initiated the transition to fully turbulent boundary-layer flow [5,6].

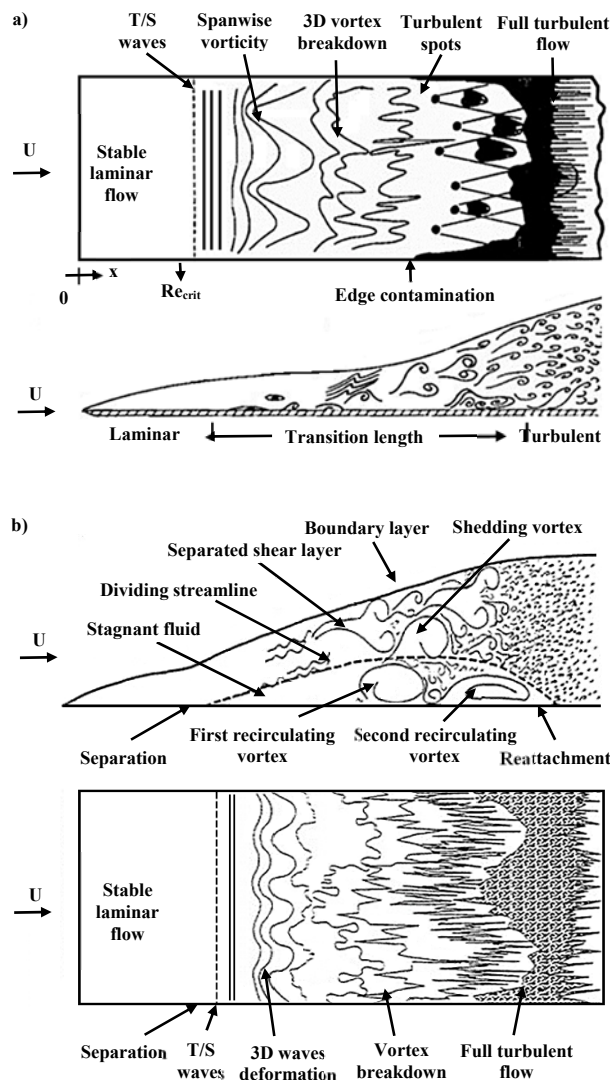


Figure 1. The visualization of flow behavior on surface (a) [1], (b) [2]

Additionally, as seen in Figure 1, a transitional separation bubble could be formed on the surface. Following laminar boundary layer separation, an unstable detached shear layer was created and alteration to turbulence took spot in this shear layer. The boosted momentum transport in the turbulent flow ordinary enabled reconnecting and a turbulent boundary layer developed downstream. After separation, a dead-air region formed under the shear layer. Then, reverse flow and an intense recirculation zone were created near the back of the bubble distribution in the dead-air region [7,8]. Images taken from some studies [9-13] expressing the characteristics of flow behaviors are given in Figure 2.

The surface oil flow visualization method is a simple but effective method that is widely used to follow the flow behavior on the surface of aerodynamic elements. It is quite economical compared to other flow imaging methods. Recently, many studies have been conducted to observe flow behavior using this method. Genç et al. [9] examined the flow behavior on the NACA2415 profile surface at  $0.5 \times 10^5$ ,  $1.0 \times 10^5$ , and  $2.0 \times 10^5$  Reynolds numbers and 4, 8, 12, and 15-degree angles of attack. In this context, the separation point, transition point, reattachment point and length of the separation bubble were analyzed using kerosene, titanium dioxide, and a very small amount of oleic acid. At the end of the study, it was observed that when the attack angle increased the separation, transition and reattachment points shifted towards the leading edge and, the length of the separation bubble shortened. In addition, it was determined that as the Reynolds number raised, the transition and reconnect points generally moved towards the leading edge and the bubble length decreased.

In another study, Karthikeyan et al. [10] investigated experimental the effect of the wavy leading ledge of a NACA 4415 profile at Reynolds number of  $1.2 \times 10^5$  and angles of attack of  $6^\circ$  and  $18^\circ$ . In the study, the separation point, transition point, reattachment point, reverse flow, dead air region and separation bubble were visualized on the surface of the baseline airfoil and the airfoil with tubercles.

In another study examining surface flow behaviors, McGranahan and Selig [11] examined surface flow behavior both experimentally and numerically on nine airfoils at low Reynolds numbers of  $2 \times 10^5$ ,  $3.5 \times 10^5$  and  $5 \times 10^5$ . In addition, the aerodynamic performance parameters of the airfoils were analyzed with a numerical computer program. These tests were applied at between  $-2$  and  $16$ -degree angles. Additionally, fluorescent pigments and fluorescent light were used for flow visualization. Unlike other studies, the parameters such as laminar separation, transition, oil accumulation, reattachment and turbulent separation, which express flow behavior, were presented graphically. As a result of the studies, it was determined that the parameters showing the flow behavior shifted to the leading edge as the angle of attack increased in almost all airfoils. Although the study of McGranahan and Selig [11] is similar to the research presented in this article, the study does not include analyses of any wing models consisting of airfoils. In a similar study, Liu and Hsiao [12] experimentally investigated the aerodynamic properties and flow structures of rectangular wings at aspect ratios varying from 1.0 to 3.0 and Reynolds number between  $10^4$  and  $10^5$ . The studies of surface oil flow visualization were illustrated at 10, 20, 30, and 40-degree angles of attack and  $Re=1 \times 10^5$ . It was observed that the flow separations started in the regions close to the leading edge of the wing and as the angle of attack increased, the separation shifted to the leading edge. In addition, it was indicated at  $10^\circ$  and  $20^\circ$  that the reattachment line was formed in the regions close to the leading edge and just below the separation.

In studies in which wing tip vortices were effective, it was seen that secondary flow occurs with the effect of the wing tip and leading-edge vortices [12]. Additionally, at high angles of attack, the separation bubble and wake flow region appeared to spread over the entire surface [12,13].

Also, it was observed that a secondary flow region, which was formed by the effect of leading-edge separation and wing tip vortices, was shaped at the edges of the reattachment zone. At 30 and 40 degrees, a wake flow region, which was behind the turbulent boundary layer separation line, was formed on most of the surface. Additionally, when the attack angle increases, the region grows and shifts to the leading edge.



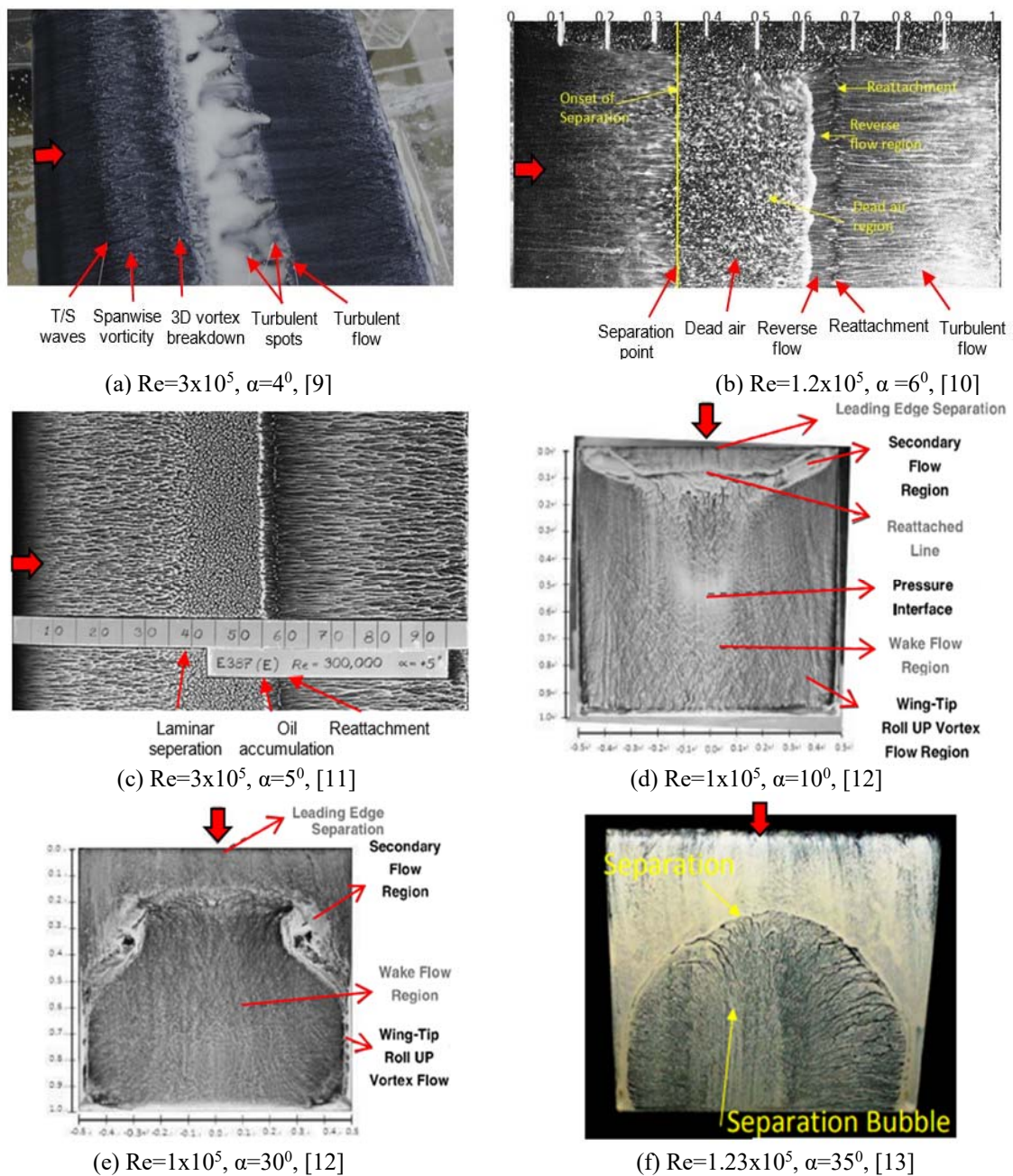


Figure 2. The flow views at different Reynolds numbers and attack angles

The flow behaviors obtained in the study are very similar to the flow behaviors presented in this article. However, NACA 4 and NACA 0012 airfoils with distinct features were used in the study. The wing model obtained from the airfoils was not included in the study. Chen et al. [13] analyzed the flow behavior while examining the effect of protuberances on the leading edge of a wing model on aerodynamic performance. The studies were carried out at a constant flow rate and constant Reynolds number at distinct angles of attack between 13 and 40 degrees and at aspect ratios of 1, 2, and 3. In this study, separation bubbles, separation zones, reattachment points and similar flow behaviors were presented by visualizing using a composite solution forming of kerosene, titanium dioxide and oleic acid by a mass ratio of 6:3:2.



When the figures in the article are examined, it is clearly seen that while laminar and turbulent flows occur on the wing surface at low angles of attack, the turbulent zone spreads over the entire surface at high angles of attack. Although this study is similar to the existing study presented in the article because it is carried out at low and high angles of attack, the main difference is that the wing model consists of a single airfoil. Wang et al. [14] observed the flow behavior while examining the effects of blowing and suction methods on the wind turbine airfoil on the NACA 0012 airfoil in a low-speed wind tunnel. In the study conducted at 14-degree angle of attack and  $1.0 \times 10^5$  Reynolds number, separation points, separation bubbles and reattachment behaviors were inspected using a mix was made of titanium dioxide, silicon oil, dodecane and oleic acid. Trie et al. [15] researched the behavior of flow on NACA 43018 airfoil with a parabolic vortex generator at  $1.0 \times 10^5$  and  $2.0 \times 10^5$  Reynolds numbers and 0, 4, 10, 12, 15 and 17-degree angles of attack. In this experimental research, the points of separation, transition and reattachment, spanwise vorticity, turbulent/laminar flow, T/S waves and 3d vortex breakdown showed the flow behavior on the airfoil surface was investigated.

Many flow visualization studies [16-24] similar to the studies whose summary given above have been carried out. However, most visualization studies have been conducted on a single airfoil. In this article, the flow behaviors have been analyzed on the wing model obtained from four airfoils. For this reason, the present study differs from other literature studies.

## 2. EXPERIMENTAL ARRANGEMENT AND PROCEDURES

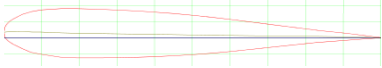

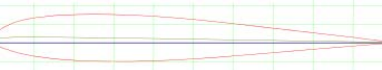

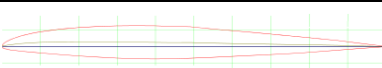

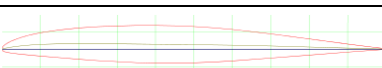

The flow visualization research presented in the paper was tested out in a low-speed tunnel in the Aerodynamics Research Laboratory at Erciyes University Faculty of Aeronautics and Astronautics. The wind tunnel's test section has a  $57 \times 57$  cm quadratic inlet and  $59 \times 59$  cm quadratic outlet of 180 cm length. Other details of the wind tunnel can be found in [25]. A view of the tunnel is shown in Figure 3. For the flow analysis, profiles forming the wing of a commercially used aircraft were selected in the experimental study. Profiles forming the inner, middle and outer wings of the wing were used. The airfoils and the wing model used in surface flow visualization have been produced from grey polylactic acid thermoplastic polyester with the help of a 3D printer. The airfoils and the wing model have a 21cm cord length and 1.0 aspect ratio. The model wing is composed of four airfoils [25]. The features of the airfoils and the wing model and the location of the airfoils on the wing model are given in Table 1.

The flow visualization experiments were carried out at 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 32 and 40-degree angles of attacks and  $2 \times 10^5$ ,  $3 \times 10^5$  and  $4 \times 10^5$  Reynolds numbers, respectively. To ensure the flow regime, flow images were recorded after the wind tunnel was operated for 3-5 minutes, depending on the flow rate. Additionally, each study was repeated at least twice, at several times, to ensure the correct flow regime was established. Silica oil, oleic acid and titanium dioxide mixtures, which are widely used in the literature, were used for flow visualization. As a result of the experiments which were conducted with different mixing ratios and different viscosity silicone oils, it was found suitable to have a mixture of silicone oil, oleic acid and titanium dioxide in the ratio of 8:1:1, with silicone oil with a viscosity of 5 cSt for the best visualization. The images of airfoil D applied the mixture to the surface when the wind tunnel was closed and of the measuring device used to gauge the flow points are given in Figure 3.



Figure 3. Views of the wind tunnel [25] and of the oil mixture on airfoil D surface

**Table 1.** The airfoil forms, characteristics and locations in the model wing of the airfoil. [25,26].

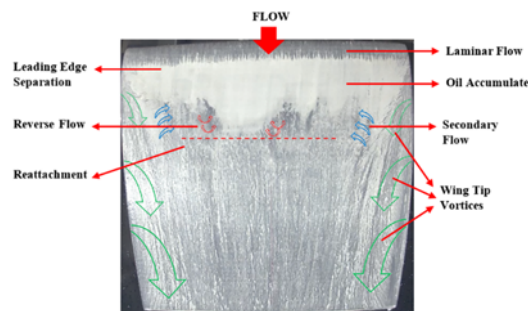
Airfoil	Forms of airfoil	Maximum thickness/ location (% of chord)	Maximum camber/ location (% of chord)	Location on model wing (% of span)	Views of airfoils on model wing
b737a (Airfoil A)		15.4 / 19.6	0.2 / 5	0	
b737b (Airfoil B)		12.5 / 29.7	0.8 / 10	33.3	
b737c (Airfoil C)		10 / 39.9	1.5 / 20.4	66.6	
b737d (Airfoil D)		10.8 / 40	1.6 / 20	100	

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

In the section, the flow behaviors on the surface of the wing model and airfoils are analyzed in terms of visually and dimensionally at  $2 \times 10^5$ ,  $3 \times 10^5$  and  $4 \times 10^5$  Reynolds numbers and different attack angles range from 0 to 40 degrees.

The images obtained in the studies can be divided into two groups in terms of visuals. 1. In studies between 0-16 degrees, the flow on the surface is trying to transition from laminar flow to turbulent flow. In there, although there are differences in location and size/length, it is seen that the flow generally exhibits similar behavior during the transition from laminar flow to turbulent flow on surfaces where wing tip vortices are inactive. 2. In studies between 24-40 degrees, the turbulent flow is trying to spread or reattach over the entire surface. The flow behaviors observed are compatible with literature studies [9-12,22,26-28] tested out at different angles of attack from 0 degrees to 40 degrees.

Figure 4 shows the oil flow image on the wing model surface under the influence of wing tip vortices at 8 degrees and  $3 \times 10^5$  Reynolds number.

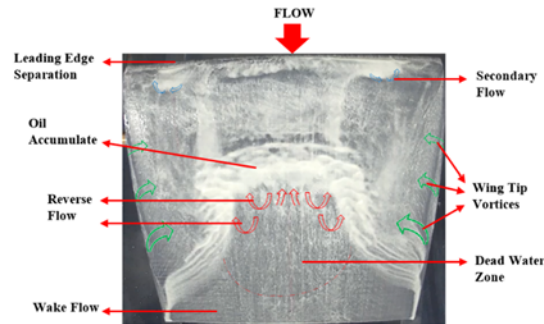


**Figure 4.** Flow properties on the surface of the wing model at  $\alpha=8^\circ$  and  $Re=3 \times 10^5$ .

In the figure, the laminar flow begins to separate in the regions close to the leading edge and then continues its flow by re-attachment itself in the middle regions where the wing tip vortices do not have any effect. Also, it is observed that the flow in the regions close to the wing tip shifts towards the inner parts as it moves from the leading edge to the trailing edge (as expected). Moreover, the secondary flow formed by the effect of the wing tip vortices and reverse flow forces the oil flow to accumulate in the middle regions of the surface.

The oil flow image on the wing model surface under the influence of wing tip vortices at 24 degrees and  $3 \times 10^5$  Reynolds number is indicated in Figure 5. Due to the high angle of attack, the flow separation starts at very close points to the leading edge. Wing tip vortexes are quite strong in the middle parts of the wing. However, it does not occur at all in regions close to the trailing edge due to the effect of turbulent flow. Secondary flow occurs at both ends of the wing and at points close to the leading edge because of the wing

tip vortices effect. Moreover, it can be seen that the current is trying to reattachment weakly, in regions close to the leading edge and where is not affected by the wing tip vortex.



**Figure 5.** Flow properties on the surface of the wing model at  $\alpha=24^\circ$  and  $Re=3 \times 10^5$ .

Due to the effect of the large separation bubble formed in the regions close to the trailing edge, reverse flow emerges towards the leading edge, and this reverse flow causes the oil to accumulate in the form of a dome in the middle region. A dead flow zone, which is the flow partially stops, begins just below the reverse flow as approaches to the trailing edge. It is seen that wake flow emerges only in the regions close to the trailing edge, owing to the large separation bubble effect.

In the section, the flow behaviors are analyzed in terms of dimensionally such as separation point, reattachment point and bubble length at different Reynolds numbers and attack angles ranging from 0 to 40 degrees.

Table 2-4 and Figure 6-10 represent dimensionally the separation point, reattachment point and bubble length that emerged from flow views. Additionally, Table 5 gives the views of flow at  $3 \times 10^5$  Reynolds number and  $0^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $16^\circ$ ,  $24^\circ$ ,  $32^\circ$  and  $40^\circ$  attack angles for the airfoils and the wing model. While creating the numerical values, the methods present in some literature studies [28-31] have been used.

**Table 2.** Separation point ( $C_s$ ), reattachment point ( $C_r$ ) and bubble length ( $L_b$ ) for airfoil A

Re	$\alpha$ [ $^\circ$ ]	$C_s$ [x/c]	$C_r$ [x/c]	$L_b$ [x/c]
$2 \times 10^5$	0	0.075	0.3	0.225
	8	0.05	0.25	0.2
	16	0.05	0.2	0.15
$3 \times 10^5$	0	0.085	0.275	0.19
	8	0.05	0.215	0.165
	16	0.05	0.175	0.125
$4 \times 10^5$	0	0.1	0.275	0.175
	8	0.05	0.2	0.15
	16	0.025	0.125	0.1

The separation point, reattachment point and bubble length for airfoil A are offered in Table 2. While the angle of attack increases at a constant Reynolds number, the  $C_s$ ,  $C_r$  and  $L_b$  values decrease. In other words, an increase in the angle of attack pulls the laminar separation and reattachment on the surface towards the leading edge and weakens the separation bubble.

At  $3 \times 10^5$  Reynolds number, as the angle of attack is increased from 0 degrees to 16 degrees, the  $C_s$  value decreases from 0.085 to 0.05, the  $C_r$  value declines from 0.275 to 0.175 and the  $L_b$  value drops from 0.19 to 0.125.

At a constant angle of attack, increasing the Reynolds number reduces the  $C_r$  and  $L_b$  values, but does not have a significant effect on the  $C_s$  values. Increasing the Reynolds number pulls the reattachment towards the leading edge and weakens the separation bubble. For example, at 8 degrees for airfoil A, while the Reynolds number is increased from  $2 \times 10^5$  to  $4 \times 10^5$ , the  $C_s$  value remains constant at 0.05, the  $C_r$  and  $L_b$  have values of 0.25, 0.215, 0.2, and 0.2, 0.165, 0.15, respectively.

Figure 6 displays numerical values ( $x/c$ ) of separation point, reattachment point and bubble length for airfoil B. When the changes in the figures are checked, it is seen that  $C_s$  values are 0.05, 0.025, and 0,  $C_r$  values are 0.675, 0.3, and 0.0175 and  $L_b$  values are 0.625, 0.275 and 0.0175 at 0, 8 and 16 degrees for  $2 \times 10^5$  Reynolds number. When the Reynolds number is  $3 \times 10^5$ ,  $C_s$  is obtained as 0.15, 0.05 and 0 at 0, 8 and 16 degrees.  $C_r$  value is obtained as 0.575, 0.225, 0.1, and  $L_b$  is obtained as 0.425, 0.175 and 0.1 at the same degrees, respectively. While the Reynolds number is  $4 \times 10^5$ , at 0, 8, and 16 degrees  $C_s$  are 0.15, 0.05, 0,  $C_r$  are 0.5, 0.2, 0.1 and  $L_b$  are 0.35, 0.15, 0.1, respectively.

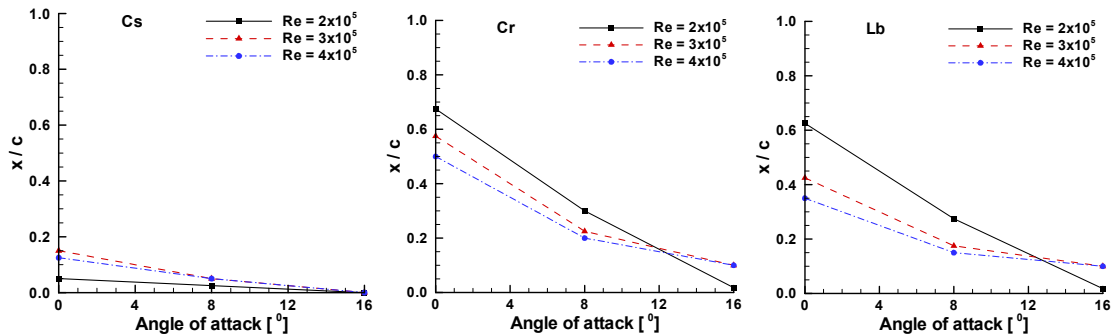


Figure 6.  $x/c$  values of  $C_s$ ,  $C_r$  and  $L_b$  for airfoil B versus angle of attack

When the figures and numerical values in Table 2-4 and Figure 6-10 are examined, two important effects can be seen. Increasing the angle of attack or Reynolds number numerically reduces the values that determine the boundaries of the separation bubble and weakens the surface separation bubble, causing it to shift towards the leading edge.

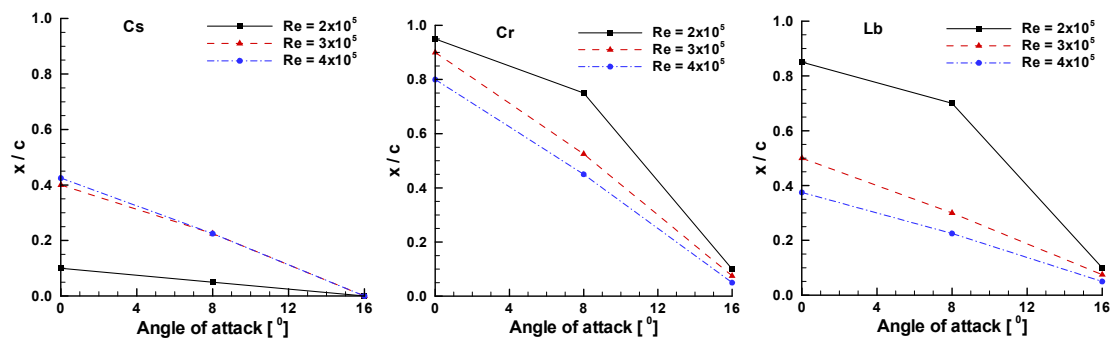


Figure 7.  $x/c$  values of  $C_s$ ,  $C_r$  and  $L_b$  for airfoil D versus angle of attack

When Table 5 is examined, it is seen that there are similar changes in the  $x/c$  values of  $C_s$ ,  $C_r$ , and  $L_b$  at three different Reynolds numbers. As each  $C_s$ ,  $C_r$ , and  $L_b$  changes are checked, it is viewed that  $x/c$  data is higher in airfoils C and D having lower thickness but higher camber at angles of attack of 0 and 8 degrees.

Table 3. Separation point ( $C_s$ ), reattachment point ( $C_r$ ) and bubble length ( $L_b$ ) for airfoil C

Re	$\alpha$ [ $^\circ$ ]	$C_s$ [ $x/c$ ]	$C_r$ [ $x/c$ ]	$L_b$ [ $x/c$ ]
$2 \times 10^5$	0	0.1	0.95	0.85
	8	0.05	0.75	0.7
	16	0	0.06	0.06
$3 \times 10^5$	0	0.25	0.875	0.625
	8	0.11	0.45	0.34
	16	0	0.04	0.04
$4 \times 10^5$	0	0.35	0.8	0.45
	8	0.1	0.275	0.175
	16	0	0.025	0.025

At the same angle, the  $x/c$  value is lower in airfoils A and B which have high thickness but low camber. At these angles, it can be said that the  $x/c$  value is inversely proportional to the thickness and directly proportional to the camber. Moreover, it is observed that the situation is reversed at 16 degrees. Relevant  $x/c$  values are higher in airfoils with greater thickness and low camber.

Although these values remain in the middle in the wing model consisting of airfoils, it is sighted that it generally follows a trend close to airfoil B up to 8 degrees and close to airfoil A after 8 degrees. To summarize, at low angles of attack, in thick and low-camber profiles and partially in the wing model, laminar separation, reattachment and the separation bubble occur in regions closer to the leading edge and the length of the bubble becomes shorter. At a high angle of attack, a similar situation occurs for thin and more camber profiles. Although different results were obtained in the studies [30,32,33], it was generally determined that the separation bubble shortened and shifted towards

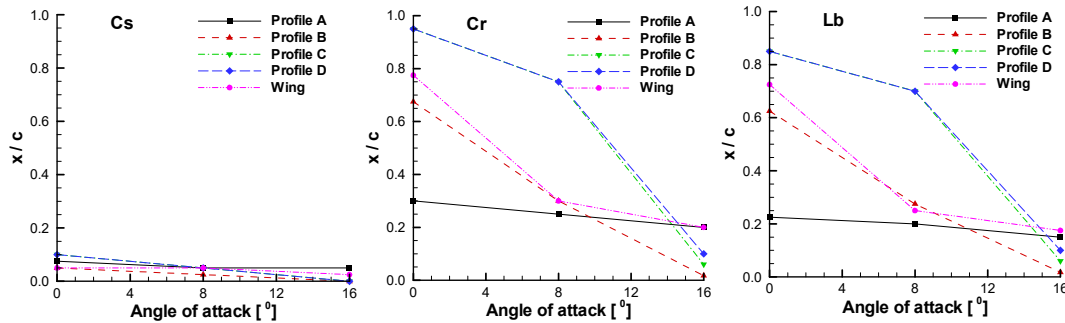
the leading edge as the thickness and camber increased. When the results obtained in the current study are examined, it is evaluated that the thickness is effective on the size and location of the separation bubble at low angles of attack (0 and 8 degrees), while the camber is more effective at 16 degrees.

**Table 4.** Separation point (Cs), reattachment point (Cr) and bubble length (Lb) for the wing model

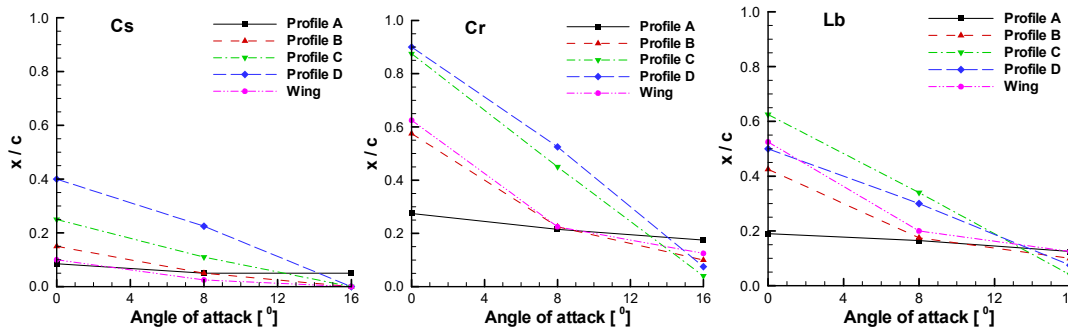
Re	$\alpha$ [°]	Cs [x/c]	Cr [x/c]	Lb [x/c]
2x10 <sup>5</sup>	0	0.05	0.775	0.725
	8	0.05	0.3	0.25
	16	0.025	0.2	0.175
3x10 <sup>5</sup>	0	0.1	0.625	0.525
	8	0.025	0.225	0.2
	16	0	0.125	0.125
4x10 <sup>5</sup>	0	0.35	0.62	0.27
	8	0.05	0.225	0.175
	16	0	0.1	0.1

When the flow images at 24 and 32 degrees are examined, phenomena such as reverse flow, secondary flow and wing tip vortices are seen. Additionally, as the Reynolds number increases, it is generally observed that the separation bubble spreads more on the surface and partially slides towards the leading edge.

The flow behaviors on the wing model are similar to the flow behaviors of airfoils A and B in terms of the flow phenomena. When the images at 40 degrees are examined, it is seen that the flow completely breaks away from the surface in all profiles at 2x10<sup>5</sup> Reynolds number. It is seen that at Reynolds numbers 3x10<sup>5</sup> and 4x10<sup>5</sup>, the flow can reattach to the surface in regions close to the trailing edge. As the Reynolds number increases, the reattachment point of the current shifts toward the leading edge.



**Figure 8.** x/c of Cs, Cr and Lb for the airfoils and the wing model versus attack angle at 2x10<sup>5</sup> Reynolds number



**Figure 9.** x/c values of Cs, Cr and Lb for the airfoils and the wing model versus attack angle at 3x10<sup>5</sup> Reynolds number



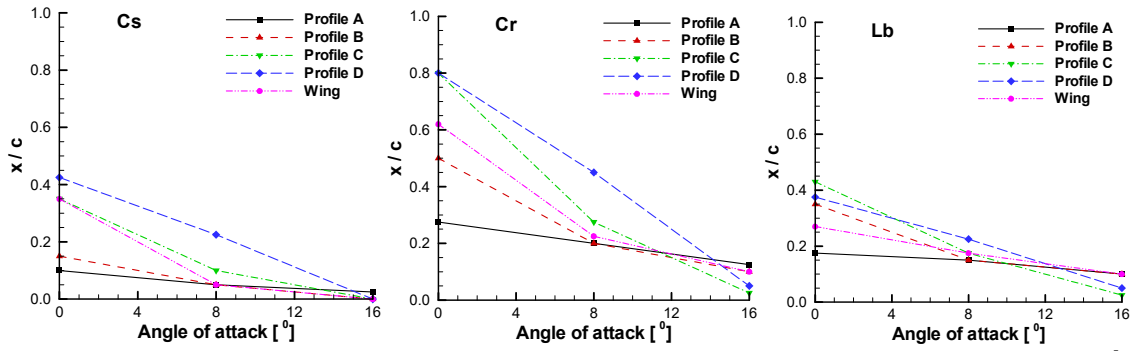


Figure 10.  $x/c$  values of  $C_s$ ,  $C_r$  and  $L_b$  for the airfoils and the wing model versus attack angle at  $4 \times 10^5$  Reynolds number

Table 5. Flow views on the surface of airfoils and wing model at  $Re = 3 \times 10^5$ .

	Airfoil-A	Airfoil-B	Airfoil-C	Airfoil-D	Wing model
$\alpha = 0^\circ$					
$\alpha = 8^\circ$					
$\alpha = 16^\circ$					
$\alpha = 24^\circ$					
$\alpha = 32^\circ$					
$\alpha = 40^\circ$					

## 4. CONCLUSIONS

The flow behaviors on the surfaces of the wing model and of the four airfoils forming the wing model are analyzed visually and dimensionally at different Reynolds numbers and angles of attack. The following results are obtained from the experiments.

- The flow on the surface is trying to transition from laminar to turbulent at angles of attack of 0, 8, and 16 degrees.
- The turbulent flow is trying to spread or reattach over the entire surface at between 24-40 degrees.
- At a fixed angle of attack, the increase in Reynolds number increases the kinetic energy of the flow, thus pulling the reattachment towards the leading edge and weakening the separation bubble.
- The increase in Reynolds number improves the kinetic energy of the flow over the wing and for this reason it numerically reduces the  $x/c$  values for  $C_r$ ,  $C_s$ , and  $L_b$  of the separation bubble.
- While the  $x/c$  value is higher in airfoils C and D having higher camber at angles of attack of 0 and 8 degrees, the  $x/c$  value is lower in airfoils A and B having high thickness. At 16 degrees, the situation turns into reverse, so the  $x/c$  value is higher in airfoils A and B. The  $x/c$  values remain in the middle of the wing model. The wing model generally follows a trend close to airfoil B at 0 and 8 degrees and close to airfoil A at 16 degrees. At low angles of attack between 0-8°, increasing the camber, which increases the lift force, delays the formation of bubbles in the more cambered C and D airfoils. At around 16°, an increase in the thickness, which increases the lift and stall angle, delays the formation of bubbles in the more thickness A and B airfoils.

## 5. ACKNOWLEDGEMENT

Thanks to the Unit of the Scientific Research Projects of Erciyes University (FBA-2018-7827) and Dr. Abdulhalim Aşkan for their past contributions in the production of the profiles. Additionally, I would like to thank the Proofreading & Editing Office of the Dean for Research at Erciyes University for copyediting and proofreading service for this manuscript.

## 6. REFERENCES

1. White, F.M., 1991. Viscous fluid flow. Second Edition, McGraw-Hill Inc., New York, 376.
2. LaGraff, J.E., Ashpis, D.E., 1998. Minnowbrook II 1997 workshop on boundary layer transition in turbomachines. National Aeronautics and Space Administration, NASA/CP-1998-206958, 345.
3. Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 1995. An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method. Longman Scientific and Technical, 47.
4. Cherubini, S., Picella, F., Robinet, J.C., 2021. Variational nonlinear optimization in fluid dynamics: the case of a channel flow with superhydrophobic walls. *Mathematics*, 9(53), 1-25.
5. Schlichting, H., Gersten, K., 2017. Boundary-layer theory. Ninth Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 419-420.
6. Bowles, R.I., 2000. Transition to turbulent flow in aerodynamics. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 358(1765), 245-260.
7. Horton, H.P., 1968. Laminar separation bubbles in two and three-dimensional incompressible flow. PhD Thesis, University of London, 28-30.
8. Sandham, N.D., 2008. Transitional separation bubbles and unsteady aspects of airfoil stall. *The Aeronautical Journal*, 112(1133), 395-404.
9. Genç, M.S., Karasu, İ., Açıkel, H.H., 2012. An experimental study on aerodynamics of NACA2415 airfoil at low Re numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 39, 252-264.
10. Karthikeyan, N., Sudhakar, S., Suriyanarayanan, P., 2014. Experimental studies on the effect of leading-edge tubercles on laminar separation bubble. AIAA 2014-1279. 52nd Aerospace Sciences Meeting, 1-9.
11. McGranahan, B.D., Selig, M.S., 2003. Surface oil flow measurements on several airfoils at low Reynolds numbers. 21st AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA 2003-4067, 1-18.
12. Liu, Y.C., Hsiao, F.B., 2014. Experimental investigation on critical Reynolds numbers aerodynamic properties of low aspect ratios wings. *Procedia Engineering*, 79, 76-85.
13. Chen, J.H., Li, S.S., Nguyen, V.T., 2012. The effect of leading-edge protuberances on the performance of small aspect ratio foils. 15th International Symposium on Flow Visualization.

14. Wang, L., Alam, M.M., Rehman, S., Zhou, Y., 2022. Effects of blowing and suction jets on the aerodynamic performance of wind turbine airfoil. *Renewable Energy*, 196, 52-64.
15. Trie, D.Z., Hariyadi, S., Rifdian, I.S., 2023. Experimental study of fluid flow characteristics in wing airfoil NACA 43018 with parabolic vortex generator using oil flow visualization. *Proceedings of the International Conference on Advance Transportation, Engineering, and Applied-Science (ICATEAS 2022)*, 52-69.
16. Kumar, V., Mandal, A.C., Podda, K., 2024. An experimental investigation on the aerodynamic characteristics and vortex dynamics of a flying wing. *The Aeronautical Journal*, First view, 1-25.
17. Mizoguchi, M., Kajikawa, Y., Itoh, H., 2016. Aerodynamic characteristics of low-aspect-ratio wings with various aspect ratios in low Reynolds number flows. *Transactions of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 59, 2, 56-63.
18. Ananda, G.K., Sukumar, Selig, M.S., 2015. Measured aerodynamic characteristics of wings at low Reynolds numbers, *Aerospace Science and Technology*, 42, 392-406.
19. Li, Q., Kamada, Y., Maeda, T., Murata, J., Nishida, Y., 2016. Visualization of the flow field and aerodynamic force on a horizontal axis wind turbine in turbulent inflows. *Energy*, 111, 57-67.
20. Seyhan, M., Akbıyık, H., Sarioğlu, M., Keçecioglu, S.C., 2022. The effect of leading-edge tubercle on a tapered swept-back sd7032 airfoil at a low Reynolds number. *Ocean Engineering*, 266(2), 112794, 1-13.
21. Ghorbanishohrat, F., Johnson, D.A., 2018. Evaluating airfoil behavior such as laminar separation bubbles with visualization and IR thermography methods. *Journal of Physics: Conference Series* 1037, 052037, 1-10.
22. Wei, Z.J., Qiao, W.Y., Liu, J., Duan, W., 2016. Reduction of endwall secondary flow losses with leading-edge fillet in a highly loaded low-pressure turbine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part a Journal of Power and Energy*, 230(2), 184-195.
23. Genç, M.S., Özhan, G., Özden, M., Kiriş, M.S., Yıldız, R., 2018. Interaction of tip vortex and laminar separation bubble over wings with different aspect ratios under low Reynolds numbers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(22), 4019-4037.
24. Aşkan, A., Tangöz, S., Konar, M., 2023. An investigation of aerodynamic behaviors and aerodynamic performance of a model wing formed from different profiles. *The Aeronautical Journal*, 127(1310), 676-697.
25. Aşkan, A., Tangöz, S., 2018. The impact of aspect ratio on aerodynamic performance and flow separation behavior of a model wing composed from different profiles. *Journal of Energy Systems*, 4(2), 224-237.
26. Duan, W., Qiao, W., Wei, Z., Liu, J., Cheng, H., 2018. The influence of different endwall contouring locations on the secondary flow losses in a highly loaded low-pressure turbine. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Volume 2B: Turbomachinery*, V02BT41A018 ASME, 1-11.
27. Sudhakar, S., Karthikeyan, N., Suriyanarayanan, P., 2019. Experimental studies on the effect of leading-edge tubercles on laminar separation bubble. *AIAA Journal*, 57(12), 5197-5207.
28. Torres, G.E., Mueller, T.J., 2004. Aerodynamic impact of aspect ratio at low Reynolds number. *AIAA Journal*, 42(5), 865-873.
29. Marchman, J.F., 1987. Aerodynamic testing at low Reynolds numbers. *Journal Aircraft*, 24(2), 107-114.
30. Elgammi, M., Sant, T., Ateeah, A.A., 2022. The influence of the flow separation bubble and transition location on the profile drag of three 4-digit NACA airfoil profiles. *Wind Engineering*, 46(3), 796-817.
31. Traub, L.W., Cooper, E., 2008. Experimental investigation of pressure measurement and airfoil characteristics at low Reynolds numbers. *Journal of Aircraft*, 45(4), 1322-1333.
32. Karasu, İ., Açikel, H.H., Koca, K., Genç, M.S., 2020. Effects of thickness and camber ratio on flow characteristics over airfoils. *Journal of Thermal Engineering*, 6(3), 242-252.
33. Dongli, M., Yanping, Z., Yuhang, Q., Guanxiong, L., 2015. Effects of relative thickness on aerodynamic characteristics of airfoil at a low Reynolds number. *Chinese Journal of Aeronautics*, 28(4), 1003-1015.

## NOMENCLATURE

x/c	: Location along the chord	Re	: Reynolds number
$\alpha$	: Angle of attack	Cs	: Separation point
Cr	: Reattachment point	Lb	: Length of bubble

## Kiremit Tozu ve Biyopolimerle İyileştirilmiş Kil Zeminin Mukavemet Parametrelerinin İncelenmesi

İlkim ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ<sup>1,a</sup>, Baki BAĞRIAÇIK<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana

<sup>a</sup>ORCID: 0009-0001-1729-2471; <sup>b</sup>ORCID: 0000-0002-1860-2881

### Makale Bilgileri

Geliş : 04.03.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560191

### Sorumlu Yazar

İlkim ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ

iozbahceci@cu.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Zemin iyileştirme

Kiremit tozu

Serbest basınç mukavemeti

Donma-çözülme

Biyopolimer

**Atf şekli:** ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ, İ., BAĞRIAÇIK, B., (2024). Kiremit Tozu Ve Biyopolimerle İyileştirilmiş Kil Zeminin Mukavemet Parametrelerinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 771-784.

### ÖZ

Tarih boyunca insanların çeşitli temel ihtiyaçları bulunmaktadır. Bu ihtiyaçlar biz insanlar için hayati öneme sahiptir. İnşaat mühendisliği alanını ilgilendiren bölümü ise barınma probleminde dayanmaktadır. İnşaat mühendisliğinin bir alt disiplini olan geoteknik alanı ise hızla tükenen inşaat sahaları, verimli arazilerin imara açılması ile var olan alanları değerlendirme konusunda sorumluluk altındadır. Var olan alanlar genellikle bir yapıyı iyileştirme olmaksızın taşıma kapasitesine sahip değildir. Bu nedenle zeminlerin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu tip zeminleri iyileştirme amacı ile uygulanan birçok yöntem bulunmaktadır. Son yıllarda en çok popüler olan yöntem atık madde ya da farklı maddeler kullanarak zeminin var olan mühendislik özelliklerini iyileştirmektir. Bu çalışmada inşaat alanlarından toplanmış kırık kiremit tozları ve biyopolimer olan Akasya Zamkı kullanılmıştır. Bu amaç ile doğal kil zeminin öncelikle endeks özellikleri belirlenmiş daha sonra ise zemine farklı yüzdelere de bu maddeler karıştırılarak serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. Sonrasında ise zeminin donma-çözülme davranışını incelemek için 1, 3, 5 ve 10 döngü sonrası serbest basınç deneyi yapılmıştır. Donma-çözülme öncesi ve sonrası mukavemet parametreleri incelenmiştir. Sonuç olarak kiremit tozu ve biyopolimerin birlikte ve ayrı olarak kil zeminin dayanımını artırdığı, donma-çözülme sonrası ise kiremit tozu ve biyopolimer içeren kil zeminin dayanıma olumlu yönde katkı sağladığı görülmüştür.

## Investigation of Strength Parameters of Clay Soil Improved with Tile Powder and Biopolymer

### Article Info

Received : 04.03.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560191

### Corresponding Author

İlkim ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ

iozbahceci@cu.edu.tr

### Keywords

Soil improvement

Tile dust

Unconfined compressive strength

Freeze-thawing

Biopolymer

**How to cite:** ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ, İ., BAĞRIAÇIK, B., (2024). Kiremit Tozu Ve Biyopolimerle İyileştirilmiş Kil Zeminin Mukavemet Parametrelerinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 771-784.

### ABSTRACT

Throughout history, people have had various basic needs. These needs are vital for humans. The section concerning the field of civil engineering is based on the housing problem. The field of geotechnical engineering, which is a sub-discipline of civil engineering, is responsible for evaluating existing areas due to rapidly depleting construction sites and the development of efficient lands. Existing areas generally do not have the capacity to bear without improving a structure. Therefore, the improvement of the floors is necessary. There are many methods applied for the purpose of improving such types of surfaces. In recent years, the most popular method has been to improve the existing engineering properties of the ground by using waste materials or different substances. In this study, broken tile dust collected from construction sites and the biopolymer Acacia Gum were used. For this purpose, the index properties of the natural clay soil were first determined, and then different percentages of these materials were mixed into the soil, followed by the application of unconfined compression tests. Subsequently, to examine the freezing-thawing behavior of the ground, unconfined compression test was conducted after 1, 3, 5, and 10 cycles. The resistance parameters before and after freezing-thawing have been examined. As a result, it has been observed that both the brick powder and the biopolymer, whether used together or separately, enhance the strength of the clay soil. After freeze-thaw cycles, the clay soil containing brick powder and biopolymer also positively contributes to its strength.



## 1. GİRİŞ

İnsanların yaşamını sürdürebilmesi için gerekli olan bazı temel ihtiyaçları vardır. Bu ihtiyaçlardan barınma ihtiyacı hızla artan dünya nüfusu ile büyük bir problem haline gelmiştir. Artan nüfusla birlikte barınma ihtiyacını karşılamak için yapılacak her türlü yapı için sağlam bir zemine sahip araziler günden güne azalmaktadır. İnsan hayatı için çok büyük bir önem arz eden bu sorun geoteknik alanında zemin iyileştirme konusunda birtakım çalışmaların yapılmasını zaruri kılmıştır. Yapılan bu çalışmalar günümüze kadar birçok şekilde deneme ve çalışmalar yapılarak kayda değer bir ilerleme sağlanmıştır. Bu çalışmaların tamamı zemin iyileştirme olarak adlandırılmıştır. Barınma ihtiyacının yanında dünyamızda bulunan geri dönüştürülemeyen, atıl olarak kalıp görüntü ve çevre kirliliğine sebep olan atıklarda dünyamız için son dönemde tehlikeli hale gelmiştir. Bu iki hayati konu geoteknik alanındaki uzmanlar tarafından birleştirilerek atıklar ile zemin iyileştirme çalışmaları başlamıştır.

Yapılmış olan bu çalışmada ise bina enkazlarından alınan kiremit kırıklarından elde edilmiş kiremit tozu (KT) kullanılmıştır. Kiremit tozunun çalışmaya dahil edilme nedeni inorganik bir madde olan KT'nin doğada kaybolmaması çevre düzeni ve sağlığı için risk oluşturmaktadır. Bu sebeple yeni kullanım alanları bulmak için çalışmada etkisi araştırılmıştır. Kiremit tozunun ana hammaddesi kildir. Kiremit tozuna ek olarak bir biyopolimer çeşidi olan Akasya Zamkı (AZ) da zeminde iyileştirme amacı ile kullanılmıştır. Akasya zamkı ise son dönemde popüler olan biyopolimerler olarak adlandırılan maddelerin bir türevidir. Bu madde gıdadan endüstriye, zemin iyileştirme çalışmalarına kadar uzanan geniş bir yelpazeye sahiptir.

Bu çalışma taşıma gücü açısından zayıf olan bir zeminin nasıl dayanımının artırılacağı ve don olaylarına karşı zeminin katkılı ve katkısız hallerde nasıl davranış sergileyeceğini ortaya koymak amacıyla yapılmıştır.

Poyraz ve Ural [1], çalışmalarında atık porselen karoları kullanarak kil zeminlerin geoteknik açıdan özelliklerini incelemişlerdir. Bu amaçla kil zemine kontrol numunesi ve %5, %10, %15, %25 oranlarında atık porselen karoları ekleyerek endeks özellikleri incelenmiştir. Sonucunda ise limit değerlerinde düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir. Maksimum kuru birim hacim ağırlığında artış, su muhtevasında ise azalma meydana gelmiştir. CBR değeri ise %6 oranında artmıştır. Serbest basınç dayanımı %44 oranında artış göstermiştir. Konsolidasyon özellikleri incelendiğinde ise konsolidasyon katsayısında artış, hacimsel sıkışma katsayısında ise %90 oranında azalma meydana gelmiştir. Sonuç olarak atık porselen karosu kil zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileşme meydana getirmiştir.

Çimen ve arkadaşları [2], çalışmalarında yüksek plastisiteye sahip bir kilin inşaat atıkları ile mühendislik özelliklerinde meydana gelen değişimi incelemişlerdir. Bu amaç ile öncelikle inşaat atıkları ve kil numunenin kimyasal analizleri yapılmıştır. Farklı oranlarda inşaat atığı eklenen kil zemine kıvam deneyleri, kompaksiyon deneyleri, serbest basınç deneyi ve şişme deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak %10-%20 aralığında inşaat atığı kil zeminde plastisite indisi azalmakta, maksimum kuru birim hacim ağırlığı artmakta ve optimum su muhtevası azalmaktadır. Şişme deneyi sonucunda ise sabit hacme sahip şişme basıncı azalmıştır. Serbest basınç mukavemetinde de artış meydana gelmiştir.

Devlet [3], yaptığı bu tez çalışmasında, kil zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde atık lastikler ve gaz beton atıklarının katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu çalışmada, killi zemine değişik oranlarda toz lastik atık ve öğütülmüş gaz beton katılarak, serbest basınç deneyleri ve CBR deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, toz atık katkısının ve öğütülmüş gaz beton katkısının killi zeminlerde optimum oran olan %5 gaz beton + %2 lastik atığı katkılı numunenin serbest basınç değerinde katkısız numuneye göre %19,30 oranında artış ve CBR değerinde de %27,61 oranında artış ile Serbest basınç dayanımı 44,2 kPa, CBR değeri %27,17 olarak tespit edildiği görülmüştür.

Abd ve arkadaşları [4], killi zemini iyileştirmek için biyopolimer kullanmışlardır. Çalışmada biyopolimerin (karboxi metil selüloz) kil zeminin dayanımına katkısı incelenmiştir. Biyopolimer, zemine iki ayrı oranda (%0.5 ve %3) eklenmiştir. Kil zeminin dayanımı 42 kN/m<sup>2</sup> iken %3 biyopolimer ile 106 kN/m<sup>2</sup>'ye yükselmiştir. Ayrıca, 3% polimer içeriğinde, 0 günde 16 kN/m<sup>2</sup> olan serbest basınç dayanımının 7 günde 206 kN/m<sup>2</sup>'ye ve 28 günde 257 kN/m<sup>2</sup>'ye yükseldiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak biyopolimerin kil zeminin dayanımına katkı sağladığı sonucuna varılmıştır.

Yarbaşı [5] yaptığı bu çalışmada, mermer tozu ve atık lastik parçalarıyla iyileştirilmiş düşük plastisiteli kırmızı killi birimin dayanımındaki değişimler incelenmiştir. Kırmızı kil birimine % 0,5, % 1, % 2 atık



lastik ve %5, %10, %15, %20 mermer tozu ilave edilerek 0 (3 saat), 1, 7, 28 gün ve +21°C'deki dayanımları belirlenmiştir. Bu verilerden 28 günlük kür sonrası %0.5 (2.00 mm) atık lastik ve %5 mermer tozu katkısıyla iyileştirilen killi birimin en yüksek dayanım değeri verdiği belirlenmiştir. Bu karışıma donma çözülme deneyi uygulanmıştır. Sonuçta, %0.5 atık lastik (2.00 mm) ve %5 mermer tozu ile iyileştirilen killi birimin dayanımında %5.1, ana malzeme olan kilde ise %28.7 oranında azalma meydana gelmiştir.

Tunç ve arkadaşları [6], çalışmalarında, akasya zamkı (AG) biyopolimeri ile iyileştirilen nehir kumu (NK) ve geri dönüştürülmüş kumun (GDK) serbest basınç dayanımları ve permeabilite özellikleri incelemişlerdir. AG biyopolimeri ile iyileştirilen GDK ve NK'nın serbest basınç dayanımlarının arttığı gözlenmiştir. Sonuç olarak, NK'ya alternatif olarak bir malzeme olarak inşaat yıkıntı atıklarından elde edilen GDK'nın kullanılabilmesi ve AG biyopolimerinin, her iki zeminin de mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılabilmesi belirlenmiştir.

Aysu [7] 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. Suya doymun numunelere yapılan serbest basınç deneylerinin sonucunda; doymunluğun farklı oranlardaki cam lifi katkılı zeminin mukavemetinde yaklaşık %25-%35 oranlarında azalma olduğu görülmüştür. Optimum su muhtevasında ve doymun durumunda, katkısız zemine kıyasla cam lifi katkısı, zeminin kayma mukavemetini %25 oranında artırdığı belirlenmiştir.

Alaryan [8] yaptığı bu çalışmada, yüksek ve düşük plastisiteli killerin iyileştirilmesi amacıyla numunelere farklı oranlarda katkı maddeleri; PKF (%5, %10, %15, %20), karşılaştırma yapmak için çimento (%5, %10) ve kireç (%5, %10) eklenmiştir. Yapılan çalışmada, yüksek ve düşük plastisiteli kil zeminlere belirli oranlarda ilave edilen PKF'nin zeminlerin basınç ve kayma mukavemetini artırıp oturma miktarını azalttığı tespit edilmiştir. PKF, başta killi zeminler olmak üzere çeşitli zeminlerde stabilizasyon (iyileştirme) maddesi olarak kullanılabilmesi ortaya konmuştur. Katkısız kil zemine göre her iki kil zeminin (farklı kür sürelerinde) serbest basınç mukavemetinde artış görülmüştür. %15 üzeri katkı ilavesinde mukavemette azalma tespit edildi. Katkılı yüksek plastisiteli kil zeminin, katkısız yüksek plastisiteli kil zemine göre basınç mukavemetindeki artış %97 olmuştur. Katkılı düşük plastisiteli kil zeminin, katkısız düşük plastisiteli kil zemine göre basınç mukavemetindeki artış %225 olmuştur.

Geçkil ve arkadaşları [9], killi zemine kireç ilavesinin dayanım üzerindeki etkisini araştırmıştır. Kireç, killi zemine ağırlıkça farklı oranlarda eklenmiştir. Hazırlanan karışımlarda kilin ağırlığının %2.5, %5, %7.5, %10, %15 ve %20'si oranında kireç eklenerek farklı oranlarda hazırlanan numuneler homojen karıştırılarak sıkıştırılmış ve serbest basınç ve Kaliforniya taşıma oranı testleri yapılmıştır. Deneyler sonuçları, karışımdaki kireç içeriğinin artışıyla plastisite indeksi ve maksimum kuru yoğunluğun azaldığı, optimum su içeriğinin ise arttığını göstermiştir. Kür süreleri (7 ve 28 gün) sonucunda serbest basınç dayanımı değeri, en yüksek %5 ile kireçten elde edilmiştir. Ayrıca kürlenmiş numunelerin Kaliforniya taşıma gücü oranı değerleri 7 ve 28 günlük kürlerin sırasıyla katkısız killi zemine göre 1.37 ve 2.08 kat daha yüksek bulunmuştur.

Vural [10], yaptığı bu çalışmada, inşaat yıkıntı atığı, kireç ve kaolini karışım haline getirerek bu karışımların 1, 7 ve 28 günlük CBR değerleri ölçülmüştür. İyileştirme yapılacak zemin olarak kaolin kili kullanılmıştır. Karışımlarda birinci, yedinci ve yirmi sekizinci gün için en düşük CBR değerleri sırasıyla 26.3, 28.65 ve 33.13 olarak %3 Yıkıntı atığı, %5 Kireç ve %92 Kaolin kullanıldığında, en yüksek CBR değeri ise 33.52, 34.70 ve 34.95 ile %23 yıkıntı atığı, %5 kireç ve %72 kaolin kullanıldığında elde edilmiştir.

Literatür araştırması sonucunda zemin iyileştirme adına birçok organik ya da inorganik maddenin kullanıldığı görülmüştür. Yapılan bu çalışmada kullanılacak kiremit tozu ve biyopolimerin bir arada zeminin mukavemet parametresine ve donma-çözülme davranışına olan etkisinin incelenmediği görülmüştür. Bu nedenle iki madde yardımı ile zeminin donma-çözülme öncesi ve sonrasında dayanımında meydana gelen değişimler incelenecektir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Materyal

Çalışmada kullanılan Kil Zemin (KZ) numuneleri, Adana ilinden alınmıştır. Alınan kil numune ise Şekil 1’de sunulmuştur.

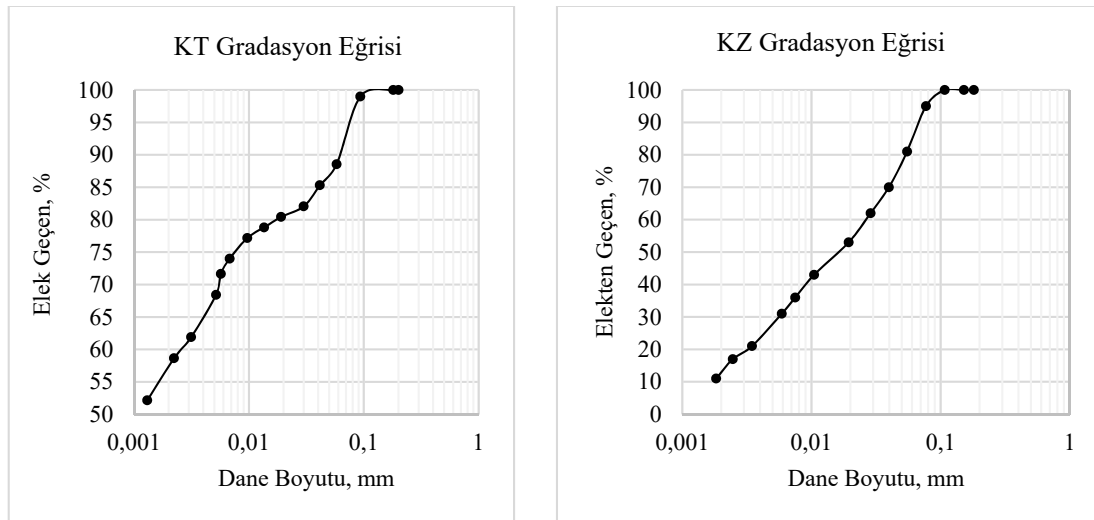


Şekil.1 Doğal kil numunesi öğütülmemiş hal

Adana ilinden alınan kil zemin numunesinin TS 1900-1 standardına uygun olarak yapılan deneyler ile birim hacim ağırlığı  $2,63 \text{ kg/cm}^2$ , maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $1,69 \text{ kg/cm}^2$ , optimum su içeriği %21 olarak bulunmuştur. Numunenin likit limiti %51, plastik limiti %28 olarak bulunmuştur. Zemin sınıfı ise birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi ile CH yani yüksek plastisiteli kil olarak saptanmıştır.

Çizelge 1. Plastik limit, likit limit ve plastisite indisi

Parametreler	Veriler
CH	Yüksek plastisiteli kil
$W_L(\%)$	51
$W_p(\%)$	28
$I_p(\%)$	23



Şekil 2. Kil zemin ve kiremit tozu için dane çapı dağılım eğrisi

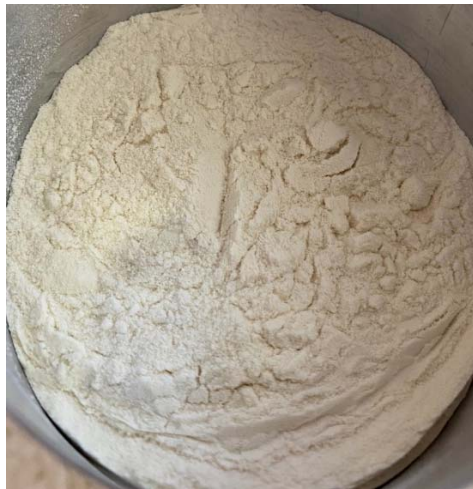
Çizelge 1’de kil zemine ait likit limit, plastik limit değerleri, Şekil 2’de ise KZ ve KT’ye ait granülometri eğrileri verilmiştir. Kz için %94.4 oranında 200 numaralı elekten numune geçtiği için Cassagrande Plastisite Kartı kullanılarak sınıflama yapılmıştır.

Zemine atık madde olarak inşaatların yıkımı sonrası atıl hale gelen kiremitlerin tozları kullanılmıştır. Kullanılan kiremit tozunun ham maddesi kilden oluşmaktadır. Kiremit üretiminde kullanılan killen genel olarak montmorillonit ve kaolin cinsi killerdir. Isıya dayanıklı bu killen 900-920°C sıcaklıkta pişirilerek kullanıma hazır hale gelmektedir. Isıl işleme birlikte kil mineralleri arası bağlar güçlenmekte ve dayanımını artırmaktadır. Bu çalışmada kullanım amacı da dayanımı artırılmış bir karışım kil olan kiremit tozunun doğal kil zeminin mühendislik özelliklerine etkisini gözlemlemektir. Şekil 3’te kiremit tozunun öğütme sonrası hali verilmiştir.



Şekil 3. Kiremit tozu

Kullanılan diğer bir madde ise polimerlerin alt dalı olarak bilinen biyopolimerlerden Akasya zımkı kullanılmıştır. Akasya zımkı aynı zamanda Senegal zımkı veya Arabic Gum olarakta bilinmektedir. Senegal zımkı olarak bilinmesinin sebebi ise Senegal’de yetişen Acacia ağacından elde edilen maddenin kurutulmuş toz hale getirildikten sonra elde edilmesinden kaynaklıdır. Birçok biyopolimerin olduğu gibi Akasya zımkıda birçok alanda kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları şu şekildedir: Boya, tutkal ve mürekkep üretimi. Hap ve pastil üretimi, kozmetik ürünlerde ise viskoziteyi sağlamak amacı ile kullanılır. Su ile aktifleşen biyopolimer hidrojel haline gelmektedir. Hidrojel zemin içerisinde bulunan boşlukları kapatarak dayanımda artışa neden olabileceği düşünülmüştür. Bu nedenle kiremit tozu ve biyopolimer hem ayrı hem de birlikte kil zeminin dayanım parametresine etkisi incelenmiştir. Şekil 4’te Akasya zımkının toz hali verilmiştir.



Şekil 4. Akasya zımkı

## 2.2. Metot

Doğal kil zemine kiremit tozu ve biyopolimer farklı oranlarda eklenmiştir. Kiremit tozu %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında; biyopolimer ise %0,5, %0,75, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında doğal kil zemin içerisine eklenmiştir. Hazırlanmış olan numuneler ile yapılan deney sonucu seri deneylerde kullanılacak optimum kiremit tozu ve biyopolimer yüzdesi belirlenmiştir. Optimum madde miktarları belirlendikten sonra her iki malzemenin karışımından elde edilen numune üzerinde serbest basınç deneyi yapılmıştır. Sonrasında ise optimum miktarda madde içeren numuneye en uygun kür süresinin belirlemek için SBD numuneleri hazırlanıp 1, 5, 15, 25 günlük 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, yaka ve tokmaktan oluşan düzeneğe ile numuneler hazırlanmıştır. Bu SBD düzeneği Şekil 5’de sunulmuştur.



Şekil 5. Serbest basınç aleti ve kil numunesi

Bu düzeneğe ile hazırlanan deney numuneleri 5 günlük kür süresi ile desikatörde bekletilmesi sonrasında serbest basınç deneyine tabi tutularak dayanımlar belirlenmiştir. Deneylerde, zemin numunesi, SBD aletinin alt plakasının orta noktasına yerleştirildikten sonra üst başlık numunenin üst yüzeyine değecek şekilde fakat yük verilmeden yerleştirilmiştir. Bu işlemler ilgili standartta belirtildiği şekilde gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, optimum madde miktarları elde edilmiş ve bu orana bağlı numuneler üstünde SBD yapılarak optimum kür süresi belirlenmiştir. Optimum miktar içeren numuneye ve doğal kil zemine ayrıca donma-çözülme davranışını incelemek için donma-çözülme döngüleri uygulandıktan sonra serbest basınç deneyleri yapılmıştır.

### 2.2.1. Islak Karışım Yöntemi ile Biyopolimerin Aktif Hale Getirilmesi

Biyopolimerlerin zemin iyileştirme alanında kullanılmaya başlanması ile farklı uygulama yöntemleri geliştirilmiştir. Islak karışım yöntemi, kuru karışım ve termal karışım yöntemleri yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Bu çalışmada kullanılan Akasya Zamkı ıslak karışım yöntemi ile hazırlanmıştır. Islak karışım yöntemi biyopolimerin optimum su içeriği ile yüksek devirli karıştırıcı yardımı ile jelimsi hale gelene kadar karıştırılması sonucu elde edilmektedir.

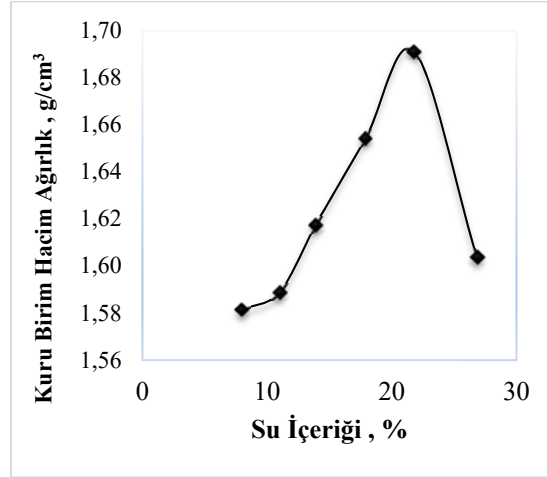
### 2.2.2. Donma-Çözülme Numunelerinin Hazırlanması

TS-1900 standartları ile hazırlanan serbest basınç numuneleri streç film yardımı ile hacimleri sabit kalacak şekilde donma-çözülme kabineye yerleştirilmiştir. Numuneler streç filme sarılarak donma olayı esnasında numunede meydana gelecek fiziki değişimler ile dağılması amaçlanmıştır.

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

#### 3.1. Optimum Su İçeriğinin Belirlenmesi

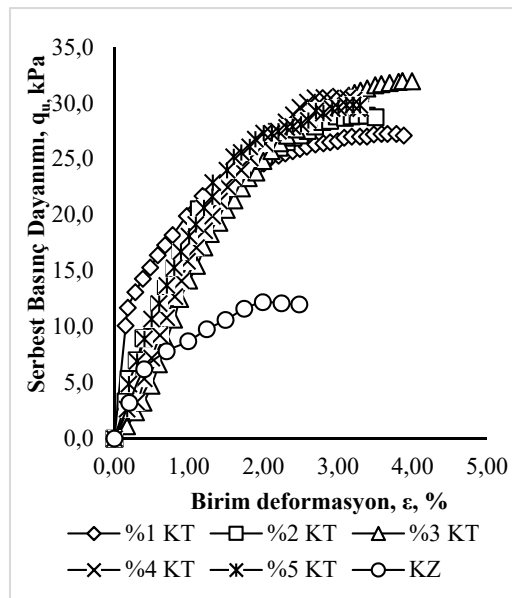
Standart kompaksiyon deneyi TS1900-2 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Doğal kil zemin numunesinin optimum su miktarı belirlenmiş ve bu değere bağlı kalınarak zeminin kendi su içeriğinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deney ile kil zeminin optimum su muhtevası %21 olarak saptanmıştır. Tüm deneylerde doğal kil zemine ait optimum su muhtevası değeri ile numuneler hazırlanmıştır. Bulunan optimum su muhtevası emsal teşkil eden kil zemin su muhtevaları ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Optimum su muhtevası grafiği Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Kompaksiyon eğrisi

#### 3.2. Kiremit Tozu ve Biyopolimerin Optimum Oranlarının Belirlenmesi

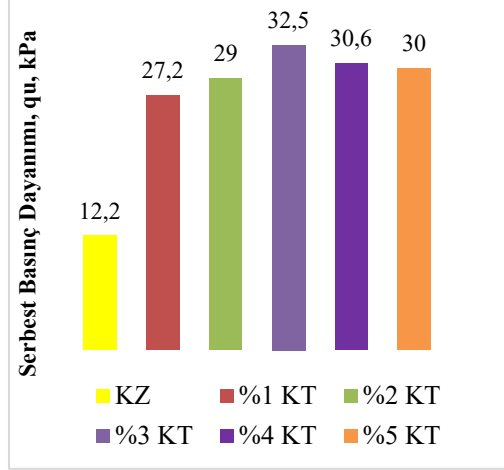
Doğal kil zemine ve KT, AZ katkılı kil zemine 5 günlük referans kür süresi sonrası serbest basınç deneyleri yapılmıştır. KT; %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında, AZ; %0.5, %0.75, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında doğal kil zeminin ıslak karışımına eklenmiştir. Sonucunda %3 oranında KT ve %1 oranında AZ optimum madde miktarı olarak belirlenmiştir. Seçilen değerler her maddenin maksimum dayanım değeri olarak seçilmiştir. %3 KT 32.5 kPa, %1 AZ 26.2 kPa dayanıma sahiptir. Doğal kil zemine (KZ) ve kiremit tozu katkılı zemin numunelerine ait dayanım değerleri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. KZ ve farklı KT oranları için serbest basınç mukavemetleri



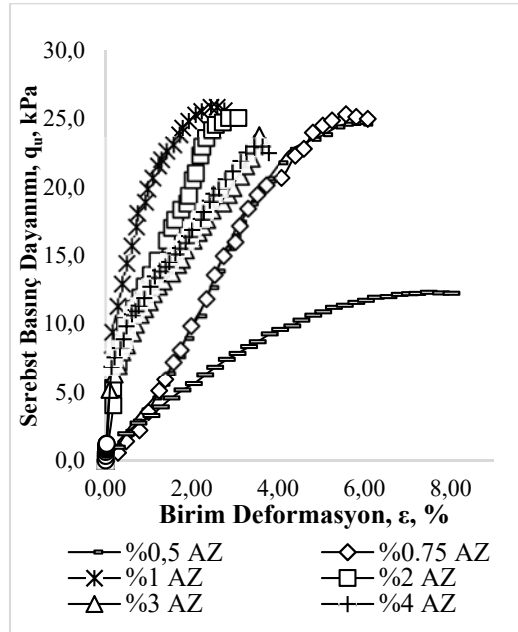
Şekil 7, incelendiğinde doğal kil zemine ait serbest basınç dayanımı 12.2 kPa olarak bulunmuştur. KT içeren doğal kil zemin numunelere ait dayanımların doğal kil zemine oranla %166'ya kadar dayanımda artış meydana gelmiştir. Kiremit tozunun ana maddesi olan kil minerallerinin pişirim esnasında kil mineralleri arasında bulunan zayıf Van Der Waals bağlarının güçlenerek mukavemetinin arttığı söylenebilir. Mukavemeti artan bu madde doğal kil zeminle hazırlanan karışımında mukavemetinin sonuç olarak artış gösterdiği düşünülmektedir. Şekil 8'de ise KT'ye ait sütun grafiği verilmiştir. Sütun grafikte görüldüğü üzere %3 oranında KT içeren kil zemin numunesi maksimum dayanım değerine sahiptir. 32.5 kPa değeri ile optimum oran olarak seçilmiştir.



Şekil 8. KT'ye ait dayanım değerleri

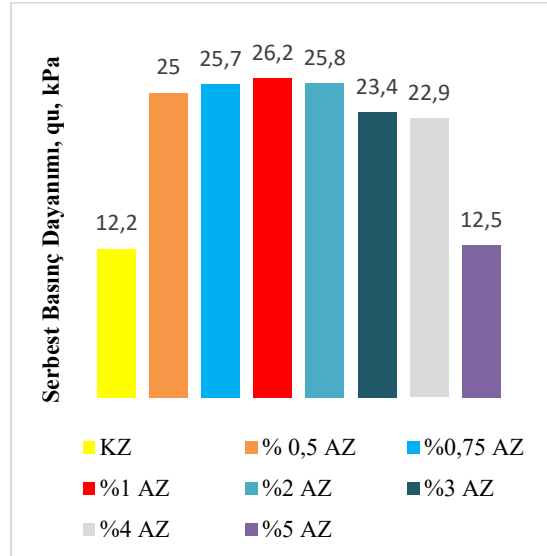
Yapılan bir diğer serbest basınç deneyi ise AZ'ye ait optimum oranların belirlenmesidir. Deney başlangıcında %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında numuneler deneye tabi tutulmuş fakat deney sonucunda maksimum dayanıma sahip oran %1 çıktığı için %0.5 ve %0.75 oranlarında eklenerek optimum oran tam olarak belirlenmiştir. Şekil 9'da AZ'ye ait serbest basınç deney eğrisi verilmiştir.

Biyopolimer eklenmiş doğal kil zemin numunesine yapılan serbest basınç deneyinde 7 farklı yüzde için dayanım değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerlerden %1 oranında AZ içeren numune 26,2 kPa değeri ile en büyük dayanıma sahiptir. Bu nedenle optimum oran olarak seçilmiştir. %5 oranında biyopolimer içeren numunenin dayanımı diğer oranlara göre oldukça düşmüştür. Düşüşün sebebi jel kıvamında olan biyopolimerin kil zeminin fiziksel yapısını bozarak çamurumsu bir hale gelmesiyle birlikte dayanımını da oldukça düşürmüştür.



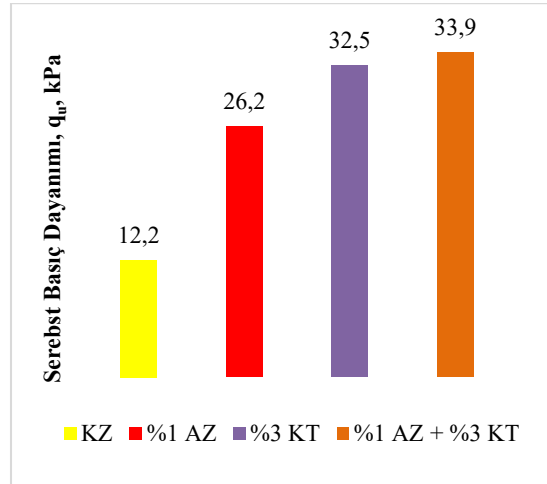
Şekil 9. KZ ve farklı AZ oranları için serbest basınç mukavemetleri

Biyopolimerin kil zeminin dayanımını artırma sebebi jelimsi yapısından dolayı doğal kil zeminde bulunan boşlukları doldurmasıdır. Şekil 10'da AZ'ye ait maksimum dayanım değerleri sütun grafiği halinde verilmiştir.



Şekil 10. AZ'ye ait serbest basınç dayanım değerleri

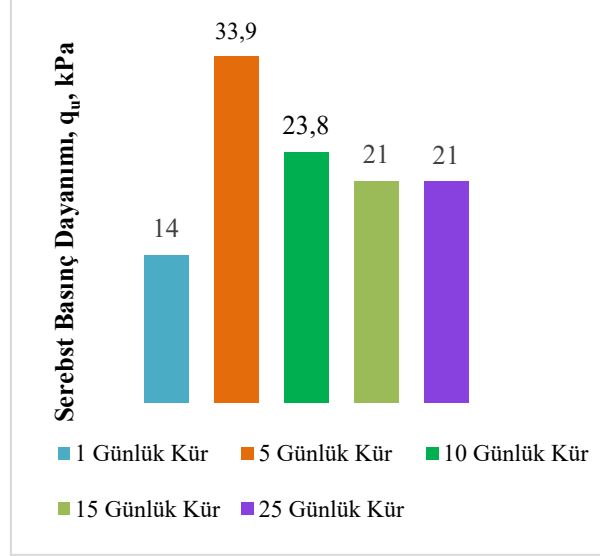
Optimum oranları bulunan KT ve AZ maddelerinin karışımlarından elde edilen numuneye serbest basınç deneyi yapılarak iki maddenin birlikte çalışıp çalışmadığı kontrol edilmiştir. Bu amaçla 5 günlük referans kür süresi ile serbest basınç deneyi yapılmış ve maksimum dayanım değerinin doğal kil zemine, KT'ye ve AZ'ye oranları karşılaştırılmıştır. Şekil 11'de KZ, KT, AZ ve karışıma ait dayanım değerleri verilmiştir. KZ, KT, AZ ve karışıma ait maksimum dayanım değerlerine bakıldığında karışıma ait dayanım değeri diğer numunelere oranla yüksektir. Bu sonuçta kiremit tozu ve akasya zankının bir arada kullanıldığında zeminin mukavemet parametresine olumlu yönde katkı sağladığı söylenebilir. Optimum oranlarla hazırlanmış karışımın dayanım değeri 33,9 kPa'dır.



Şekil 11. KZ, KT, AZ ve karışımın maksimum dayanım değerleri

### 3.3. %3 KT + %1 AZ Karışımının Kür Süresinin Belirlenmesi

Optimum oranlar kullanılarak hazırlanan karışımın kür süresinin belirlemek amacı ile farklı kür süreleri verilerek desikatörde bekletilmiş ve serbest basınç deneyine tabii tutulmuştur. Şekil 12'de karışıma ait kür sürelerine bağlı dayanım değerleri verilmiştir.

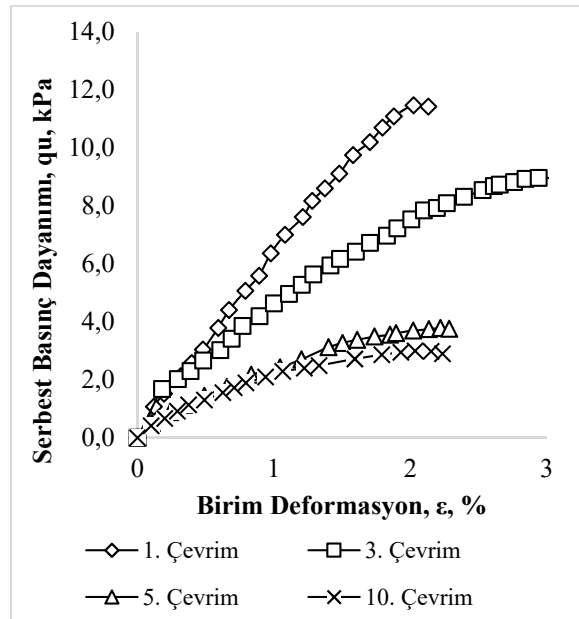


Şekil 12. Karışımın kür süresine bağlı dayanım değerleri

Belirlenen oranlarda maddelerin karıştırılması ile elde edilen numunenin optimum kür süresini belirlemek amacı ile yapılan serbest basınç deneyi sonucunda numuneler doğal kil zeminin dayanımına göre dayanımda artış göstermiştir. Fakat 5 günlük kür süresi sonrası en yüksek dayanım değeri elde edilmiştir. 5. günden sonra dayanımda ani bir düşüş yaşanmıştır. Bu ani düşüş araştırılmaya açık bir konudur.

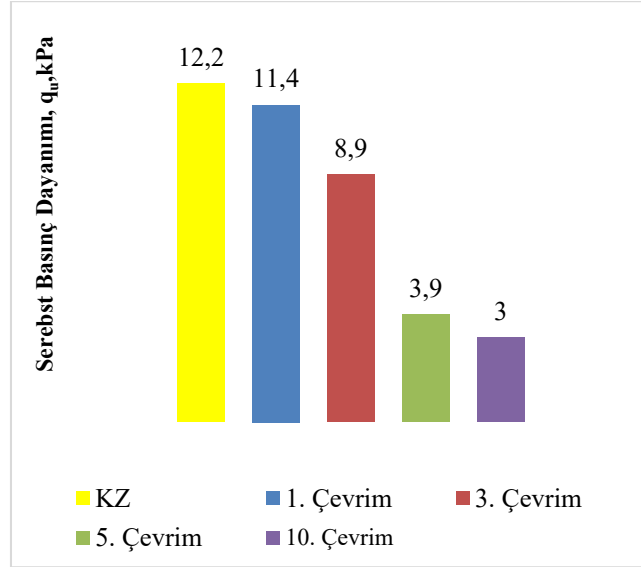
### 3.4. Doğal Kil Zemin ve Karışımın Donma-Çözülme Sonra Dayanım Değerlerinin Değişimi

Kil zeminin iklim koşullarına bağlı olarak donma-çözülme olayı karşısında mukavemetinde nasıl bir değişim meydana geleceğini görmek amacıyla donma-çözülmeyle ilgili serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Donma-çözülme olayı ile birlikte kil zeminin fiziksel ve kimyasal anlamda meydana gelebilecek değişimlerden dolayı dayanım değerlerinde de azalma meydana gelebileceği bilinmektedir. Doğal kil zemine uygulanan donma-çözülme çevrimleri sayesinde seçilen kil zeminde meydana gelen dayanım değişimleri incelenmiştir. 1, 3, 5 ve 10 çevrim sayısı ile her döngü 6 saat sürecek şekilde 3 saat  $-5^{\circ}\text{C}$ 'de, 3 saat  $+25^{\circ}\text{C}$ 'de donma-çözülme kabini içinde bekletilmiştir. Döngüyü tamamlayan numuneye serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Şekil 13 ve Şekil 14'te KZ'ye ait donma-çözülme sonrası dayanım değerleri, Şekil 15 ve Şekil 16'da ise %3 KT + %1 AZ katkılı numuneye ait dayanım değerleri verilmiştir.



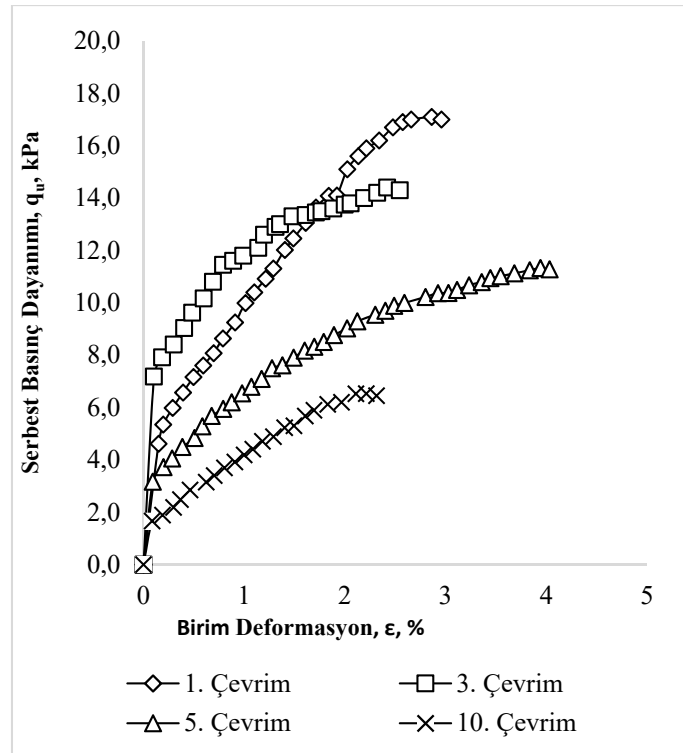
Şekil 13. KZ'ye ait donma-çözülme SBD eğrileri

Doğal kil zemin donma-çözülme sonrasında 1. çevrimden itibaren dayanımda büyük oranda düşüş meydana gelmiştir. Doğal kil zemin ile 10. çevrim arasında ise yaklaşık %75-%80 oranında dayanımda kayıp yaşanmıştır. Dayanımda yaşanan düşüşlerin sebebi donma esnasında numunede boşluk oranının artması ile hacimde olan değişiklerden kaynaklı olabilir.

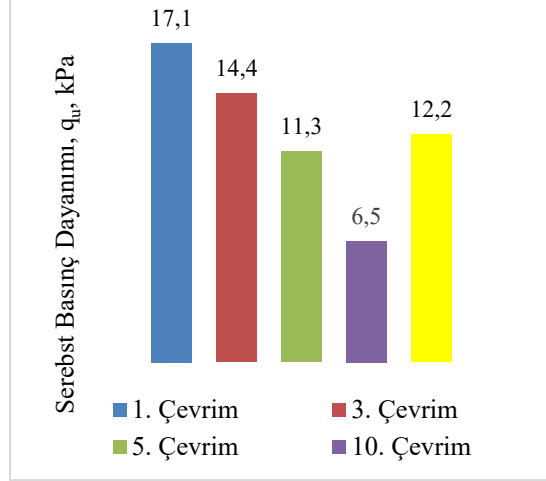


Şekil 14. KZ ve KZ donma-çözülme karşılaştırma grafiği

Şekil 15'de ise %3 KT + %1 AZ katkılı zeminin donma-çözülme sonrası dayanım değerleri verilmiştir.



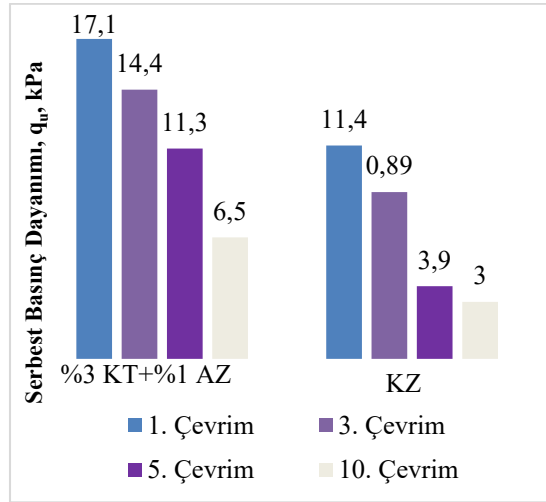
Şekil 15. %3 KT + %1 AZ karışımının donma-çözülme sonrası dayanım değerleri



Şekil 16. %3KT+ %1 AZ numune ve KZ (doğal hal) donma-çözülme değerleri

Şekil 15 ve Şekil 16’da verilen değerlere bakıldığında karışımın doğal kil zemine kıyasla serbest basınç dayanımı %46 oranında azalmıştır.

Şekil 17’de doğal kil zemin ve karışımın dayanım değerleri sütun grafik halinde verilmiştir.



Şekil 17. Doğal kil zemin ve karışımın donma-çözülme sonrası dayanım değerleri

Hem doğal kil zeminde hem de karışım içeren numunenin dayanımında donma-çözülme sonrası düşüş meydana gelmiştir. Bunun iki sebebi olabileceği düşünülmektedir. İlki donma-çözülme esnasında boşluklarda bulunan suyun donmasıyla numune yatay ve düşey kılcal çatlaklar meydana gelerek hacminde artış yaşanmış ve bu sebeple dayanımda düşüş yaşanmış olabilir. Bir diğer neden ise killerin iyon değiştirme özelliği sayesinde numune hazırlama aşamasında kil mineralleri arasında bulunan bağlarla su molekülleri yer değiştirmiş ve donma-çözülme olayı sırasında kil mineralleri arasında bulunan su molekülleri parçalanarak numunenin kimyasal yapısında bozulmaya neden olarak dayanımı düşürmüş olabilir. Kil zeminler donma-çözülme esnasında plastiklik özelliklerini kaybederler. Dayanımlarında buna bağlı olarak düşüş gösterir.

Tüm deneyler ele alındığında doğal kil zeminin Akasya Zamkı ve biyopolimerle birlikte dayanımında yüksek oranda artış meydana geldiği görülmüştür.

Ok ve arkadaşları [11], çalışmalarında Guar Gum kullanarak kohezyonlu bir zemini iyileştirmeye çalışmışlardır. Zemine belli oranlarda (%1, %2 ve %3) guar gum eklenerek karışımlar hazırlamışlardır. Çalışmada Guar Gum’un karışım oranı ile kür süresi ve donma çözülmenin serbest basınç dayanımı ve



şişme basıncı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, biyopolimer malzemesinin kohezyonlu bir zeminin serbest basınç mukavemetinde 5.7, 4.6 ve 3.9 kata varan artışlar meydana geldiği görülmüştür.

Kahiyah [12], biyopolimer katkısının kil zeminin mühendislik özelliklerine etkisini incelemiştir. Çalışma kapsamında dört farklı biyopolimer malzeme kullanılmıştır. Deneysel kilin ağırlıkça % 1, % 2, % 3'ü oranlarında biyopolimer malzemeler kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler 1, 7, 14 ve 28 gün küre bırakılmıştır. Kür sonrası numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu tez çalışması sonucunda kil zeminlerde biyopolimer kullanımının zemin mukavemet özelliklerinde iyileştirme meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada ise %3 KT ve %1 AZ en yüksek dayanım değerini vermiştir. KZ'nin dayanım değeri 12.2 kPa, karışımın ise 33.9 kPa'dır. Sonuçlara göre KZ'ye oranla karışımın dayanımı 2.77 kat artmıştır. Donma çözülme sonrasında ise dayanım karışım açısından KZ'ye oranla azalma olmamıştır. Aksine KZ'ye oranla donma-çözülme sonrası da daha yüksek dayanıma sahiptir. Fakat donma-çözülme sonrası belli çevrim sayısından sonra dayanım 1, 3 çevrimleri için kil zemine oranla 1.4, 1.18 kat artmış, 5, 10 çevrim sayıları için 1.07, 1.87 kat dayanım değeri düşmüştür.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kiremit tozu ve Akasya Zamkının killi zeminlerin mukavemet değerlerine etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen bilgiler aşağıda verilmiştir.

- Doğal kil zeminin zemin sınıfı CH yani yüksek plastisiteli kil olarak belirlenmiştir.
- Kompaksiyon deneyi sonucunda optimum su muhtevası %21, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1.69 g/cm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur.
- Kıvam deneyleri ile likit limit değeri %51, plastik limit değeri ise %27 olarak bulunmuştur.
- Doğal kil zeminin dayanımı 12.2 kPa'dır.
- Kiremit tozu katkılı numunelerin %1, %2, %3, %4 ve %5 katkı değerleri ile sırası ile dayanım değerleri 27.2, 29, 32.5, 30.6 ve 30 kPa'dır. Kiremit tozu içeren numuneler doğal kil zemine oranla %166 oranında dayanımda artış meydana gelmiştir. Kiremit tozu doğal kil zeminin dayanımını artırmada tek başına kullanılabileceği görülmüştür.
- Akasya Zamkı içeren numuneler ise %0.5, %0.75, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında eklenmiştir. Dayanım değerleri ise 25, 25.7, 26.2, 25.8, 23.4, 22.9 ve 12.5 kPa'dır. Doğal kil zemine oranla dayanım yaklaşık %115 civarında artmıştır. Biyopolimer eklenen kil zeminin dayanımında gerçekleşen artış Akasya Zamkı ile kil zeminin dayanımının arttığını göstermektedir.
- Optimum oranları belirlenen numunelerden karışım hazırlanmış dayanım değeri 33.9 kPa olarak bulunmuştur. Karışımın kür süresi ise referans kür süresi seçilen 5 gün ile aynı değer elde edilmiştir.
- Donma-çözülme sonrası dayanım değerleri doğal kil zeminde 1, 3, 5 ve 10 çevrim sayıları için sırası ile 11.4, 8.9, 3.9 ve 3 kPa olarak bulunmuştur.
- Kiremit tozu katkılı zemin için ise 1, 3, 5 ve 10 çevrim sayısı için sırası ile 17.1, 14.4, 11.3 ve 6.5 kPa dayanım değerleri bulunmuştur.

Sonuç olarak kiremit tozunun hem tek başına hem de Akasya Zamkı ile birlikte zeminin mukavemet parametresine donma-çözülme öncesi ve sonrasında olumlu yönde etki ettiği sonucuna varılmıştır.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Poyraz, S., Ural, N., 2022. Atık porselen karonun (apk) kil zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(2), 771–782.
2. Çimen, Ö., Günaydın, H., Keskin, S., 2017. Yüksek plastisiteli kil zeminin mühendislik özelliklerine inşaat atıklarının etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(3), 250-253.
3. Devlet, H., 2020. Killi zeminler üzerinde atık lastik ve gazbetonun etkilerinin değerlendirilmesi. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21(1), 1-9.
4. Abd, T.A., Fattah, M.Y., Aswad, M.F., 2021. Improvement of soft clayey soil by bio-polymer. Engineering and Technology Journal, 39(8), 1301-1306.

5. Yarbaşı, N., 2018. Mermer tozu ve atık lastik ile iyileştirilen düşük plastisiteli killi zeminlerin dayanım özellikleri. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 4(2), 162-170.
6. Tunç, U., Bağrıaçık, B., Aslan, H., Altay, G., Şenol, A., 2022. Arabik gam katkılı doğal kil zeminin konsolidasyon sonuçlarının değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(3), 731-740.
7. Aysu, Ş., 2020. Yüksek plastisiteli kil zeminlerde cam lifi katkısının zeminin mukavemet, permeabilite ve konsolidasyon özelliklerine etkisi. *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Dergisi*, 2507, 1-9.
8. Alaryan, M., 2022. Konya şeker fabrikası atık kireç çamuru (PKF)'nin geoteknik mühendisliğinde kullanımının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya, 186.
9. Geçkil, T., Sarıcı, T., Yıldırım, E., 2019. Kireç katkısı ile kil bir zeminin dayanımının iyileştirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(4), 171-179.
10. Vural, İ., 2019. İnşaat yıkıntı atıklarının zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliği. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(1), 1-6.
11. Ok, B., Bağrıaçık, B., 2022. Guar gum ile iyileştirilen kil zeminlerin donma çözülme etkisinde mukavemet ve şişme basınçlarının araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(3), 589-600.
12. Kahiyah, M.T.M.A., 2020. Investigation of engineering properties of clayey soils improved with biopolymers. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 89.

## Trafik Kaynaklı Emisyonun Azaltılabilmesi Amacıyla Sürdürülebilir ve Çok Modlu Yol Ağlarının Tasarlanması; Erzurum – Tortum Yolu Örneği

Emre KUŞKAPAN<sup>1,a</sup>, Mahmut YILDIRIM<sup>2,b</sup>, Ömer Lütfü AYDIN<sup>1,2,c</sup>

<sup>1</sup>Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum  
<sup>2</sup>İklim Değişikliği ve Sıfır Atık Şube Müdürlüğü, Erzurum Büyükşehir Belediyesi, Erzurum

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0003-0711-5567; <sup>b</sup>ORCID: 0000-0001-8378-248X; <sup>c</sup>ORCID: 0000-0003-3616-0754

### Makale Bilgileri

Geliş : 09.02.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560198

### Sorumlu Yazar

Emre KUŞKAPAN

emre.kuskapan@erzurum.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Sürdürülebilir kentler

Hava kirliliği

Taşıt trafiği

**Atf şekli:** KUŞKAPAN, E., YILDIRIM, M., AYDIN, Ö.L., (2024). Trafik Kaynaklı Emisyonun Azaltılabilmesi Amacıyla Sürdürülebilir ve Çok Modlu Yol Ağlarının Tasarlanması; Erzurum – Tortum Yolu Örneği. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 785-795.

### ÖZ

Dünya genelinde artan taşıt sayısı ile ulaşım kaynaklı hava kirlilikleri çok ciddi seviyelere gelmiştir. Bu durumu önlemek için gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülkede ulaşım sistemlerinin daha verimli kullanıldığı sürdürülebilir ulaşım türlerine yönelimler başlamıştır. Sürdürülebilir ulaşım sistemlerinde, otomobile dayalı ulaşım sistemleri yerine çok modlu ulaşım sistemleri esas alınarak daha çevreci, güvenilir ve verimli ulaşım olanakları sağlanabilmektedir. Yapılan bu çalışmada da Erzurum İlinde yer alan ve Tortum Yolu olarak ifade edilen yol kesiminde çok modlu bir ulaşım altyapısının oluşturulması gerektiği ve bu doğrultuda hava kirliliğinin önemli ölçüde azaltılabileceği belirlenmiştir. Bu doğrultuda da yapılan saha çalışmaları, incelemeler ve SketchUp ve Lumion Pro 12.5 programlarıyla yapılan modellemeler sonucunda mevcut yol ağı için alternatif bir yol ağı tasarımı yapılmıştır. Modellenen yol ağı için de hava kirlilik değerleri hesaplandığında mevcut duruma göre yaklaşık %24 azalma olacağı öngörülmüştür. Bu sonuçlar Ülkemizin temiz hava eylem planı hedeflerine ulaşılması için önemli rol oynayacaktır.

## Designing Sustainable and Multi-Modal Road Networks to Reduce Traffic-Related Emissions

### Article Info

Received : 09.02.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560198

### Corresponding Author

Emre KUŞKAPAN

emre.kuskapan@erzurum.edu.tr

### Keywords

Sustainable cities

Air pollution

Vehicle traffic

**How to cite:** KUŞKAPAN, E., YILDIRIM, M., AYDIN, Ö.L., (2024). Trafik Kaynaklı Emisyonun Azaltılabilmesi Amacıyla Sürdürülebilir ve Çok Modlu Yol Ağlarının Tasarlanması; Erzurum – Tortum Yolu Örneği. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 785-795.

### ABSTRACT

With the increasing number of vehicles worldwide, air pollution from transportation has reached very serious levels. To prevent this situation, many developed and developing countries have started to turn towards sustainable transportation modes where transportation systems are used more efficiently. In sustainable transportation systems, more environmentally friendly, reliable and efficient transportation opportunities can be provided based on multimodal transportation systems instead of automobile-based transportation systems. In this study, it has been determined that a multimodal transportation infrastructure should be established on the road section called Tortum Road in Erzurum Province and that air pollution can be significantly reduced in this direction. In this direction, an alternative road network design was made for the existing road network as a result of field studies, investigations and modeling with SketchUp ve Lumion Pro 12.5 programs. When air pollution values are calculated for the modeled road network, it is predicted that there will be a decrease of approximately 24% compared to the current situation. These results will play an important role in achieving the Clean Air Action Plan targets of our country.

## 1. GİRİŞ

Hava kirliliği, ilk başlarda bölgesel bir sorun olarak başlamış olsa da zamanla uluslararası düzeyde etkili en büyük büyük bir çevre sorunlarından birisi olmuştur. Hava kirliliğinin canlıların sağlığı açısından ciddi seviyede olumsuz etkilere sebep olduğu bilinmektedir. Sağlık problemlerinin yanı sıra toplumsal ve ekonomik problemlere de neden olurken, küresel ölçekte ise ekolojik etkileri de görülmeye başlanmıştır.

Günümüzde iklim değişikliğinin etkileri hayatın her alanında hissedilmektedir. İklim değişikliği, küresel ısınma, kuraklık, doğal afetler, ozon tabakasının delinmesi, su kirliliği, toprak kirliliği, biyolojik çeşitlilik kaybı gibi temel sorunlar hava kirliliğine sebep olan kirleticilerin etkileridir [1].

Canlıların hayatta kalabilmesi açısından en birinci faktör olan hava; atmosferi oluşturan gazların karışımı olarak tanımlanmaktadır [2]. Kentsel hava kalitesi, doğal ve antropojenik çevre koşulları arasındaki karmaşık etkileşimin sonucu olarak ifade edilmektedir [3]. Hava kirliliği ise atmosferdeki kirleticilerin bileşiminde ve varlığında insan sağlığını ve çevre dengesini bozacak değişiklikleri ifade etmektedir [4].

Geçmişten günümüze kadar sürekli olarak nüfus, motorlu taşıt kullanımı, sanayileşme ve enerji kullanım oranının artış göstermektedir. Bu durum şehirlerdeki hava kirliliğini daha fazla artırarak, hava kalitesinin azalmasına ve birçok probleme neden olmaktadır [5,6].

Ulaşım sektörü, kentsel ve sosyo-ekonomik gelişmelerle beraber hızla gelişmekte ve ciddi hava kirliliğine sebep olmaktadır. Örneğin Ülkemizde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının hazırlamış olduğu raporlarda orta büyüklükte bir kent için hava kirliliğinin sektörel dağılımı yapıldığında ulaşım sektörünün payının yaklaşık %70'lerde olduğu görülmektedir [7]. Benzer şekilde geçmişten günümüze kadar antropojenik yönden en etkili faktör ulaşımdaki motorlu taşıtlardan kaynaklanan emisyonlardır. Daha sonrasında endüstriyel tesisler ve konut ısıtma sistemleri şeklinde sıralanabilir. Hızlı nüfus artışıyla birlikte araçların sayıları da hızla artmaktadır. Araçlar, atmosfere yaydıkları egzoz gazları nedeniyle en önemli kirlilik kaynaklarından biri olarak değerlendirilmektedir. Motorlu taşıtların kullandığı yakıtlardan kaynaklı olarak egzozlardan salınan çeşitli gaz ve tozlar hava kalitesini önemli ölçüde düşürmektedir [8].

Taşıtların trafikte harcadıkları zaman ile saldıkları zararlı gazlar doğru orantılıdır. Trafikte harcanan zamanı artıran unsurlardan en temeli ise trafik sıkışıklığıdır. Trafik sıkışıklığı azaltıldığı takdirde bahsedilen problemlerin azaltılabilmesi mümkün hale gelmektedir. Bu sebeple trafik sıkışıklığını azaltabilmek ve trafik akışını iyileştirebilmek için literatürde birçok çalışma yer almaktadır [9-12].

Hava kirliliğini azaltma çabaları aynı zamanda sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ve küresel ısınmanın etkisinin en aza indirilmesine de yardımcı olmaktadır [13]. Bu bağlamda, birçok gelişmiş ülke, motorlu taşıtlardan kaynaklı hava kirliliğini azaltmak ve hava kalitesini iyileştirmek için katı yasalar çıkarmıştır [14]. Ancak az gelişmiş ülkelerde ise bu tür yasaların oluşturulmasının daha arka planda kaldığı önceliklerin genellikle kalkınma içerikli çalışmalar üzerinde olduğu görülmektedir [15].

## 2. KAYNAK TARAMASI

Literatürde motorlu taşıtlardan kaynaklı hava kirliliği üzerine yapılmış çok sayıda çalışma vardır. Bu çalışmalardan bazıları mevcut durumu ele alarak günümüzdeki koşullar altında hava kirliliğini ele almış olup bazı çalışmalar ise geleceğe dönük birtakım tahminler neticesinde oluşabilecek hava koşullarını ele almıştır.

Öztürk [16] taşıtlardan kaynaklanan CO, HC ve NO<sub>x</sub> gazlarının hava kirliliğine etkilerini otoyol ve D-100 Devlet Karayolu için karşılaştırmasının yaptığı çalışmada; otoyolda tüm kirletici gazların daha az salınım yaptığı ve kirletici gazların sırasıyla CO, NO<sub>x</sub> ve HC'nin daha fazla etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Özen [17], motorlu taşıtlardan kaynaklanan hava kirliliğini incelemek amacıyla motorlu taşıt sayısı ve nüfustaki artışların ulaşımdan kaynaklanan hava kirliliği ile ilişkisini araştırmıştır. Çalışmada transit geçiş yapacak araçların şehir içerisinden geçişlerinin engellenmesini, bireysel araç yerine servis araçlarıyla iş yerine gidilmesini, özel ulaşımdan toplu taşımaya geçiş yapılmasını, toplu taşıma araçlarının dumansız

enerji kaynaklarıyla çalışmasını ve merkez bölgede toplu taşıma ile raylı sistemlere öncelik verilmesini önermiştir.

Coşkun [18], araç istatistikleri çıkararak trafik yoğunluğunu belirlemiş ve kentsel atmosferde gözlemlenen kirlilik düzeylerini hesaplamıştır. CO emisyonunun düşük hızlarda ve rölantideki sürüşlerde yüksek değerlere ulaştığını, hava kirliliğinin araç hızı ile negatif bir korelasyon gösterdiğini belirtmiştir.

Polat [19], kent merkezlerinde meydana gelen trafik kaynaklı emisyonları tespit etmiş ve bu emisyonları (NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>) içeren kirlilik haritalarını oluşturmuş, trafikten kaynaklanan toplam kirletici miktarının sırasıyla en fazla NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub>'den kaynaklandığını ve kavşaklardaki araç sayısı arttıkça kirliliğin de doğru orantılı şekilde arttığını gözlemlemiştir.

Çetin ve Ergüder [20], yaptıkları anket çalışmasında motosiklet, benzinli, dizel ve LPG'li araçların yıl bazında kat ettiği mesafeyi elde etmiş, taşıt türüne göre yıllık ortalama hız ve yakıt tüketimini tespit ederek her taşıt tipi için CO, HC, NO<sub>x</sub> ve PM emisyonlarını hesaplamışlardır. CO ile HC emisyonlarının daha çok binek otomobillerde ve LPG'li taşıtlarda görüldüğünü tespit etmişlerdir.

Filiz [21], CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, CO, NMVOC kirleticilerini anlık yakıt miktarı, araç hızı, araç tipi, araç sayısı ve yapılan kilometre verilerine göre hesaplamış, araç yakıtının yanma verimi düşük olduğu için hız değerinin 60 km/saate ulaşana kadar emisyon değerlerinin düştüğünü, araç hızı 60-70 km/saat aralığında iken emisyonların en az oranda seyrettiğini ve 70 km/saatten sonra emisyonların da doğru orantılı olarak arttığını tespit etmiş, NO<sub>x</sub> emisyonunun en fazla dizel araçlardan, karbon monoksit (CO) salınımının ise en fazla benzinli araçlardan kaynaklandığını belirtmiştir.

Kuşkapan [22], otomobil odaklı sokak tasarımlarında oluşan kısır döngüden bahsederek tasarımların çok modlu olarak sağlanmasının avantajlarından bahsetmiş, bu avantajlar arasında özellikle yayalar için elverişli ulaşım olanaklarının oluşması sayesinde kentlerdeki hareketliliğin artacağını, çok modlu ulaşım sisteminde motorlu taşıtlara yönelimin azalacağı ve dolayısıyla emisyon kaynaklı hava kirliliğinin de önemli seviyede düşeceğini belirtmiştir.

Bir başka çalışmada ise McCaffery ve arkadaşları [23] taşınabilir emisyon ölçüm sistemleri kullanılarak, farklı görevlerdeki ve motor teknolojilerine sahip 50 ağır vasıttan azot oksit (NO<sub>x</sub>) emisyonları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda ileri teknoloji ve alternatif yakıtlı araçların NO<sub>x</sub> emisyonlarını önemli ölçüde azaltabileceğini ve hava kalitesi hedeflerine ulaşmak için etkili bir yol sunduğunu göstermektedir.

Shafie ve arkadaşlarının [24] Kuala Lumpur'da gerçekleştirdiği çalışma, farklı araç türlerinden kaynaklanan egzoz ve egzoz dışı partikül madde (PM<sub>10</sub>) ile karbon monoksit (CO) ve azot oksit (NO<sub>x</sub>) gibi gaz kirleticilerin emisyonlarını incelemiştir. Malezya'da PM10 ve NO<sub>x</sub> emisyonları diğer OECD ülkelerine kıyasla daha düşük, ancak CO emisyonları Japonya, Kore ve bazı Avrupa ülkelerinden daha yüksektir. Bu nedenle, kentsel çevreyi, insan sağlığını ve toplum refahını iyileştirmek amacıyla ulaşım kaynaklı emisyonları azaltmak için stratejiler geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Trafik kaynaklı hava kirliliğine neden olan kirleticiler ve bu kirleticilerin ortaya çıkmasında etkili olan durumlara ilişkin bazı bilgiler yukarıda verilmiştir. Bu hususta motorlu taşıt kullanımının birçok kentteki hava kirliliği içerisindeki payının ısınma ve endüstri sektörlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Motorlu taşıt kullanımından kaynaklı hava kirliliğini azaltmak için ise başta yerel yönetimler olmak üzere çeşitli kamu kurum ve kuruluşları birtakım politikalar yürütmektedir.

Literatürde var olan çalışmalar incelendiğinde çok büyük bir kısmı mevcut ulaşım sektörünün hava kirliliğine etkisini ortaya koymuştur. Yapılan bu çalışmada ise çalışma alanı olarak belirlenen yol kesiminde trafik kaynaklı hava kirliliği ortaya koyulduktan sonra çalışma alanı için alternatif bir ulaşım sistemi önerilerek bu önerilen sistem ile mevcut sistem arasında hem trafik kaynaklı emisyon hem de trafik kaynaklı oluşabilecek diğer farklılıklar ortaya konmuştur.



### 3. ÇALIŞMA ALANI

Çalışma alanı olan ve Erzurum ilinde yer alan Tortum Yolu, Erzurum Kentinin iller arası bağlantı yolu olan D950 karayolu üzerinde yer almaktadır. Kentin kuzey kesiminde yer alan bu yol kesiminin etrafında sanayi ve ticaret işletmeleri yer almakta olup taşıt hareketliliği fazladır. İnceleme alanı ve çevresi detaylı olarak analiz edildiğinde 1/1000 ölçekli uygulama imar planı doğrultusunda bu yol kesiminin konut bölgelerine göre araç hareketliliğinin de giderek arttığı ortaya konulmaktadır. Çalışma alanının imar planı üzerinde gösterimi Şekil 1’de yer almaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanının 1/1000 ölçekli Uygulama İmar Planı üzerindeki gösterimi

Şekilde de görüldüğü üzere imar planında çalışma alanının yol genişliği 35 metre ve bu yol kesimindeki ayrılma, katılma yolları ve kavşak bağlantılarının sayıları ise 6’dır. Fakat uygulamada bu durumlar farklılık göstermektedir. Çalışma alanında karşılıklı olarak kadastral parsel analizi gerçekleştirilmiş ve gidiş geliş toplamda 387 adet kadastral parsel olduğu tespit edilmiştir. Bu durum vatandaşların ticari faaliyet gösteren alanlarına yol geçiş izni, kavşak talebi gibi talepleri ile ulaşım ana planında ve uygulama imar planlarının yapım aşamasında projelendirilmemiş geçiş güzergahlarının ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Bu iki durum arasındaki farklılık aşağıda Şekil 2 ve 3’te belirtilmiştir.



Şekil 2. İnceleme alanında bulunan yol bağlantıları (6 Adet) (1/1000 Ölçekli Uygulama İmar Planı)

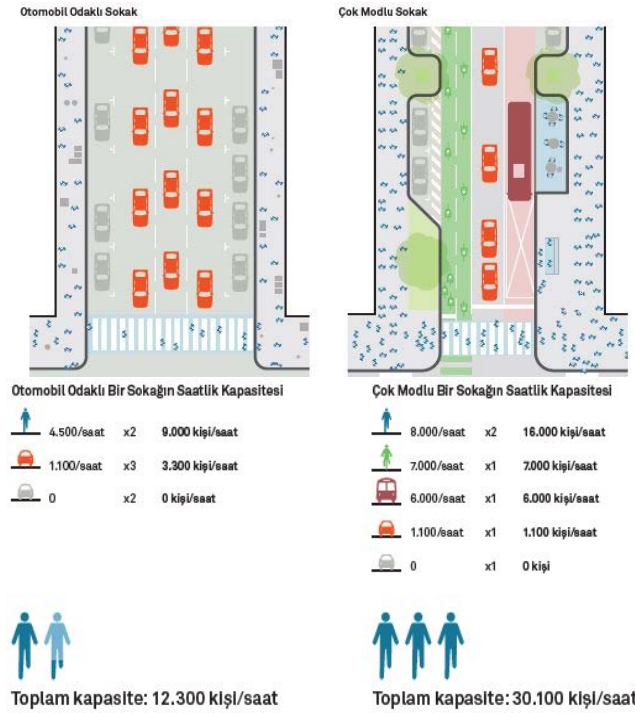


Şekil 3. Mevcut durumda inceleme alanındaki yol bağlantıları (24 adet)

#### 4. YÖNTEM

Çalışma alanında yapılan incelemelerde bazı ayrılma ve katılma yollarının neredeyse hiç kullanılmadığı tespit edilmiştir. Buna rağmen bu kesimlerin bazılarında trafik sinyalizasyon sistemlerinin bulunması trafik akışını ciddi oranda aksatmaktadır. Öte yandan yine saha çalışmalarında yaya yollarında deformasyonlar olduğu bu durumun sürücüler tarafından tespit edilemediği için trafik kazalarına sebebiyet verebileceği tespit edilmiştir. Bu durumla birlikte çalışma alanında yer alan işyerlerinde bisiklet gibi mikro mobilite taşıtlarının sıklıkla kullanıldığı gözlemlenmiştir. Fakat bu taşıtlar için de herhangi bir ulaşım altyapısı yer almamaktadır. Tüm bunlara ilaveten yol kenarı parklanma ve otobüs durakları için ceplerin olmaması da trafik akışını etkileyen dolaylı olarak da hava kirliliğini artıran etmenler olarak gözlemlenmiştir.

Bahsedilen tüm bu sorunların üstesinden gelebilmek için mevcut yol kesiminin yeniden tasarlanması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Mevcut yol kesimi tamamen otomobil odaklı olup alternatif ulaşım kaynakları için elverişli değildir. Çalışmada yöntem olarak mevcut yol kesiminin çok modlu şekilde tasarlanması ile de yukarıda bahsedilen birçok problemin üstesinden gelinmiş olacaktır. Aşağıda Şekil 4'te aynı özellikte iki farklı yol kesiminin otomobil odaklı veya çok modlu olarak kullanılması durumunda kapasitesinde oluşabilecek değişiklikler gösterilmektedir.



Şekil 4. Aynı özellikteki iki sokağın otomobil odaklı veya çok modlu olarak tasarlanması durumunda oluşan kapasite farkları [25]

Çalışma alanında yer alan yol güzergahı toplam 4.15 kilometre uzunluğunda olup bu yol kesiminde hız sınırı 50 km/sa'tir. Söz konusu kesimde yeşil dalga uygulaması yapılmaktadır. Ancak taşıt yoğunluğu her iki yönde trafik ışıkları arasında olduğundan güzergâh boyunca bir aracın tek seferde yeşil dalgayı yakalayabilmesi mümkündür. Öte yandan saha çalışmalarında güzergahın başlangıç ve bitiş noktaları arasında ortalama harcanan süre 7 dakika 16 saniye olarak belirlenmiştir. Çalışma alanında farklı gün ve saat dilimlerinde taşıt sayımları geleneksel bir yöntem olan manuel araç sayım yöntemiyle yapılmıştır. Bununla birlikte Erzurum Büyükşehir Belediyesinin de bölgede yapmış olduğu trafik sayımları da mevcuttur. Çalışma içeriğinde her iki sayım bilgilerinden de yararlanılmıştır. Aşağıda Şekil 5'te mevcut yol kesimi Şekil 6'da ise bu yol kesimindeki taşıt sayımları gösterilmiştir.

Sabah Zirve Saat (08:00 - 09:00)

Öğle Zirve Saat (13:00 - 14:00)

Akşam Zirve Saat (17:30 - 18:30)



Şekil 5. Çalışmada ölçüm yapılan noktalardan bir tanesinin uydu görüntüsü ve kavşak kolları

	1	2	3	4	Genel Toplam
SABAH	1080	934	240	255	2509
1	11	803	112	78	1004
2	801	18	79	49	947
3	142	37	0	128	307
4	126	76	49	0	251
ÖĞLE	1002	889	268	297	2456
1	8	699	104	134	945
2	724	58	70	74	926
3	89	57	0	89	235
4	181	75	94	0	350
AKŞAM	980	1065	356	288	2689
1	10	837	155	112	1114
2	687	48	70	65	870
3	156	70	0	106	332
4	127	110	131	5	373

Şekil 6. Çalışma alanındaki trafik sayım matrisi

Yapılan trafik ölçümlerinde sayının birim otomobil cinsinden ifade edilebilmesi için araç türüne göre birim otomobil dönüşümü yapılmıştır. Bu dönüşüm işlemi aşağıda verilen Çizelgeden yararlanılmıştır.

Çizelge 1. Taşıtların birim otomobil cinsinden dönüştürülmesi [26]

Taşıtların Türü	Şehir İçi Yolda	Dönel Kavşakta	İşikli Kavşakta
Özel Otomobil, Taksi, Sepetli Motosiklet, Triportör	1,00	1,00	1,00
Yüksüz 1500kg'a Kadar Olan Pikap	1,15	1,30	1,27
Minibüs, Dolmuş, Taksi	2,00	2,80	1,75
Yüksüz 1500 kg'dan Ağır Ticari Kamyon, At arabası	3,00	2,80	2,25
Kent İçi ve dışı yolcu otobüsü (körüklü dahil) Servis	0,75	0,75	0,33
Otobüsü, Trolleybüs, Tramvay	0,33	0,50	0,20
Motosiklet, Mopet			
Bisiklet			

Taşıtların türleri birim otomobil cinsinden ifade edildikten sonra yakıt türlerine göre NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> ve SO<sub>2</sub> kirleticilerine ait emisyon faktörleri belirtilmiştir. Bu emisyon faktörleri her bir taşıtların yakıt türüne göre Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından belirlenmiştir. Ayrıca kentte trafiğe kayıtlı otomobil sayılarının yakıt türlerine göre dağılımları da istatistiksel olarak belirlenmiştir [7]. Bahsedilen bu detaylar aşağıda Çizelge 2'de yer almaktadır.

**Çizelge 2.** Otomobillerin yakıt türlerine göre emisyon faktörü dağılımları

Araç sınıfı	Yakıt tipi	Bulunma oranı (%)	Emisyon Faktörü		
			NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>
Otomobil	Benzin	26	14,5	0,03	0,02
	Dizel	36	11	1,1	0,02
	LPG	38	15,5	0	0,1

## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Mevcut güzergâh üzerinde oluşan yıllık emisyon miktarlarının hesaplanabilmesi için taşıtların emisyon faktörleri ve yakıt türlerinin dağılımlarının yanı sıra yıllık ortalama günlük trafik değerleri ve taşıtların kilometre başına ortalama tükettikleri yakıt miktarları değerlerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu değerler içerisinde yıllık ortalama günlük trafik (YOGT) değerleri hesaplanırken güzergahtaki günlük trafik değerleri ve zirve saatlerindeki taşıt trafiği arasındaki ilişki ortaya konmuştur.

Yapılan saha çalışmalarında bu yol kesiminde akşam zirve saatteki taşıt sayısının, günlük toplam taşıt değerinin yaklaşık %6'sına tekabül ettiği tespit edilmiştir. Bu değerlerden yararlanılarak yaklaşık olarak yıllık ortalama günlük trafik değeri 1 numaralı denklem yardımıyla belirlenmiştir.

$$YOGT = \text{Zirve saatteki taşıt değeri} \times \frac{100}{6} \quad (1)$$

Ayrıca yine Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının hazırlamış olduğu raporda kentte ortalama yakıt tüketiminin 100 kilometrede 7 litre olarak belirlendiği şekilde dikkate alınmıştır. Bu bilgiler doğrultusunda ilgili Bakanlık tarafından yapılan yıllık emisyon miktarı 2 numaralı denklem yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$TYEM = EF \times YOT \times YTBO \quad (2)$$

\* TYEM: Türüne göre yıllık emisyon miktarı, EF: Emisyon faktörü, YOT: Yıllık ortalama trafik, YTBO: Yakıt türüne göre bulunma oranı

Saha çalışmasında; güzergâh üzerindeki kavşak noktaları çok sık aralıklarla yerleştirilmiştir. Bu durum kavşakların ve sinyalizasyon sistemlerinin verimli şekilde kullanılmamasının bir sonucudur. Tortum yolu diye adlandırılan ana yola, katılım ve bu yoldan ayrılmaların bağlantı yolları ile sağlanmasının trafik akışını daha verimli şekilde sağlayacağı tespit edilmiştir. Öte yandan sık yerleştirilmiş kavşak noktalarının bazılarının kaldırılması ve art arda gelen kavşak noktaları arasında en az 1500 metre mesafe bulunması gerektiği de tespit edilmiştir. Yine yol kesiminde yaya yollarına ait işaretlemelerin yetersiz olduğu, ticari faaliyette bulunan işletmelerin bir kısmının mikro mobilite taşıtlarını kullandığı tespit edilmiştir. Fakat bu taşıt türleri için de ayrılmış bir yol kesimi bulunmamaktadır. Çalışma alanındaki bir diğer problem ise güzergahın sağ ve sol kesimlerinin sanayi işletmesi olması sebebiyle yüksek gürültü seviyelerine sahip olmasıdır. Mevcut yol kesiminin 30 metre genişliğine kadar büyütülebileceği bölgenin imar durumundan tespit edilmiştir.

Tüm bu durumlar birlikte değerlendirildiğinde önce mevcut sisteme ait daha sonra ise bu çalışma kapsamında önerilen güzergâh çalışmasına ait tahmini olarak oluşabilecek hava kirliliği hesaplanmıştır. Aşağıda Şekil 7'de bu çalışma kapsamında SketchUp ve Lumion Pro 12.5 kullanarak tasarlanan güzergâh için oluşturulan modellere ait görseller sunulmaktadır [27-28]. Bu görsellerde ana yol kesiminin sağına ve soluna bağlantı yolları yerleştirilmiş, kavşak sayısı ana arterlere bağlanacak şekilde üçe düşürülmüş, yaya yolları işaretlenmiş, mikro mobilite taşıtları için yol düzenlemesi yapılmış, gürültü ve hava kirliliğini önlemek için ise orta refüjlerde ağaçlandırma çalışması yapılmıştır.



Şekil 7. Çalışma alanı için oluşturulan tasarıma ait bazı görseller

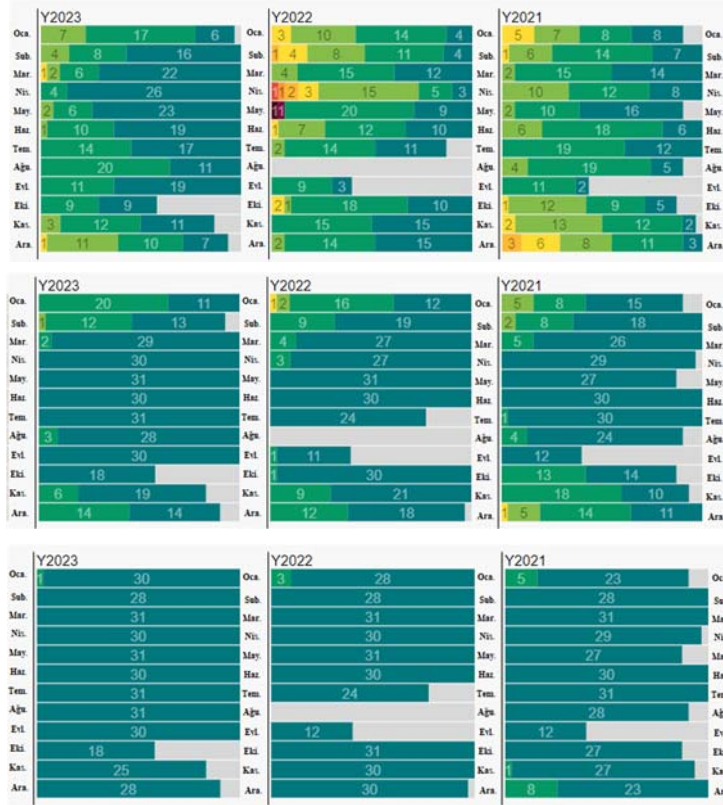
Çalışma alanı için oluşturulan tasarımda ana yola katılma ve ana yoldan ayrılmaların büyük bir kısmı bağlantı yolları ile sağlanmıştır. Bununla birlikte kavşak sayısı üçe düşürüldüğü için mevcut yol kesiminde trafik akışı hızlandırılmıştır. Sinyalize kavşaklar arası mesafe de artırıldığı için yeşil ışık dalga hızı 70 km/sa olarak belirlenmiştir. Tüm bunların yanında yaya ulaşımı ve mikro mobilite taşıtları için elverişli koşullar oluşturulması sebebiyle bu ulaşım kaynaklarına yönlendirme sağlanmış olacaktır. Saha çalışmalarında yapılan gözlem ve incelemelerde çok modlu ulaşım tasarımı durumunda mevcut taşıt trafiğinin yaklaşık %13'ünün alternatif ulaşım kaynakları ile sağlanması öngörülmektedir.

Çalışma alanında yapılan saha çalışmalarında son yıllarda alternatif ulaşım kaynaklarına yönelimin her geçen gün arttığı da tespit edilmiştir. Bu durumu destekler nitelikte olarak aşağıda yer alan Şekil 8'de çalışma alanına en yakın hava ölçüm istasyonundan elde edilen son üç yıla ait hava kalite değerleri gösterilmektedir. Çizelge 3'te ise hava kalite indekslerine göre yapılan sınıflandırmalar yer almaktadır. PM<sub>10</sub>, NO<sub>x</sub> ve SO<sub>2</sub> hava kirleticileri açısından her üç türde de 2023 yılında hava kalitesinde önceki iki yıla göre artış olduğu görülmektedir.

Çizelge 3. Hava kalitesi indekslerine göre sınıfların dağılımı

Hava kalite indeksi	Sınıfı
0-50	İyi
51-100	Orta
101-150	Hassas gruplar için sağlıksız
151-200	Sağlıksız
201-300	Çok sağlıksız
300+	Tehlikeli





Şekil 8. Çalışma alanı için sırasıyla  $PM_{10}$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$  emisyonlarına ait son 3 yıllık hava kalite değerleri [29]

Bazı bireylerin mevcut ulaşım olanaklarının yetersizliğinden kaynaklı olarak bu ulaşım türünü tercih etmekte bazı endişeler duyduğu da belirlenmiştir. Bu endişelerin önemli bir kısmının ise güvenli ulaşım olanaklarının olmamasından kaynaklı olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada planlanan elverişli ulaşım olanakları sağlandığı takdirde ise bahsedilen %13 lük artışla hava kirliliği daha da azalmış olacaktır.

Kısa mesafelerde alternatif ulaşım kaynaklarına yönelim sağlanması durumunda incelenen yol kesiminde işletme hızının artacağı öngörülmektedir. Dolayısıyla bu kesimde harcanan sürenin azaltılması ve sinyalizasyon sistemlerinin optimize edilmesi sonucu oluşabilecek tahmini yıllık emisyon değerleri ile mevcut emisyon değerlerinin yer aldığı veriler aşağıda Çizelge 4'te yer almaktadır.

Çizelge 4. Mevcut durum ve tasarım sonrası için oluşacak tahmini emisyon değerleri

	Yıllık emisyon miktarları (kg)			
	$NO_x$	$PM_{10}$	$SO_2$	Toplam
<b>Mevcut durum</b>	31118	866	108	32092
<b>Tasarım sonrası durum</b>	23546	642	57	24245

Çizelgede yer alan sonuçlar incelendiğinde mevcut yol kesimi için yapılan tasarımın yıllık emisyon miktarını yaklaşık %24 düşüreceği tespit edilmiştir. Bu değer günümüz koşullarında oldukça iyi bir oran olduğu söylenebilmektedir. Özellikle ülkemizin 2030 yılına kadar zararlı gaz emisyonunu %35 oranında azaltma politikaları adına bu ve benzeri değişimlere gitmesinin gerekliliği de düşünüldüğünde yapılan çalışmanın önemli bir politika ortaya koyacağı düşünülmektedir [30]. Bununla birlikte ülkemizde elektrikli taşıtlara yönelimin hız kazanmasının yanı sıra alternatif ulaşım kaynaklarına da yönelime öncelik verilmesi hedeflere daha kısa sürede ulaşılmasına olanak sağlamış olacaktır. Kentlerde düzenlenen imar planlarının gözden geçirilerek sadece otomobil odaklı tasarımlar yerine sürdürülebilir ulaşımın temelini oluşturan çok modlu tasarımlar yapılması da atılabilecek en önemli adımlar arasında yer almaktadır.

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan bu çalışmada Erzurum İlinde yer alan Tortum yolu olarak adlandırılan yol kesimi hava kirliliği açısından ele alınmıştır. Bu yol kesimi kentte trafik yoğunluğunun en sık yaşandığı ve hava kirliliğinin en yüksek olduğu yol kesimlerinden birisidir. Yapılan saha çalışmalarında bu yol kesimine katılma ve bu yol kesiminden ayrılma kollarının gerektiğinden çok daha fazla olduğu, trafik sinyalizasyon sistemlerinin çok sık yerleştirildiği, yol genişlikleri uygun olmasına rağmen alternatif ulaşım kaynakları için olanakların yetersiz olduğu ve yaya yolları işaretlemelerinin deforme olduğu gözlemlenmiştir. Tüm bu gözlemlerin yanı sıra yol kesiminde yapılan taşıt sayımları ile mevcut yıllık emisyon miktarları hesaplanmıştır. Mevcut yol kesimi için yapılan çok modlu tasarım ile daha önce tespit edilen tüm problemlere çözümler sunulmuştur. Öte yandan tasarım sonucu oluşabilecek yıllık emisyon miktarı yaklaşık olarak hesaplandığında %24 civarında bir azalma olacağı öngörülmüştür. Yapılan bu çalışmanın Ülkemizin temiz hava eylem planları açısından önemli olduğu düşünülmektedir. Öte yandan Ülke politikalarının sadece otomobil odaklı tasarımlar yerine sürdürülebilir çok modlu ulaşım yöntemlerine yönelimler sayesinde daha yaşanabilir kentler oluşabilmesinin mümkün olabileceği belirtilmiştir. Yapılan bu çalışmanın gelecekte benzer amaçlarla yapılacak olan çalışmalar ve sahadaki uygulamalar için önemli bir kaynak olabileceği düşünülmektedir.

## 7. KAYNAKLAR

1. Kırımhan, S., 2006. Hava kirliliği ve kontrolü. Turhan Kitapevi. Ankara.
2. Aydınlar, B., Güven, H., Kirksekiz, S., 2009. Hava kirliliği nedir, ölçüm ve hava kalite modelleme yöntemleri nelerdir. Hava Kirliliği ve Modellemesi Dergisi, 16(2), 83-91.
3. Mayer, H., 1999. Air pollution in cities. Atmospheric environment, 33(24-25), 4029-4037.
4. Zencirci, S.A., Işık, B., 2017. Hava kirliliği. Estüdam Halk Sağlığı Dergisi, 2(2), 24-36.
5. Milku Augustine, K., Attiogbe, F., Derkyi, N.S.A., Atepor, L., 2023. A review of policies and legislations of vehicular exhaust emissions in Ghana and their enforcement. Aerosol Science and Engineering, 7(2), 169-181.
6. Toros, H., Bağış, S., 2017. Hava kirlilik modellerinde kullanılacak emisyon envanteri oluşturulması için yaklaşımlar ve İstanbul hava kirliliği dağılımı örneği. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32(2), 1-12.
7. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Erzurum İl Müdürlüğü, 2020. Erzurum İli Temiz Hava Eylem Planı. [https://webdosya.cb.gov.tr/db/erzurum/menu/thep-2020-2024\\_20201019103133.pdf](https://webdosya.cb.gov.tr/db/erzurum/menu/thep-2020-2024_20201019103133.pdf)
8. Uzun, Ö., Gümüş, M., Demir, A., 2021. Ücretli yol kenarı parkların trafik akışına etkisinin incelenmesi. İdealkent, 12(34), 1878-1899.
9. Armah, F.A., Yawson, D.O., Pappoe, A.A., 2010. A systems dynamics approach to explore traffic congestion and air pollution link in the city of Accra, Ghana. Sustainability, 2(1), 252-265.
10. Baghirova, M., 2023. Establishment of confidence intervals for average vehicle speeds. Trafik ve Ulaşım Araştırmaları Dergisi, 6(2), 131-142.
11. Lu, J., Li, B., Li, H., Al-Barakani, A., 2021. Expansion of city scale, traffic modes, traffic congestion, and air pollution. Cities, 108, 102974.
12. Öden, M.K., Bilgin, İ., 2019. Sarayönü ilçe merkezinde trafik kaynaklı gürültü kirliliğinin araştırılması. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34(1), 103-114.
13. Dünya Sağlık Örgütü, 2023. Hava Kirliliği Raporları, <https://www.who.int/news/item/10-10-2023-monitoring-air-pollution-levels-is-key-to-adopting-and-implementing-who-s-global-air-quality-guidelines>
14. Zhang, Y., Andersson, S., Muhammed, M., 1995. Nanophase catalytic oxides: I. Synthesis of doped cerium oxides as oxygen promoters. Applied Catalysis B: Environmental, 6(4), 325-337.
15. Ji, W., Huang, Z., Gao, G., Zheng, P., 2024. Evaluation of integrated transport efficiency and equity at the county level-taking the counties in ningbo city as an example. Transport Policy.
16. Öztürk, G., 2006. Düzce ilinde trafikten kaynaklanan hava kirliliğinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak.
17. Özen, M., 2006. Karayolu ulaşımının hava kirliliğine etkileri ve çözüm önerileri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
18. Coşkun, A., 2008. Şehir atmosferinde taşıt emisyonlarından kaynaklanan hava kirliliğinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
19. Polat, E.E., 2016. Gaziantep'in trafik kaynaklı hava kirliliğinin belirlenmesi üzerine bir çalışma. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş.

20. Çetin, M., Ergüder, T.O., 2020. Erzincan'da motorlu taşıtlar tarafından atmosfere bırakılan egzoz emisyonları ve tahmini miktarlarının belirlenmesi. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 13(3), 1403-1412.
21. Filiz, A., 2019. Karayolu kaynaklı hava kirliliği dağılım modellemesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük.
22. Kuşkapan, E. 2023. Yaya ulaşımının artırılması ve güvenliklerinin sağlanması amacıyla yapay zekâ ve görüntü işleme yöntemlerinin kullanılması. Doktora Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum.
23. McCaffery, C., Zhu, H., Tang, T., Li, C., Karavalakis, G., Cao, S., Durbin, T.D., 2021. Real-world NOx emissions from heavy-duty diesel, natural gas, and diesel hybrid electric vehicles of different vocations on California roadways. *Science of the Total Environment*, 784, 147224.
24. Shafie, S.H.M., Mahmud, M., 2020. Urban air pollutant from motor vehicle emissions in Kuala Lumpur, Malaysia. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(12), 2793-2804.
25. Küresel Sokak Tasarım Rehberi. 2019. <https://globaldesigningcities.org/publication/global-street-design-guide-tr/>
26. Türk Standart Enstitüsü, 2019. Şehir içi ulaşım hesaplamalarında kullanılan araç tiplerine göre otomobil eşdeğeri katsayıları, <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?>
27. Sketchup Deneme Versiyonu, 2023. <https://www.sketchup.com/en>
28. Lumion, 2023. <https://lumion.com/>
29. World's Air Pollution, 2023. <https://waqi.info/#/c/39.689/40.304/9.2z>
30. Birleşmiş Milletler İklim Zirvesi, 2022. <https://www.wwf.org.tr/?12740/2030-Iklim-Hedefi>.



## Rüzgâr Enerji Santralleri Rampa Oranı: Türkiye Örneği

İsrafil KARADÖL<sup>1,a</sup>, Uğur Serkan BALTACI<sup>2,b</sup>, Ökkeş Fatih KECEÇİOĞLU<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup>Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kilis

<sup>2</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0002-9239-0565; <sup>b</sup>ORCID: 0000-0002-4835-2879; <sup>c</sup>ORCID: 0000-0001-7004-4947

### Makale Bilgileri

Geliş : 18.03.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560205

### Sorumlu Yazar

İsrafil KARADÖL

israfilkaradol@kilis.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Yenilebilir enerji

Rüzgâr enerji santrali

Rampa oranı

Histogram alanı

**Atf şekli:** KARADÖL, İ., BALTACI, U.S., KECEÇİOĞLU, Ö.F., (2024). Rüzgâr Enerji Santralleri Rampa Oranı: Türkiye Örneği. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 797-811.

### ÖZ

Rüzgâr Enerji Santrali (RES) üretimindeki değişkenlik, şebeke esnekliği ve güvenliği açısından teknik ve finansal sorunlara neden olmaktadır. Bu açıdan rüzgâr enerji santrali üretim değişkenliğinin bölgesel ve zamansal olarak önceden bilinmesi veya tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, Türkiye'deki RES üretimlerinin farklı zamansal periyotlardaki rampa olaylarını bölgesel olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla ihtiyaç duyulan 2019, 2020 ve 2021 yıllarında Türkiye'deki RES gerçek üretim verileri Türkiye Elektrik İletim AŞ'den temin edilmiştir. Bu üç yılın RES saatlik gerçek üretim verileri kullanılarak farklı zamansal periyotlardaki histogram grafikleri oluşturularak rampa büyüklükleri hesaplanmıştır. Bölgesel olarak belirlenen rampalar; büyüklüğü (%5, %7,5 ve %10 kurulu güce göre), yönü (negatif, pozitif), oluşum yeri (Marmara, Ege, İç Anadolu, Akdeniz, Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu) ve oluşum dönemi (bir, iki, üç, dört, beş ve altı saat) parametreleri göz önüne alınarak detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, kurulu güce göre %5 ve üzeri rampa olaylarında Marmara, Ege, İç Anadolu, Akdeniz, Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin 1 saatlik zamansal periyotta toplam kümülatif rampa alanları sırasıyla 1.91, 2.77, 14.39, 16.02, 35.95, 122.66, 250.85'tir ve 6 saatlik zamansal periyotta toplam kümülatif rampa alanları ise sırasıyla 195.93, 190.60, 280.42, 305.29, 361.14, 528.77, 623'tür. Bu rampa hesaplamaları ışığında kurulu güce göre %5 ve üzeri rampa olaylarında 1 saatlik zamansal periyotta en az rampa olayı Marmara Bölgesinde, 6 saatlik zamansal periyotta ise en az rampa olayı Ege Bölgesinde görülmüştür. 1 ve 6 saatlik zamansal periyotta en fazla rampa olayı Güneydoğu Anadolu Bölgesinde görülmüştür.

## Wind Power Plant Ramp Rate: The Case of Turkey

### Article Info

Received : 18.03.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560205

### Corresponding Author

İsrafil KARADÖL

israfilkaradol@kilis.edu.tr

### Keywords

Renewable energy

Wind power plant

Ramp rate

Histogram field

**How to cite:** KARADÖL, İ., BALTACI, U.S., KECEÇİOĞLU, Ö.F., (2024). Rüzgâr Enerji Santralleri Rampa Oranı: Türkiye Örneği. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 797-811.

### ABSTRACT

Variability in Wind Power Plant (WPP) generation causes technical and financial problems in terms of grid flexibility and security. In this respect, it is of great importance to know or predict wind power plant generation variability regionally and temporally in advance. This study aims to regionally examine ramp events in different temporal periods of generated WPP in Turkey. For this purpose, the actual generation data WPP in Turkey in 2019, 2020 and 2021 were obtained from Turkey Electricity Transmission Inc. Using the actual WPP hourly generation data of these three years, ramp magnitudes were calculated by creating histogram plots at different temporal periods. Regionally determined ramps; size (5%, 7.5% and 10% based on installed capacity), direction (negative, positive), place of formation (Marmara, Aegean, Central Anatolia, Mediterranean, Black Sea, Eastern Anatolia and Southeastern Anatolia) and formation period (one, two, three, four, five and six hours). It was examined in detail considering the parameters (two, three, four, five and six hours). As a result of the investigations, the total cumulative ramp areas of the Marmara, Aegean, Central Anatolia, Mediterranean, Black Sea, Eastern Anatolia and Southeastern Anatolia regions in a 1-hour temporal period in ramp events of 5% and above compared to the installed capacity are 1.91, 2.77, 14.39, 16.02, 35.95, 122.66, respectively. is 250.85 and the total cumulative ramp areas in the 6-hour temporal period are 195.93, 190.60, 280.42, 305.29, 361.14, 528.77, 623, respectively. In the light of these ramp calculations, in ramp events of 5% and above according to the installed power, the least ramp events were seen in the Marmara Region in a 1-hour temporal period, and the least ramp events were seen in the Aegean Region in a 6-hour temporal period. The highest ramp events in the 1 and 6 hour temporal period were seen in the Southeastern Anatolia Region.



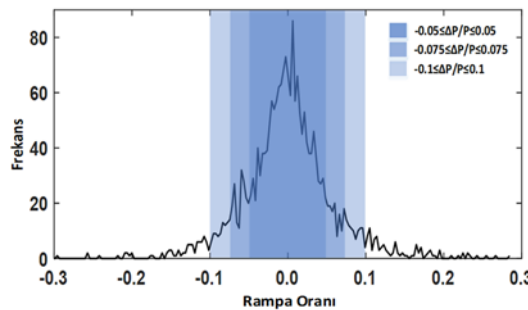
## 1. GİRİŞ

Elektrik günlük yaşamın vazgeçilmez bir parçasıdır. Bu sebeple dünyadaki birçok ülkenin hedefleri arasında tüketicilere sürekli, güvenli ve kaliteli elektrik enerjisi temin etmek vardır. Bu durumun oluşabilmesi için elektrik arz sisteminin doğru planlanması ve yönetilmesi gerekmektedir. Elektrik arz sisteminin doğru planlanması ve yönetilmesi için etkin modellemeye ihtiyaç duyulmaktadır [1]. 2022 yılı içerisinde Türkiye’de yapılan çalışmalarda mevcut kaynaklara göre toplam kurulu güç dağılımında yenilebilir enerji kaynakları %53’lük bir paya sahiptir. Toplam kurulu güç içerisindeki kaynak dağılımı ise; %30,9’u hidrolik enerji, %24,7’si doğal gaz, %20,6’sı kömür, %10,9’u rüzgâr, %8,8’i güneş, %1,6’sı jeotermal ve %2,4’ü ise diğer kaynaklardır [2].

Günümüzde Rüzgâr Enerji Santrallerinin (RES) yenilebilir enerji kaynakları içinde önemli bir yeri vardır. Ancak RES’ler belirsiz ve değişken üretim karakteristiğine sahiptir. Bu durum elektrik şebeke sistemindeki arz-talep dengesini olumsuz etkilemektedir. RES üretiminde meydana gelen bu değişkenlikler rampa olayı olarak adlandırılmaktadır. Rampa oranlarının şebeke sisteminde oluşturduğu olumsuzluklar sebebiyle RES üretimlerindeki rampa olaylarını incelemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Santral üretiminde meydana gelen değişkenliğin rampa olabilmesi, kurulu güçteki değişkenliğin %5 veya daha fazla olmasına bağlıdır [3].

Bazı ülkelerde rampa tanımlaması farklılık gösterdiğinden toplam kurulu gücün %5, %7,5 ve %10 üstündeki değişkenlikler incelenmiştir. Örneğin Puerto Rico Electric Power Authority’de kurulu gücün %10 ve üzerindeki değişiklikler incelenmiştir [4]. Toplam kurulu gücün %5, %7,5 ve %10 üzerindeki değişkenliklere rampa oranı karakteristiği olarak adlandırılmaktadır ve rampa oranı karakteristiğinin görseli Şekil 1’de verilmiştir. Bu şekilde üretimdeki düşüşler negatif yönlü rampalar olarak tanımlanırken üretimdeki artışlar pozitif yönlü rampa olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca şekilde gösterilen koyu lacivert bölge negatif ve pozitif yönlü %5 ve altındaki rampaları tanımlamaktadır. Lacivert bölge %5 ile %7,5 arasındaki negatif ve pozitif yönlü rampaları, açık lacivert bölge ise %7,5 ile %10 arasındaki rampaları göstermektedir. Beyaz bölge %10 ve üzerindeki rampa olaylarını göstermektedir.

Yapılan bu çalışma Türkiye’de bulunan RES’lerin 2019, 2020 ve 2021 yıllarındaki elektrik üretiminde meydana gelen rampa olaylarının bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda bölgesel olarak incelenmesini amaçlamıştır. Çalışma sonucunda elde edilen kümülatif rampa alanları bölgesel olarak karşılaştırılmıştır. RES üretiminde meydana gelen kısıtlamaları ve şebekedeki problemleri çözmek için enerji üretiminde oluşan rampaların yönünü bilmek gerekmektedir. RES üretiminde görülen negatif yönlü rampalardan kaynaklı enerji ihtiyacını karşılamak için; santrallerin şebekede aktif olma süresi, meydana gelen rampa büyüklüğüne göre pasif olan santraller devreye alınmakta veya aktif olan santrallerin üretimi arttırılmaktadır. Şebekede pozitif yönlü rampa oluşması halinde bazı yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler; sistemde aktif olan santrallerin üretiminin azaltılması, aktif santralin şebekedeki diğer aktif santrallere yük aktarımı yapılması ya da bazı santralin pasif duruma getirilmesi gerekmektedir. Bu durum şebeke işletmecisi açısından ek maliyetler oluşturmaktadır. Şebeke işletilmesindeki ek maliyetlerin minimize edilmesi amacıyla RES üretimlerindeki rampa olaylarının büyüklüğü, oluşum zamanı ve süre bilgilerine önceden sahip olmak büyük önem arz etmektedir [5].



Şekil 1. Rampa oranı karakteristiği

Bu konu kapsamında literatürde birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalardan bazıları incelenerek özetlenmiştir. Dhiman ve arkadaşlarının çalışmasında, Destek Vektör Regresyonu (DVR) ve

dalgacık dönüşümü değişkenlerini bir araya getirerek hibrit yapıya sahip rüzgâr tahmin modeli önerilmiştir. Önerilen tahmin model ile rüzgâr gücünde oluşan rampa olayları incelenmiş ve performans değerlendirme kriterleri ile karşılaştırma yapılmıştır [6]. Ery ve arkadaşlarının çalışmasında, rüzgâr yönünün doğrusal ve çapraz alan özelliklerine sahip olan santrallerde meydana gelen rampaların mekâna bağlı değişkenlikleri Poisson süreci ile modellenmiştir [7]. Ekström ve arkadaşlarının çalışmasında, bir güç sistemine eklenen yeni RES'lerin rampa özellikleri dikkate alarak coğrafi şartların enerji üretimindeki etkisini göstermek için model önerilmiştir [8]. Zucattelli ve arkadaşlarının çalışmasında, Brezilya ve Uruguay'da da bulunan santrallerde, rüzgâr enerjisi rampa tahmini için dalgacık ayrıştırması ve derin öğrenme teknikleri kullanılarak tahmin modeli önerilmiştir [9]. Martins ve arkadaşlarının çalışmasında, güneş enerji sisteminde meydana gelen harmoniklerin sebep olduğu güç dengesizliklerini ortadan kaldırmak için rampa hızı kontrol algoritmaları ile koordine edilen Enerji Depolama Sistemleri (EDS)'nin kullanıldığı bir model önerilmiştir [10]. Probst'un çalışmasında, rüzgâr santralleri üretimlerinde meydana gelen ani değişimleri Tahmine Dayalı Azaltma (TDA) metodu kullanılarak tahmine dayalı yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Analizler belirli ancak değişken bir eğim sınırına uygun yapılmıştır. Eğimin olmadığı sınırlarda ise TDA'nın maliyet-fayda ilişkileri karşılaştırılmıştır. Çalışmada önerilen yaklaşım ile çıkış gücü değişim dağılımlarının çalışan bir rüzgâr santralinden elde edilen gözlemsel verilerle tutarlı olduğu gösterilmiştir [11]. Li ve arkadaşlarının çalışmasında, rüzgâr enerjisi üretiminde meydana gelen rampa olayları ile atmosferik basınç alanları arasındaki ilişki analiz edilerek gelecekteki rüzgâr rampalarını tahmin eden model önerilmiştir. Tahmin modelinde atmosferik basınç alanlarının analizini, Gabor filtreleme adı verilen bir görüntü dokusu çıkarma tekniği kullanılarak yapılmıştır. Güç tahmininde, Gabor filtrelemeyi kullanmayan sistem ile tahmin modeli karşılaştırıldığında önerilen model bu çalışma için seçilen üç rüzgâr santrallerinden ikisi için daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca sayısal deneyler sonucunda önerilen modelin rampa yakalama oranı ve tahmin doğruluğu açısından diğer modelden daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür [12]. Karadöl ve arkadaşlarının çalışmasında, RES üretimlerinde iklimsel koşullara bağlı olarak görülen rampa olayları analiz edilmiştir ve bölgesel olarak ayrılan mevcut tesislerdeki rampa olayları dikkate alınarak rampa olaylarını azaltmaya yönelik model önerilmiştir. Önerilen modelde Genetik Algoritma (GA) kullanılmıştır. Yeni tesis kurulumlarında tavsiye edilen metot ile elde edilen tesislerin bölgelere dağılımının dikkate alınması durumunda oluşacak rampa olaylarının minimize edilebileceği öngörülmüştür [13].

Literatürdeki çalışmalar değerlendirildiğinde rampa olayları üzerine yapılan çalışmaların kısıtlı sayıda olduğu görülmüştür. Çalışmaların çoğunda enerji depolama sistemleri ve rampa tahmin modelleri önerilmiştir. Rampa analizi yapılan bazı çalışmalarda ise 1 yıllık santral üretim değerleri ile tek bir lokasyonda saatlik incelemeler yapılmıştır. Ayrıca yapılan birçok çalışmada kullanılan veriler farklı üretim modellemelerinden elde edilmiştir.

Bu çalışmanın literatüre iki yönlü katkısı olmuştur:

- İlk kez Türkiye için RES üretim değerlerindeki rampa olayları gerçek veriler ile bölgesel olarak incelenmiştir.
- Üç yıllık periyottaki (2019, 2020 ve 2021) RES üretimlerindeki rampa olayları bölgesel olarak farklı zamansal periyotlarda (bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik) hesaplanmıştır. Rampaların yönü, büyüklüğü ve oluşum yeri (bölgesel olarak) farklı zamansal periyotlarda detaylı olarak incelenmiştir.

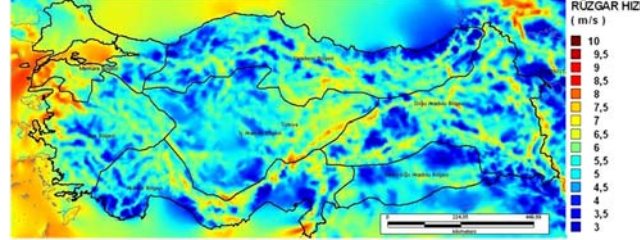
Bu makale dört başlıktan oluşmaktadır. İlk kısımda Türkiye'nin rüzgâr enerji potansiyeli anlatılmış, RES enerji üretimlerinde meydana gelen rampa olayından bahsedilmiş, çalışma ile ilgili literatür özeti ve çalışmanın literatüre katkısına değinilmiştir. İkinci kısımda verilerin elde edildiği santrallerin üretim bilgileri, Türkiye bölgesel rüzgâr enerjisi potansiyel atlası, Türkiye'nin 2019, 2020 ve 2021 yıllarını kapsayan RES bölgesel teknik verileri 3 yıllık zaman aralığında bölgesel olarak saatlik ortalama güç üretim değerleri yer almıştır ve rampa hesaplanmasında kullanılan yamuk kuralı açıklanmıştır. Çalışma sonunda elde edilen bulgular üçüncü kısımda yer almıştır. Bulgular doğrultusunda elde edilen sonuçlar son kısımda verilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Türkiye'de RES

Günümüzde fosil yakıt kaynaklarının hızla azalması sebebiyle yenilenebilir enerjinin ehemmiyeti anlaşılmaktadır. Genel olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları; hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal

ve biyokütle enerjisidir. Yenilenebilir enerji kaynakları içinde en çok gelişen rüzgâr enerjisi, güneş radyasyonunun yer yüzeylerini farklı değerlerde ısıtması ile meydana gelmektedir. Yeryüzünün farklı ısınması ile meydana gelen basınç ve nem farkından kaynaklı havanın yüksek basınçtan alçak basınca doğru olan hareket etmesiyle rüzgâr oluşmaktadır [14]. Türkiye’de bölgesel rüzgâr enerjisi potansiyel atlası Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Türkiye bölgesel rüzgâr enerjisi potansiyel atlası (50 m) [15]

Rüzgâr hızları 7 m/s’den fazla olan yerler belirlenerek Türkiye’nin rüzgâr enerji kapasitesi 47,849 MW olarak hesaplanmıştır. Atlasa bakılarak Marmara Bölgesi’nin ve Ege Bölgesi’nin kuzeyinin rüzgâr enerjisi potansiyeli diğer bölgelerden daha çok olduğu anlaşılmaktadır. Böylece Marmara Bölgesi ve Ege Bölgesi’ne kurulması planlanan RES’lerin üreteceği rüzgâr enerjisi daha verimli olacaktır [16].

## 2.2. Türkiye’deki RES’lerin Teknik Verileri

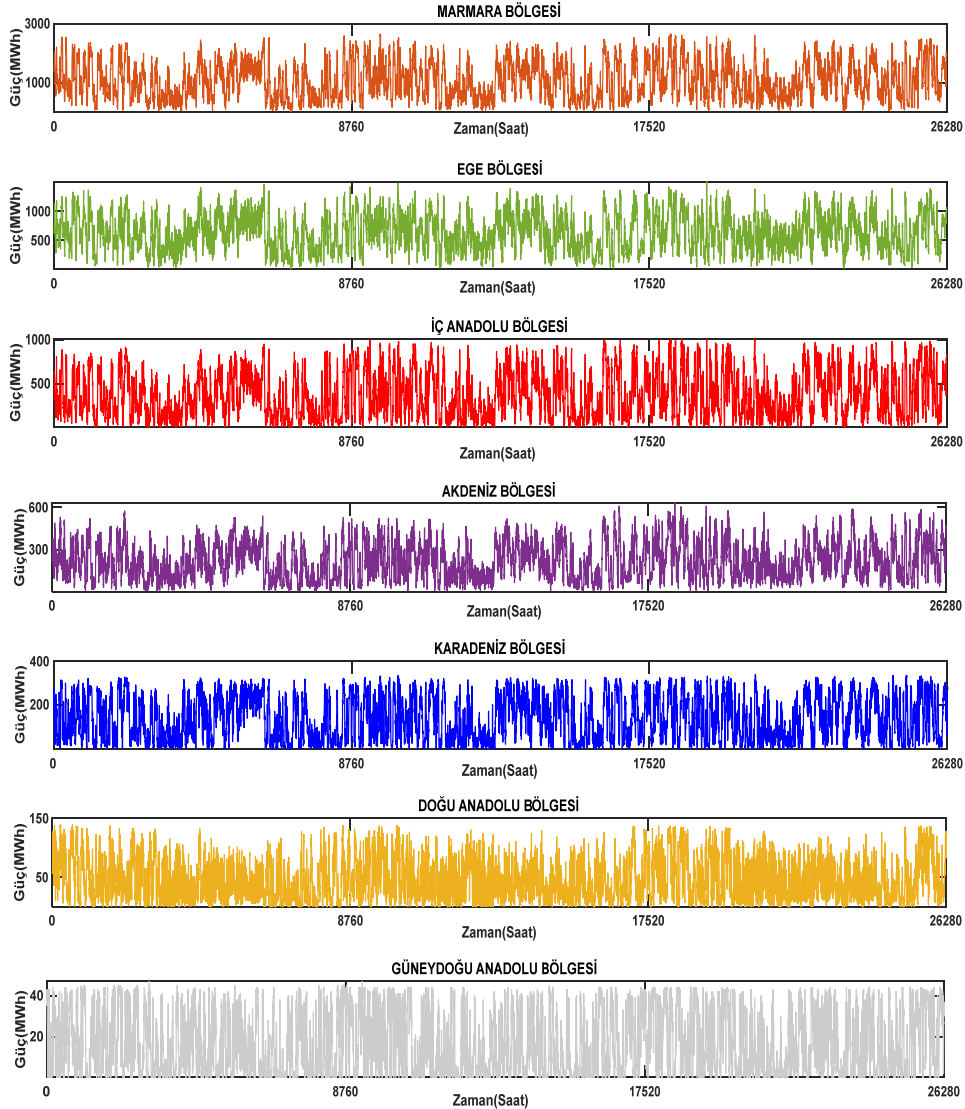
Rüzgâr enerjisinin Dünya çapında ve ülkemizde süratle gelişmesinde bu kaynak türünün yenilenebilir olması, taşıma rahatlığı ve enerji üretiminde çağın teknolojisine gereksinim duyulmaması gibi avantajları yer almaktadır [14]. Rüzgâr enerjisi kullanımındaki artışlar beraberinde bazı problemlere neden olmuştur. Rüzgâr enerjisi üretimi yapılırken ortaya çıkan rampa olayları bu problemlerin başında gelmektedir [13]. Çalışmada rampa olaylarını bölgesel olarak incelemek ve azaltmak için tüm bölgelerin birer saatlik zaman aralıklarında 2019, 2020 ve 2021 yıllarındaki üç yıllık RES üretim verileri incelemeye alınmıştır. Türkiye’de aktif olarak faaliyet gösteren Marmara Bölgesi’nde 70, Ege Bölgesi’nde 49, İç Anadolu Bölgesi’nde 19, Akdeniz Bölgesi’nde 13, Karadeniz Bölgesi’nde 10, Doğu Anadolu Bölgesi’nde 3 ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi’nde 1 tesis bulunmaktadır. Tesislere ait üretim verileri TEİAŞ’tan elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan verilerin genel özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir. Bu veriler ışığında, Marmara Bölgesinin en çok ortalama üretim ve standart sapmaya sahip olduğu, Güneydoğu Anadolu Bölgesinin ise en az ortalama üretim ve standart sapmaya sahip olduğu görülmüştür.

Marmara Bölgesi’ndeki standart sapma, diğer tüm bölgeler arasında en yüksek olanıdır. Bu da üretimdeki en yüksek değişkenliğin Marmara Bölgesi’nde meydana geldiğini kanıtlamaktadır. Bölgelerin her birinde maksimum ve minimum değerleri arasındaki farklar dikkate alındığında Marmara Bölgesi’nde 639,24 MW, Ege Bölgesi’nde 1508,36 MW, İç Anadolu Bölgesi’nde 1014,17 MW, Akdeniz Bölgesi’nde 626,33 MW, Karadeniz Bölgesi’nde 39,01 MW, Doğu Anadolu Bölgesi’nde 39,23 MW ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi’nde 47,00 MW olduğu anlaşılmaktadır. Meydana gelen tüm değişimler şebekede aktif olan RES’lerin işletme kısmında güçlükler neden olmaktadır.

Çizelge 1. Türkiye bölgesel RES üretimlerinin istatistiksel ve genel özellikleri

Özellikler	Marmara	Ege	İç Anadolu	Akdeniz	Karadeniz	Doğu Anadolu	Güneydoğu Anadolu
Santral Sayısı	70	49	19	13	10	3	1
Toplam Veri Sayısı	26304	26304	26304	26304	26304	26304	26304
Veri Zaman Aralığı	01.01.2019 - 31.12.2021						
Standart Sapma (MW)	621,68	307,90	262,54	127,90	101,43	35,13	14,97
Ortalama Üretim (MW)	1065,83	634,95	365,30	213,43	134,67	44,61	15,84
Maximum Üretim (MW)	663,33	1514,59	1014,27	628,32	39,01	39,23	47,00
Minimum Üretim (MW)	24,09	6,23	0,10	1,99	0	0	0
Toplam Kurulu Güç (MW)	3139,27	1779,82	1077,65	664,77	348,75	138,70	43,90

Ayrıca çalışmada kullanılan, Marmara Bölgesi'nde 70, Ege Bölgesi'nde 49, İç Anadolu Bölgesi'nde 19, Akdeniz Bölgesi'nde 13, Karadeniz Bölgesi'nde 10, Doğu Anadolu Bölgesi'nde 3 ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde 1 kurulu santrale ilişkin saatlik toplam üretimi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Türkiye'deki RES'lerin bölgesel olarak saatlik toplam üretimleri

RES üretimlerinin zaman bazında kararsız yapıya sahip olduğu Şekil 3'ten çıkarılmaktadır. Santral üretiminde meydana gelen değişkenliğin rampa olabilmesi, kurulu güçteki değişkenliğin %5 veya daha fazla olmasına bağlıdır [3]. Üretimdeki rampa olaylarını göstermek için toplam kurulu gücün %5, %7,5 ve %10 üzerindeki değişkenlikler hesaplanmıştır. Çizelge 2'de bölgesel saatlik toplam tesis üretimleri (MW) veri seti verilmiştir.

Çizelge 2. Veri seti

Veri Numara	Tarih	Marmara	Ege	İç Anadolu	Akdeniz	Karadeniz	Doğu Anadolu	Güneydoğu Anadolu
1	01.01.19 01:00	20	13	21	16	15	19	35
2	01.01.19 02:00	20	14	20	18	17	19	38
3	01.01.19 03:00	22	14	23	17	19	19	41
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
26304	31.12.21 24:00	8	6	11	11	5	3	2

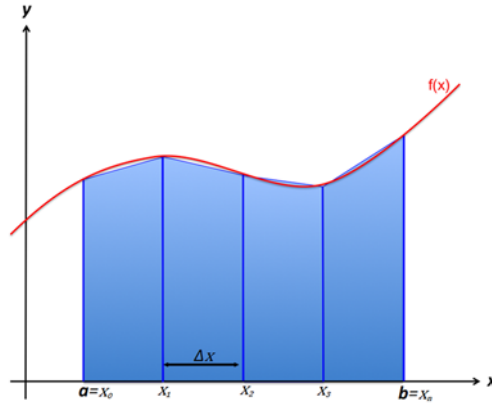
### 2.3. Rampa Hesaplamaları

Herhangi bir zamanki üretimde meydana gelen rampanın büyüklüğünü hesaplamak için Eşitlik 1'deki formüller kullanılmıştır [3].

$$\begin{aligned} \Delta P &= \{\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n\} \\ i &= (1, 2, \dots, n) \\ t &= (1, 2, 3, 4, 5, 6) \\ n &\in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (1)$$

Denklemden verilen  $\Delta P_i$ ,  $i$  zamandaki rampa büyüklüğünü,  $p(i)$  ise  $i$  saatindeki santraldeki üretimi göstermektedir.  $t$  zamansal periyodu ve  $n$  ise santralin saatlik çözünürlük zamanını göstermektedir. Eşitlik 1'de verilen  $\Delta P$ , tüm zamansal periyotlardaki üretim miktarı için rampa setini ifade etmektedir.

Bu çalışmada, santralin üretimindeki değişkenliklerini hesaplayabilmek için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarındaki fonksiyonlarının, yamuk kuralı kullanılarak histogram grafik alanını hesaplanmıştır. Matematiksel bir yöntem olan yamuk kuralı alan hesaplamaları için kullanılmaktadır. Bu metod, ilgili fonksiyon ile x-ekseni arasında kalan alanı daha küçük yamuklara bölerek gerçek değere yaklaştırmaktadır. Şekil 4'te yamuk kuralı görsel olarak verilmiştir.



Şekil 4. Yamuk kuralı [17]

Yamuk kuralının formülü Eşitlik 2 ve Eşitlik 3'te verilmiştir [18]. Eşitlik 2'de,  $f(x)$  fonksiyonun  $a$  ve  $b$  değerleri integral alan sınırlarıdır.  $a$  ve  $b$  değerleri Eşitlik 4'te detaylı biçimde verilmiştir [18].

$$\int_a^b f(x) dx \quad (2)$$

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{2} \{f(a) + f(b)\} \quad (3)$$

Eşitlik 5'te verilen  $\Delta x_i$  değeri, bölünerek oluşturulan her bir yamuk parçasının taban uzunluğunu göstermektedir. Bir yamuğun alanını hesaplayabilmek için Eşitlik 3'te verilen matematiksel ifade, birden çok yamuk alanı hesabı için Eşitlik 6'daki formül kullanılmaktadır [18]. Eşitlik 6'daki formülle farklı zamansal periyotlardaki saatlik RES üretim değişimlerinin histogram grafik alanlarının hesabı yapılmıştır [18].

$$[a, b] = \{a = x_0 < x_1 < \dots < x_{N-1} < x_N = b\} \quad (4)$$

$$\Delta x_i = x_i - x_{i-1} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \int_a^b f(x) dx &\approx \sum_{i=1}^N \frac{f(x_{i-1}) + f(x_i)}{2} \Delta x_i \\ &= \frac{\Delta x}{2} (f(x_0) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{N-1}) + f(x_N)) \end{aligned} \quad (6)$$

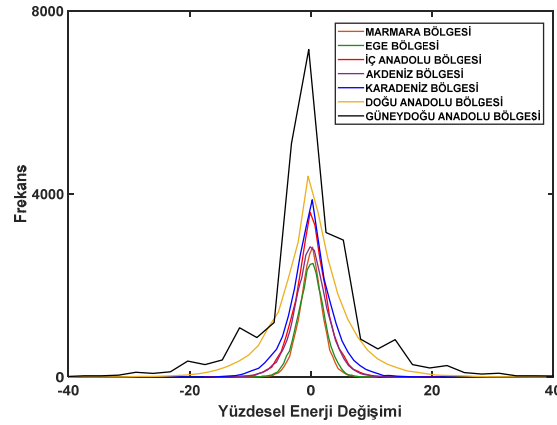


### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

İki zaman aralığında meydana gelen RES üretimindeki güç değişkenlikleri rampa olayı olarak ifade edilmektedir. RES üretiminde saniyelik ve dakikalık zamansal periyotlarda meydana gelen yüksek rampa olayları şebekede önemli bir zarar meydana getirmemektedir. Ama bir saat ve daha büyük zaman dilimlerinde oluşan rampa olaylarının şebekede dengelenmesi ek maliyetler gerektirmekte ve şebekenin güvenliğini olumsuz etkilemektedir [19-21].

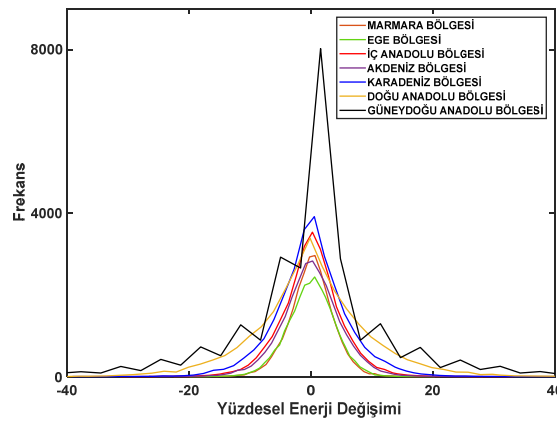
Yapılan çalışmada oluşan rampaların zamansal olarak büyüklüğünü belirlemek amacıyla 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 saatlik periyotlardaki rampa olayları incelenmiştir. Çünkü rampa olayları (üretim değişimleri) 1 saat sürerken bazı rampalar daha uzun periyotlarda gerçekleşmektedir. Tüm rampa olaylarının detaylı olarak belirleyebilmek amacıyla yapılan çalışmada 1-6 saatlik zamansal periyotlar incelenmiştir. Türkiye'deki 2019, 2020 ve 2021 yıllarına ait RES üretimindeki rampa olaylarının farklı zamansal periyotlarda bölgesel olarak saatlik değişimleri incelenmiştir. Bu değişiklikler per unit olarak histogram grafiklerinde Şekil 5, 6, 7, 8, 9 ve 10'da verilmiştir.

Bir saatlik periyottaki rampa olaylarını incelediğimizde Marmara, Ege, İç Anadolu, Akdeniz, Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin toplam kümülatif rampa alanları sırasıyla 111, 116, 182, 164, 223, 365 ve 603'tür.



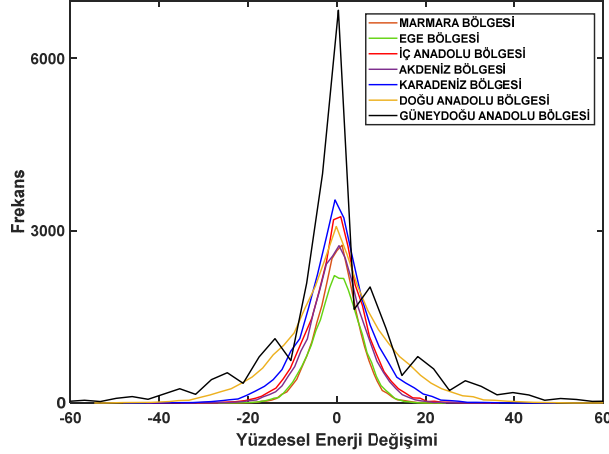
Şekil 5. 1 saatlik periyottaki rampa olayları

Bir saatlik periyotta en fazla rampa olayları Güneydoğu Anadolu bölgesinde görülmüştür. Bu bölgeyi takip eden bölgelerimiz ise sırasıyla Doğu Anadolu, Karadeniz, İç Anadolu, Akdeniz, Ege ve Marmara bölgesidir. Fakat rampa büyüklükleri arttıkça kurulu güce göre %5 ve üzerinde en düşük rampa olayları Marmara bölgesinde gözlemlenmiştir. Aynı zamanda İç Anadolu bölgesi için toplam kümülatif rampa alanı Akdeniz bölgesinden daha fazla olmasına rağmen kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında daha az olduğu görülmüştür.



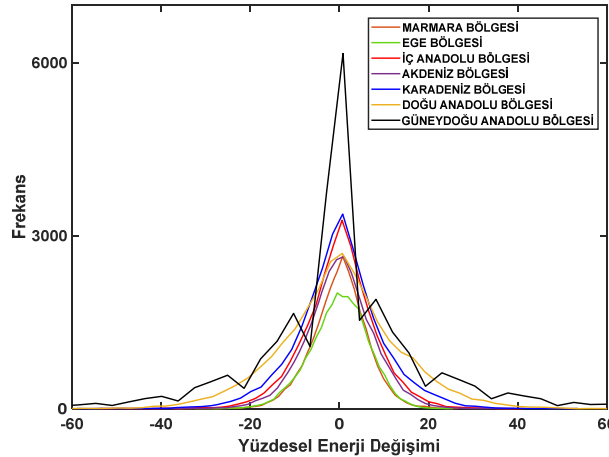
Şekil 6. 2 saatlik periyottaki rampa olayları

İki saatlik periyottaki rampa olaylarını incelediğimizde Marmara, Ege, İç Anadolu, Akdeniz, Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin toplam kümülatif rampa alanları sırasıyla 208, 197, 302, 263, 373, 464 ve 687'dir. İki saatlik periyotta en fazla rampa olayları Güneydoğu Anadolu bölgesinde görülmüştür. Bu bölgeyi takip eden bölgelerimiz ise sırasıyla Doğu Anadolu, Karadeniz, İç Anadolu, Akdeniz, Marmara ve Ege bölgesidir. Rampa büyüklükleri arttıkça kurulu güce göre %5, %7,5 ve üzerinde en düşük rampa olayları Marmara bölgesinde gözlemlenmiş, %10 ve üzerindeki en düşük rampa olayları ise Ege bölgesinde görülmüştür.



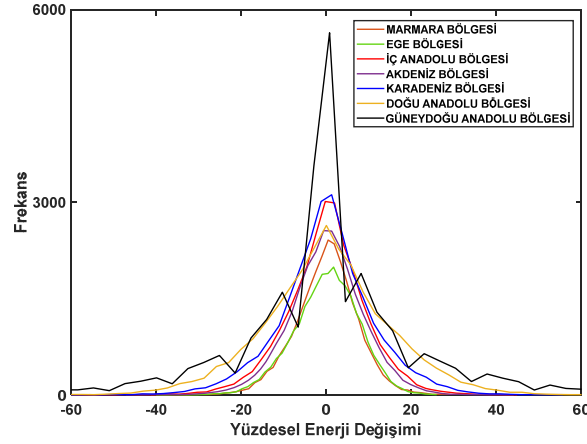
Şekil 7. 3 saatlik periyottaki rampa olayları

Üç saatlik periyottaki rampa olaylarını incelediğimizde Marmara, Ege, İç Anadolu, Akdeniz, Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin toplam kümülatif rampa alanları sırasıyla 268, 252, 375, 338, 456, 556 ve 747'dir. Üç saatlik periyotta en fazla rampa olayları Güneydoğu Anadolu bölgesinde görülmüştür. Bu bölgeyi takip eden bölgelerimiz ise sırasıyla Doğu Anadolu, Karadeniz, İç Anadolu, Akdeniz, Marmara ve Ege bölgesidir. Rampa büyüklükleri arttıkça kurulu güce göre %5, %7,5 ve üzerinde en düşük rampa olayları Marmara bölgesinde gözlemlenmiş, %10 ve üzerindeki en düşük rampa olayları ise Ege bölgesinde görülmüştür. Aynı zamanda İç Anadolu bölgesi için toplam kümülatif rampa alanı Akdeniz bölgesinden daha fazla olmasına rağmen kurulu güce göre %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında daha az olduğu görülmüştür.



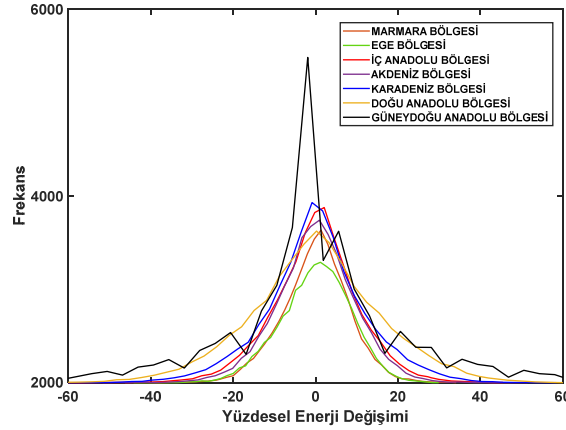
Şekil 8. 4 saatlik periyottaki rampa olayları

Dört saatlik periyottaki rampa olaylarını incelediğimizde Marmara, Ege, İç Anadolu, Akdeniz, Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin toplam kümülatif rampa alanları sırasıyla 311, 288, 452, 394, 530, 626 ve 790'dır. Dört saatlik periyotta en fazla rampa olayları Güneydoğu Anadolu bölgesinde görülmüştür. Bu bölgeyi takip eden bölgelerimiz ise sırasıyla Doğu Anadolu, Karadeniz, İç Anadolu, Akdeniz, Marmara ve Ege bölgesidir. Rampa büyüklükleri arttıkça kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki en düşük rampa olayları Marmara bölgesinde gözlemlenmiştir.



Şekil 9. 5 saatlik periyottaki rampa olayları

Beş saatlik periyottaki rampa olaylarını incelediğimizde Marmara, Ege, İç Anadolu, Akdeniz, Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin toplam kümülatif rampa alanları sırasıyla 345, 329, 501, 442, 574, 685 ve 803'tür. Beş saatlik periyotta en fazla rampa olayları Güneydoğu Anadolu bölgesinde görülmüştür. Bu bölgeyi takip eden bölgelerimiz ise sırasıyla Doğu Anadolu, Karadeniz, İç Anadolu, Akdeniz, Marmara ve Ege bölgesidir. Rampa büyüklükleri arttıkça kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki en düşük rampa olayları Marmara bölgesinde gözlemlenmiştir.



Şekil 10. 6 saatlik periyottaki rampa olayları

Altı saatlik periyottaki rampa olaylarını incelediğimizde Marmara, Ege, İç Anadolu, Akdeniz, Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin toplam kümülatif rampa alanları sırasıyla 392, 368, 537, 500, 605, 727 ve 850'dir. Altı saatlik periyotta en fazla rampa olayları Güneydoğu Anadolu bölgesinde görülmüştür. Bu bölgeyi takip eden bölgelerimiz ise sırasıyla Doğu Anadolu, Karadeniz, İç Anadolu, Akdeniz, Marmara ve Ege bölgesidir. Rampa büyüklükleri arttıkça kurulu güce göre %7,5 ve %10 üzerinde en düşük rampa olayları Marmara bölgesinde gözlemlenmiştir. Aynı zamanda İç Anadolu bölgesi için toplam kümülatif rampa alanı Akdeniz bölgesinden daha fazla olmasına rağmen kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında daha az olduğu görülmüştür.

Rampa olaylarında hesaplanan minimum değişim negatif rampayı, maksimum değişim ise pozitif rampayı ifade etmektedir. Tesislerde; geçmişteki üretimlere göre gerçekleşen üretimdeki azalış negatif değişimi, artış ise pozitif değişimi göstermektedir.

Marmara Bölgesi için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki, negatif ve pozitif yönlü kümülatif rampa alanları Çizelge 3'te verilmiştir. Rampa olayları kümülatif rampa alanlarına göre incelendiğinde en fazla rampa olayları kurulu güce göre %5 üzerindeki rampa olaylarında gözlemlenmiştir. Aynı zamansal periyotta en düşük pozitif ve negatif kümülatif rampa alanı %10 ve üzerindeki rampa olaylarında görülmüştür. Oluşma şekline göre rampaları

incelediğinde, kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında iki saatlik zamansal periyot hariç tüm zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında bir, üç ve dört saatlik zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı iki, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda ise negatif rampa alanı daha fazla olduğu gözlenmiştir. %10 ve üzerindeki rampa olaylarında ise tüm zamansal periyotlarda pozitif kümülatif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. %7,5 ve %10 üzerindeki rampa olaylarında bir saatlik zamansal periyotta toplam rampa alanı 0'a yakındır ve bu değer Marmara Bölgesi için %7,5 ve %10 üzeri rampa olaylarında bir saatlik zamansal periyotta rampa olayı gerçekleşmediğini göstermektedir.

Ege Bölgesi için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki, negatif ve pozitif yönlü kümülatif rampa alanları Çizelge 4'te verilmiştir. Rampa olayları kümülatif rampa alanlarına göre incelendiğinde en fazla rampa olayları kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında meydana geldiği görülmüştür. Aynı zamansal periyotta en düşük pozitif ve negatif yönlü kümülatif rampa alanı %10 ve üzerindeki rampa olaylarında gözlenmiştir. Oluşma şekline göre rampaları incelediğinde, kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında bir ve altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında ise tüm zamansal periyotlarda pozitif kümülatif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. %10 ve üzerindeki rampa olaylarında bir, dört ve altı saatlik zamansal periyotlarda negatif ve pozitif rampa alanları yaklaşık olarak aynı hesaplanmıştır. İki, üç ve beş saatlik zamansal periyotlarda ise pozitif rampa alanı daha fazla olduğu gözlenmiştir. %7,5 ve %10 üzerindeki rampa olaylarında bir saatlik zamansal periyotta toplam rampa alanı 0'a yakındır ve bu değer Ege Bölgesi için %7,5 ve %10 üzeri rampa olaylarında bir saatlik zamansal periyotta rampa olayı gerçekleşmediğini göstermektedir.

**Çizelge 3.** Marmara Bölgesi %5, %7,5 ve %10 üzeri kümülatif rampa alanları

	%5 +			%7,5 +			%10 +		
	Pozitif	Negatif	Toplam	Pozitif	Negatif	Toplam	Pozitif	Negatif	Toplam
<b>1 saat</b>	1,02	0,90	1,91	0,13	0,08	0,21	0,02	0,01	0,03
<b>2 saat</b>	14,90	17,11	32,01	3,91	4,10	8,01	1,49	1,03	2,53
<b>3 saat</b>	36,87	34,28	71,15	18,02	15,14	33,15	8,14	6,30	14,45
<b>4 saat</b>	56,55	52,83	109,37	30,81	25,61	56,42	15,54	11,51	27,06
<b>5 saat</b>	81,61	69,43	151,04	48,43	50,69	99,12	26,59	25,28	51,87
<b>6 saat</b>	104,64	91,29	195,93	63,26	66,82	130,08	47,87	33,74	81,61

**Çizelge 4.** Ege Bölgesi %5, %7,5 ve %10 üzeri kümülatif rampa alanları

	%5 +			%7,5 +			%10 +		
	Pozitif	Negatif	Toplam	Pozitif	Negatif	Toplam	Pozitif	Negatif	Toplam
<b>1 saat</b>	1,35	1,43	2,77	0,16	0,12	0,28	0,01	0,01	0,03
<b>2 saat</b>	20,00	15,53	35,53	6,35	4,12	10,46	1,72	0,76	2,48
<b>3 saat</b>	37,41	36,73	74,14	20,32	17,63	37,95	6,58	4,72	11,30
<b>4 saat</b>	63,38	62,30	125,69	38,81	34,44	73,25	16,54	16,83	33,37
<b>5 saat</b>	86,42	80,32	166,74	55,58	45,47	101,05	33,58	22,87	56,45
<b>6 saat</b>	88,06	102,53	190,60	71,21	59,98	131,18	44,19	43,77	87,96

İç Anadolu Bölgesi için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki, negatif ve pozitif yönlü kümülatif rampa alanları Çizelge 5'te verilmiştir. Kümülatif rampa alanlarına göre rampa olayları değerlendirildiğinde en fazla rampa olayları kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında oluşmuştur. Aynı zamansal periyotta en düşük pozitif ve negatif kümülatif rampa alanı %10 ve üzerindeki rampa olaylarında meydana gelmiştir. Meydana geliş şekline göre rampalar değerlendirildiğinde kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında bir, beş ve altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında ise iki ve üç saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda negatif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. %10 ve üzerindeki rampa olaylarında dört, beş ve altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür.

Akdeniz Bölgesi için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki, negatif ve pozitif kümülatif rampa alanları Çizelge 6'da verilmiştir. Kümülatif rampa alanlarına göre rampa olayları değerlendirildiğinde en fazla rampa olayları kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında oluşmuştur. Aynı zamansal periyotta en düşük pozitif ve negatif kümülatif rampa alanı %10 ve üzerindeki rampa olaylarında meydana gelmiştir. Oluşum şekline göre rampalar incelendiğinde, kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında ise iki ve beş saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda negatif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. %10 ve üzerindeki rampa olaylarında dört saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda negatif rampa alanı daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Karadeniz Bölgesi için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki, negatif ve pozitif kümülatif rampa alanları Çizelge 7'de verilmiştir. Kümülatif rampa alanlarına göre rampa olayları incelendiğinde en fazla rampa olayları kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında meydana gelmiştir. Aynı zamansal periyotta en küçük pozitif ve negatif kümülatif rampa alanı %10 ve üzerindeki rampa olaylarında oluşmuştur. Oluşma şekline göre rampaları değerlendirildiğinde kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında beş ve altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda negatif rampa alanı daha fazla olduğu görülmüştür. Beş saatlik zamansal periyotta negatif ve pozitif rampa alanları birbirine çok yakın değerlerdedir. %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında ise 3, 4 ve 5 saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha fazla olduğu gözlenmiştir. %10 ve üzerindeki rampa olaylarında 1, 2 ve 5 saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha fazla olduğu, 5 saatlik zamansal periyotta negatif ve pozitif rampa alanları birbirine yakın değerlerde olduğu görülmüştür.

**Çizelge 5.** İç Anadolu Bölgesi %5, %7,5 ve %10 üzeri kümülatif rampa alanları

	%5 +			%7,5 +			%10 +		
	Pozitif	Negatif	Toplam	Pozitif	Negatif	Toplam	Pozitif	Negatif	Toplam
<b>1 saat</b>	6,67	7,72	14,39	1,78	1,89	3,67	0,53	0,44	0,97
<b>2 saat</b>	47,72	40,66	88,38	21,01	17,07	38,08	8,45	6,94	15,38
<b>3 saat</b>	75,33	72,28	147,61	36,68	33,08	69,77	24,49	21,85	46,34
<b>4 saat</b>	117,47	96,78	214,25	61,11	67,54	128,65	42,31	45,97	88,28
<b>5 saat</b>	120,51	130,15	250,66	88,96	93,48	182,44	64,16	65,81	129,97
<b>6 saat</b>	136,46	143,96	280,42	102,80	105,64	208,44	75,72	76,53	152,25

**Çizelge 6.** Akdeniz Bölgesi %5, %7,5 ve %10 üzeri kümülatif rampa alanları

	%5 +			%7,5 +			%10 +		
	Pozitif	Negatif	Toplam	Pozitif	Negatif	Toplam	Pozitif	Negatif	Toplam
<b>1 saat</b>	9,18	6,84	16,02	1,88	1,99	3,86	0,31	0,38	0,69
<b>2 saat</b>	35,90	30,75	66,65	16,96	13,81	30,77	5,22	5,60	10,82
<b>3 saat</b>	68,78	56,82	125,60	35,09	39,80	74,89	16,28	18,24	34,52
<b>4 saat</b>	91,98	87,08	179,06	48,69	63,36	112,05	34,16	30,61	64,77
<b>5 saat</b>	107,35	98,44	205,79	79,66	72,23	151,89	41,53	51,41	92,93
<b>6 saat</b>	148,24	157,05	305,29	82,96	86,37	169,34	59,82	61,33	121,15

**Çizelge 7.** Karadeniz Bölgesi %5, %7,5 ve %10 üzeri kümülatif rampa alanları

	%5 +			%7,5 +			%10 +		
	Pozitif	Negatif	Toplam	Pozitif	Negatif	Toplam	Pozitif	Negatif	Toplam
<b>1 saat</b>	16,05	19,90	35,95	7,07	5,90	12,97	1,78	2,44	4,21
<b>2 saat</b>	57,99	66,53	124,52	38,76	30,07	68,83	16,62	20,16	36,78
<b>3 saat</b>	93,34	108,63	201,97	65,74	76,86	142,60	45,66	36,78	82,44
<b>4 saat</b>	136,98	152,88	289,86	98,55	110,22	208,77	70,42	56,18	126,59
<b>5 saat</b>	164,40	164,27	328,67	121,24	122,26	243,50	89,17	89,81	178,98
<b>6 saat</b>	188,41	172,73	361,14	143,19	131,76	274,95	107,70	99,49	207,19



Doğu Anadolu Bölgesi için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki negatif ve pozitif kümülatif rampa alanları Çizelge 8'de verilmiştir. Kümülatif rampa alanlarına göre rampa olayları değerlendirildiğinde en büyük rampa olayları kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında oluşmuştur. Aynı zamansal periyotta en düşük pozitif ve negatif kümülatif rampa alanı %10 ve üzerindeki rampa olaylarında meydana gelmiştir. Meydana geliş şekline göre rampalar değerlendirdiğinde kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında iki, üç ve dört saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha büyük olduğu görülmüştür. %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında ise beş ve altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda negatif rampa alanı daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. %10 ve üzerindeki rampa olaylarında bir, iki ve altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda negatif rampa alanı daha fazla olduğu, beş saatlik zamansal periyotta negatif ve pozitif rampa alanları birbirine yaklaşık olarak eşit değerlerde olduğu görülmüştür.

Güneydoğu Anadolu Bölgesi için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki, negatif ve pozitif kümülatif rampa alanları Çizelge 9'da verilmiştir. Rampa olayları kümülatif rampa alanlarına göre analiz edildiğinde en yüksek rampa olayları kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında gözlenmiştir. Aynı zamansal periyotta en düşük pozitif ve negatif kümülatif rampa alanı %10 ve üzerindeki rampa olaylarında gözlenmiştir. Oluşum şekline göre rampalar incelendiğinde kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında bir saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında ise dört ve beş saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha fazla olduğu, bir saatlik zamansal periyotta negatif ve pozitif rampa alanları birbirine yaklaşık olarak eşit olduğu görülmüştür. %10 ve üzerindeki rampa olaylarında bir ve altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda pozitif rampa alanı daha büyük olduğu görülmüştür.

**Çizelge 8.** Doğu Anadolu Bölgesi %5, %7,5 ve %10 üzeri kümülatif rampa alanları

	%5 +			%7,5 +			%10 +		
	Pozitif	Negatif	Toplam	Pozitif	Negatif	Toplam	Pozitif	Negatif	Toplam
<b>1 saat</b>	66,53	56,12	122,66	31,50	38,65	70,16	21,92	18,68	40,60
<b>2 saat</b>	112,80	118,75	231,55	84,78	89,34	174,13	62,84	49,49	112,33
<b>3 saat</b>	145,00	148,79	293,80	111,09	114,53	225,63	84,70	87,18	171,88
<b>4 saat</b>	184,25	206,90	391,15	143,07	161,22	304,29	109,44	125,72	235,16
<b>5 saat</b>	246,99	245,10	492,09	195,34	192,99	388,33	151,73	151,85	303,58
<b>6 saat</b>	270,40	258,37	528,77	214,72	205,79	420,51	168,86	162,70	331,56

**Çizelge 9.** Güneydoğu Anadolu Bölgesi %5, %7,5 ve %10 üzeri kümülatif rampa alanları

	%5 +			%7,5 +			%10 +		
	Pozitif	Negatif	Toplam	Pozitif	Negatif	Toplam	Pozitif	Negatif	Toplam
<b>1 saat</b>	112,97	137,88	250,85	83,72	83,45	167,17	56,12	62,91	119,03
<b>2 saat</b>	146,99	145,53	292,52	146,99	145,53	292,52	111,67	109,80	221,47
<b>3 saat</b>	212,63	208,80	421,43	162,16	149,56	311,71	162,16	149,56	311,71
<b>4 saat</b>	257,89	237,03	494,92	207,32	237,03	444,35	207,32	177,29	384,61
<b>5 saat</b>	271,94	252,47	524,41	222,83	252,47	475,30	222,83	193,66	416,49
<b>6 saat</b>	313,32	309,69	623,00	237,32	235,91	473,23	186,41	187,59	374,00

Tüm bölgeler için bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki negatif ve pozitif kümülatif rampa alanı toplamaları Çizelge 10,11 ve 12'de verilmiştir. Tüm bölgelerde aynı zamansal dönemde toplam kümülatif rampa alanlarına göre rampa olayları analiz edildiğinde en yüksek rampa olayları kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olaylarında görülmüştür. En düşük toplam kümülatif rampa alanı ise %10 ve üzerindeki rampa olaylarında gözlenmiştir. %5 ve üzerindeki rampa olaylarında altı saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda en düşük toplam kümülatif rampa alanı Marmara Bölgesi'ne, altı saatlik zamansal periyotta ise en az kümülatif rampa alanı Ege Bölgesi'ne aittir. Ayrıca tüm zamansal periyotlarda en yüksek toplam kümülatif rampa alanı Güneydoğu Anadolu Bölgesi'ne aittir. %7,5 ve üzerindeki rampa olaylarında, bir saatlik zamansal periyotta Marmara Bölgesi ve Ege Bölgesi toplam kümülatif rampa alanları 0 olduğu görülmüş olup bu iki bölgede

rampa olayı gerçekleşmediği anlaşılmıştır. Diğer zamansal periyotlarda en düşük kümülatif rampa alanı Marmara Bölgesi'ne aittir. Buna ek olarak, %7,5 ve üzerindeki rampa olayları için tüm zamansal periyotlarda en yüksek kümülatif rampa alanı Güneydoğu Anadolu Bölgesi'ne aittir. %10 ve üzerindeki rampa olaylarında, bir saatlik zamansal periyotta Marmara Bölgesi ve Ege Bölgesi toplam kümülatif rampa alanları 0 olduğu görülmüş olup bu iki bölgede rampa olayı meydana gelmediği anlaşılmıştır. Ayrıca iki ve üç saatlik zamansal periyot hariç diğer zamansal periyotlarda en küçük toplam kümülatif rampa alanı Marmara Bölgesi'ne aittir. Buna ek olarak, %10 ve üzerindeki rampa olayları için tüm zamansal periyotlarda en yüksek toplam kümülatif rampa alanı Güneydoğu Anadolu Bölgesi'ne aittir.

**Çizelge 10.** Tüm bölgelerin %5 ve üzeri toplam kümülatif rampa alanları

	Marmara	Ege	İç Anadolu	Akdeniz	Karadeniz	Doğu Anadolu	Güneydoğu Anadolu
1 saat	2	3	14	16	36	123	251
2 saat	32	36	88	67	125	232	293
3 saat	71	74	148	126	202	294	421
4 saat	109	126	214	179	290	391	495
5 saat	151	167	251	206	329	492	524
6 saat	196	191	280	305	361	529	623

**Çizelge 11.** Tüm bölgelerin %7,5 ve üzeri toplam kümülatif rampa alanları

	Marmara	Ege	İç Anadolu	Akdeniz	Karadeniz	Doğu Anadolu	Güneydoğu Anadolu
1 saat	0	0	4	4	13	70	167
2 saat	8	10	38	31	69	174	293
3 saat	33	38	70	75	143	226	312
4 saat	56	73	129	112	209	304	444
5 saat	99	101	182	152	244	388	475
6 saat	130	131	208	169	275	421	473

**Çizelge 12.** Tüm bölgelerin %10 ve üzeri toplam kümülatif rampa alanları

	Marmara	Ege	İç Anadolu	Akdeniz	Karadeniz	Doğu Anadolu	Güneydoğu Anadolu
1 saat	0	0	1	1	4	41	119
2 saat	3	2	15	11	37	112	221
3 saat	14	11	46	35	82	172	312
4 saat	27	33	88	65	127	235	385
5 saat	52	56	130	93	179	304	416
6 saat	82	88	152	121	207	332	374

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, üç yıllık zaman aralığında Türkiye'deki rüzgâr enerji santral üretimlerinde oluşan rampa olaylarının farklı zamansal periyotlar da ve bölgesel olarak incelemesini amaçlanmıştır. Rüzgâr enerji tesislerinde oluşan rampaların büyüklüğünün ve oluşma zamanının bilinmesi şebeke işletmeleri için büyük önem arz etmektedir. Çünkü üretimdeki azalmalarda şebeke işletmeleri emre amade üretimi (anlık kullanım için hazır enerji) kullanmaktadır. Üretimlerdeki artış durumunda ise şebeke yük atmaktadır. Bu iki senaryoda şebeke işletmeleri için büyük maliyetler oluşturmaktadır. Bu amaçla çalışmada Türkiye'deki Marmara Bölgesi'nde 70, Ege Bölgesi'nde 49, İç Anadolu Bölgesi'nde 19, Akdeniz Bölgesi'nde 13, Karadeniz Bölgesi'nde 10, Doğu Anadolu Bölgesi'nde 3, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde bir rüzgâr

enerji santralinin 2019, 2020 ve 2021 yıllarını kapsayan üç yıllık ortalama saatlik üretimleri kullanılmıştır. Bu tesislerin saatlik enerji üretimlerine göre bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda oluşan rampa büyüklükleri, standart sapmaları ve yönü hesaplanmıştır. Kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10'un üzerindeki rampalar incelenmiştir. İnceleme bir, iki, üç, dört, beş ve altı saatlik zamansal periyotlarda bölgesel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda;

- Kurulu güce göre %5 ve üzerindeki rampa olayları altı saatlik zamansal periyot hariç tüm zamansal periyotlarda en az Marmara Bölgesi'nde görülmüştür. Altı saatlik zamansal periyotta %5 ve üzeri için toplam kümülatif rampa alanı Marmara Bölgesi için 196, Ege Bölgesi için ise 191'dir ve bu zamansal periyotta en az rampa olayları Ege Bölgesi'nde görülmüştür.
- Kurulu güce göre %7,5 ve üzerindeki rampa olayları bir saatlik zamansal periyot hariç tüm zamansal periyotlarda en az Marmara Bölgesi'nde meydana gelmiştir. Bir saatlik zamansal periyotta Marmara ve Ege Bölgesi için toplam kümülatif rampa alanı 0'dır ve bu zamansal periyotta en az rampa olayları Marmara ve Ege Bölgesi'nde meydana gelmiştir.
- Kurulu güce göre %10 ve üzerindeki rampa olayları bir, iki ve üç saatlik zamansal periyotlar hariç en az Marmara Bölgesi'nde meydana gelmiştir. İki ve üç saatlik zamansal periyotlarda toplam kümülatif rampa alanları Marmara Bölgesi için sırasıyla; 3 ve 14, Ege Bölgesi için ise sırasıyla; 2 ve 11'dir.

Bu sonuçlara göre iki ve üç saatlik zamansal periyotlarda en az rampa olayları Ege Bölgesi'nde görülmüştür. Kurulu güce göre %10 ve üzeri için bir saatlik zamansal periyotta ise Marmara ve Ege Bölgesi için toplam kümülatif rampa alanları 0'dır. Ayrıca kurulu güce göre %5, %7,5 ve %10 üzerindeki rampa olayları tüm zamansal periyotlarda tüm bölgeler içerisinde en fazla rampa olayları Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde meydana gelmiştir. Sonuç olarak, elde edilen tüm veriler değerlendirildiğinde Marmara ve Ege Bölgesi'nde diğer bölgelere göre RES üretiminin çok fazla değişken olmadığı ve bu bölgelerde rampa olaylarının bozucu etkisinin çok az olduğu görülmüştür. Aksine Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde diğer bölgelere göre RES üretimindeki değişkenliğin ve şebekedeki bozucu etkinin çok fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde bu çalışma, Türkiye'de kurulması planlanan yeni tesislere bulunduğu bölge açısından ışık tutacak niteliktedir. Aynı zamanda, mevcut kurulu tesisler için ise gerçekleşecek olan rampa olayları için önlem almalarına fayda sağlayabilecek ve Türkiye ölçeğinde rampa olaylarının tahmini üzerine yapılan çalışmalara girdi niteliği taşıyabilecektir.

Bu makale çalışması Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü bünyesinde Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında 2022 yılında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilen "Türkiye'de RES üretimi rampa olaylarının farklı zamansal periyotlarda bölgesel olarak incelenmesi" adlı yüksek lisans tezinden türetilmiştir (Danışman: Doç. Dr. Ö. Fatih KEÇECİOĞLU, Dr. Öğr. Üyesi İsrail KARADÖL).

## 5. KAYNAKLAR

1. Aydın, M., 2016. Enerji verimliliğinin sürdürülebilir kalkınmadaki rolü: Türkiye değerlendirmesi. Yönetim Bilimleri Dergisi / Journal of Administrative Sciences, 14(28), 409-441.
2. Ersöz, A., 2022., Dünya ve Türkiye enerji görünümü gelecek yaklaşımları. Temiz Enerji Haber Portalı.
3. Frate, G.F., Cherubini, P., Tacconelli, C., Micangeli, A., Ferrari, L., Desideri, U., 2019. Ramp rate abatement for wind power plants: a techno-economic analysis. Applied Energy, 254-255, Science Direct.
4. Gevorgian, V., Booth, S., 2013. Review of PREPA technical requirements for interconnecting wind and solar generation. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 72, United States: U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information.
5. Ela, E., Kemper, J., 2009. Wind plant ramping behavior. Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, 38.
6. Dhiman, H., Deb, D., Guerrero, J., 2019. Hybrid machine intelligent SVR variants for wind forecasting and ramp events.
7. Ery, A. C., Jan, K., Matthew, L., 2014. A poisson model for anisotropic solar ramp rate correlations.
8. Ekström, J., Koivisto, M., Mellin, I., Millar, R.J., Lehtonen, M., 2018. A statistical modeling methodology for long-term wind generation and power ramp simulations in new generation locations. Energies 2018, 11(9), 2442

9. Zucатели, P., Nascimento, E., Santos, A., Arce, A., Moreira, D., 2021. An investigation on deep learning and wavelet transform to nowcast wind power and wind power ramp: A case study in Brazil and Uruguay. *Energy*, 230, 120842.
10. Martins, J., Spataru, S., Sera, D., Stroe, D.-l., Lashab, A., 2019. Comparative study of ramp-rate control algorithms for PV with energy storage systems. *Energies*, 12(7), 1342.
11. Probst, O., 2020. A new strategy for short-term ramp rate control in wind farms. *Electrical Power and Energy Systems*, 120, 105969.
12. Li, Y., Musilek, P., Lozowski, E., 2017. Improving the prediction of wind power ramps using texture extraction techniques applied to atmospheric pressure fields. *International Journal of Data Science and Analytics*, 237-250.
13. Karadöl, İ., Yıldız, C., Şekkeli, M., 2020. Spatial distribution optimization of wind power plants to be installed in Turkey to minimize wind power ramp events. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 959-971.
14. Şenel, M. C., Koç, E., 2015. Dünyada ve Türkiye’de rüzgâr enerjisi durumu genel değerlendirme, *Mühendis ve Makina*, 56(663), 46-56.
15. Rüzgâr Enerjisi Hakkında Doğru Bilinen Yanlışlar. Ekoyapı: <https://124.im/39uXHA5> Erişim Tarihi: 12.12.2020.
16. Behçet, R., Gül, H., Oral, H., Oral, F., 2014. Rüzgâr enerjisi potansiyeli bakımından Malatya ilinin Doğu Anadolu bölgesindeki yeri. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 65-73
17. Integration Using the Trapezoidal Method. Calvin Üniversitesi. <https://cs.calvin.edu/courses/cs/374/exercises/05/lab/>, Erişim Tarihi: 12.08.2021
18. Karadöl, İ., Şekkeli, M., 2021. Nehir tipi hidroelektrik santrallerinde rampa olayları: Türkiye örneği. *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 361-375.
19. Couto, A., Costa, P., Rodrigues, L., Lopes, V., 2015. Impact of weather regimes on the wind power ramp forecast in Portugal. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 6(3), 934-942, IEE Xplore.
20. Lia, H., Wang, J., Lu, H., Guo, Z., 2018. Research and application of a combined model based on variable weight for short term wind speed forecasting. *Renewable Energy*, 116, 669-684.
21. Radu, D., Berger, M., Raphael, F., Hardy, S., Fettweis, X., Du, M.L., Ernst, D., 2019. Complementarity assessment of south greenland katabatic flows and west Europe wind regimes. *Energy*, 175, 393-401.





## Çavuşlu (Malatya) Granitlerinin Demiryolu Balastı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Esma KAHRAMAN<sup>1,a</sup>, Ali Can ÖZDEMİR<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Adana

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0002-4326-7202; <sup>b</sup>ORCID: 0000-0003-3064-4264

### Makale Bilgileri

Geliş : 16.08.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560212

### Sorumlu Yazar

Ali Can ÖZDEMİR

acozdemir@cu.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Balast

Demiryolu

Fiziko-mekanik özellikler

Granit

**Atf şekli:** KAHRAMAN, E., ÖZDEMİR, A.C., (2024). Çavuşlu (Malatya) Granitlerinin Demiryolu Balastı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 813-820.

### ÖZ

Granitler fiziko-mekanik, kimyasal ve mineralojik yapısından dolayı demiryollarında balast malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Malatya İli Doğanşehir bölgesinde bulunan granitlerin demiryolu balastı olarak kullanımı değerlendirilmiştir. Kayaç numunelerinin Balast Teknik Şartnamesinde belirtilen temel özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca, granit numunesinin mineralojik özellikleri ve kimyasal içerikleri incelenmiştir. Deney numunesinin; Los Angeles parçalanma direnci %13,20; Mikro-Deval aşınma direnci %10,36; Su emme oranı %0,105; Tane yoğunluğu 2,681 g/cm<sup>3</sup>; MgSO<sub>4</sub> donat dayanımı %0,98; Tek eksenli basınç dayanımı 104,68 MPa; Nokta yük dayanımı 6,89 MPa olarak elde edilmiştir. Deney sonuçları Malatya İli Doğanşehir bölgesinde bulunan granitlerin konvansiyonel, hızlı tren ve yüksek hızlı tren hatlarında balast malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Bu granit, proje etüdü devam eden Malatya-Elazığ-Diyarbakır hızlı tren hattında ve mevcut durumdaki demiryolu balast yenilemelerinde kullanılacak alternatif bir malzeme olacaktır.

## Investigation of the Usability of Çavuşlu (Malatya) Granites as Railway Ballast

### Article Info

Received : 16.08.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560212

### Corresponding Author

Ali Can ÖZDEMİR

acozdemir@cu.edu.tr

### Keywords

Ballast

Railway

Physico-mechanical properties

Granite

**How to cite:** KAHRAMAN, E., ÖZDEMİR, A.C., (2024). Çavuşlu (Malatya) Granitlerinin Demiryolu Balastı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 813-820.

### ABSTRACT

Granites are widely used as ballast material in railways due to their physico-mechanical, chemical, and mineralogical properties. This study evaluated the use of granites in the Doğanşehir region of Malatya as railway ballast. The basic properties of the rock samples specified in the Ballast Technical Specifications were determined. Additionally, the granite samples' mineralogical characteristics and chemical content were examined. The test sample; Los Angeles abrasion resistance was 13.20%; Micro-Deval abrasion resistance was 10.36%; magnesium sulfate freeze-thaw durability was 0.98%; Water absorption rate was 0.105%; density was 2.681 g/cm<sup>3</sup>. Uniaxial compressive strength was 104.68 MPa; Point load strength was 6.89 MPa. The experimental results indicate that granites from the Doğanşehir region in Malatya can be effectively used as ballast material in conventional, high-speed, and high-speed railway lines. This granite will be an alternative material that can be used in the Malatya-Elazığ-Diyarbakır high-speed train line, whose project studies are ongoing, and in existing railway ballast renewals.

## 1. GİRİŞ

Demiryolu hattını oluşturan temel bileşenler arasında bulunan balast hem dikey, yanal ve boylamsal gerilimlere direnmekte hem de iyi bir drenaj yolu sağlayan önemli bir bileşendir [1,2]. Balast malzemeleri genellikle madencilik sırasında patlatılan ve istenilen balast parçacıklarını elde etmek için -22.4 mm +63 mm elek aralığında sınıflandırılan sağlam ve sert magmatik veya metamorfik kayalardır [3,4].

Balast numunesi aşağıdaki işlevleri yerine getirmektedir [5-7]

- Traverslerin düşey, boylamsal ve yanal yer değiştirmelere karşı direnci sayesinde trenlerin gidişi için stabil bir destek sağlamaktadır.
- Tren kuvvetlerini alt zemine aktararak gerilimleri azaltmakta ve böylece alt zemindeki gerilimlerin taşıma kapasitesini aşmasını önlemeye yardımcıdır.
- Ray geometrisinin dikey ve yanal yönlerde korunmasını sağlamaktadır.
- Tüm ray yapısının esnekliğinin ve sertliğinin ayarlanmasına yardımcı olmaktadır.
- Yalıtım sağlayarak hattın güç kaynağına müdahalesini önlemektedir.
- Drenajı sağlamakta, gürültü ve titreşimi azaltmaktadır.
- Hat boyunca bitki örtüsü büyümesini baskılamaktadır.

Tüm bu işlevlerinden dolayı balast malzemesi hat güvenliği açısından oldukça önem arz etmektedir. Bu nedenle balast malzemesi seçilirken dayanıklılık, drenaj özelliği, aşınma direnci ve petrografik ve mineralojik özellikleri dikkate alınmalıdır.

Ülkemizde kullanılan balast malzemelerinin özellikleri pek çok araştırmacı tarafından irdelenmiştir. Kozak [8] Kütahya-Yenikaracaören bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanılabilirliğini araştırmış ve yaptığı deneysel çalışmaların sonucunda bölgedeki bazaltların yüksek hızlı, hızlı ve konvansiyonel demiryolu hatlarında kullanılabilmesine işaret etmiştir. Yazar diğer bir çalışmada da Kütahya-Işıkara bazaltlarının balast olarak kullanılabilir olduğunu belirtmiştir [9]. Kahraman ve Yapıcı [10] Ceyhan-Kurtpınar bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanımı değerlendirmişler ve konvansiyonel hatlarda demiryolu balastı olarak kullanılabilmesini belirtmişlerdir.

Ülkemizde demiryolu taşımacılığına olan talebin hızla artmasıyla birlikte yeni demiryolu hatlarının inşası ve mevcut hatların uygun şekilde bakımının yapılması gerekmektedir. Balast ihtiyacı nakliye kaynaklı zaman ve maliyeti azaltmak amacıyla genellikle yerel taş ocaklarından talep edilmektedir.

Bu çalışma kapsamında; Malatya Doğanşehir granitlerinin fiziksel, kimyasal ve petrografik özellikleri belirlenerek deney sonuçlarının "TCDD Balast Teknik Şartnamesi"nde belirtilen kriterler ile karşılaştırılacaktır [11]. Bölge Malatya-Elazığ-Diyarbakır arasında etüt çalışmaları devam eden hızlı tren hattına yakın olması sebebiyle çalışma sahasından balast malzemesi teminine olanak sağlanmış olacaktır. Hali hazırda bölgede bulunan konvansiyonel hatlarında gerçekleştirilecek bakım ve balast değişim çalışmalarında da bölgeden elde edilen granit numuneleri kullanılabilir olacaktır.

## 2. ÇALIŞMA SAHASI HAKKINDA BİLGİLER

### 2.1. Çalışma Sahasının Konumu

Bu çalışma kapsamında, Malatya İli, Doğanşehir İlçesi sınırları içerisinde Çavuşlu Mahallesi Mevkii'nden bulunan granit ocağından elde edilen numuneler üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 1).

Çalışma alanı Malatya'ya 51 km, Doğanşehir ilçesine 10 km, Polat Mahallesi 4,5 km, Fındık Mahallesi 3 km ve Çavuşlu Mahallesi 900 m ve uzaklıktadır.



Şekil 1. Çalışma sahasına ait yer bulduru haritası

## 2.2. Çalışma Sahası Jeolojisi

Granit işletmesinin bulunduğu etüt alanı ve yakın çevresinde jeolojik birimler tabanda Permo-Triyas yaşlı Malatya Metamorfikleri ile başlamaktadır. Çalışma sahasının genelleştirilmiş stratigrafi kesiti Şekil 2'de verilmiştir. Malatya metamorfikleri allokton kütle konumundadır. Bölgede, kronostratigrafik olarak yaşlı birim Metamorfikler olmasına rağmen çalışma alanında en üst seviyelerde yer almaktadır [12,13].

Ü Sistem	Sistem	Formasyon	Simgesi	Litoloji	Açıklamalar
SENOZÖK	KUVATERNER	Genel Çökeller	Çöl-Öym	Alüvyon ve yamaç, molozlar	Uyumsuzluk
PALEOZÖK-MEZOZÖK	PERMO-TRİYAS	Malatya Metamorfikleri	Pilirm	Kristalize kireçtaşları	Tektonik dokanak (binderme fayı)
MEZOZÖK	ÜST KRETASE	Polat Granotoyidi	Kp	Granodiyorit, tonalit gibi derinlik kayaları ile burulan kesen aplit ve lamprofir damarları	

Şekil 2. Çalışma sahasına ait genelleştirilmiş stratigrafi kesiti [14]

Metamorfikler inceleme alanında kristalize kireçtaşları ile karakterize olup alt dokunağında Üst Kretase yaşlı Polat Granotoyidi yer alır. Polat Granotoyidi ile Malatya Metamorfikleri'nin kontağı yer yer tektonik yer yerde sokulum şeklindedir. Tektonik dokanak yaklaşık KD-GB doğrultuludur. İki birim arasındaki tektonik dokanaklarda deformasyon gelişirken sokulum şeklindeki dokanaklarda skarn zonları meydana gelmiştir. Granit ocağında işletilen cevher Malatya Metamorfikleri altında yer alan Polat Granotoyidi'ne ait granitlerdir. Polat Granotoyidi inceleme alanında ağırlıklı granit, granodiyoritler ile bunları kesen lamprofir, aplit dayıkları ile karakteristiktir. Tüm bu birimler üzerine uyumsuz olarak Kuvaterner yaşlı çökeller uyumsuz örtü birim olarak gelir. Kuvaterner yaşlı çökeller yamaçlarda yamaç molozu şeklinde, vadi ve dere içlerinde ise alüvyal çökeller ile temsil olunup genel olarak tutturulmamış-gevşek tutturulmuş kum-çakıl-kil depolanmaları şeklinde oluşum göstermiştir [12,13].

### 2.2.1. Bölgesel Jeoloji

Malatya İli ve çevresinde görülen birimler, yaşlıdan gence doğru; Paleozoyik yaşlı çeşitli şist ve granitlerden oluşan Bitlis-Pütürge metamorfikleri, Karbonifer-Triyas yaşlı şist ve granitlerden oluşan Malatya metamorfikleri, Koniasiyen-Santoniyen yaşlı gabro, granit, granodiyorit, diyorit, monzonit ve tonaliten oluşan Baskil mağmatitleri, Senoniyen yaşlı tabanda çakıltaşı ve üzerine uyumlu olarak gelen killi kireçtaşı- marn aralanmasından oluşan Gündüzbey formasyonu, Paleosen yaşlı çakıltaşı, yumru kireçtaşı ve çamurtaşlarından oluşan Bent formasyonu, Eosen yaşlı tabanda çakıltaşı ve üzerine uyumlu olarak gelen kumtaşı- marn- killi kireçtaşı aralanmasından oluşan Yeşilyurt formasyonu, Orta Eosen yaşlı kalkışit, çamurtaşı, spilit ve diyabazlardan oluşan Maden karmaşığı, Alt Miyosen yaşlı Akyar kireçtaşı, Orta

Miyosen-Pliyosen yaşlı kiltası, silttaşı, marn, çamurtaşı, kumtaşı ve çakıltasından oluşan Sultansuyu formasyonu, kaba taneli çakıltası ve çamurtaşı ardalanmasından oluşan Beylerderesi formasyonu, Kuvaterner yaşlı yamaç molozu ve alüvyon yer alır [12,13].

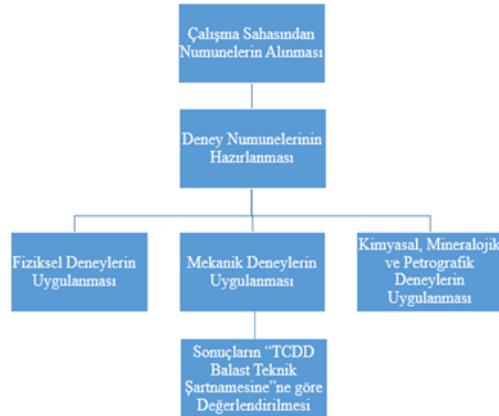
### 3. YÖNTEM

Balast olarak kullanılacak malzemelerde istenen özellikler "TCDD Yeni Balast Teknik Şartnamesi"nde belirtilmiştir [11]. Fiziksel özellikler için yapılan testler arasında Los Angeles parçalanma direnci, Mikro-Deval aşınma direnci, su emme oranı, tane yoğunluğu ve MgSO<sub>4</sub> dona dayanıklılık direnci bulunmaktadır. Mekanik özellikler ise tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yük dayanımıdır. Fiziko-mekanik deneylerin uygulanmasında kullanılan standartlar Çizelge 1'de belirtilmiştir.

Çizelge 1. Balast numunelerine uygulanan fiziko-mekanik deneyler ve kullanılan standartlar

Deney	Standart
Mikro-Deval aşınma direnci	TS EN 1097-1 [15]
Los Angeles parçalanma direnci	TS EN 1097-2 [16]
Su emme oranı	TS EN 1097-6 [17]
Tane yoğunluğu	TS EN 1097-6 [17]
MgSO <sub>4</sub> dona dayanım	TS EN 1367-2 [18]
Tek eksenli basınç dayanımı	TS EN 1926 [19]
Nokta yük dayanımı	TS 699 [20]

Kayaç numunesinin petrografik analizleri TS EN 12407 [21], TS EN 12440 [22] ve TS EN 12670 [23] standartlarına göre değerlendirilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen uygulamaların akış şeması Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Çalışmanın genel akış şeması

Çalışma sahasını temsil etmesi açısından sahanın farklı bölgelerinden kayaç numuneleri alınmıştır. Bu numuneler laboratuvar ortamına getirilmiş ve deney standartlarında belirtilen özelliklere göre numune hazırlama işlemi uygulanmıştır. Deney numuneleri küp şeklinde boyutlandırılmış ve kırma eleme işlemi yapılarak sınıflandırılmıştır (Şekil 4). Bu şekilde numuneler fiziko-mekanik deneylerin uygulanması için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4. Çalışma sahasından getirilen numunelerin görünümü

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çavuşlu (Malatya) granitlerinden elde edilmiş olan numuneler üzerinde uygulanan deneylerin sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir. Tüm deneyler Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlar hesaplanırken deneyler 5 tekrarlı uygulanmış olup elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır.

**Çizelge 2.** Deneylerden elde edilen sonuçlar

Deney	Sonuç
Los Angeles parçalanma direnci	%13,20 ± 0,42
Mikro-Deval aşınma direnci	%10,36 ± 0,21
Su emme oranı	%0,105 ± 0,08
Tane yoğunluğu	2,681± 0,012 g/cm <sup>3</sup>
MgSO <sub>4</sub> dona dayanım	%0,98 ± 0,15
Tek eksenli basınç dayanımı	104,68 ± 1,605 MPa
Nokta yük dayanımı	6,89 ± 1,342 MPa

Deneylerden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi “TCDD Balast Teknik Şartnamesi”nde belirtilen sınır değerlere göre yapılmıştır [11]. Bu şartnamede hızlı (HT)-yüksek hızlı tren hatları (YHT) ve Konvansiyonel hatlar (KT) için belirtilen sınır değerler Çizelge 3’de görülmektedir.

**Çizelge 3.** Hızlı (HT)-yüksek hızlı tren hatları (YHT) ve Konvansiyonel hatlar (KT) için belirtilen sınır değerler

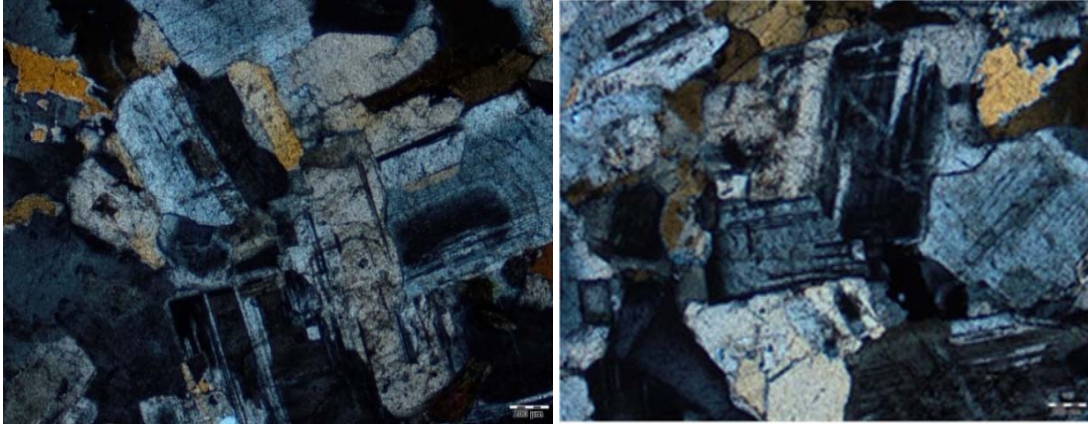
Deney	Sınır Değer	
	HT-YHT	KT
Los Angeles parçalanma direnci	≤ %14	≤ %20
Mikro-Deval aşınma direnci	≤ %12	≤ %14
Su emme oranı	≤ %1,5	≤ %2
Tane yoğunluğu	≥ 2,60 g/cm <sup>3</sup>	≥ 2,50 g/cm <sup>3</sup>
MgSO <sub>4</sub> dona dayanım	≤ %3	≤ %5
Tek eksenli basınç dayanımı	≥ 100 MPa	≥ 50 MPa
Nokta yük dayanımı	≥ 5 MPa	≥ 2.5 MPa

Petrografik tanımlama, TS EN 12407 [21], TS EN 12440 [22] ve TS EN 12670 [23] standartlarına göre alınan örnekler üzerinde görsel, lup, zoomlu steoro mikroskop ile incelemeler yapılmıştır. Örneklerden hazırlanan ince kesitler polarizan mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, kayacı oluşturan mineraller, kayacın yapısal ve dokusal özellikleri, alterasyonun varlığı ve çatlak kırık sistemleri incelenerek kayaç isimlendirilmiştir.

Makroskopik inceleme çıplak göz, lup ve zoomlu steoro mikroskop ile yapılmıştır. İnceleme neticesinde, kayacın metamorfik oluşumlu olduğu gözlenmiştir. Seyreltilmiş hidroklorik asit ile muamele edildiğinde köpürmemektedir. İncelenen örnek gri, siyah ve beyaz renk dağılımına sahip olup, boşluk oranı düşük ve asitlere karşı dayanıklıdır.

Mikroskopik inceleme hazırlanan ince kesitler üzerinde polarizan mikroskop (Olympus BH-2) kullanılarak yapılmıştır. İncelemelerde ana kayaç mineralinin feldspat olduğu ve kesitte gözlenen feldspatların fenokristalen yapıda şekilli ve yarı özşekilli olduğu görülmüştür (Şekil 5).





Şekil 5. Numunenin ince kesitlerine ait mikroskop görüntüleri (çift nikol)

Kesit bünyesinde feldspatların bir kısmı zonlu yapıda polisentetik ikizlenme göstermektedir. Kesit içerisinde ferromagnezyen mineraller özşekilsiz olarak gözlenmiştir. Kesitte boşluk miktarı oldukça azdır. İncelenen örnek; granit ailesinde granitoid bileşimli bir derinlik kayacıdır.

Ayrıca, deney numunesinin kimyasal analizi gerçekleştirilmiştir. Bu deney sırasında numunenin kimyasal içeriği X-Ray Fluorescence (XRF) yöntemi ile belirlenmiştir. Deney numunesinin kimyasal içeriği ve kızdırma kaybı (K.K.) Çizelge 4’te verilmiştir.

Çizelge 4. Numunenin kimyasal içeriği (XRF)

Oksit	%
SiO <sub>2</sub>	68,12
CaO	6,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,62
MgO	3,54
K <sub>2</sub> O	3,20
TiO <sub>2</sub>	1,26
K.K.	0,92

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Çavuşlu (Malatya) granitlerinin fiziko-mekanik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, çalışma sahasındaki kayaçların balast malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda; çalışma sahasından elde edilen numunelere Los Angeles parçalanma direnci, mikro-deval aşınma direnci, su emme oranı, tane yoğunluğu, MgSO<sub>4</sub> dona dayanıklılık, tek eksenli basınç dayanımı ve nokta yük dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca, aynı numunelerin petrografik ve kimyasal analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar TCDD Balast Teknik Şartnamesi’nde hem hızlı-yüksek hızlı tren hatları hem de konvansiyonel hatlar için belirtilen sınır değerler ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3’de belirtilen sınır değerler referans olarak alındığında; deney numunelerinden elde edilen sonuçların tamamının ilgili standartta belirtilen sınır değerleri karşıladığı anlaşılmaktadır. Sadece, hızlı – yüksek hızlı tren hatları için Los Angeles aşınma kaybı ve tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin sınır değerlere yakın olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak; Çavuşlu (Malatya) granitlerinin hem hızlı-yüksek hızlı tren hem de konvansiyonel tren hatları için balast malzemesi olarak kullanılabilmesi tespit edilmiştir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Selig, E.T., Waters, J.M., 1994. Track geotechnology and substructure management. Thomas Telford Publications, London, 446.
2. Hussain, A., Hussaini, S.K.K., 2022. Use of steel slag as railway ballast: A review. *Transportation Geotechnics*, (35), 100779.
3. Guo, Y., Xie, J., Fan, Z., Markine, V., Connolly, D.P., Jing, G., 2022. Railway ballast material selection and evaluation: A review. *Construction and Building Materials*, 344, 128218.
4. Kozak, M., Kozak, Ş., 2012. Enerji depolama yöntemleri. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 4(2), 17-29.
5. Indraratna, B., Salim, W., Rujikiatkamjorn, C., 2011. *Advanced rail geotechnology–ballasted track*. CRC Press.
6. Sadeghi, J.M., Zakeri, J.A., Najari, M.E.M., 2016. Developing track ballast characteristic guideline in order to evaluate its performance. *International Journal of Railway*, 9(2), 27-35.
7. Kuttelwascher, C., 2012. Track ballast in Austria: Part 3. *Rail Infrastructure*.
8. Kozak, M., 2024. Yenikaracaören (Kütahya) bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanılabilirliği. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 14(2), 944-952.
9. Kozak, M., 2024. Işıkkara (Kütahya) bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanılabilirliği. *Demiryolu Mühendisliği*, 20, 25-30.
10. Kahraman, E., Yapıcı, N., 2022. Kurtpınar (Ceyhan) bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanımının değerlendirilmesi. *Demiryolu Mühendisliği*, 16, 14-22.
11. TCDD Balast Teknik Şartnamesi, 2020. Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Devlet Demir Yolları İşletmesi Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara.
12. Gözübol, A.M., Önal, M., 1986. Çat Barajı isale tünelinin mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği incelemesi: Malatya-Çelikhan alanının jeolojisi. *Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, TBAG-647 Projesi*, İstanbul.
13. Önal, A., 1995. Polat-Begre (Doğanşehir) çevresindeki magmatik kayaların petrografik ve petrolojik özellikleri. *Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ*, 159.
14. Nihai Çed Raporu, 2022. Kaya Granit Doğaltaş ve Mermer İşletmeleri Sanayi Ticaret Limited Şirketi Kapasite Artışı, Kırma Eleme Tesisi, Yıkama Eleme Tesisi, Doğaltaş Kesme ve İşleme Tesisi İlavesi, Biomad Mühendislik San. ve Tic. Ltd. Şti., Ankara, 975.
15. TS EN 1097-1, 2011. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-bölüm 1: Aşınmaya karşı direncin tayini (mikro- deval), Ankara.
16. TS EN 1097-2, 2020. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini için metotlar, Ankara.
17. TS EN 1097-6, 2013. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini, Ankara.
18. TS EN 1367-2, 2011. Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler-bölüm 2: Magnezyum sülfat deneyi, Ankara.
19. TS EN 1926, 2007. Doğal taşlar-deney metotları-basınç dayanımı tayini, Ankara.
20. TS 699/T1, 2016. Doğal yapı taşları-inceleme ve laboratuvar deney yöntemleri, Ankara.
21. TS EN 12407, 2019. Doğal taşlar-deney yöntemleri-petrografik inceleme, Ankara.
22. TS EN 12440, 2017. Doğal taşlar-isimlendirme kriterleri, Ankara.
23. TS EN 12670, 2019. Doğal taşlar-doğal taşlar-terimler ve tarifler, Ankara.



## Life Cycle Assessment (LCA) of Single Jersey Knitted Fabrics Containing Recycled Cotton Fiber and Fabric Performance

Füsun DOBA KADEM<sup>1,a</sup>, Raziye OZAN<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Textile Engineering, Adana, Türkiye

<sup>2</sup>Çukurova University, Institute of Natural and Applied Sciences, Department of Textile Engineering, Adana, Türkiye

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0002-7764-5910; <sup>b</sup>ORCID: 0000-0003-4070-7679

### Article Info

Received : 07.08.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560224

### Corresponding Author

Füsun DOBA KADEM

fusunkadem01@gmail.com

### Keywords

Recycle fiber

Sustainability

Life cycle assessment

Knitted cotton fabric

**How to cite:** DOBA KADEM, F., OZAN, R., (2024). Life Cycle Assessment (LCA) of Single Jersey Knitted Fabrics Containing Recycled Cotton Fiber and Fabric Performance. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 821-830.

### ABSTRACT

This study investigates the life cycle assesment of single jersey knitted fabrics containing recycled cotton and their some performance properties. In the yarn production stage fibers obtained from waste through mechanical recycling (pre-consumer recycle) were used in blends at 10%, 15%, and 20% to produce knitted fabrics. Some performance properties such as fabric stiffness, air permeability, and dimensional change, which are important in the usage properties of jersey knitted fabrics, were compared. Within the scope of the study, the environmental impact of the use of recycled raw materials was evaluated with LCA. According to the Life Cycle Analysis (LCA) results, the use of recycled cotton with contributions ranging from 10% to 20% instead of 100% original cotton demonstrated significant improvements in resource depletion (fossil fuels), global warming, ozone layer depletion, toxic impact on human life, toxic impact on freshwater life, toxic impact on terrestrial life, and total water usage.

## Ger i Dönüştürülmüş Pamuk Elyafı İçeren Süprem Ö rme Kumaş ların Yaşam Dö ngüsü Değerlendirmesi ve Kumaş Performansı

### Makale Bilgileri

Geliş : 07.08.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560224

### Sorumlu Yazar

Füsun DOBA KADEM

fusunkadem01@gmail.com

### Anahtar Kelimeler

Ger i dönüşüm elyaf

Sürdürülebilirlik

Yaşam dö ngü analizi

Pamuklu örme kumaş

**Atıf şekli:** DOBA KADEM, F., OZAN, R., (2024). Life Cycle Assessment (LCA) of Single Jersey Knitted Fabrics Containing Recycled Cotton Fiber and Fabric Performance. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 821-830.

### ÖZ

Bu çalışmada ger i dönüştürülmüş pamuk içeren süprem örme kumaş ların yaşam dö ngüsü değerlendirmesi yapılmış ve bazı performans özellikleri araştırılmıştır. İplik üretim aşamasında mekanik ger i dönüşüm (tüketici öncesi ger i dönüşüm) yoluyla atıktan elde edilen lifler %10, %15 ve %20 oranlarında karışım halinde kullanılarak örme kumaş lar üretilmiştir. Süprem örme kumaş ların kullanım özelliklerinde önemli olan kumaş sertliği, hava geçirgenliği ve boyut değişimi gibi bazı performans özellikleri karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında ger i dönüştürülmüş hammadde kullanımının çevresel etkisi LCA ile değerlendirilmiştir. Yaşam Dö ngüsü Analizi (LCA) sonuçlarına göre %100 orijinal pamuk yerine %10 ile %20 arasında değişen katkı oranlarına sahip ger i dönüştürülmüş pamuk kullanımı kaynak tükenmesi (fosil yakıtlar), küresel ısınma, ozon tabakasının incilmesi, insan yaşamı üzerindeki toksik etki, tatlı su yaşamı üzerindeki toksik etki, karasal yaşam üzerindeki toksik etki ve toplam su kullanımında önemli iyileştirmeler göstermiştir.

## 1. INTRODUCTION

The textile industry is one of the sectors with great economic value in the world, but it also has a high environmental impact. Unconscious behaviors in resource use around the world significantly affect economic sectors, especially textiles and clothing. Steps such as choosing reusable products, repairing and reusing products, recyclable product design, using recycled materials, repairing and reusing, and renting can be listed as options to be preferred for resource efficiency in the textile and apparel sector.

In this context, recycling, especially in cotton materials as raw materials in textiles and apparel, has recently gained an important place in the sector with different application stages. If the aim is to add value to the product through high-level recycling, using cotton obtained from pre-consumer/post-consumer waste sources instead of producing cotton from scratch not only ensures the sustainable use of natural resources, but also significantly reduces environmental damage by saving energy and water. When it comes to textile fibers such as cotton, recycling becomes increasingly important when the value of such a valuable material is considered, and obtaining products from 100% recycled fibers becomes important over time.

In this study, in a facility where production wastes generated during yarn production stages are recycled by mechanical methods, knitted fabric yarns were obtained by mixing original cotton fiber with recycled fiber at different rates. With the recycled knitting yarns obtained here, single jersey knitted fabrics were produced at different recycling rates and some performance properties in the use of the fabrics were compared with each other.

In addition, the effect of the use of recycled raw materials was evaluated with life cycle analysis (LCA) within the scope of the study. The improvement values (%) obtained with LCA for the use of recycled fiber instead of 100% cotton were determined. Life Cycle Assessment is a scientific analysis method used to use resources more efficiently and reduce the consumption of natural resources in a sector where inputs such as energy, raw materials, chemicals, water, etc. are intensive, such as the textile and apparel sectors. Life Cycle Assessment - LCA (Life Cycle Assessment) Life cycle assessment is a scientific analysis method used worldwide, defined and standardized in detail in the ISO 14040 series. It is a tool used to calculate the environmental impacts of a product during the stages of obtaining, producing, transporting, using and disposing of its raw materials (throughout its entire life cycle), to identify problematic points in production and to get to the source of problems. Many environmental impacts can be presented with numerical data using computer software specifically prepared for the subject.

## 2. LITERATURE

Gün et al. [1] examined the dimensional and physical properties of socks produced from recycled fibers. While the effect of fiber type on air permeability was found to be significant, no significant difference was observed in burst strength between recycled fabrics and original fabrics. Recycled fabrics were found to have lower air permeability and higher pilling tendency. In terms of abrasion resistance, recycled fabrics showed lower mass loss in the evaluation through mass loss, and in terms of color resistance, higher color fastness was observed. Although the quality characteristics of yarns obtained from recycled fibers differ from those of original (virgin) yarns, it has been generally concluded that recycled fabrics can be used comfortably without significant loss of quality.

Doba Kadem [2], in an experimental study on the recycling of cotton waste in the denim sector, compared the strength properties of weft and warp of denim fabric produced by blending recycled cotton in the blend with non-recycled denim fabric. As a result of the study, it was stated that denim fabrics with recycled cotton can be used similarly to non-recycled fabrics.

Wanassi et al. [3], obtained mixed yarns by using fibers obtained after the waste yarn recycling process and mixing these fibers with other fibers. Cotton from Mali, Greece, and Brazil, known for its good length properties, was selected to be mixed with recycled fibers. Mixing ratios were prepared in the form of an experimental plan in different proportions up to 100%. Fiber tests were conducted, and fiber properties were determined, including the flexibility index. When the results were examined, it was seen that the blend made with Mali cotton had the most suitable fiber properties for practical use. Additionally, it was found that these blends could be obtained at a lower cost. It was concluded that the increased proportion of



recycled fibers in the yarn led to an increase in thin places, thick places, neps, and roughness of the blended yarn.

Doba Kadem and Özdemir [4] compared some comfort features of denim fabric produced using recycled cotton fibers after consumer use with the original cotton denim fabric of the same construction. Cotton yarns from the same blend were used in the fabric production. The fibers obtained from the post-consumer recycling process were mixed into the warp yarn blend at a rate of 20%, and 79% cotton fibers were selected as the reference denim blend. Both fabrics underwent the same finishing processes. The air permeability, bending strength, and dimensional change after washing of the denim fabrics were determined according to standards. According to the results, it was found that the recycling process in question could be effectively used in denim production.

Kertmen et al. [5], evaluated the selected properties of supreme fabrics woven with various blends of cotton and waste cotton, interpreting the impact of recycling on performance characteristics. In this study, Ne 20/1 open-end yarns were produced using 100% original cotton, 95% original + 5% recycled cotton, and 90% original cotton + 10% recycled cotton blends. Performance tests such as burst strength and pilling were applied to the fabrics produced using the yarns, along with some comfort tests. It was found that the burst strength of the fabric woven from 100% original cotton was higher than that of the knitted fabric with recycled fiber content. The tests indicated that the yarn structure had little effect on thermal comfort.

Jamshad et al. [6], conducted a study to evaluate spinning wastes and transform them into value-added products using different fiber blends recovered from different yarn wastes and fabric cutting machines. The goal was to produce open-end yarns from 100% recycled materials. Cost calculations showed that the yarn cost obtained from recycled fibers was cheaper than the reference yarns. HVI tests revealed that yarn waste had better fiber length and uniformity compared to fabric waste. Yarns produced from blended yarn waste were found to have less yarn irregularity and better tensile strength compared to fabric waste blends.

Fidan's study investigates the contribution of the use of organic cotton fiber to the environmental impact of denim fabric, instead of conventional cotton fiber. As a result of this LCA study, all environmental impacts of denim fabric decreased with the use of organic cotton. The LCA application was implemented using Simapro 8.5.2 software. A significant reduction in fresh aquatic ecotoxicity of 96% was achieved compared to the use of conventional cotton. Moreover, in terrestrial ecotoxicity and photochemical oxidation potentials, quite remarkable improvements were gathered with 90% and 57%, respectively. [7]

Doba Kadem and Sevgi [8] conducted a study in which waste material generated during the yarn production stages (such as combing waste, carding waste, and other production waste referred to as pre-consumer waste) was mechanically recycled and blended with original cotton fibers in different proportions to obtain recycled fiber. Knitted yarns with recycled content were produced from these recycled blend yarns, and supreme knitted fabrics were manufactured. Although there was an increase in yarn irregularity, especially as the recycling ratio increased, generally, for all the tested properties, supreme knitted fabrics with 10%, 15%, and 20% recycling ratios showed similar values in terms of air permeability, burst strength, and fabric stiffness. Similar studies conducted previously have also observed that the use of recycled fibers in fabric production is acceptable in terms of performance characteristics. It is suggested that increasing the usage ratio of recycled cotton fiber can contribute significantly to raw material resource conservation without compromising product performance.

In the Doba Kadem study, changes in selected performance properties of fabrics woven in plain weave with different weft densities and different raw materials (cotton, linen and cotton/linen blended) weft yarns were examined and the positive contribution of linen fiber to the fabric was revealed in the study. When evaluated in terms of life cycle analysis, fabrics using 5% linen have 2% better resource depletion, 3% better toxic effect on human life and 1% better effect on freshwater life. When 20% linen is used, resource depletion is 9% better, 10% better effect on terrestrial life, 10% better toxic effect on human life and 9% better effect on freshwater life [9].

Zervent Ünal and Baylak [10] conducted a study on pre-consumer yarn production using fibers obtained through the recycling of indigo-dyed waste yarns used as the weft yarn in denim fabric production. In the study, fibers obtained from recycled indigo-dyed yarns were blended with the blend at a ratio of 30%, and yarn production was carried out. The physical properties of the produced yarns were compared with yarns

produced using original cotton fibers of the same number. It was found that the  $U\%$  and  $CV_m$  values of the yarns containing pre-consumer fibers were, on average, 1% higher for all yarn numbers, and the increase in irregularity due to the use of recycled fibers was quite low. As a result of the study, it was determined that fibers obtained through the recycling of indigo-dyed yarns, despite a slight increase in irregularity and a loss in strength, could be reused in denim fabric production, which is an essential part of denim fabric manufacturing.

In another paper, within the framework of increasing contributions to sustainable development goals and reducing the water footprint, the sustainable production potential of a factory producing denim fabrics was studied in association with the sustainable development goals. As a result of the evaluations, it emerged as a more dominant view that the factory's contribution to sustainable development goals should be evaluated according to the total production capacity. The sustainability evaluation made according to the total production capacity determined that the factory contributed approximately 12% to Sustainable Development Goal 12 in the period examined, according to both the life cycle assessment and material input per service method. Although there is inconsistency in the life cycle assessment and material input per service method results, it was predicted that there are economic and environmental gain potentials related to Sustainable Development Goals 13, 14, and 15, and the sustainable production potential of the factory can be increased [11].

In Sabir et al.'s study, the life cycle analysis (LCA) of finished fabrics produced as denim and sportswear products from soy protein fiber, an innovative natural fiber, was examined. In the study, 8 different blends consisting of cotton, soy fiber and cotton/soy blend yarns were used in the weft of woven fabrics selected from the denim and sportswear product groups. The soy fiber ratio in the blend was selected as 10%, 30% and 50%, and the other blend material was cotton. Weft yarns were produced in two different yarn counts, Ne10 and Ne16. The warp yarn is the same in all fabrics and is 100% cotton material. Fabrics produced using these yarns were woven as 8 different fabrics, four of which were denim and four were sportswear. Anti-bacterial activity, color fastness and some fabric performance tests were applied to the sample fabrics. It was observed that the soy fiber content did not negatively affect the fastness and performance of the woven fabrics. All fabric samples in the study were analyzed separately for denim and sportswear lines with the Life Cycle Analysis (LCA) study. The best result in the life cycle analysis study of soybean fiber was obtained in fabrics using 90% cotton-10% soybean fiber yarn in the weft for denim fabric and 50% cotton-50% soybean fiber yarn in sportswear fabric production [12].

Karagöl et al.'s study conducted on denim fabrics were produced using weft yarns obtained from mechanically recycled fibers after consumer use, and the breaking strength, tearing strength, thermal resistance, water vapor permeability, air permeability, and fabric stiffness of these fabrics were determined according to the standards and the results were interpreted. With this study, it was aimed to reveal the importance of more environmentally friendly denim fabric production by increasing the recycled fiber ratio, and the impact of denim fabrics on the life cycle in terms of sustainability was evaluated. A life cycle analysis of the recycled denim fabrics was made using the SimaPro software program, and the environmental effects of the production were also revealed. Within the scope of the study, it was observed that the structural properties of the fabrics produced and the composition of recycled cotton used affect the performance and comfort properties of the fabric. The effect of the cotton recycling rate on the recycled denim fabrics was evaluated by LCA (life cycle analysis). As a result of the LCA evaluation, with the use of cotton with a high percentage of recycling additives instead of conventional cotton, as in the reference fabric, resource depletion (fossil fuels), global warming, depletion of the ozone layer, the toxic effect on human, freshwater and terrestrial life, the total water use, and other categories were observed to undergo a significant improvement [13].

In this study, production wastes called pre-consumer in yarn production stages were recycled by mechanical method and recycled fiber was obtained by mixing with original cotton fiber in different ratios. Single jersey knitted fabrics were produced with the recycled knitting yarns obtained from here at different recycling ratios and some performance properties were compared in the use of fabrics. In addition, the effect of using recycled raw materials was evaluated with LCA within the scope of the study. The improvement values (%) obtained with LCA for the use of recycled fiber instead of 100% cotton were determined.

### 3. MATERIAL AND METHOD

In the study, single jersey knitted fabrics were produced with Ne 20/1 open-end yarns, which are obtained by mixing recycled cotton fiber with original cotton fiber. Knitted fabrics were obtained by mixing the cotton fiber obtained from the recycling process into the pure cotton mixture at the rates of 10% (90% virgin cotton), 15% (85% virgin cotton) and 20% (80% virgin cotton). The properties of the recycled blended yarns used in the study are given in Table 1.

When Table 1 is evaluated in general, it can be said that as the recycling rate increases, yarn evenness and some yarn defects (thin place, thick place, neps) increase, but yarn strength (Rkm) value is not adversely affected.

**Table 1.** The properties of the recycled blended yarns

Properties of yarns	Samples			
	100 % virgin cotton (reference)	10% recycled cotton 90% virgin cotton	15% recycled cotton 85% virgin cotton	20% recycled cotton 80% virgin cotton
Rkm	10,74	10,65	10,57	10,04
% U	10,45	10,49	10,88	11,12
% CVm	13,17	13,21	13,7	14,01
Breaking elongation (%)	3,56	3,59	3,79	3,43
Thin places (-50)	3,2	3,5	6	8
Thick places (+50)	12,5	12	31,5	29
Neps (+280) (sayı/km)	0,46	0,5	6	8
Hairiness (H)	4,75	5	5,31	5,15

Single jersey fabrics were produced on a Pilotelli circular knitting machine (Pus/Fein 32/22 inch). Since the fabrics are knitted fabrics, they were kept in laboratory conditions (at 20° C and 65% relative humidity) for at least 48 hours since there would be a size change after leaving the knitting machine. The tests were carried out in a conditioned laboratory environment in accordance with the standards. In this way, before starting the test measurements, the treatment was done with a rested fabric.

**Table 2.** Structural properties of knitted fabrics

Structural properties	Knitted fabric cotton blend ratio			
	Reference (RS)	10% recycled	15% recycled	20% recycled
Course/cm	17,00	16,40	16,80	16,40
Wale/cm	12,00	11,40	11,00	10,80
Stitch density (wpc*cpc)	204	186,96	184,8	177,12
Loop shape factor (cpc/wpc)	1,41	1,43	1,52	1,51

The structural properties of the knitted fabrics obtained from the yarns were measured in accordance with the standards. The results with the structural properties are given in Table 2. The fabrics were tested before and after home washing.

Loop line and bar count were determined according to TS EN 14971 standard [14], weight (mass per unit area) was determined according to TS 251 [15], fabric thickness was carried out according to TS 7128 EN ISO 5084 [16], air permeability was determined according to TS 391 EN ISO 9237 standard [17], fabric hardness was carried out according to ASTM D 4032-94 standard [18], and dimensional change after washing was performed according to TS EN ISO 5077 standard [19] respectively.

### 4. RESULTS AND DISCUSSION

The fabric weight values of the reference and recycled cotton-added fabrics before and after washing are given in Figure 1, and the fabric thickness results are given in Figure 2. The loop structures of the fabrics approaching each other after washing (gathering of the fabric) caused an increase in grammage and fabric thickness.

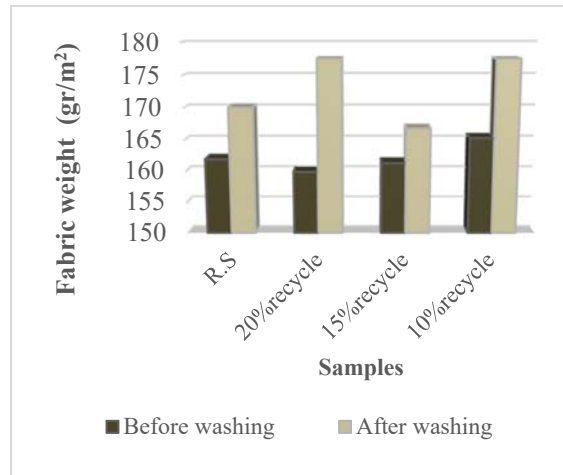


Figure 1. Fabric weight of reference fabric and recycled cotton fabrics

Spirality, which is determined as the deviation value of the angle between the loop row and the loop column from 90 degrees, is an undesirable situation in the fabric and the maximum acceptable value in knitted fabrics is 5 [8]. Figure 3 shows that the spirality before and after washing is within the acceptable limit.

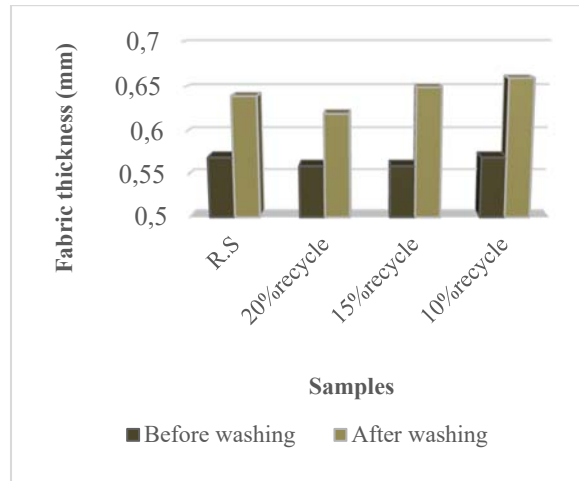


Figure 2. Fabric thickness of reference fabric and recycled cotton fabrics

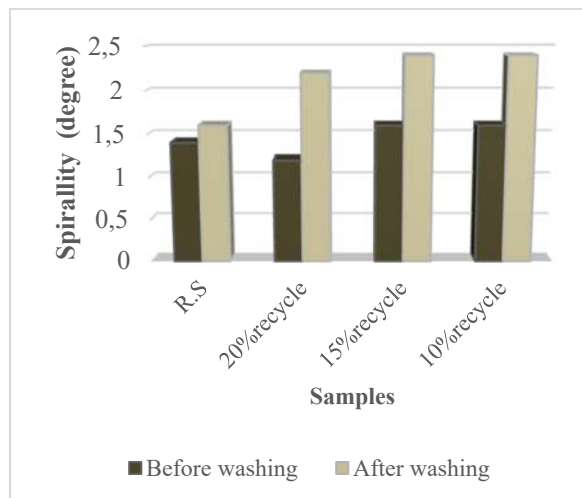
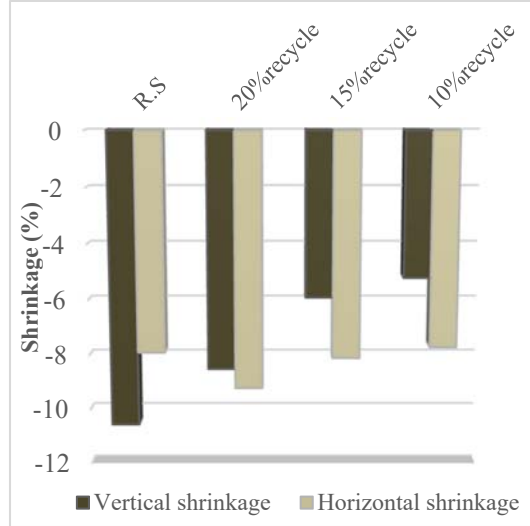


Figure 3. Fabric spirality of reference fabric and recycled cotton fabrics

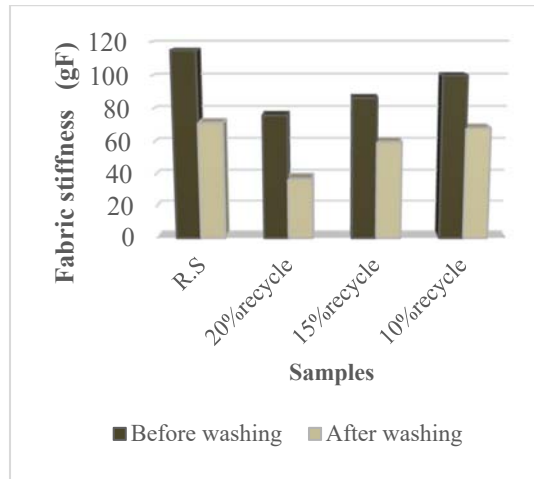
In addition to the difference in the recycling rates of knitted fabrics, it was observed that the spirality results were close to each other due to the similarity of features such as knitting structure (serial jersey knitting), yarn twist (the twist of the fabrics is 680 t/m), loop density and rod density effective in warp rotation. In order for this value not to be high, knitting in balanced knitting structures (e.g. 1x1 rib) is generally preferred.

Figure 4 shows the dimensional changes in the transverse and longitudinal directions of knitted fabrics after washing.



**Figure 4.** Fabric shrinkage of reference fabric and recycled cotton fabrics

When the test results were evaluated as fabric stiffness (Figure 5), when three fabrics with recycled cotton additives were evaluated together, the handle of the knitted fabric with 10% recycled cotton additive was determined to be harder than the others. As the recycling rate increased, it was observed that the handle of the fabric was softer both before and after washing. The fact that the frequency of the 10% recycled knitted fabric was higher than the others and that it was thicker caused the stiffness value of this fabric, which has a higher grammage, to be higher. This is an expected situation.



**Figure 5.** Fabric stiffness of reference fabric and recycled cotton fabrics

It is seen in Figure 6 that air permeability in knitted fabrics is higher in 100% cotton fabric (R.S.). Considering the fact that the effect of fiber type on air permeability is important, since the fabrics tested in the study were cotton and recycled cotton additives, since the fiber type was the same, no negative difference was observed between the fabrics in terms of the effect of recycled cotton additive on air permeability.



However, it is thought that recycled fabrics have a more porous structure than the original fabric and this situation has a slightly increasing effect on air permeability, especially after washing.

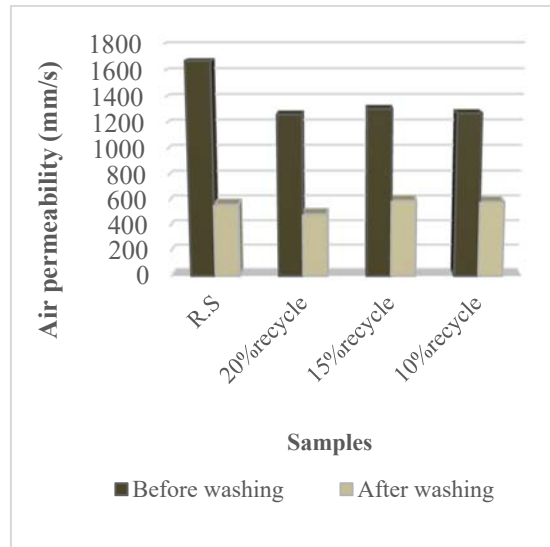


Figure 6. Fabric air permeability of reference fabric and recycled cotton fabrics

**LCA Evaluation Results:**

Simapro software is used when performing LCA to determine, report and control the environmental impacts of a product or service at each stage of its life cycle, from raw materials to the disposal of waste generated as a result of production. All production inventories were collected in order to enter data in the life cycle analysis. As a result of inventory analysis, a list was categorized based on environment (air, water, soil) or process emerges. Accordingly, the environmental impacts calculated in the life cycle assessment were determined and interpreted for the reference suprem fabric and recycled cottonadded suprem fabric. Life cycle analysis (LCA) of the suprem fabrics obtained was made with SimaPro software (2018, vers. 8.5.2.2.), and as a result of the LCA evaluation, the effect of the use of cotton with a high percentage of recycling additives instead of the original cotton, as in the reference fabric, on resource depletion (fossil fuels), global warming, depletion of the ozone layer, the toxic effect on human, freshwater, and terrestrial life, total water use and other categories was revealed (Table 3).

Table 3. Comparison of LCA Results for single jersey fabrics [20]

Impact category	Improvement (%) of LCA results		
	80% cotton +20% recycled cotton	%85 cotton +%15 recycled cotton	%90 cotton +%10 recycled cotton
Abiotic depletion (kg Sb eq)	14,92	11,19	7,46
Abiotic depletion (fossil fuels) (MJ)	1,10	0,83	0,55
Global warming (GWP100a) (kg CO2 eq)	2,56	1,92	1,28
Ozone layer depletion (ODP) (kg CFC-11 eq)	6,93	5,19	3,46
Human toxicity (kg 1,4-DB eq)	4,18	3,13	2,09
Freshwater toxicity (kg 1,4-DB eq)	17,6	13,2	8,8
Terrestrial ecotoxicity (kg 1,4-DB eq)	19,8	14,85	9,90
Total Water Use	13,85	10,39	6,92

According to the Life Cycle Analysis (LCA) results, the use of recycled cotton with contributions ranging from 10% to 20% instead of 100% original cotton demonstrated significant improvements in resource depletion (fossil fuels), global warming, ozone layer depletion, toxic impact on human life, toxic impact on freshwater life, toxic impact on terrestrial life, and total water usage, as shown in Table 3. In the life cycle analysis, it was observed that the use of pre-consumer recycled yarn in fabrics produced with 20% recycled fiber resulted in a 14.92% improvement in resource depletion, 2.56% in global warming, 6.93% in ozone layer depletion, 17.6% in toxic impact on freshwater life, 19.8% in toxic impact on terrestrial life, and 13.85% in total water usage.

## 5. CONCLUSION

As is known, the recycling process of cotton begins with appropriate classification. At this stage, pre-consumption wastes within the enterprise and post-consumption wastes outside the enterprise can be used. Pre-consumption wastes are formed during yarn production, weaving, knitting, finishing, sewing or quality control stages. A classification is made according to the quality and color of the incoming wastes. In this classification, different criteria such as the structure of the waste (yarn count, production method, fabric weight, etc.), raw material, size and color are used. The quality of the fibers obtained as a result of the recycling process is closely related to the properties of the waste material [21]. There are different results in the literature on how the type and ratio of raw material for recycled cotton fiber is reflected in the recycled fiber-added fabric.

In this study, it was planned to evaluate the usability of single jersey knitted fabrics produced from mechanically recycled raw materials in apparel production in terms of fabric performance properties. In the study, the knit structure widely preferred in apparel fabrics was selected. These fabrics were produced under controlled operating conditions and subjected to certain tests according to standards and the results (fabric shrinkage, spirallity, fabric stiffness and air permeability) were evaluated. When the obtained test results were compared with the reference fabrics, it was seen that increasing the recycling rate did not significantly reduce the fabric quality in terms of performance properties. In addition, LCA evaluation was made and the obtained results showed that the use of recycled cotton containing additives provided significant improvements compared to the use of 100% original cotton in terms of resource depletion (fossil fuels), global warming, ozone layer depletion, toxic effects on human life, toxic effects on freshwater life, toxic effects on terrestrial life and total water use.

## 6. REFERENCES

1. Gün, A.D., Aktürk, H.N., Macit, A.S, Alan, G., 2014. Dimensional and physical properties of socks made from reclaimed fibre. *J. Text. Inst.*, 105(10), 1108-1117.
2. Doba Kadem, F., 2016. A sustainable approach: a study on recycling of cotton waste in denim industry. 12th National Chemical Engineering Congress, (UKMK 2016), August 23-26, İzmir.
3. Wanassi, B., Mohamed, B.H., Azouz, B., 2018. Industrial cotton waste: recycling, reclaimed fiber behavior and quality prediction of its blend. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 28(1), 14-20.
4. Doba Kadem, F., Özdemir, Ş., 2020. A study on selected comfort properties of post-consumer recycled denim fabrics. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(2), 379-388.
5. Kertmen, M., Doba Kadem, F., Karagöl, H., 2021. A study on classified quality characteristics of post-consumer recycled cotton knitted fabrics. *XVth International Izmir Textile & Apparel Symposium (IITAS 2021)*, 216-223, October 26-27, İzmir.
6. Jamshaid, H., Hussain, U., Mishra, R., Tichy, M., Muller, M., 2021. Turning textile waste into valuable yarn. *Cleaner Engineering and Technology*, (5), 100341.
7. Fidan, F.S., Aydoğan, E.K., Uzal, N., 2021. A comparative life cycle assessment of conventional and organic cotton in denim fabric. *8th International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Thessaloniki, Yunanistan*, 23 - 26 Haziran 2021, 1-2.
8. Doba Kadem, F., Sevgi, R., 2022. Determining the effect on performance characteristics of recycled cotton fiber ratio in single jersey knitted fabrics. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(3), 609-616.
9. Doba Kadem, F., 2022. Evaluation of selected performance properties of cotton/linen blended woven fabrics. *Proceedings of the 8th International Congress on Engineering and Technology Management*, 44-49, İstanbul.

10. Zervent Ünal, B., Baylak, F., 2022. Effect of recycled fibers from indigo dyed yarns on yarn performance. *International Refereed Journal of Engineering and Sciences*, 18, 1-13.
11. Sarı, B., Zarifi, F., Alhasan, M., Güney, H., Türkeş, S., Sırlıbaş, S., Civan Yiğit, D., Kılınççeker, G., Şahin, B., Keskinan, O., 2023. Determining the contributions in a denim fabric production for sustainable development goals: life cycle assessment and material input approaches. *Sustainability*, 15, 5315.
12. Sabır, E.C., Sırlıbaş, S., Dönmez Uzun, İ., Civan Yiğit, D., 2023. Life cycle analysis (LCA) of finished denim and sportswear fabrics containing innovative soy fiber. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(4), 887-898.
13. Karagöl, H., Doba Kadem, F., Olucak, H.İ., Kertmen, M., Özdemir, Ş., 2024. Sustainability approach of recycled denim fabrics with a life cycle assessment. *Fibres & Textiles in Eastern Europe, FTEE* 32(2), 57-63.
14. TS EN 14971, 2020. Loop line and bar count.
15. TS 251, 1991. Mass per unit area.
16. TS 7128 EN ISO 5084, 1998. Fabric thickness.
17. TS 391 EN ISO 9237, 1999. Air permeability.
18. ASTM D 4032-94, 1994. Stiffness of fabric by the circular bend procedure ASTM international. West Conshohocken, PA.
19. TS EN ISO 5077, 2012. Dimensional change after washing.
20. Ozan, R., 2023. Investigation the performance of knitted fabrics made from recycled cotton contributed materials. MSc Thesis, Çukurova University, Institute of Natural and Applied Sciences, Department of Textile Engineering, 63, Adana.
21. Uyanık, S., Parlakyiğit, P., Ovalı, S., 2022. Closed-loop recycled yarn production from yarn wastes and investigation of their physical properties within the scope of sustainability. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(4), 1087-1101.

## Patlatma Sonucu Meydana Gelen Hava Şoku ve Partikül Madde Yayılımı Arasındaki İlişkinin Araştırılması

Ülkü KALAYCI ŞAHİNOĞLU<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup>*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul*

<sup>a</sup>*ORCID: 0000-0002-2375-2550*

### Makale Bilgileri

Geliş : 02.09.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560475

### Sorumlu Yazar

Ülkü Kalaycı ŞAHİNOĞLU

ukalayci@iuc.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Patlatma

Partikül madde

Toz

Hava Şoku

PM Yayılımı

**Atf şekli:** KALAYCI ŞAHİNOĞLU, Ü., (2024). Patlatma Sonucu Meydana Gelen Hava Şoku ve Partikül Madde Yayılımı Arasındaki İlişkinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 831-837.

### ÖZ

Bu makalede, taşocağı faaliyetlerinde gerçekleştirilen patlatma işlemleri sonucu oluşan toplam askıda partikül madde miktarı (TAPM) ile hava şoku arasındaki ilişki incelenmiştir. Araştırma kapsamında, patlatma etkisiyle oluşan partikül madde miktarı ve hava şoku ölçümleri aynı anda aynı ölçüm noktasında yapılmış, elde edilen veriler arasındaki ilişki araştırılmıştır. Sonuç olarak, patlatma kaynaklı çevresel etkilerden hava şoku ile TAPM arasında yüksek korelasyonlu ( $R=0,9$ ) ve anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir. Çalışma, hem patlatma operasyonlarının hava kalitesi üzerindeki etkilerini belirlemekte, hem patlatma ile oluşan toz bulutunun yayılım mesafesini analiz etmekte, hem de ölçümü zahmetli ve maliyetli olan toz miktarının amacıyla hava şoku ve partikül madde miktarı arasındaki ilişkiyi detaylı olarak ortaya koymaktadır.

## Investigation of the Relationship between Air Overpressure and Particulate Matter Dispersion Caused by Blasting

### Article Info

Received : 02.09.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560475

### Corresponding Author

Ülkü Kalaycı ŞAHİNOĞLU

ukalayci@iuc.edu.tr

### Keywords

Blasting

Particulate matter

Dust

Air overpressure

PM Dispersion

**How to cite:** KALAYCI ŞAHİNOĞLU, Ü., (2024). Patlatma Sonucu Meydana Gelen Hava Şoku ve Partikül Madde Yayılımı Arasındaki İlişkinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 831-837.

### ABSTRACT

This article examines the relationship between the total suspended particulate matter (TSPM) generated by blasting operations in quarry activities and air shock. In the research, measurements of particulate matter and air shock caused by blasting were taken simultaneously at the same measurement point, and the relationship between the obtained data was analyzed. As a result, a high correlation ( $R=0,9$ ) and a significant relationship were found between air shock and TSPM, one of the environmental impacts caused by blasting. The study not only determines the effects of blasting operations on air quality but also analyzes the dispersion distance of the dust cloud generated by blasting and provides detailed insights into the relationship between air shock and particulate matter, which are challenging and costly to measure.

## 1. GİRİŞ

Ülkemizde ve dünyada şehirleşmeyle birlikte maden ve taş ocaklarında patlatma işlemleri büyük bir hızla devam etmektedir. Yeraltı ve açık ocak kazılarında patlayıcı madde kullanımı, hem teknik hem de ekonomik nedenlerle kaçınılmaz hale gelmiştir. Kaya formasyonunda açılan bir deliğe patlayıcı yerleştirildiğinde, çok kısa sürede yüksek miktarda gaz açığa çıkar ve bu gaz, delik çevresine yoğun bir basınç uygular. Patlatma işlemi sonucunda, deliğin çevresindeki kaya pülverize olurken, pülverize olmuş zonun dışında kaya parçalanır. Ayrıca, patlatmanın neden olduğu hava şoku (AOP), yüzlerce metre uzaktan ölçülebilen bir basınç değişimine yol açar [1-3].

Patlatmanın başlıca çevresel olumsuzluklarından biri toz oluşumu ve yayılımıdır. Patlatma sırasında oluşan toz, çok küçük parça boyutlarında olup atmosferik koşullara bağlı olarak yüzlerce metre uzağa taşınabilir. Havadaki partikül madde, insan sağlığını etkileyen önemli kirleticilerdendir. Patlatma sonucu oluşan toz, havada bulunmaması gereken maddelerin atmosfere karışmasına yol açar. Tozun 10 mikrondan büyük kısmı dış solunum yollarında kalırken, 10 mikrondan küçük kısmı bronşlarda, 1-2 mikron çapındaki partiküller alveollerde tutulur. 0,1 mikron çapındaki partiküller ise alveoller aracılığıyla kana karışabilir [4-6]. Literatürde partikül madde (PM) ölçüm ve analizinin büyük önemi bilinmekle birlikte, taşocağı faaliyetlerinde toz ölçümü ile ilgili çalışma oldukça sınırlıdır [3].

Patlatma ile atmosfere yayılan bir diğer çevresel etki hava şokudur. Havadaki gaz molekülleri oldukça düzenli bir şekilde dağılmakta ve rastgele hareket halinde bulunmaktadır. Ses dalgalarının yayılım mekanizması, bir molekülden diğer bir moleküle moleküler yer değiştirme sırasında momentum transferi şeklinde açıklanmaktadır. Değişik hava koşulları altında ve kötü patlatma uygulamalarında hava şokları oldukça yüksek mesafelere ulaşabilmektedir.

Ses, basınç ya da desibel (dB) olmak üzere iki farklı birim ile ifade edilebilmektedir. Hava şoku, basınç ya da ses ölçerler kullanılarak ölçülebilmektedir. İnsan kulağıyla duyulabilen yaygın aralıklı genlikler ve frekanslardan dolayı akustik mühendisleri sesi desibel terimi ile ifade etmektedir [7,8].

Partikül maddenin mesafeye bağlı sönümlenmenin yanı sıra, atmosferik koşullardan etkilendiği bilindiği gibi [9,10]; hava şokunun da özellikle sıcaklık, hava basıncı ve rüzgar gibi hava koşullarından etkilendiği bilinmektedir [11]. Bu çalışmada, önce partikül madde yayılımı karakteristiği, sonrasında da hava şoku ile ilişkisi ortaya konmuştur.

Patlatmanın çevresel etkileri irdelenirken, toz oluşumu göz ardı edilen bir husustur. Bu çalışma ile, hem ocak içi çevresel koşullarla ilgili farkındalığın hem de literatürdeki bilgi birikiminin artırılması hedeflenmekte, ayrıca patlatma ile oluşan toz bulutunun yayılım mesafesini analiz etmek, hem de ölçümü zahmetli ve maliyetli olan toz miktarı ile hava şoku arasındaki ilişkiyi detaylı olarak ortaya koymaktır. Literatürde patlatma operasyonlarına yakın mesafede toz örnekleme yapan bir çalışma bulunmamakla birlikte, hava şoku ile toz ölçümünü bir arada yaparak ilişkilendiren bir çalışma da mevcut değildir.

## 2. YÖNTEM

Çalışma kapsamında, sahada titreşim, hava şoku ve toz ölçümleri gerçekleştirilmiş, ayrıca laboratuvar ortamında toz ölçümü yapılan filtrelerin analiziyle PM miktarı belirlenmiştir. Toplanan veriler, istatistiksel analizlere tabi tutulmuş ve sonuçların geçerliliği R katsayısı (korelasyon katsayısı) ile doğrulanmış; veri sayısına bağlı istatistiksel ilişkinin anlamlılığını değerlendirmek için ise t-testi (Eşitlik 1) uygulanmıştır [12].

$$t = \frac{R}{\sqrt{\left(\frac{1-R^2}{n-2}\right)}} \quad (1)$$

Burada, R korelasyon katsayısı, n ise veri sayısıdır.

Ayrıca, titreşim ve hava şokunun tahmin edilebilirliğini ortaya koyan, literatürde yerleşmiş ölçekli mesafe (SD) ilişkisi (Eşitlik 2) kullanılmıştır.

$$SD = R/W^{0.5} \quad (2)$$



Burada R: mesafe, W: gecikme başına şarj miktarıdır. Çalışma sürecine dair detaylı bilgiler, takip eden bölümlerde sunulmuştur.

## 2.1. Çalışma Sahası

İstanbul'da, yerleşim yerlerine yakın bir taş ocağında yerinde inceleme ve gözlemler gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, kaya kütle durumu ve kazı çalışmaları yerinde gözlemlenmiş, patlatma tasarım parametreleri kaydedilmiştir. Atım öncesi ve sırasında atmosferik parametreler izlenmiş, havadaki partikül madde parça boyut dağılımı Cascade Impactor cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, izlenen atımlar sırasında titreşim ve hava şoku değerleri de kayıt altına alınmıştır [3].

## 2.2. Çalışma Sahasının Jeolojisi

İnceleme alanında altta yatan birim şistlerdir. Kırklareli formasyonuna kadar uzanan kireçtaşı ve marn seviyeleri şistler üzerinde yer alır. İnceleme alanında kil, kumlu kil ve çok zayıf dayanımlı kumtaşı araldanması vardır ve bu araldanmanın üzerinde kazılan birim Kırklareli Kireçtaşı'dır. Kırklareli Kireçtaşı resif ortamının çeşitli fasiyeslerini temsil eden karbonatlardan oluşmaktadır. Kireçtaşı, kirli beyaz, açık krem, gri, orta-kalın, çok kalın tabakalı, bol makrofosiller ve bentonik foraminifer içeren kireçtaşlarından oluşur. İçi boş ve gözenekli bir dokuya sahiptir ve yer yer dolomitleşme gösterir. Büyük ve küçük paleokarstik eriyik boşlukları yaygındır. Bol alg içeren kireçtaşı, mercan içeriği ve tanetaşı tipi hakimdir. Çalışma sahasında yer alan kaya birimleri kalsitik yapıda, beyaz ve gri renkli olup, homojen ve altere olmamış bir durumdadır. Üretilen kaya birimleri kalsitik yapıdaki kireçtaşlarıdır [13-15].

## 2.3. Saha Çalışmaları

Saha çalışmaları sırasında, yağışsız günlerde, operasyonu aksatmayacak şekilde uygulanagelen patlatmalar izlenmiştir. İzlenen atımların patlatma paternleri kayıt altına alınmış, atımlar sırasında titreşim ve hava şoku ölçümleri İntantel marka titreşim ve hava şoku ölçer cihazla gerçekleştirilmiş, PM ölçümleri Cascade Impactor cihazı ile alınmıştır. Örneklemeler, 0,45 mikron gözenek boyutuna sahip 82 mm kuvars fiber QMA filtreler kullanılarak yapılmış, filtreler ölçüm öncesi ve sonrası desikatörde 48 saat şartlandırılmıştır. Filtreler hassas terazilerle ağırlıklandırılmıştır. Atımlar esnasında oluşan toz bulutuna ait PM örnekleme yapıldıktan sonra, filtreler laboratuvar ortamında tartılarak, ilk ağırlık ve son ağırlık farkı yöntemiyle toz miktarları tespit edilmiştir.

Yapılan titreşim, hava şoku ve toz ölçümleri her bir atım için aynı istasyonda (aynı konumda) yapılmıştır. Ölçüm istasyonları her bir atım için tozun ve hava şokunun rüzgar etkisiyle hareket edeceği düşüncesinden hareketle, aynı atımdan istasyon notasına doğru rüzgar yönünde seçilmiştir. Belirlenen yöntemlerle yapılan örneklemeleere ait sonuçlar bulgular bölümünde detaylarıyla sunulmaktadır.

## 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Saha çalışmaları bölümünde detayları belirtilen arazi ve laboratuvar çalışmaları sonucunda, sahada gerçekleşen patlatma paternleri, hava şoku ölçümleri ve partikül madde örnekleme sonuçları sınıflandırılmıştır. Atımların anlaşılmasında kolaylık sağlamak üzere atımlar yakın mesafeden uzak mesafeye göre olacak şekilde 1'den 5'e kadar sıralanmıştır. Sahada gerçekleştirilen atımlara ait paternler Çizelge 1'de sunulmaktadır.

**Çizelge 1.** Sahada ölçümleri izlenen atımlara ait paternler [3]

Atım no	Delik boyu (m)	Sıkılama (m)	Dilim kalınlığı (m)	Delikler arası mesafe (m)	Delik sayısı	Gecikme başına şarj (kg)
1	12	3	2,5	3 -3,5	63	51
2	12	3	2,5	3 -3,5	63	51
3	14	3	2,5	3	50	64
4	12	3	3	3	70	51
5	12	3	3	3	70	51

PM ölçümleri, 110-496 m mesafeler arasında, her patlama için farklı mesafelerde alınmıştır. Rüzgar yönü doğrultusunda mesafeye göre sönümlenme oranı tespit edilmiştir. Cascade Impactor cihazı ile toplanan ve

boyutlandırılan partikül maddeler, ultra hassas terazilerle tartılarak sınıflandırılmış ve her boyut aralığındaki partikül madde miktarı kaydedilmiştir. Yapılan bu değerlendirmelerin sonuçları Çizelge 2’de sunulmaktadır.

**Çizelge 2.** Sahada gerçekleştirilen TAPM ölçüm sonuçları [10]

Ölçüm no	Mesafe (m)	TAPM konsantrasyonu (mg/m <sup>3</sup> )
1	110	17,29
2	232	11,14
3	303	8,98
4	364	6,09
5	496	2,17

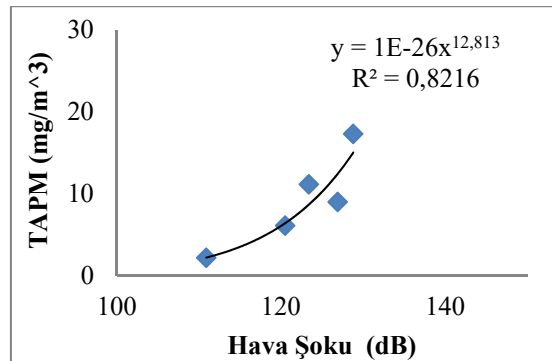
Atım paternleri ve PM sonuçları beraber değerlendirildiğinde, ortalama 3.2 ton patlayıcı kullanıldığında, toplam askıda partikül madde (TAPM) konsantrasyonları sırasıyla 110 m için 17,29 mg/m<sup>3</sup>, 232 m için 11,14 mg/m<sup>3</sup>, 303 m için 8,98 mg/m<sup>3</sup>, 364 m için 6,09 mg/m<sup>3</sup> ve 496 m mesafe için 2,17 mg/m<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir [3].

Çalışma kapsamında yapılan hava şoku ve titreşim ölçümlerine dair elde edilen bulgular Çizelge 3’te sunulmaktadır.

**Çizelge 3.** Çalışma kapsamında yapılan hava şoku ve titreşim ölçümleri [3]

Atım no	Titreşim ölçer modeli	Enine parçacık hızı (mm/sn)	Enine frekans (Hz)	Boyuna parçacık hızı (mm/sn)	Boyuna frekans (Hz)	Düşey parçacık hızı (mm/sn)	Düşey frekans (Hz)	Max. parçacık hızı (PPV)	Hava şoku (dB)
1	Instantel BE10708	0,9	32,0	1,7	25,6	1,1	28,4	1,7	123,4
2	Instantel BE10704	1,1	73,1	1,0	46,6	2,5	64	2,5	120,5
3	Instantel BE10704	,8	42,7	1,3	73,1	2,2	100	2,2	126,9
4	Instantel BE10704	1,3	18,3	0,9	17,7	1,5	19	1,5	110,9
5	Instantel BE10704	8,3	23,3	9,8	73,1	10	73,1	10,0	128,8

Çizelge 2 ve Çizelge 3’de sunulan veriler, aynı anda aynı ölçüm noktasında yapılmış ve çalışma kapsamında birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler arasındaki ilişki araştırılmıştır. Hava şoku ve toz yayılımının aynı ortamda (hava) yayıldığı, dolayısıyla benzer koşullardan etkileneceği düşüncesinden hareketle, toplam askıda partikül madde ile hava şoku arasında Şekil 1’de gösterilen şekilde ilişki bulunmuştur.

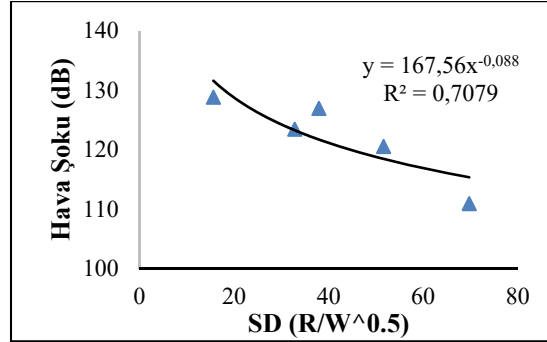


**Şekil 1.** TAPM ile AOP arasındaki istatistiki ilişki

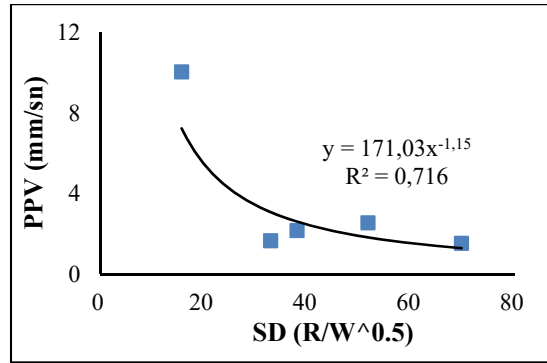
Toplam askıda partikül madde ile hava şoku arasındaki istatistiki ilişki Eşitlik 3 ile ifade edilebilir.

$$TAPM = 1E^{-26} \times AOP^{12,813} (R = 0,91) \quad (3)$$

Patlatmanın toz dışındaki diğer olumsuz çevresel etkileri olan hava şoku ve titreşimlerin, pratik olarak ölçekli mesafeden etkilendiği bilinmektedir [16]. Bu nedenle, çalışma kapsamında SD ile hava şoku arasında ve ölçekli mesafe ile parçacık hızı (PPV) arasındaki ilişki irdelenmiş ve sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 2. AOP ile SD arasındaki ilişki



Şekil 3. PPV ile SD arasındaki ilişki

Şekil 2 ve 3'te sunulan regresyon analizlerine göre, ölçekli mesafe ile hava şoku arasındaki istatistiki ilişki Eşitlik 4'te, ölçekli mesafe ile maksimum parçacık hızı arasındaki istatistiki ilişki Eşitlik 5'teki formüller ile ifade edilebilir.

$$\text{AOP} = 167.56 \times \text{SD}^{-0,088} \quad (R^2 = 0,71) \quad (4)$$

$$\text{PPV} = 171.03 \times \text{SD}^{-1,15} \quad (R^2 = 0,72) \quad (5)$$

Elde edilen Eşitlik 3, 4 ve 5 için veri setlerinin %98, %95 ve %90 güven seviyelerinde anlamlılıklarını test etmek amacıyla, t-testi yapılmıştır (Eşitlik 1). Yapılan t-testi sonuçları, Eşitlik 3, 4 ve 5 için sırasıyla aşağıda sunulmaktadır.

$$t = 5,98 > t_{0,900, n=5} = 1,64 \quad (\text{Eşitlik 3 için})$$

$$t = 9,1 > t_{0,950, n=5} = 1,96 \quad (\text{Eşitlik 4 için})$$

$$t = 11,79 > t_{0,980, n=5} = 2,92 \quad (\text{Eşitlik 5 için})$$

Yukarıda görüldüğü gibi, veriler %90, %95 ve %98 anlamlılık seviyelerine göre anlamlı bulunmuştur. Dolayısıyla partikül maddenin mesafeye bağlı sönümlenmenin yanı sıra, atmosferik koşullardan etkilendiği bilindiği gibi [10] hava şokunun da özellikle sıcaklık, hava basıncı ve rüzgar gibi hava koşullarından etkilendiği bilinmektedir [11]. Bu çalışmada, farklı mesafelerde PM ölçümleri yapılmış, sonrasında da hava şoku ile yüksek korelasyonu ve anlamlı ilişkisi ortaya konmuştur.

Ayrıca, farklı PM fraksiyonlarının da benzer mesafeye göre sönümlenme davranışı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, farklı PM fraksiyonlarının da benzer davranışı göstereceği sonucuna ulaşılabılır. Çalışmada kaydedilen titreşim ölçümleri ile partikül madde yayılımı arasında anlamlı bir ilişkiye ulaşılamamıştır. Bunun nedeni yayılım ortamının farklılığı ve sürekliliği olduğu düşünülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında kentsel sit ocağında patlatma noktasından 110-496 m mesafede PM örneklemeleri yapılmıştır. Araştırma, hava kirliliğinin kontrol altına alınması konusundaki bilgi birikimini artırmak için açık ocak madenciliği operasyonlarının temel çevresel etkilerinden biri olan PM'nin sönümlenme özelliklerini ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmaya göre elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Elde edilen toz, hava şoku ve titreşim değerleri karşılaştırıldığında, hava şoku ile partikül madde sönümlenmesinin benzer nitelikte olduğu, titreşimlerin ise yayılım ortamlarının farklı olmasından dolayı, farklı yayılım karakteristiğine sahip olduğu belirlenmiştir.

Literatürde patlatma operasyonlarına yakın mesafede toz örnekleme yapan bir çalışma bulunmamakla birlikte, bu araştırmadan elde edilen sonuçlar TAPM miktarının inşaat işleri gibi benzer faaliyetler aralığında olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, ilk olarak partikül madde yayılımının karakteristikleri incelenmiş ve ardından bu yayılımın hava şoku ile ilişkisi analiz edilmiştir. Arazi koşullarında partikül madde ölçümü genellikle zahmetli ve zaman alıcı bir süreçtir. Bu nedenle, rutin olarak gerçekleştirilen ve daha uygun maliyetli olan hava şoku ölçümleri kullanılarak partikül madde miktarının tahmin edilmesi, mühendislik uygulamalarında önemli bir kolaylık sağlayacaktır.

Gelecek araştırmalar için, bu çalışmanın bulgularının farklı sahalarda, farklı atmosferik koşullarda edilmesi tavsiye edilmektedir. Farklı çevresel ve operasyonel faktörlerin etkisini değerlendirmek amacıyla daha geniş bir veri seti kullanılması, elde edilen sonuçların genelleştirilebilirliğini artıracaktır. Ayrıca, daha uzun izleme süreleri ve daha çeşitli patlatma parametreleri ile gerçekleştirilecek çalışmalar, hava şoku ve partikül madde yayılımı arasındaki ilişkinin daha derinlemesine anlaşılmasını sağlayabilir.

#### 5. TEŞEKKÜR

Yazar, araştırmayı finansal olarak FHZ-2022-36383 no'lu proje ile destekleyen İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) koordinasyon birimine, ayrıca, katkılarından dolayı Prof. Dr. Ülkü ALVER ŞAHİN'e, Prof. Dr. Ümit ÖZER'e ve Ekrem GÜNDOĞDU'ya teşekkür eder.

#### 6. KAYNAKLAR

1. Özer, U. 2001. Investigation of blasting kinematics and simulation of blasting. PhD Thesis, Çukurova University, Institute of Sciences, 188.
2. Jimeno, E., Jimeno, C., Carcedo, F., 1995. Drilling and blasting of rocks. A.A. Balkema.
3. Kalaycı Şahinoğlu, Ü., 2023. Patlatma sonucu meydana gelen partikül maddelerin yayılım karakteristiğinin araştırılması. Proje Sonuç Raporu, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri, Proje no: FHZ-2022-36383, İstanbul.
4. WHO (World Health Organization), 2020. New WHO global air quality guidelines aim to save millions of lives from air pollution. <https://www.who.int/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>, Erişim tarihi: 25.03.2022.
5. EPA (Environmental Protection Agency), 2021. Particulate matter (PM) basics. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>, Erişim tarihi: 29.03.2022.
6. Sahin, U.A., Harrison, R.M., Alam, M.S., Beddows, D.C.S., Bousiotis, D., Shi, Z., Crilley, L.R., Bloss, W., Brean, J., Khanna, I., Verma, R., 2022. Measurement report: Interpretation of wide range particulate matter size distributions in Delhi!. Atmospheric Chemistry and Physics, 22(8), 5415-5433.
7. Özer, Ü., Karadoğan, A., Özyurt, M.C., Kalaycı Şahinoğlu, Ü., 2012. Denizli ili, Acıpayam ilçesi, Suçatı köyü mevkiinde 201200601 ruhsat numaralı IV (Krom) maden ocağında gerçekleştirilecek patlatmalı kazı işi kapsamında risk analizine dayalı patlatmalı kazı ön tasarımı. Döner Sermaye Projesi.
8. Kılıç, A.M., Kahraman, E., 2016. Patlatmadan kaynaklı çevresel etkilerin incelenmesi ve uygulamaya ilişkin bir örnek. Çukurova Üniversitesi, 8. Uluslararası Kırmataş Sempozyumu, 13-14 Ekim 2016, Kütahya-Türkiye.
9. Onat, B. Stakeeva, B., 2014. Assessment of fine particulate matters in the subway system of Istanbul. Indoor and Built Environment, 23(4), 574-583.

10. Kalaycı Şahinoğlu, Ü., 2023. The assessment of blast-induced dust in an urban site quarry. *Journal of Mining Science*, 59(3), 1-13.
11. Özer, U., Karadoğan, A., Özyurt, M.C., Sertabipoğlu, Z., Şahinoğlu, Ü., 2020. Modelling of blasting-induced air overpressure wave propagation under atmospheric conditions by using ANN model. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(16).
12. Akdeniz, F., (1998). *Probability and statistics*. Baki Kitabevi. ISBN: 975-96039-7-7.
13. Kalaycı, Ü., 2011. Patlatmada harcanan faydalı enerji ile patlatma verimi arasındaki ilişkinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 236.
14. Örgün, Y., Yalçın, T., Bozkurtoğlu, E., Duman, E., Yiğitbaş, E., Kuzu, C., Nasuf, E., Öztürk, A., 2003. İstanbul-Çatalca-Muratbey civarında yapılan madencilik faaliyetlerinin Büyükçekmece göl havzasında yer alan yeraltı yüzey sularında ve çevreye olan etkisi. Kuvaterner Çalışmayı IV. İTÜ Avrasya Yerbilimleri Enstitüsü, İstanbul.
15. Yıldırım, H., 2020. Technical report. The Rectorate of Istanbul Technical University, Disaster Management Coordination Unit, İstanbul.
16. Dowding, C.H., 1996. *Construction vibration*. Prentice Hall Inc., Eaglewood Cliffs, 69.





## Düşük Karbonlu St52 Çeliğinin Elektromanyetik Kalkanlama Potansiyeli: 4900-6000 MHz Frekans Aralığında Performans İncelemesi

Uğur SORGUCU<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup>Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Nevşehir

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0001-9227-1526

### Makale Bilgileri

Geliş : 06.03.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560477

### Sorumlu Yazar

Uğur SORGUCU

sorgucu@nevsehir.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Ekranklama

Kalkanlama

Elektromanyetik interferans

ST52

**Atf şekli:** SORGUCU, U., (2024). Düşük Karbonlu St52 Çeliğinin Elektromanyetik Kalkanlama Potansiyeli: 4900-6000 MHz Frekans Aralığında Performans İncelemesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 839-848.

### ÖZ

Elektromanyetik alanların hayatın her alanında yaygınlaşmasıyla elektromanyetik kalkanlama da önemi artan bir disiplin olmuştur. Mühendislik, fizik ve malzeme bilimi gibi çeşitli disiplinleri bir araya getiren çok disiplinli araştırma yönüyle ve hızla gelişen teknolojilerle birlikte elektromanyetik kalkanlama, elektronik cihazların ve sistemlerin güvenliği için kritik bir öneme sahip olmaya devam etmektedir. Bu makale kapsamında, çok geniş bir kullanım sahasına sahip olan düşük karbonlu ST52 çeliğinin elektromanyetik kalkanlama potansiyeli 4900-6000 MHz frekans aralığında değerlendirilmiştir. ST52 çeliğinin kolay erişilebilir ve birçok emsaline göre fiyat/performans avantajları sebebiyle, elektromanyetik kalkanlama açısından kullanılabilirliği sorusuyla başlayan bu çalışma sonucunda, ST52 çeliğinin 4900-6000 MHz frekans aralığında 40-60 dB arasında etkili bir elektromanyetik kalkanlama performansına sahip olduğu görülmüştür. Bu değerler, ASTM düzenlemeleri tarafından belirlenen 40 dB'lik elektromanyetik kalkanlama kriterini başarıyla karşılamaktadır. Elde edilen bulgular, literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak ST52 çeliğinin geniş bir frekans aralığında güçlü bir performans sergilediğini göstermektedir. ST52 çeliğinin elektromanyetik kalkanlama potansiyeli, özellikle 4900-6000 MHz frekans aralığında diğer malzemelerden ayrılmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen bilgiler, telekomünikasyon, savunma sanayi ve elektronik üretimi gibi sektörlerde güvenilir elektromanyetik kalkanlama çözümleri arayan profesyoneller için önemlidir.

## Low Carbon St52 Steel Electromagnetic Shielding Potential: 4900-6000 MHz Frequency Range Performance Analysis

### Article Info

Received : 06.03.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560477

### Corresponding Author

Uğur SORGUCU

sorgucu@nevsehir.edu.tr

### Keywords

Shielding

Screening

Electromagnetic interference

ST52

**How to cite:** SORGUCU, U., (2024). Düşük Karbonlu St52 Çeliğinin Elektromanyetik Kalkanlama Potansiyeli: 4900-6000 MHz Frekans Aralığında Performans İncelemesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 839-848.

### ABSTRACT

With the widespread use of electromagnetic fields in all areas of life, electromagnetic shielding has become an increasingly important discipline. With the multidisciplinary research direction that brings together various disciplines such as engineering, physics and materials science, and rapidly developing technologies, electromagnetic shielding continues to be of critical importance for the safety of electronic devices and systems. This paper evaluates the electromagnetic shielding potential of low carbon ST52 steel in the frequency range of 4900-6000 MHz. ST52 steel is widely used in various applications. The study aimed to investigate whether ST52 steel is a viable option for electromagnetic shielding, given its accessibility and cost-effectiveness compared to other materials. Results showed that ST52 steel is effective in shielding electromagnetic waves, with a range of 40-60 dB in the 4900-6000 MHz frequency range, meeting the 40 dB criterion set by ASTM regulations. Results showed that ST52 steel is effective in shielding electromagnetic waves, with a range of 40-60 dB in the 4900-6000 MHz frequency range, meeting the 40 dB criterion set by ASTM regulations. Results showed that ST52 steel is effective in shielding electromagnetic waves, with a range of 40-60 dB in the 4900-6000 MHz frequency range, meeting the 40 dB criterion set by ASTM regulations. The study demonstrates that ST52 steel performs exceptionally well across a broad frequency range, which distinguishes it from other materials. This is particularly evident in the 4900-6000 MHz frequency range, where ST52 steel exhibits superior electromagnetic shielding potential compared to other materials. The study's insights are valuable for professionals seeking dependable electromagnetic shielding solutions in sectors such as telecommunications, defense, and electronics manufacturing.

## 1. GİRİŞ

Son dönemde gelişen elektronik ekipman ve cihazlar, çeşitli frekans aralıklarında elektromanyetik enerji yaymaktadır. Bu nedenle dijital cihazları, veri sızıntısı, yanlış işlemler veya tamamen başarısızlık gibi etkilere karşı korumak son derece önemli bir hale gelmiştir [1]. Bununla birlikte elektromanyetik (EM) radyasyonunun özellikle 5. nesil (5G) iletişim sistemlerinden kaynaklanan insan sağlığına olan zararlı etkileri konusunda artan bir endişe de bulunmaktadır [2,3]. Elektromanyetik radyasyonun insan sağlığı üzerinde etkisi olduğuna dair ciddi bir literatür birikimi vardır ve EMI (Elektromanyetik İnterferans) önleyici malzemelerin kullanımı, bu sorunları etkili bir şekilde azaltmanın güçlü yöntemlerinden bir tanesi olmaktadır [4-6].

İyi kalkan malzemesinin elektriksel iletkenlik, iyi termal özellikler ve yüksek EMI kalkanlama verimliliği gibi özelliklere sahip olması beklenmektedir [7]. Son zamanlarda, EMI kalkanlama malzemeleriyle ilgili bu tür özelliklere yönelik çalışmalar devam etmektedir [8,9]. EM radyasyonunun emilimi ve yansıması, EMI kalkanlamanın ana mekanizmalarıdır ve mobil yük taşıyıcıları ile manyetik/elektrik dipollerin doğrudan etkileşiminden kaynaklanmaktadır [10]. Malzemelerin elektriksel iletkenliği, EMI kalkanlama özelliklerini kontrol etmek için temel bir parametre olarak bilinmektedir.

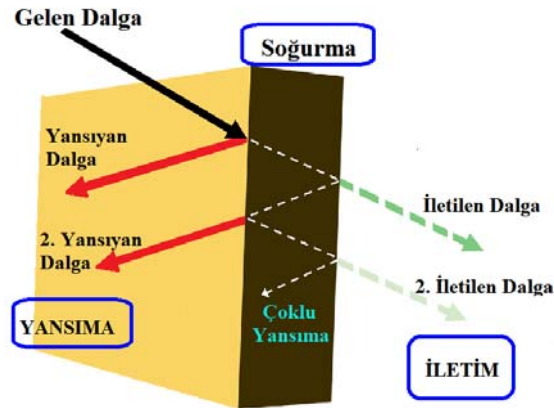
EMI kalkanlama için, metal pullar, metal teller, partiküller ve karbon fiber gibi kesikli iletken dolgular içeren kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır [11]. Özellikle metal bazlı kompozitler, mükemmel elektriksel iletkenlikleri nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür [12,13]. Ayrıca, gigahertz frekans bölgesinde EMI kalkanlama malzemeleri olarak potansiyel olarak kullanılmıştır [14]. Yüksek iletkenlik ve ayarlanabilir EMI kalkanlama performansı gibi özel özelliklere sahip iletken polimer kompozitleri de, EMI kalkanlama için sıklıkla kullanılmaktadır [15]. Polimer tabanlı elektrik iletken kompozitler, geleneksel metalik kompozit malzemelere göre hafif, maliyet etkili ve korozyona dayanıklı avantajlar sunmaktadır [16].

Özellikle son yıllarda, EMI kalkanlama performansını optimize etmeye yönelik nanoyapılı malzemeler ve hibrit yapılar üzerine önemli araştırmalar yapılmaktadır. Bu bağlamda, çok katmanlı yapıların (örneğin, metal-polimer-metal kompozitleri) ve nano-dolgu katkılı polimer kompozitlerin kullanımı, kalkanlama etkinliğini artırmak için popüler yaklaşımlar arasında yer almaktadır [17,18]. Bununla birlikte, farklı uygulamalarda kullanılan bu malzemelerin kalkanlama performansını anlamak ve optimize etmek için, malzemelerin elektromanyetik alanlarla olan etkileşimlerinin detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir [19].

Görüldüğü gibi elektromanyetik kalkanlama için birçok malzeme farklı formlarda ve farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Farklı uygulama alanlarında kullanılan bu malzemelerin performansını anlamak ve optimize etmek için, malzemelerin elektromanyetik alanlarla etkileşimlerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir [20]. Malzemelerin elektriksel, manyetik ve dielektrik özellikleri, EMI kalkanlama mekanizmalarını (soğurma, yansıma, çoklu yansıma) belirlemektedir. Böylece, hedeflenen uygulamalar için en uygun malzeme ve tasarım seçenekleri belirlenebilir.

### 1.1. Elektromanyetik Alan – Malzeme Etkileşimi

Elektromanyetik alanların malzemelerle etkileşimi, bilimsel ve teknolojik birçok sorunun çözümünde kritik bir öneme sahiptir. Bu etkileşim, malzemelerin elektromanyetik dalgaları emmesi (absorption), yansıtması (reflection), iletmesi (transmission) veya kırması (refraction) gibi çeşitli şekillerde gerçekleşebilmektedir (Şekil 1) [21]. Elektromanyetik alanların malzemelerle olan bu kompleks etkileşimi, endüstriyel uygulamalarda, telekomünikasyon sistemlerinde ve daha birçok alanda kritik önemle dikkate alınarak değerlendirilmektedir. Bu etkileşimde etkili iki unsur vardır, birinci elektromanyetik dalganın karakteri, ikincisi ise malzemenin karakteri. Elektromanyetik dalgayı değerlendirirken, frekansı ve gücü en belirli etkenler iken, elektromanyetik dalga ile etkileşim içinde olan malzemenin en önemli özelliği yüzey iletkenliği ve dielektrik katsayısı olmaktadır.

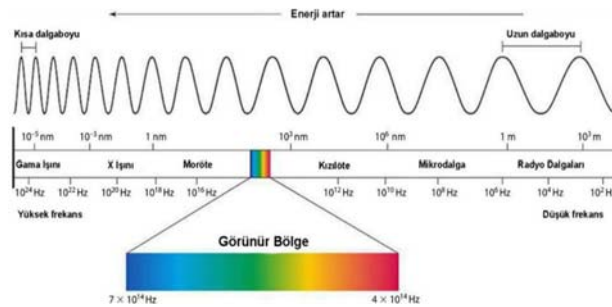


Şekil 1. Elektromanyetik dalga - malzeme etkileşimi [21]

Elektromanyetik dalga ile herhangi bir malzeme karşılaştığında, Şekil 1’ de gösterildiği gibi, üç durum söz konusu olabilmektedir. Malzeme gelen dalgayı absorbe edebilir, gelen dalga malzemeden yansıyabilir ya da malzeme içinde çoklu yansımalara maruz kalabilir [22]. Bu etkileşim olurken, malzeme kadar gelen dalganın frekansı da önemlidir. Elektromanyetik dalgalar, frekansın artmasıyla, genellikle malzemede en az kayıpla geçerek ilerlemektedir [23]. Bu sebeple gelen elektromanyetik dalganın elektromanyetik spektrumun neresinde olduğuna dikkat edilmelidir. Nitekim Nobel ödüllü Fransız fizikçi De Broglie tarafından keşfedilen frekans ile dalgaboyu arasındaki matematiksel ilişki ( $c=\lambda \cdot f$ ) de bu durumun önemini vurgulamaktadır [24]. Örnek bir elektromanyetik spektrum Şekil 2’ de sunulmuştur.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde yüksek frekanslı bileşenleri kalkanlamak için yüksek iletken özellikli malzemelerin seçilmesi gerektiği, düşük frekans bileşenli dalgaları kalkanlamak için ise yüksek dielektrik özelliğe sahip malzemelerin seçilmesi gerektiği görülmektedir [25]. En sık kullanılan malzemelerden biri olan metalik malzemeler, genellikle yüksek iletkenlikleri nedeniyle elektromanyetik kalkanlamada tercih edilmektedir. Özellikle bakır ve alüminyum, elektromanyetik alanları yüksek oranda absorbe edebilme ve yansıtılma yetenekleri ile bilinmektedir [26]. Elektromanyetik kalkanlamada kullanılan bir diğer malzeme grubu ferromanyetik malzemelerdir [27]. Demir, nikel ve kobalt gibi ferromanyetik malzemeler, manyetik alanlara karşı güçlü bir tepki göstermektedir. Bu özellikleri, elektromanyetik alanların absorbe edilmesine katkı sağlamaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte iletken polimer kompozitler de elektromanyetik kalkanlama için kullanılmaya başlanmıştır. Polimer matrisine iletken dolgu maddeleri eklenerek oluşturulan bu malzemeler, karbon nanotüpler, grafen veya iletken polimerler içerebilirler. Bu kompozitler, hafif, esnek ve maliyet etkili kalkanlama çözümleri sunmaktadır [28, 29]. Metalik Folyo ve Şeritler gibi özel amaçlı malzemeler de elektromanyetik kalkanlama için kullanılmaktadır. Esnek yapıları sayesinde kablo bağlantılarını sarmakta veya elektronik cihazların iç kısımlarına entegre edilerek etkili bir kalkanlama sağlanmasında kullanılmaktadır [30].

Elektromanyetik kalkanlama problemlerinde, özellikle düşük frekans bölgesinde ferit malzemeler kullanılmaktadır: Ferritler, genellikle demir oksit bazlı malzemelerdir ve özellikle düşük frekansta elektromanyetik kalkanlamada etkilidirler. Ferrit malzemeler, manyetik alanları absorbe ederek etki göstermektedir [31]. En sık kullanılan malzemelerden biri de seramiklerdir. Seramikler özellikle radyo frekansları ve mikrodalga frekans bölgesinde elektromanyetik kalkanlamada kullanılmaktadır. Seramikler, ferroelektrik özelliklere sahip olması sebebiyle geniş bir kullanım sahasına sahiptirler [32,33].



Şekil 2. Elektromanyetik spektrum [24]

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

Literatür göstermiştir ki, elektromanyetik alanlar çok geniş bir frekans spektrumunda etkili olmaya devam etmektedir. Bu sebeple hem çalışan sistemlerin birbirini etkilememesi hem de insan sağlığına olabilecek muhtemel zararların önüne geçebilmek için, elektromanyetik kalkanlama konusu ciddiyle irdelenmelidir. Yürütülen bu çalışma kapsamında, literatürde elektromanyetik kalkanlama konusunda sıklıkla değerlendirilmeyen ancak fiyat/performans açısından birçok sektörde sıklıkla kullanılan ST52 düşük karbonlu çeliği değerlendirilmiştir. Frekans bölgesi olarak ise 4900 – 6000 MHz bölgesi ele alınmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan ST52 metali 3 mm kalınlığındadır. Kumpas ile yapılan kalınlık ölçümü Şekil 3 ile sunulmuştur. Kullanılan malzemenin kalınlığı kalkanlama üzerinde doğrudan etkili bir parametre olmaktadır. Bu sebeple hassas bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada değerlendirilen ST52, düşük karbonlu bir çelik türüdür ve genellikle yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu çelik, dayanıklılık, mukavemet ve işlenebilirlik gibi avantajlarıyla bilinmektedir. İşlenmesi kolaydır ve çeşitli metalurjik işlemlere uygun bir malzemedir. ST52 çeliği, çeşitli endüstrilerde kullanılan yapısal boru, boru hatları, silindirlere, makine parçaları ve diğer çeşitli inşaat bileşenleri için yaygın olarak tercih edilmektedir. Düşük karbon içeriği, kaynaklanabilirliği artırmakta ve kolay şekillendirilebilmesini sağlamaktadır. Bu çelik türü, özellikle mukavemet ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca, yüksek sıcaklık ve basınca maruz kaldığında stabil bir performans sergilemesi bir diğer önemli avantajı olarak sunulabilir [34,35]. Anlatılan avantajları sebebiyle inşaat ve makine mühendisliği gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılan ST52 çeliği, askeri ve medikal uygulamalarda da elektromanyetik kalkanlama amacıyla kullanılabilir bu çalışma ile gösterilmiştir.



Şekil 3. ST52 çeliği - kumpas ölçümü

Yürütülen çalışma 4.9-6GHz frekans bölgesinde yürütülmüştür. Çünkü bu frekans bölgesinde, Wi-Fi 5 ve Wi-Fi 6 Ağları, 5G Mobil İletişim, Yüksek Hızlı Kablosuz Bağlantılar (Point-to-Point Bağlantılar), Radyo Frekansı Tanımlı Radyo (SDR) Uygulamaları ve Yüksek Performanslı Endüstriyel Kablosuz Kontrol Sistemleri gibi önemli işlemler yürütülmektedir. Yapılan çalışmaya ilişkin detaylar Çizelge 1 ile sunulmuştur.

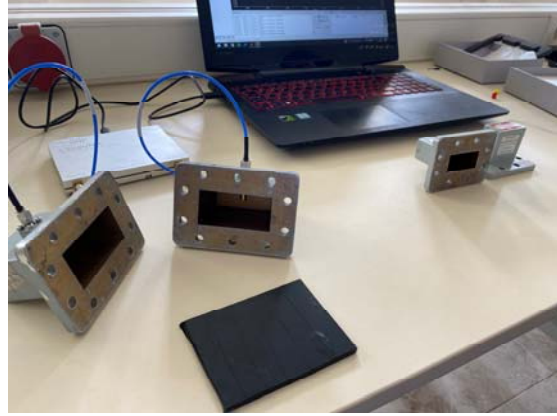
Çizelge 1. Deneysel Çalışmaya İlişkin Detaylar

Parametre	Değer
Malzeme	Düşük Karbonlu ST52
Frekans Aralığı	4900-6000MHz
Ölçüm cihazı	Libre VNA
Numune Kalınlığı	3 mm
Numune Boyutları	10mm*10mm

## 3. TARTIŞMA

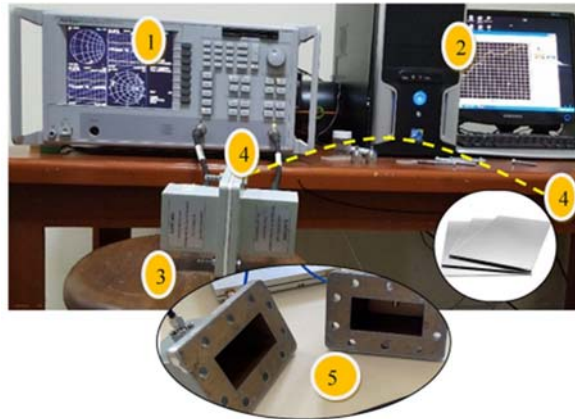
Elektromanyetik kalkanlama, modern teknolojinin hızla ilerlediği günümüzde, malzemelerin elektromanyetik alanlara karşı direnç gösterme kabiliyetini anlamak ve optimize etmek için kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, bu çalışma kapsamında, ST52 metalinin elektromanyetik kalkanlama özellikleri derinlemesine incelenmiş ve elektromanyetik kalkanlama noktasındaki potansiyeli ortaya konulmuştur. Özellikle, vektör network analizör kullanılarak gerçekleştirilen ölçümler, ASTM standartlarına uygun bir şekilde tasarlanmış deneyler ve belirli bir frekans bandında yapılan ölçümlerle malzemenin elektromanyetik kalkanlama etkinliği analiz edilmiştir [36]. Hazırlanan ölçüm düzeneği Şekil 4'te sunulmuştur.





Şekil 4. Kalkanlama ölçüm sistemi

Elektromanyetik kalkanlama ölçümleri, taşınabilir vektör network analizör (VNA), bilgisayar, dalga kılavuzları ve koaksiyel kablolarla ile gerçekleştirilmiştir. Vektör network analizör, geniş bir frekans aralığında yüksek hassasiyetli ölçümler yapabilme kabiliyetiyle bu tür çalışmalarda sıkça tercih edilmektedir. Laboratuvar imkânları kapsamında bulunan dalga kılavuzları da 4.9-6GHz frekans bandında ölçümler almak için kullanılmıştır. Bu sistem, elektromanyetik alanın frekansa bağlı olarak nasıl değiştiğini incelemek ve malzemenin elektromanyetik özelliklerini çeşitli frekanslarda analiz etmek için etkili bir çözüm sunmuştur. Bu ölçüm sistemi yazarların bir önceki makalelerinde kullanılan ölçüm sisteminin benzeridir [33].



Şekil 5. Örnek ölçüm sistemi [37]

Şekil 5te gösterilen ölçüm sistemi dört ana bileşenden oluşmaktadır. 1 numara ile gösterilen eleman masa tipi bir network analizörü göstermektedir ve bu eleman ile kalkanlama etkinliği ölçümleri bilgisayar aktarılmaktadır. 2 numara ile gösterilen bilgisayarın burada kullanım amacı, network analizörden almış olduğu S parametre bilgilerini görselleştirmek ve anlaşılır bir halde sunulmasını sağlamak içindir. 3 ve 5 numaralarla gösterilen dalga kılavuzları ve koaksiyel kablolar ise çalışılmak istenilen frekansa göre özel olarak üretilmiş elemanlardır. Nitekim kalkanlama etkinliği ölçülecek olan ST52 bu dalga kılavuzlarının arasına yerleştirilmektedir. 4 numara ile ölçümü yapılacak elemanın levha şeklinde olması gerektiği gösterilmiştir. Kalkanlama etkinliği ölçülecek eleman, levha formunda olmazsa dalga kılavuzlarından kaçaklar oluşabilecek bu da ölçüm güvenilirliğini saptıracaktır.

Ölçümlerin doğru sonuçlanabilmesi için taşınabilir VNA ve kalkanlama ölçümlerinde kullanılan dalga kılavuzlarının doğru seçilmesi son derece önemlidir. Nitekim bu çalışma kapsamında kullanılan Libre firmasına ait cihaz 100kHz-6GHz bandında ölçümler alabilmektedir. Ayrıca bu cihazla beraber kullanılan dalga kılavuzları da bu frekans bandında doğru sonuçlar üretebilmelidir. Bu bağlamda A-info firmasına ait 159WCAS model dalga kılavuzları kullanılmıştır. Yakından görülmesi adına Şekil 6 da VNA ve dalga kılavuzları eklenmiştir. Kullanılan dalga kılavuzuna ait detaylar [38]' den elde edilebilir.



Şekil 6. Dalga kılavuzları ve mobil VNA

Deneyler, ASTM standartlarına uygun olarak tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. ASTM standartları, ölçüm süreçlerinin standartlaştırılmasını sağlayarak, elde edilen verilerin güvenilirliğini ve karşılaştırılabilirliğini artırmaktadır. Bu standartlar çerçevesinde dalga kılavuzları kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Dalga kılavuzları, özellikle yüksek frekanslarda daha kesin ölçümler yapabilme kabiliyetiyle bilinmektedir. Bu çalışma, 4.9 - 6 GHz frekans bandında gerçekleştirilen ölçümleri içermektedir. Bu frekans bandı birçok uygulamada sıklıkla tercih edilmektedir. İlgili frekans bandının kullanıldığı bazı uygulamalar ve nedenleri Çizelge 2 ile sunulmuştur.

Yapılan ölçümler sonucunda, ST52 metalinin elektromanyetik kalkanlama etkinliğinin 45-60 dB arasında olduğu belirlenmiştir. Bu değerler, malzemenin elektromanyetik alanlara karşı yüksek direnç gösterdiğini ve etkili bir kalkanlama sağladığını göstermektedir. Bu, özellikle elektronik cihazların ve iletişim sistemlerinin gelişmiş güvenilirlik ve performansını sağlamak adına önemli bir özelliktir. Elektromanyetik kalkanlama özellikleri üzerine yapılan bu çalışma, sadece ST52 metalinin belirli bir frekans bandında değil, aynı zamanda malzemenin genel kullanılabilirliği ve çeşitli uygulama alanları üzerine de ışık tutmaktadır. Yüksek elektromanyetik kalkanlama etkinliği, endüstriyel ve askeri uygulamalardan medikal cihazlara kadar bir dizi farklı sektörde potansiyel kullanımlarını açığa çıkarmaktadır. Şekil 7’de ST52 çeliğinin 4.9-6 GHz frekans bandındaki elektromanyetik kalkanlama performansı sunulmuştur.

Çizelge 2. 4.9-6 GHz bandındaki bazı uygulamalar

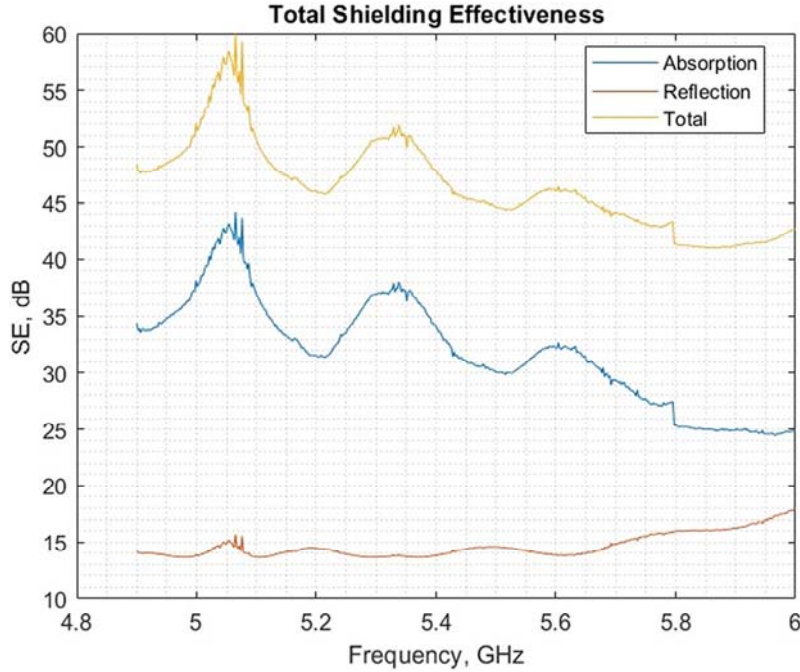
<b>Radar Sistemleri</b>	Hem sivil hem de askeri radar sistemleri, nesne tespiti ve izleme gibi görevler için bu frekans bandını kullanılmaktadır.
<b>Wi-fi (Kablosuz internet)</b>	Özellikle 5 GHz bandı, yüksek bant genişliği ve daha düşük girişim nedeniyle Wi-Fi iletişimde tercih edilen bir frekans bandıdır.
<b>Mikrodalga Bağlantılar</b>	Uzun mesafe iletişim bağlantıları için yaygın olarak kullanılmaktadır.
<b>Mobil İletişim (5G)</b>	Yüksek hızlı veri iletimi için bu frekans bandı kullanılmaktadır. 5G, daha geniş bant genişliği ve daha düşük gecikme süreleri sunarak daha hızlı ve güvenilir kablosuz bağlantılar sağlar.
<b>Kablosuz Sensör Ağları:</b>	Endüstriyel otomasyon ve İnternet of Things (IoT) uygulamalarında kullanılan kablosuz sensör ağları, bu frekans bandını kullanabilmektedir.
<b>Ağ Ekipmanları ve Radyo Bağlantıları</b>	Kablosuz ağ ekipmanları ve bağlantılar, bu frekans bandını kullanarak veri iletimi sağlamaktadır.

Şekil 7’de dikey sütun kalkanlama performansı (shielding effectiveness – SE), yatay sütun ise frekans (frequency – GHz) olarak sunulmuştur. Kırmızıçizgi ile yansıma (reflection), mavi çizgi ile emilim (absorption), sarı ile ise toptam etki (total) sunulmuştur. ST52 nin 4.9 – 6 GHz frekans bandındaki elektromanyetik kalkanlama karakteristiği birkaç açıdan farklı bir karakteristik sunmaktadır. Şöyle ki;

- ST 52 çeliğinin yansıtma özelliği, artan frekansla birlikte artmaktadır. Nitekim 4.9-5GHz bandında 14-15dB civarındayken, 6 GHz bölgesinde yansıma etkinliği 20 dB ye yaklaşmıştır.

- ST 52 çeliğinin soğurma (emilim) özelliği ise artan frekans ile birlikte azalan bir eğilim göstermektedir.
- Bazı özel frekanslarda (5.1, 5.3 ve 5.6 GHz) alt ve üst frekans komşuluklarına göre daha belirgin bir kalkanlama özelliği göstermektedir. Nitekim en yüksek kalkanlamayı da 5.1 GHz bölgesinde göstermektedir.

Toplam elektromanyetik alan kalkanlama özelliği ise, artan frekansla birlikte azalmaktadır. Yani, emilimdeki düşüş, yansıtmadaki artıştan çok daha fazla olmaktadır.



Şekil 7. ST52 çeliğinin elektromanyetik kalkanlama performansı

Ölçüm yapılan frekans bölgesinde oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Nitekim bazı özel frekanslar için elde edilen yüksek kalkanlama performanslarının hangi uygulamalarda kullanıldığına ilişkin hazırlanan Çizelge 3 aşağıda sunulmuştur. Çizelge 3 incelendiğinde, sabit kablosuz erişim, lisanssız spektrum uygulamaları, 5G NR, Wi-Fi 6E gibi birçok uygulamanın çalışma sahasında oldukça başarılı kalkanlama etkinliği sağlandığı görülecektir. Elektromanyetik kalkanlama malzemeleri üzerine yapılan çalışmalar, günümüzde hızla gelişen elektronik cihazların yaydığı elektromanyetik radyasyonun kontrol altına alınması gerekliliğiyle ortaya çıktığı önceki bölümlerde belirtilmiştir. Son yıllarda, özellikle düşük karbonlu çelikler gibi maliyet açısından avantajlı ve yüksek performans gösteren malzemelerin elektromanyetik kalkanlama potansiyeli üzerine yapılan araştırmalar artış göstermiştir [39-41]. ST52 çeliği, düşük karbon içeriği ve yapısal mukavemeti ile bilinen bir malzeme olup, son çalışmalarda bu malzemenin elektromanyetik kalkanlama performansı incelenmiştir [42].

Çizelge 3. Bazı özel kalkanlama gereksinimleri

Frekans	SE(dB)	Kullanılan uygulama
5.1 GHz	58	Wi-Fi 6 (802.11ax), 5G NR (New Radio)
5.3 GHz	52	Wi-Fi 5 (802.11ac), U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure), Sabit kablosuz erişim
6 GHz	44	Wi-Fi 6E, Fixed Wireless Access (FWA), Lisanssız spektrum uygulamaları

Güncel çalışmalar, özellikle 5G gibi yüksek frekanslı uygulamalarda ST52 gibi metal bazlı malzemelerin yüksek kalkanlama performansı sergilediğini göstermektedir [43]. Örneğin, Mostafavi ve arkadaşlarının çalışmasında polimerlerin yüzeylerini çinko ve alüminyum kaplamışlardır. Bu işlem sonucunda

polimerlerin kalkanlama performansı artmıştır. Ayrıca, metal bazlı malzemelerin, özellikle maliyet avantajları ve yüksek yansıtma oranları nedeniyle, gigahertz frekans aralığında tercih edildiği belirtilmiştir [44]. Aynı şekilde, Jiao ve ekibinin 2021 tarihli araştırması da ST52 gibi düşük karbonlu çeliklerin özellikle telekomünikasyon ve savunma sanayisinde giderek daha fazla kullanım alanı bulunduğunu vurgulamaktadır [45]. Bu araştırmalar, düşük karbonlu çeliklerin elektriksel iletkenliklerinin yanı sıra mekanik dayanımlarının da yüksek frekanslı uygulamalarda önemli bir avantaj sunduğunu ortaya koymuştur. Nitekim 40 dB üzerindeki kalkanlama performanslarının telekomünikasyon uygulamaları için yeterli olduğu bu konudaki önemli literatür kaynaklarında belirtilmiştir [46].

Bu makale kapsamında yapılan deneysel çalışmalar, 4900-6000 MHz frekans aralığında ST52 çeliğinin 40-60 dB arasında değişen bir kalkanlama etkinliği sunduğunu göstermiştir. Bu kalkanlama performansı da ASTM ve MIL-STD 'de belirtilen minimum kalkanlama etkinliğini karşılamakta ve ST52'nin, maliyet performansı açısından uygun bir elektromanyetik kalkanlama malzemesi olduğunu ortaya koymaktadır. Literatürdeki diğer araştırmalarla karşılaştırıldığında, elde edilen sonuçlar ST52 çeliğinin özellikle gigahertz frekans bandında yüksek bir kalkanlama performansı sunduğunu ve bu özelliğiyle alternatif malzemelerden biri olduğunu da doğrulamaktadır [47,48].

Sonuç olarak, bu çalışma, literatürde yer alan mevcut bulguları destekleyerek ST52 çeliğinin yüksek frekanslı uygulamalar için uygun bir elektromanyetik kalkanlama malzemesi olduğunu ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, ST52 çeliğinin geniş bir uygulama alanına sahip olduğu ve telekomünikasyon, savunma sanayi gibi sektörlerde kullanımı açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu söylenebilmektedir.

#### **4. SONUÇLAR**

Sonuç olarak, bu çalışma, ST52 metalinin elektromanyetik kalkanlama özelliklerini detaylı bir şekilde inceleyerek, malzemenin yüksek etkinlik gösterdiği bir frekans bandında önemli bir direnç sağladığını göstermiştir. Bu bulgular, malzemenin gelecekteki elektromanyetik kalkanlama uygulamalarında güvenle kullanılabileceğini ve endüstrinin ihtiyaçlarına uygun çözümler sunabileceğini göstermektedir. Ayrıca, ST52 çeliğinin düşük karbonlu olup işlemeye elverişli olması kullanım sahasının geniş bir yelpazede olmasına imkân tanımıştır. Bununla birlikte başka malzemelerle nano düzeyde etkileşime geçebilecek yüzey özellikleri sebebiyle, gelecek çalışmalarda bu yönüyle araştırmalar devam edecektir.

#### **5. KAYNAKLAR**

1. Ertekin, Z., Secmen, M., Erol, M., 2023. Electromagnetic shielding effectiveness and microwave properties of expanded graphite-ionic liquid co-doped PVDF. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(1), 43.
2. Kim, K., Lee, Y.S., Kim, N., Choi, H.D., Kang, D.J., Kim, H.R., Lim, K.M., 2021. Effects of electromagnetic waves with LTE and 5G bandwidth on the skin pigmentation in vitro. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(1), 170.
3. Bushberg, J.T., Chou, C.K., Foster, K.R., Kavet, R., Maxson, D.P., Tell, R.A., Ziskin, M.C. 2020. IEEE committee on man and radiation-COMAR technical information statement: health and safety issues concerning exposure of the general public to electromagnetic energy from 5G wireless communications networks. *Health Physics*, 119(2), 236-246.
4. Mathur, P., Raman, S., 2020. Electromagnetic interference (EMI): measurement and reduction techniques. *Journal of Electronic Materials*, 49, 2975-2998.
5. Zhan, Y., Wang, J., Zhang, K., Li, Y., Meng, Y., Yan, N., Xia, H., 2018. Fabrication of a flexible electromagnetic interference shielding Fe3O4@ reduced graphene oxide/natural rubber composite with segregated network. *Chemical Engineering Journal*, 344, 184-193.
6. Bi, S., Zhang, L., Mu, C., Liu, M., Hu, X., 2017. Electromagnetic interference shielding properties and mechanisms of chemically reduced graphene aerogels. *Applied Surface Science*, 412, 529-536.
7. Thomassin, J.M., Jérôme, C., Pardoën, T., Bailly, C., Huynen, I., Detrembleur, C., 2013. Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 74(7), 211-232.
8. Wu, N., Hu, Q., Wei, R., Mai, X., Naik, N., Pan, D., Shi, Z., 2021. Review on the electromagnetic interference shielding properties of carbon based materials and their novel composites: Recent progress, challenges and prospects. *Carbon*, 176, 88-105.



9. Wang, G., Zhao, G., Wang, S., Zhang, L., Park, C.B., 2018. Injection-molded microcellular PLA/graphite nanocomposites with dramatically enhanced mechanical and electrical properties for ultra-efficient EMI shielding applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 6(25), 6847-6859.
10. Lakshmi, K., John, H., Mathew, K.T., Joseph, R., George, K.E., 2009. Microwave absorption, reflection and EMI shielding of PU-PANI composite. *Acta Materialia*, 57(2), 371-375.
11. Abbasi, H., Antunes, M., Velasco, J.I., 2019. Recent advances in carbon-based polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding. *Progress in Materials Science*, 103, 319-373.
12. Khan, M., Tahir, M.N., Adil, S.F., Khan, H.U., Siddiqui, M.R.H., Al-Warthan, A.A., Tremel, W., 2015. Graphene based metal and metal oxide nanocomposites: synthesis, properties and their applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(37), 18753-18808.
13. Zhang, X., Zhang, S., Tang, Y., Huang, X., Pang, H., 2022. Recent advances and challenges of metal-organic framework/graphene-based composites. *Composites Part B: Engineering*, 230, 109532.
14. Ren, Y., Wang, X., Ma, J., Zheng, Q., Wang, L., Jiang, W., 2023. Metal-organic framework-derived carbon-based composites for electromagnetic wave absorption: dimension design and morphology regulation. *Journal of Materials Science & Technology*, 132, 223-251.
15. Kruželák, J., Kvasničáková, A., Hložeková, K., Hudec, I., 2021. Progress in polymers and polymer composites used as efficient materials for EMI shielding. *Nanoscale Advances*, 3(1), 123-172.
16. Sharma, S., Sudhakara, P., Omran, A.A.B., Singh, J., Ilyas, R.A., 2021. Recent trends and developments in conducting polymer nanocomposites for multifunctional applications. *Polymers*, 13(17), 2898.
17. Sorgucu, U., 2024. Enhancing the electromagnetic shielding effectiveness of alumina (AL<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) by coating with nano gold (AuNp). *Optical Materials*, 148, 114795.
18. Sorgucu, U., Kariper, I.A., 2024. Shielding performance of nano palladium-coated stainless steels against electromagnetic interference in 5G networks. *Waves in Random and Complex Media*, 1-19
19. Hou, X., Feng, X.R., Jiang, K., Zheng, Y.C., Liu, J.T., Wang, M., 2024. Recent progress in smart electromagnetic interference shielding materials. *Journal of Materials Science & Technology*, 186, 256-271.
20. Piersanti, S., Orlandi, A., de Paulis, F., 2018. Electromagnetic absorbing materials design by optimization using a machine learning approach. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1-8.
21. Liu, C., Wang, L., Liu, S., Tong, L., Liu, X., 2020. Fabrication strategies of polymer-based electromagnetic interference shielding materials. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3(4), 149-159.
22. Gülmez, N., Koçkal, N.U., Özen, Ş., Ateş, K., 2022. Corrosion potential and electromagnetic shielding effectiveness of geopolymer tiles produced with waste metal particles. *Sādhanā*, 47(3), 115.
23. Lv, H., Yang, Z., Pan, H., Wu, R., 2022. Electromagnetic absorption materials: current progress and new frontiers. *Progress in Materials Science*, 127, 100946.
24. Döner, D., İçier, F., 2018. Gıdaların elektriksel yöntemlerle işlenmesinde uygulanan farklı frekans ve dalga şekillerinin proses etkinliği üzerine etkisi. *Akademik Gıda*, 16(4), 470-482.
25. Kimmel, W.D., Gerke, D., 2018. *Electromagnetic compatibility in medical equipment: a guide for designers and installers*. CRC Press, 46(3), 276-288.
26. Wanasinghe, D., Aslani, F., 2019. A review on recent advancement of electromagnetic interference shielding novel metallic materials and processes. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107207.
27. Di Fraia, S., Marracci, M., Tellini, B., Zappacosta, C., 2008. Shielding effectiveness measurements for ferromagnetic shields. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 58(1), 115-121.
28. Wang, M., Tang, X.H., Cai, J.H., Wu, H., Shen, J.B., Guo, S.Y., 2021. Construction, mechanism and prospective of conductive polymer composites with multiple interfaces for electromagnetic interference shielding: A review. *Carbon*, 177, 377-402.
29. Fox, R.T., Wani, V., Howard, K.E., Bogle, A., Kempel, L., 2008. Conductive polymer composite materials and their utility in electromagnetic shielding applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 107(4), 2558-2566.
30. Palanisamy, S., Tunakova, V., Militky, J., 2018. Fiber-based structures for electromagnetic shielding-comparison of different materials and textile structures. *Textile Research Journal*, 88(17), 1992-2012.
31. Rayar, A., Naveen, C.S., Onkarappa, H.S., Betageri, V.S., Prasanna, G.D., 2023. EMI shielding applications of PANI-Ferrite nanocomposite materials: a review. *Synthetic Metals*, 295, 117338.
32. Shi, S.L., Liang, J., 2008. The effect of multi-wall carbon nanotubes on electromagnetic interference shielding of ceramic composites. *Nanotechnology*, 19(25), 255707.
33. Kumari, P., Tripathi, P., Singh, S.P., Kumar, D., 2020. Electromagnetic shielding using ceramic materials. In *Materials For Potential Emi Shielding Applications*, 315-331, Elsevier.



34. Küçükömeroğlu, T., Aktarer, S.M., İpekoğlu, G., Çam, G., 2018. Microstructure and mechanical properties of friction-stir welded St52 steel joints. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 25, 1457-1464.
35. Aydın, Ş.I.K., 2006. Yapı çeliğinin (St52-3) Mig/Mag kaynağında gaz karışımlarının çekme dayanımı özelliklerine etkisi. *Trakya Univ J Sci*, 7(1), 9-15.
36. Park, H.H., 2022. Electromagnetic shielding analysis of planar materials using ASTM D4935 standard fixture. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 64(5), 1767-1778.
37. Sorgucu, U., 2023. Electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness (SE) of pure aluminum: an experimental assessment for 5G (SUB 6GHZ). *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 34(2325), 1-15.
38. <https://www.ainfoinc.us/159wcas-right-angle-rectangular-waveguide-to-coaxial-adapter-4-9-7-05-ghz-wr159-to-sma-female-fdp58-udr58>, Erişim tarihi: 18/09/2024
39. Yang, Y., Wang, J., Liu, Z., Wang, Z., 2021. A new study on the influencing factors and mechanism of shielding effectiveness of woven fabrics containing stainless steel fibers. *Journal of Industrial Textiles*. 50(6), 830-846.
40. Alım, B., Şakar, E., Baltakesmez, A., Han, İ., Sayyed, M.I., Demir, L., 2020. Experimental investigation of radiation shielding performances of some important AISI-coded stainless steels: Part I. *Radiation Physics and Chemistry*. 166, 108455.
41. Kim, S., Jang, Y.S., Oh, T., Lee, S.K., Yoo, D.Y., 2022. Effect of crack width on electromagnetic interference shielding effectiveness of high-performance cementitious composites containing steel and carbon fibers. *Journal of Materials Research and Technology*. 20, 359-372.
42. Mikinka, E., Siwak, M., 2021. Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of carbon-fibre-reinforced polymer composites-a topical review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 32(20), 24585-24643.
43. Pandey, R., Tekumalla, S., Gupta, M., 2020. EMI shielding of metals, alloys, and composites. In *Materials for Potential EMI Shielding Applications*, 341-355, Elsevier.
44. Mostafavi Yazdi, S.J., Lisitski, A., Pack, S., Hiziroglu, H.R., Baqersad, J., 2023. Analysis of shielding effectiveness against electromagnetic interference (EMI) for metal-coated polymeric materials. *Polymers*. 15(8), 1911.
45. Jiao, C., Xu, Y., Li, X., Zhang, X., Zhao, Z., Pang, C., 2021. Electromagnetic shielding techniques in the wireless power transfer system for charging inspection robot application. *International Journal of Antennas and Propagation*, 9984595
46. Adamczyk, B., 2023. *Principles of electromagnetic compatibility: Laboratory Exercises and Lectures* Wiley-IEEE Press, 592.
47. Sorgucu, U., 2024. Enhancing the electromagnetic shielding effectiveness of alumina (AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) by coating with nano gold (AuNp). *Opt Mater (Amst)*, 148(2024), 114795.
48. Martinez, P.A., Victoria, J., Torres, J., Suarez, A., Alcarria, A., Amaro, A., Galindo-Galiana, B., Losada-Fernandez, C., Ramirez-Monsell, V., Lopez-Ruis, B., 2021. Analysis of EMI shielding effectiveness for plastic fiber composites in the 5G sub-6 GHz band. 2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium, Raleigh, NC, USA, 278-283.

## Determination of Financial Performance in Electric Power Enterprises with Entropy Weighted WASPAS Analysis Method

Ayşe KÖKYILDIRIM<sup>1,a</sup>, Zahide Figen ANTMEN<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Adana, Türkiye

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0003-1696-179X; <sup>b</sup>ORCID: 0000-0001-8475-1300

### Article Info

Received : 24.07.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560478

### Corresponding Author

Ayşe KÖKYILDIRIM

mervekokyildirim02@gmail.com

### Keywords

Financial performance evaluation

Financial ratios

Entropy method

WASPAS method

**How to cite:** KÖKYILDIRIM, A., ANTMEN, Z.F., (2024). Determination of Financial Performance in Electric Power Enterprises with Entropy Weighted WASPAS Analysis Method. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 849-860.

### ABSTRACT

In this study, Entropy weighted WASPAS method is applied to measure the financial performance of 11 electric power enterprises operating in Borsa İstanbul (BIST) for the period of 2022. 7 financial ratios for the year 2022 were accepted as criteria and the financial success ranking of 11 electric power enterprises was made. The financial ratios used in the study were selected among the ratios that can provide information about the liquidity and profitability status of the enterprises. In the first stage of the application, Entropy method was used to determine the criteria weights. The determined criteria weights were prioritized and used in the WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) method. Then, the financial performance of electric energy enterprises was ranked by making an evaluation with the WASPAS method.

## Entropi Ağırlıklı WASPAS Analiz Yöntemi İle Elektrik Enerji İşletmelerinde Finansal Performansın Belirlenmesi

### Makale Bilgileri

Geliş : 24.07.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560478

### Sorumlu Yazar

Ayşe KÖKYILDIRIM

mervekokyildirim02@gmail.com

### Anahtar Kelimeler

Finansal performans değerlendirilmesi

Finansal oranlar

Entropi yöntemi

WASPAS yöntem

**Atıf şekli:** KÖKYILDIRIM, A., ANTMEN, Z.F., (2024). Determination of Financial Performance in Electric Power Enterprises with Entropy Weighted WASPAS Analysis Method. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(3), 849-860.

### ÖZ

Bu çalışmada Borsa İstanbul'da (BIST) faaliyet gösteren 11 elektrik enerji işletmesinin 2022 dönemine ait finansal performanslarını ölçmek için Entropi ağırlıklı WASPAS yöntemi uygulanmıştır. 2022 yılına ait 7 finansal oran kriter kabul edilerek 11 elektrik enerji işletmesinin finansal başarı sıralaması yapılmıştır. Çalışmada kullanılan finansal oranlar işletmelerin likidite durumu ve karlılık durumu hakkında bilgi verebilecek nitelikteki oranlar arasından seçilmiştir. Uygulamanın ilk aşamasında kriter ağırlıklarının belirlenmesi için Entropi yöntemi kullanılmıştır. Belirlenen kriter ağırlıkları önceliklendirilerek WASPAS yöntemi içerisinde kullanılmıştır. Daha sonra WASPAS yöntemiyle bir değerlendirme yapılarak elektrik enerji işletmelerinin finansal performansı sıralanmıştır.

## 1. INTRODUCTION

With the advancement of technology and the increase in population, the dependence of society and businesses on energy to sustain their daily activities is constantly increasing. Increasing energy demand has also increased the importance of businesses operating in this sector. At this point, it is important to meet these needs by utilizing different energy sources. Electric energy is the most widespread and important among these sources today [1].

Electricity consumption in Turkey increased rapidly until the end of 2018. In 2019 and 2020, electricity consumption is almost unchanged. After a high increase in 2021 due to the post-Covid-19 recovery effect, the distribution of economic activity started to change in 2022 as the share of the service sector in the economy increased, which had an impact on electricity consumption. Studies have estimated that the industrial and service sectors will account for more than 50% of Turkey's annual electricity consumption in 2035 [2].

The sector-based data of the electricity demanded in Turkey in 2019, 2021 and 2022 are shown in Figure 1.

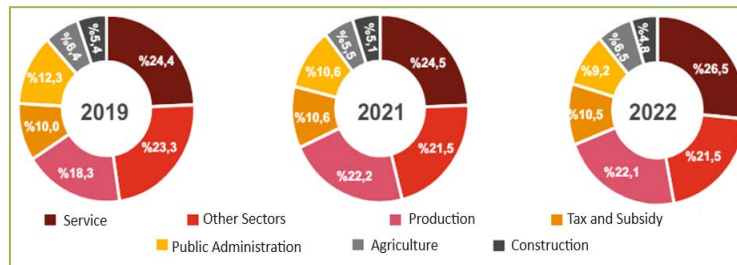


Figure 1. Electricity demand by sector [2]

The fact that electric power enterprises are important and strategic for the Turkish economy has been an encouraging factor in the realization of the study. As a result of the decrease in the share of the public sector and the increase in the share of the private sector in electricity energy enterprises over the years, the importance of the efficiency and financial strength of energy companies increases even more. For this reason, businesses in the energy sector have to carry out their activities effectively and efficiently [3]. The financial performance of a company is an indicator of how efficiently that company performs its activities [4]. If the financial performance of electric energy companies is low, it is not possible for them to successfully carry out their production and distribution activities, which may cause problems in meeting the demand.

Financial performance has a critical role in the strategic decisions of businesses. Financial performance is used in the process of evaluating the financial activity results of enterprises [5]. As in all sectors, it is important to analyze financial data to determine the role and financial status of the electricity energy sector in the national economy [6]. These analyses play a critical role in shaping the future decisions of businesses. Because a solid financial foundation helps businesses to determine their future strategic plans and achieve their goals.

Decision making is an important part of life. Entropy and WASPAS method, which is one of the multi-criteria decision-making methods used in the decision-making process, is a technique that allows the most appropriate one to be selected among the alternatives [7]. Although the Entropy and WASPAS method is used in the literature to determine the financial performance ranking of enterprises operating in different sectors such as automotive, transportation, food, technology, etc., it has shown that this method can also be applied to an important sector such as electric energy enterprises.

The study aims to evaluate the financial performance of 11 electric power enterprises operating in Borsa Istanbul (BIST), which are included in the "BIST 100" and "BIST ELECTRIC" indices. These enterprises operate at various points of the Turkish electricity market value chain. While evaluating the performance of the enterprises, financial ratios that can provide information about the liquidity and profitability status of the enterprises were utilized.

### 1.1. Financial Ratios (Performance Indicators)

Financial ratios used in performance analysis are grouped as liquidity ratios, financial ratios, operating ratios and profitability ratios according to the way they are used [8]. In this study, among the financial ratios, ratios showing the liquidity, financial structure and profitability of companies were used. The ratios determined as decision criteria were determined by analyzing similar studies in the literature.

The explanations and formulas of the financial performance indicators used in the research are given below.

**Liquidity Ratio (Acid-Test Ratio):** It is the ratio obtained by subtracting the inventories from the current assets of the enterprises and then dividing them by short-term liabilities. It measures the capacity of enterprises to meet their short-term debts. The Acid-Test Ratio is a ratio that complements the current ratio. A ratio of 1 is generally considered sufficient. In case the liquidity ratio is less than 1, it depends on the stocks of the enterprise in the payment of short-term debts.  $(\text{Current Assets} - \text{Stocks}) / \text{Short-Term Liabilities}$  is calculated [9].

**Cash Ratio:** It shows the ability of the company to meet its short-term debts in the event that its sales stop and it cannot collect its receivables. It is calculated by dividing  $(\text{Cash and Cash Equivalents} / \text{Short Term Liabilities})$  [9].

**Current Ratio:** It is a ratio that shows the extent to which the company can meet its short-term debts and is the most widely used ratio in financial performance analysis in order to determine the capital adequacy of the business. It is calculated by dividing  $(\text{Current Assets} / \text{Short-Term Debts})$  [9].

**Operating Profitability:** It shows the operating profitability of the business over sales. If the ratio is high, it indicates that the main activity of the business is profitable and efficient, while the downward trend of the ratio indicates that profitability and efficiency are decreasing.  $(\text{Operating Profit} / \text{Net Sales})$  is calculated [9].

**Net Profitability:** It reflects the overall efficiency and profitability of the business's activities. It is the profit obtained as a result of subtracting the total expenses spent for the realization of these activities from the total income obtained from all activities of the enterprise in a certain period.  $(\text{Net Profit} / \text{Net Sales})$  is calculated [9].

**Return on Equity:** It is a financial performance measure that shows how much profit a business makes with its equity. It is calculated as  $(\text{Net Profit} / \text{Equity})$  [9].

**Financial Leverage:** It shows what percentage of the assets owned by the business is financed by debts. A higher leverage ratio indicates that the company has higher financial risk.  $(\text{Total Debt} / \text{Total Assets})$  is calculated [9].

The study consists of six chapters. In the second section, previous studies are included. Entropy and WASPAS methods are discussed in the third chapter. In the fourth section, the decision criteria to be used in the study are explained. In the fifth section, Entropy and WASPAS models are used to evaluate the financial performance of 11 electric power enterprises considering 7 different criteria. In the conclusion section, the findings are explained in detail and suggestions for future studies are presented.

### 1.2. Literature Review

Within the scope of the research, a selection was made from the studies conducted in the past years in order to reach the most up-to-date information. These studies, which include applications, are detailed below.

There are different studies in the literature that measure the performance of electricity and energy sectors. In these studies, different techniques from multi-criteria decision making methods were used in performance measurements. Some studies used TOPSIS method, while others used Entropy, VIKOR, EDAS, COCOSO and WASPAS methods. In general, TOPSIS method is more predominant. The majority of the studies in which financial performance criteria were weighted by the Entropy method and decision alternatives were ranked by the WASPAS method were conducted in the banking sector.

There are examples of studies on financial performance measurement in the energy sector. Akgün [3], in his study, evaluated the enterprises operating in the energy sector registered in Borsa Istanbul with CRITIC and CODAS approach, one of the multi-criteria decision making methods. In the study, 13 financial ratios were used as decision criteria. These financial ratios are the data for the 2020 and 2021 periods on the Public Disclosure Platform (KAP). CRITIC method was used for weighting the criteria. CODAS method was used for prioritization among alternatives. Metin et al. examined the relationship between stock market returns and financial performance of three energy companies listed in Borsa Istanbul. It is concluded that the company with the highest performance is Ayen Energy. Sakarya et al. [10] used the TOPSIS method, one of the multi-criteria decision-making methods, to measure the financial performance of 14 energy companies traded in Borsa Istanbul. Studies on Entropy and WASPAS methods available in the literature are also summarized. Baykal et al. [11] evaluated the financial performance rankings of life and pension insurance companies operating in Turkey using Entropy-based WASPAS method. Kangal [12] evaluated the financial performance of energy enterprises operating in Turkey in the electricity, steam and gas sector registered in Borsa Istanbul in 2020. In the study, the weights of the criteria needed were determined by the Entropy method. Then, financial performance measurement was made with the WASPAS method, one of the multi-criteria decision-making methods. Çilek et al. [13] determined the priorities of the criteria using the Entropy method to determine the banking performance of the cities in the Black Sea Region. After determining the priorities of the criteria, the banking performance rankings of the cities in the Black Sea Region in Turkey were made with the WASPAS technique. As a result of the analysis, the best performing city for 2014-2019 was Samsun, while the worst performing cities were Kastamonu and Tokat. Eş et al. [14] evaluated the asset size performance of banks by applying Entropy and WASPAS methods in their study. A data set covering the years 2015-2019 was utilized. In the analysis, the importance levels of the criteria were calculated with the Entropy method. The WASPAS method was applied with the calculated importance levels and the performance ranking was made. As a result of the analysis, it was determined that Garanti Bank had the best performance in 2015, Ziraat Bank in 2016-2017 and Yapı ve Kredi Bank in 2018-2019. Orçun [15] applied the WASPAS method in the energy sector to evaluate the financial performance of companies. Karaca et al. [16] used Entropy and WASPAS methods to select the appropriate renewable energy source for Turkey. With the Entropy method, the criteria of renewable energy sources were ranked according to their importance. In the second stage, the WASPAS method was used to suggest which renewable energy source would be the most suitable renewable energy source in Turkey. Ural et al. [17], the performances of 3 state-owned banks operating in Turkey were analyzed using Entropy and WASPAS methods by utilizing financial statements for the period 2012-2016. According to the results obtained from the study, it was determined that the best performing bank in 2012 and 2013 was Türkiye Vakıflar Bankası, and the best performing public capital bank in 2014, 2015 and 2016 was Türkiye Cumhuriyeti Ziraat Bankası A.Ş. Akçakanat et al. [18] grouped the banks operating in Turkey as small, medium and large scale according to their asset sizes. They evaluated the performance analysis of banks with the Entropy-based WASPAS method. In the study, the first 9 months of 2016 data from the Forbes Magazine Banks Report were utilized. The 6 criteria determined for the performance analysis measurement of the banks were weighted by the Entropy method. Then, the banks were grouped according to their scales using the WASPAS method and ranked according to their performance. As a result, it was observed that Ziraat Bank was the best performing bank among large-scale banks, Finansbank among medium-scale banks and Anadolubank among small-scale banks.

Orçun [15], Topal [4] and Ömürbek [8] can be cited in the literature review conducted during our research. Most of the studies on the WASPAS method have focused on the banking sector. In Turkey, there are no studies in which Entropy and WASPAS methods are applied together to the financial performance of electric energy enterprises operating in Borsa Istanbul, included in the BIST 100 and also included in the BIST Electricity index. Therefore, it is thought to contribute to the literature.

## **2. MATERIAL AND METHODS**

The problems that the decision maker may face when starting a solution are usually the determination of which method is the appropriate method. When determining the appropriate method, the structure of the problem and the characteristics of the process should be considered [19]. In order to reach the best result in multi-criteria decision-making problems, different multi-criteria decision-making techniques can be used [20]. Multi-criteria decision making (MCDM) is a method that allows the selection of the best alternative among multiple criteria. The application process of all MCDM techniques consists of three stages. In the first stage, criteria and alternatives are identified. In the second stage, weights indicating the importance of



the criteria are determined and alternatives are evaluated according to these criteria. In the third stage, each alternative is ranked according to the method whose numerical values are determined [21]. In this study, the Entropy method, which is an objective evaluation method, was used for weighting the decision criteria, and the WASPAS method was used for ranking the alternatives.

## 2.1. Entropy Method

The concept of entropy was defined in the literature by Rudolph Clausius (1865) as a measure of uncertainty in the system. It was later developed by Shannon's work and adapted to information theory [22]. Entropy method is used to calculate the weights of the criteria in the decision problem [1].

Entropy method consists of 5 steps [25].

**Step 1:** Decision matrix is created.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$i=1,2,\dots,m$  (alternatives) and  $j=1,2,\dots,n$  (criteria)

**Step 2:** The decision matrix is normalized.

Criteria are normalized without distinguishing between benefit and cost functions. The values in the decision matrix are normalized by dividing by the column sums.

The value of  $p_{ij}$  is calculated by normalization.

$$p_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad (2)$$

$p_{ij}$  : Normalized values

$a_{ij}$  : Given benefit values

**Step 3:** Entropy values are calculated.

The entropy value for the criteria is found with the help of the equations given below.

$$E_j = -k \cdot \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln(p_{ij}) \quad (3)$$

$$k = (\ln(m))^{-1} \quad (4)$$

k: Entropy value coefficient

$E_j$ : Entropy value

$p_{ij}$  : Refers to normalized values

**Step 4:** Deviation values for each criterion are found with the help of the equation given below.

$$d_j = 1 - E_j \quad (5)$$

**Step 5:** To determine the importance level of criterion j, weight values  $w_j$  are calculated for each criterion.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (6)$$

## 2.2. WASPAS Method

WASPAS method is a multi-criteria decision-making method based on weighted sum model and weighted product model methods. This method, developed by Zavadskas et al. in 2012, reveals the performance values of the selected alternatives using criterion weights. As a result of the solution, the alternatives are evaluated and ranked from best to worst. The main purpose of the method is to maximize the ranking accuracy [23]. There is no technique for determining the criteria weights in the WASPAS method. Therefore, Entropy method was used to determine the criteria weights in this study.

The WASPAS method consists of 6 steps [23].

**Step 1:** Decision matrix is created.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

**Step 2:** The decision matrix is normalized. Normalization is carried out using the formula in equation (8) for benefit-side criteria and equation (9) for cost-side criteria.

$$\bar{x}_{ij} = x_{ij} / \max_i(x_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$\bar{x}_{ij} = \min_i(x_{ij}) / x_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

**Step 3:** Calculate the total relative importance of alternative i. in terms of the Weighted Sum Model (WSM). The total relative importance is calculated by multiplying the i<sup>th</sup> alternative value by the weight value of each criterion and then summing each alternative value respectively as in equation (10) [24].

$$Q_i^{(1)} = \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} \cdot w_j \quad (10)$$

**Step 4:** Calculate the total relative importance of alternative i in terms of the Weighted Multiplicative Model (WPM). The power of the relevant criterion weight is taken for the value of each i. alternative criterion over the normalized decision matrix and the values found are multiplied for each alternative respectively and the  $Q_i^{(2)}$  value is calculated as in equation (11) [24].

$$Q_i^{(2)} = \prod_{j=1}^n (\bar{x}_{ij})^{w_j} \quad (11)$$

**Step 5:** Calculate the weighted common overall criterion value for the Weighted Sum (WSM) and Weighted Product Models (WPM). The relative importance of decision alternatives is calculated as in equation (12).

$$Q_i = \lambda \cdot Q_i^{(1)} + (1 - \lambda) \cdot Q_i^{(2)} \quad (12)$$

**Step 6:** After the alternatives are identified, they are ranked according to the Q value. The highest value of Q is selected as the best alternative.

## 3. DATA SET OF THE STUDY

Within the scope of the study, 11 electric energy enterprises operating in Borsa Istanbul (BIST) are included. The data set of the study consists of financial data obtained from the financial statements and annual reports of all 11 companies for the year 2022. In this section, 7 financial ratios are accepted as criteria and the success ranking of 11 electric power companies is tried to be made. The criteria used in the study were weighted with the Entropy method, and then the performance ranking was carried out with the WASPAS method. The data of the study were analyzed with MS. Office Excel Program.

The financial ratios used in the study were selected among the ratios that can provide information about the liquidity and profitability status of the enterprises. It is included in Table 1 [8].

**Table 1.** Decision criteria used in the study [8]

Financial performance indicators	Codes	Direction
Operating profitability	FAKA	Maximum (Benefit)
Net profitability	NK	Maximum (Benefit)
Current ratio	CO	Maximum (Benefit)
Liquidity ratio	LO	Maximum (Benefit)
Financial leverage	FICA	Minimum (Cost)
Cash rate	NO	Maximum (Benefit)
Return on equity	ÖK	Maximum (Benefit)

The year 2023 is not included in the assessment since the annual balance sheet period for 2023 is still in progress. The data used in the study were obtained from the Public Disclosure Platform (KAP) and <https://fintables.com/> websites. For 2022, the decision matrix was formed according to the values obtained from the financial statements and annual reports. While considering the alternatives used in the study, electric energy enterprises in the "BIST 100" and "BIST ELECTRIC" indices were taken into consideration.

The companies included in the scope of the research are given in Table 2.

**Table 2.** Enterprises in the scope of the research

Enterprise code	Enterprise name
ENJSA	Enerjisa energy
IZENR	Izdemir energy
ZOREN	Zorlu energy
ODAS	Odaş electric
TATEN	Sweetpinar energy
AKFYE	Akfen renewable energy
AKSEN	Aksa energy
ALFAS	Alfa solar energy
CWENE	CW energy
GWIND	Galata wind energy
SMRTG	Smart solar energy

Table 3 presents a decision matrix representing the calculated ratios of the enterprises for 2022.

**Table 3.** Decision matrix

Alternative/criteria	FAKA	NK	CO	LO	FICA	NO	ÖK
ENJSA	0.11	0.13	0.71	0.65	0.70	0.27	0.35
IZENR	0.27	0.17	1.03	0.18	0.29	0.02	0.54
ZOREN	0.18	0.001	0.60	0.58	0.74	0.13	0.006
ODAS	0.40	0.37	1.43	1.22	0.44	0.50	0.36
TATEN	0.40	0.47	0.95	0.95	0.60	0.91	0.33
AKFYE	0.63	0.28	0.60	0.60	0.61	0.38	0.10
AKSEN	0.12	0.11	1.43	1.40	0.43	0.16	0.24
ALFAS	0.17	0.24	1.67	1.20	0.51	0.84	0.57
CWENE	0.19	0.19	1.14	0.78	0.69	0.21	0.65
GWIND	0.83	0.64	8.52	8.49	0.21	6.85	0.21
SMRTG	0.135	0.11	1.34	1.07	0.70	0.17	0.32

#### 4. RESULTS AND EVALUATION

Entropy and WASPAS were applied respectively. The results obtained were evaluated.

After the decision matrix was created, the Entropy method was applied to determine the criteria weights to be used in the WASPAS method. Since there were no negative values in the decision matrix, the values were normalized as shown in Table 4 without the need for correction in the data set.

**Table 4.** Decision matrix normalized by entropy method

Normalized decision matrix							
Alternative/criteria	FAKA	NK	CO	LO	FICA	NO	ÖK
ENJSA	0.032	0.048	0.037	0.038	0.118	0.026	0.095
IZENR	0.079	0.063	0.053	0.011	0.049	0.002	0.147
ZOREN	0.052	0.000	0.031	0.034	0.125	0.012	0.002
ODAS	0.116	0.136	0.074	0.071	0.074	0.048	0.098
TATEN	0.116	0.173	0.049	0.055	0.101	0.087	0.090
AKFYE	0.183	0.103	0.031	0.035	0.103	0.036	0.027
AKSEN	0.035	0.041	0.074	0.082	0.073	0.015	0.065
ALFAS	0.049	0.089	0.086	0.070	0.086	0.080	0.155
CWENE	0.055	0.070	0.059	0.046	0.117	0.020	0.177
GWIND	0.242	0.236	0.439	0.496	0.035	0.656	0.057
SMRTG	0.039	0.041	0.069	0.063	0.118	0.016	0.087

The natural logarithm of each criterion was taken and the logarithm value was multiplied by its own value. After normalization, the Entropy value for each criterion is shown in Table 5.

**Table 5.** Entropy values for criteria

Alternative/criteria	FAKA	NK	CO	LO	FICA	NO	ÖK
ENJSA	-0.110	-0.146	-0.121	-0.124	-0.252	-0.095	-0.224
IZENR	-0.200	-0.174	-0.156	-0.048	-0.148	-0.012	-0.282
ZOREN	-0.155	-0.003	-0.107	-0.115	-0.260	-0.055	-0.010
ODAS	-0.250	-0.272	-0.192	-0.188	-0.193	-0.146	-0.228
TATEN	-0.250	-0.304	-0.148	-0.160	-0.232	-0.213	-0.216
AKFYE	-0.311	-0.234	-0.107	-0.117	-0.234	-0.121	-0.098
AKSEN	-0.117	-0.130	-0.192	-0.205	-0.190	-0.064	-0.178
ALFAS	-0.149	-0.215	-0.211	-0.186	-0.211	-0.203	-0.289
CWENE	-0.160	-0.186	-0.166	-0.141	-0.251	-0.079	-0.306
GWIND	-0.343	-0.341	-0.361	-0.348	-0.118	-0.276	-0.164
SMRTG	-0.127	-0.130	-0.184	-0.173	-0.252	-0.067	-0.213

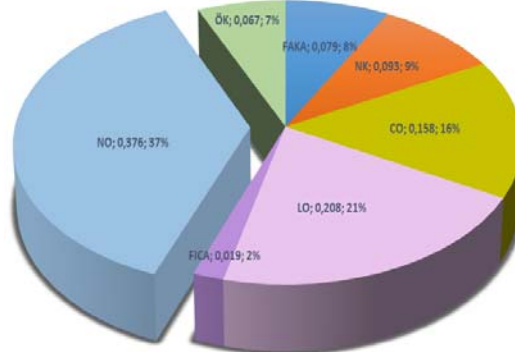
Using the formula  $k=1/\ln(m)$ , the entropy coefficient was found to be  $k=0.417$ . Here,  $m$  is the number of decision alternatives and  $k$  is a fixed number.  $E_j$  values are calculated using equation (3) and results are given in Table 5. Then,  $d_j$  deviation values were obtained for each criterion by subtracting 1 from the  $E_j$  value. In the last stage,  $w_j$  weight values were obtained as shown in Table 6 to determine the importance level of the criteria.

**Table 6.** Criteria weights

Criteria	FAKA	NK	CO	LO	FICA	NO	ÖK
$E_j$	0.906	0.890	0.812	0.753	0.977	0.554	0.921
$d_j$	0.094	0.110	0.188	0.247	0.023	0.446	0.079
$w_j$	<b>0.079</b>	<b>0.093</b>	<b>0.158</b>	<b>0.208</b>	<b>0.019</b>	<b>0.376</b>	<b>0.067</b>

The ranking of the importance of the criteria according to the weights ( $w_i$ ) obtained as a result of the application of the entropy method is as follows: NO>LO>CO>NK>FAKA>ÖK>FICA.

In Figure 2, the criteria and criteria weights with the largest share are expressed as percentages.



**Figure 2.** Pie chart showing criteria weights

In short, according to the results of the entropy method, the most important financial performance criterion is Cash Ratio and the second most important performance criterion is Liquidity Ratio. Financial Leverage, which has the lowest weight, is determined as a low impact criterion.

The criteria whose weights are calculated in Table 6 are used in the WASPAS method. WASPAS method will be used to evaluate the financial performance of electric energy enterprises.

In the first stage of the WASPAS method, the decision matrices need to be normalized as in the Entropy method. The decision matrices are normalized with the help of Equation (8) for the benefit criteria and Equation (9) for the cost criteria. In this context, Operating Profitability, Net Profitability, Current Ratio, Liquidity Ratio, Cash Ratio and Return on Equity are considered to benefit the business, while Financial Leverage is considered as a cost. Using the decision matrix, the decision matrix normalized according to the benefit and cost criteria is given in Table 7.

**Table 7.** Decision matrix normalized by waspas method

Alternative/Criteria	Normalized decision matrix						
	FAKA	NK	CO	LO	FICA	NO	ÖK
ENJSA	0.133	0.203	0.083	0.077	0.300	0.039	0.538
IZENR	0.325	0.266	0.121	0.021	0.724	0.003	0.831
ZOREN	0.217	0.002	0.070	0.068	0.284	0.019	0.009
ODAS	0.482	0.578	0.168	0.144	0.477	0.073	0.554
TATEN	0.482	0.734	0.112	0.112	0.350	0.133	0.508
AKFYE	0.759	0.438	0.070	0.071	0.344	0.055	0.154
AKSEN	0.145	0.172	0.168	0.165	0.488	0.023	0.369
ALFAS	0.205	0.375	0.196	0.141	0.412	0.123	0.877
CWENE	0.229	0.297	0.134	0.092	0.304	0.031	1.000
GWIND	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.323
SMRTG	0.163	0.172	0.157	0.126	0.300	0.025	0.492

For the Weighted Sum Model (WSM), each alternative value was multiplied by the criterion weight values calculated in the Entropy method over the normalized decision matrix and the sum of each electric power enterprises was taken and the  $Q_i^{(1)}$  value in Table 8 was obtained. In the next stage, the power of the criterion weight was taken for each alternative value over the normalized decision matrix for the Weighted Multiplication Model (WPM) and the values obtained were multiplied with each alternative respectively and the  $Q_i^{(2)}$  value in Table 8 was obtained.



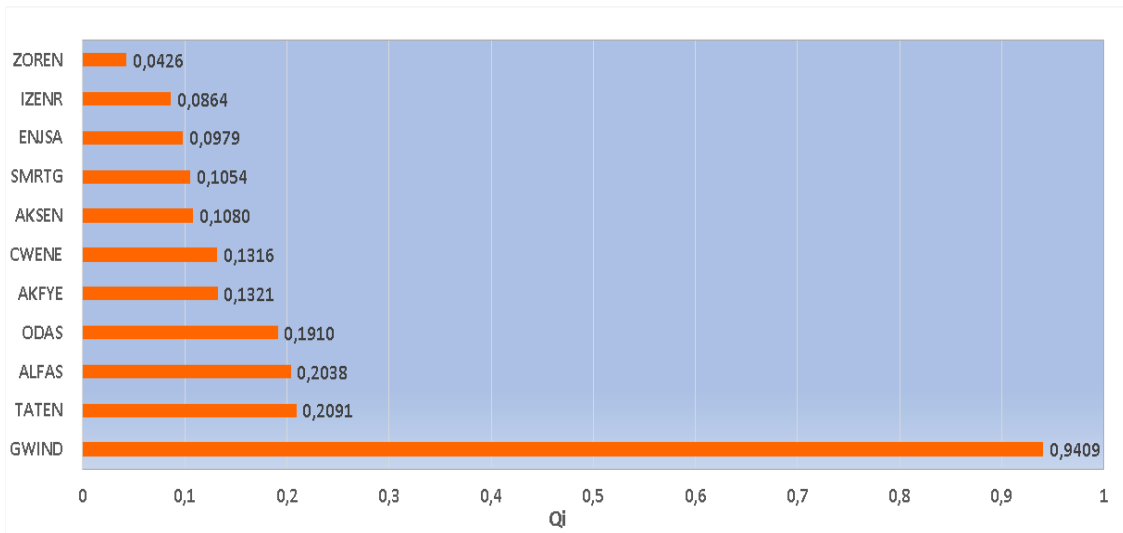
After obtaining  $Q_i^{(1)}$  and  $Q_i^{(2)}$  values within the scope of the Weight Sum and Multiplication model, the Weighted Common Overall Criteria value  $Q_i$  was calculated by taking ( $\lambda=0.5$ ) with the help of equation (12). According to the value of  $Q_i$ , a ranking is presented in Table 8. The value with the highest  $Q_i$  was selected as the best alternative.

**Table 8.** Weighted common general criteria values and prioritization

Electric energy companies	$Q_i^{(1)}$	$Q_i^{(2)}$	$Q_i$	Sorting	Best performance
ENJSA	0.1150	0.0808	0.0979	9	GWIND (Galata wind energy)
IZENR	0.1444	0.0284	0.0864	10	
ZOREN	0.0558	0.0294	0.0426	11	
ODAS	0.2219	0.1601	0.1910	4	
TATEN	0.2379	0.1803	0.2091	2	
AKFYE	0.1642	0.1001	0.1321	5	
AKSEN	0.1310	0.0849	0.1080	7	
ALFAS	0.2241	0.1835	0.2038	3	
CWENE	0.1703	0.0929	0.1316	6	
GWIND	0.9546	0.9271	0.9409	1	
SMRTG	0.1279	0.0829	0.1054	8	

Looking at the priority ranking in Table 8, it is seen that Galata Wind Energy is the company with the best financial performance in 2022. Sweetpinar Energy, Alfa Solar Energy and Odaş Electric follow, respectively. Zorlu Energy ranked last in 2022 with a lower performance compared to other electricity energy enterprises, and Izdemir Energy ranked second to last. To summarize briefly, the financial performance ranking of energy enterprises in 2022 is as follows: Galata Wind Energy > Sweetpinar Energy > Alfa Solar Energy > Odaş Electric > Akfen Renewable Energy > CW Enerji > Aksa Energy > Smart Solar Energy > Enerjisa Energy > Izdemir Energy > Zorlu Energy.

In Figure 3, the performances of enterprises are ranked from largest to smallest.



**Figure 3.** Financial performance ranking

In the application of the WASPAS method, the effect of different values of  $\lambda$  is examined in order to increase the accuracy in the decision-making process. Looking at the different values of ( $\lambda$ ) in Table 9, it is observed that the degree of importance in the ranking does not change. For all ( $\lambda$ ) values, Galata Wind Energy has the best financial performance.

**Table 9.** Overall total relative importance values of alternatives in 2022

2022	$\lambda=0$	$\lambda=0.1$	$\lambda=0.2$	$\lambda=0.3$	$\lambda=0.4$	$\lambda=0.5$	$\lambda=0.6$	$\lambda=0.7$	$\lambda=0.8$	$\lambda=0.9$	$\lambda=1$
ENJSA	0.081	0.084	0.088	0.091	0.095	0.098	0.101	0.105	0.108	0.112	0.115
IZENR	0.028	0.040	0.052	0.063	0.075	0.086	0.098	0.110	0.121	0.133	0.144
ZOREN	0.029	0.032	0.035	0.037	0.040	0.043	0.045	0.048	0.050	0.053	0.056
ODAS	0.160	0.166	0.172	0.179	0.185	0.191	0.197	0.203	0.210	0.216	0.222
TATEN	0.180	0.186	0.192	0.198	0.203	0.209	0.215	0.221	0.226	0.232	0.238
AKFYE	0.100	0.106	0.113	0.119	0.126	0.132	0.139	0.145	0.151	0.158	0.164
AKSEN	0.085	0.090	0.094	0.099	0.103	0.108	0.113	0.117	0.122	0.126	0.131
ALFAS	0.183	0.188	0.192	0.196	0.200	0.204	0.208	0.212	0.216	0.220	0.224
CWENE	0.093	0.101	0.108	0.116	0.124	0.132	0.139	0.147	0.155	0.163	0.170
GWIND	0.927	0.930	0.933	0.935	0.938	0.941	0.944	0.946	0.949	0.952	0.955
SMRTG	0.083	0.087	0.092	0.096	0.101	0.105	0.110	0.114	0.119	0.123	0.128

## 5. CONCLUSIONS

Performance evaluation is very important for electric energy enterprises. In order to increase their competitiveness and ensure their continuity, enterprises should regularly conduct performance evaluations. Financial performance is one of the leading factors to be taken into account in this evaluation process. Financial indicators such as revenues, expenses and profitability ratios of enterprises should be regularly monitored and analyzed. Analyzing the performance of enterprises in the energy sector within certain criteria and making the necessary improvements allows the current situation to be determined and thus more effective and efficient decision-making processes to be carried out.

Within the scope of the study, the performances of 11 electric power enterprises operating in Borsa Istanbul (BIST) were analyzed using their financial ratios for 2022. The 7 financial indicators determined to measure the performance of electric power enterprises are as follows: Operating Profitability, Net Profitability, Current Ratio, Liquidity Ratio, Financial Leverage, Cash Ratio, Return on Equity. In the analysis, the criteria were weighted using the Entropy method, one of the multi-criteria decision-making techniques, and then the financial performance of the enterprises was ranked using the WASPAS method. When the weights of the criteria selected according to the results of the Entropy method are analyzed, it is determined that the cash ratio is the most important criterion with a weight value of 0.376 and the financial leverage ratio is the lowest criterion with a weight value of 0.019. As a result of the weights obtained, it was determined that Galata Wind Energy had the highest performance with the application of the WASPAS method. In the same period, it was observed that Zorlu Energy had the lowest financial performance.

Based on the results of the analysis, it is very important for enterprises with low or medium financial performance to review their sales policies while making strategic decisions. In this process, it is important to gain competitive advantage by taking into account the performances of rival enterprises. In addition, electric power enterprises with low financial performance should strengthen their cash management by focusing more on the cash ratio criterion, which has the highest criterion weight. On the other hand, they should consider the financial leverage ratio criterion with the lowest criterion weight as a lower priority. Therefore, it is important for electric power enterprises with low financial performance to strengthen cash management and reduce debt burden as a priority. These strategies can be important steps towards improving their financial performance. Therefore, a comprehensive analysis and careful planning are necessary when making strategic decisions.

## 6. REFERENCES

- Keleş, M.K., Armağan, İ.Ü., Özdağoğlu, A., 2021. Analysis of the financial performance of electricity generating companies in the covid-19 pandemic environment with roc and smart integrated approach. *Bilecik Şeyh Edebali University Journal of Social Sciences*, 6(2), 227-235.
- Pricewaterhouse Coopers Overview of the Turkish Electricity Market. <https://www.pwc.com.tr/tr/sectorler/enerji/turkiye-elektrik-piyasasina-genel-bakis-2023.pdf>, Access date: 13.05.2024.

3. Akgün, A., 2022. Financial evaluation of bist energy companies with critic and codas integrated approach. *Journal of Selçuk University Institute of Social Sciences*, (48), 338-356.
4. Topal, A., 2021. Financial performance analysis of electricity generation companies with multi-criteria decision making analysis: entropy based cocoso method. *Business & Management Studies: An International Journal*, 9(2), 532-546.
5. Aytekin, S., Erol, A. F., 2018. Is financial performance a key determinant of corporate sustainability performance? An application with aras method in Bist sustainability index. *International Journal of Economic and Administrative Studies*, 869-886.
6. İskenderoğlu, Ö., Karadeniz, E., Ayyıldız, N., 2015. Financial analysis of the energy sector: a comparison of Turkish and European energy sector. *Journal of Business and Economics Studies*, 3(3), 86-97.
7. Özbek, A., 2021. Multi-criteria decision making methods and problem solving with Excel.
8. Ömürbek, V., 2013. Financial performance evaluation with topsis method in airline transportation sector. *Journal of Süleyman Demirel University Faculty of Economics and Administrative Sciences*, 18(3), 343-363.
9. Kiliç, P., 2019. The relationship between financial performance and stock returns: an application on firms operating in energy sector in Bist. Master's Thesis, Institute of Social Sciences.
10. Sakarya, Ş., Yıldırım, H.H., Akkuş, H.T., Determination of Financial Performance of Energy Companies Traded on Bist by Topsis Multi-Criteria Decision Making Method.
11. Baykal, K.B., Akıllı, K., 2023. Evaluation of financial performance of life and pension insurance companies operating in Turkey with entropy-based waspas method. *Social Sciences Research Journal*, 12(1), 63-80.
12. Kangal, I.M., 2021. Financial performance measurement of energy companies in Bist with entropy and waspas methods. *EYI 2021 XXIth International Symposium on Econometrics Operations Research and Statistics: Selected Papers*, 261.
13. Çilek, A., Karavardar, A., 2021. Analysis of banking performance of cities in the Black Sea region with entropy-based waspas method: 2014-2019 period. *Opus International Journal of Society Researches*, 18 (Special Issue on Management and Organization), 1484-1513.
14. Eş, A., Kök, E., 2020. Analysis of bank performances with entropy based waspas method. *Düzce University Journal of Social Sciences*, 10(2), 233-250.
15. Orçun, Ç., 2019. Performance analysis with waspas method in energy sector. *Bolu Abant İzzet Baysal University Journal of Institute of Social Sciences*, 19(2), 439-453.
16. Karaca, C., Ulutaş, A., 2018. Selection of a suitable renewable energy source for Turkey using entropy and waspas methods. *Ege Academic Review*, 18(3), 483-494.
17. Mert, U.R.A.L., Demireli, E., Özçalık, S.G., 2018. Performance analysis in public banks: an application with entropy and waspas methods. *Pamukkale University Journal of Institute of Social Sciences*, (31), 129-141.
18. Akçakanat, Ö., Eren, H., Aksoy, E., Ömürbek, V., 2017. Performance evaluation with entropy and waspas methods in banking sector. *Journal of Süleyman Demirel University Faculty of Economics and Administrative Sciences*, 22(2), 285-300.
19. Ersöz, F., Kabak, M., 2010. Literature review of multi-criteria decision making methods in defense industry applications. *Journal of Defense Sciences*, 9(1), 97-125.
20. Oztel, A., 2016. A new approach in multi-criteria decision making selection. *17th International Symposium on Econometrics*. Sivas.
21. Arslankaya, D., Göraltay, K., 2019. Current approaches in multi-criteria decision making methods.
22. Zhang, H., Gu, C.L., Gu, L.W., Zhang, Y., 2011. The evaluation of tourism destination competitiveness by topsis & information entropy-a case in the Yangtze river delta of China. *Tourism Management*, 32(2), 443-451.
23. Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antucheviciene, J., Zakarevičius, A., 2012. Optimization of weighted aggregated sum product assessment. *Electronics and Electrical Engineering*, 122(6), 3-6.
24. Gezen, A., 2019. Performance analysis of participation banks operating in Turkey with entropy and waspas methods. *Journal of Accounting and Finance*, (84), 213-232.
25. Erol, I., Ferrell, W., 2009. Integrated approach for reorganizing purchasing: theory and a case analysis on a Turkish company. *Computers & Industrial Engineering*, 56, 1192-1204.

## 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, yayınlandığı yer, son sayfa no.

**Bildiri ise:** Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. bildirinin tam başlığı. konferansın adı, yapıldığı yer.

**Elektronik ortamdan alınmış ise:** Bildiri sadece CD/DVD'de yayınlanış ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, yıl, bildirinin adı. konferansın adı (CD/DVD), yapıldığı yer, yıl. "Konferansın adından hemen sonra parantez içerisinde CD/DVD olduğu belirtilecektir."

**Tez ise:** Yazarın soyadı, adının baş harfi., 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, yayınlandığı yer.

**Web Sitesi ise:** Yazar(lar) belli ise; yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, varsa yayınlandığı yıl. yazının başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.

**Kurum/Kuruluşlara ait ise:** Kurum adı, varsa yayınlandığı yıl. yazının 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 yayınlandığı yıl, konunun tam adı, Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.