



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

ÇUKUROVA UNIVERSITY  
JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING

Cilt/Vol: 38

Sayı/Issue: 1

Mart/March 2023

ISSN 2757-9255



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



**Sahibi (Owner)**

Ulus ÇEVİK  
Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dekanı

**Editör (Editor)**

Serin MEZARCIÖZ

**EDİTÖR KURULU (Editorial Board)**

**Ramazan ÇOBAN** (Çukurova Üniversitesi)

**Mutlu AVCI** (Çukurova Üniversitesi)

**Mustafa GÖK** (Çukurova Üniversitesi)

**Ahmet DAĞ** (Çukurova Üniversitesi)

**Hüseyin AKILLI** (Çukurova Üniversitesi)

**Ulus ÇEVİK** (Çukurova Üniversitesi)

**Ali KOKANGÜL** (Çukurova Üniversitesi)

**Mesut BAŞIBÜYÜK** (Çukurova Üniversitesi)

**Mevlüt Sami AKÖZ** (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)

**Ulvi Can ÜNLÜGENÇ** (Çukurova Üniversitesi)

**Özen KILIÇ** (Çukurova Üniversitesi)

**Serin MEZARCIÖZ** (Çukurova Üniversitesi)

**Zeynep ZAIMOĞLU** (Çukurova Üniversitesi)

**Ali KESKİN** (Çukurova Üniversitesi)

**R. Tuğrul OĞULATA** (Çukurova Üniversitesi)

**F. Duygu SABAN** (Çukurova Üniversitesi)

**Hüseyin VAPUR** (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 Fax : (322) 338 61 26 E-posta: mmfdergi@cu.edu.tr - 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 gelişimlerine 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/CONTENTS

<b>Genlik Değişiminin Titreşimli Gerilim Giderme Verim Oranı Üzerindeki Etkisi.....</b>	<b>1</b>
<i>Effect of Amplitude Change on Vibratory Stress Relief Efficiency</i>	
<b>Can GÖNENLİ ve Oğuzhan DAŞ</b>	
<b>The Influence of Climatological Variables on Particulate Matter and Sulphur Dioxide.....</b>	<b>13</b>
<i>İklimsel Değişkenlerin Partikül Madde ve Kükürt Dioksit Üzerindeki Etkisi</i>	
<b>Mine Tülin ZATEROĞLU</b>	
<b>Çelik Doğal Gaz Boruların Eğrilik Kapasitesi Üzerine Örnek Bir Çalışma: İstanbul Boğaz Geçişi.....</b>	<b>25</b>
<i>A Sample Study on Curvature Capacity of Steel Natural Gas Pipes: Bosphorus Crossing</i>	
<b>Adil YİĞİT</b>	
<b>Performance Analysis of CNN Channel Attention Modules for Image Classification Task .....</b>	<b>35</b>
<i>Görüntü Sınıflandırma Görevi için CNN Kanal Dikkat Modüllerinin Performans Analizi</i>	
<b>Mehmet SARIGÜL</b>	
<b>İstatistiksel Yöntemlerin Dekapaj Miktarının Belirlenmesinde Kullanılabilirliği ve Bir Açık Ocak Krom Sahasına Uygulanması .....</b>	<b>41</b>
<i>Modelling of Stripping Amount by Working Time in Open-Pit Mines</i>	
<b>Ali Can ÖZDEMİR</b>	
<b>Kanaldaki Jet Akış Sayısına Bağlı Olarak Farklı Model Yüzeylerinden Olan Isı Transferi ve Akış Yapısının Analizi .....</b>	<b>49</b>
<i>Analysis of Heat Transfer and Flow Structure from Distinct Model Facets Depending on the Number of Jet Flows in Channel</i>	
<b>Koray KARABULUT ve Yeliz ALNAK</b>	
<b>Esnek Üretim Sistemlerinin Dinamik Çizelgelenmesi için Çoklu Etmen Yaklaşımı ve Yönlendirme Kurallarının Karşılaştırılması .....</b>	<b>61</b>
<i>Comparison of Multi-Agent Approach and Dispatching Rules for Dynamic Scheduling of Flexible Manufacturing Systems</i>	
<b>Cenk ŞAHİN ve Rızvan EROL</b>	
<b>Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Eğri Eksenli Petek Kirişlerin Eğilme Analizi.....</b>	<b>73</b>
<i>Bending Analysis of Curved Castellated Beams Via the Finite Element Method</i>	
<b>Duygu ERTÜRKMEN ve Ahmad Reshad NOORİ</b>	

## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Optimization of Nd:YAG Laser Welding Factors of Cold Rolled Strenx 700 CR Steel by Taguchi Method ..... 85**  
*Soğuk Haddelenmiş Strenx 700 CR Çeliğinin Nd:YAG Lazer Kaynak Faktörlerinin Taguchi Yöntemi ile Optimizasyonu*  
**Oğuz TUNCEL ve Hakan AYDIN**
- Atmosferik Afetlerin Sentinel-2 ile İncelenmesi: Antalya İli 13.11.2017 Hortum Olayı ve Uzaktan Algılama Yaklaşımı ile Hasar Tespiti ..... 93**  
*Investigation of Atmospheric Disasters with Sentinel-2: Antalya Province 13.11.2017 Waterspout Event and Damage Estimation by Remote Sensing*  
**Şerife Pınar GÜVEL ve Mehmet Ali AKGÜL**
- Adana-Karaisalı Kayrak Taşlarının Dış Cephe ve Çatı Kaplamada Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi ..... 105**  
*Evaluation of the Usability of Slate Stones from Adana-Karaisa in Exterior and Roofing Covarege*  
**Esma KAHRAMAN ve Nil YAPICI**
- Ni-B/TiC Nanokompozit Kaplamaların Korozyon Dayanımlarının Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EES) Yöntemi ile Analizi ..... 115**  
*Analysis of Corrosion Resistance of Ni-B/TiC Nanocomposite Coatings by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Method*  
**Ersin ÜNAL, Abdulkadir YAŞAR ve İsmail Hakkı KARAHAN**
- Seçilmiş İpliklerde Zweigle İplik Tüylülüğü Sonuçlarına Farklı Test Hızlarının Etkisi..... 131**  
*The Effect of Different Test Speed on Zweigle Yarn Hairiness Results in Selected Yarns*  
**Abdurrahman TELLİ**
- Yaya Üst Geçitlerinin 2018 Deprem Yönetmeliğine Göre Analiz ve Tasarımları..... 143**  
*Analysis and Design of Pedestrian Bridges According to Relevant Earthquake Regulations*  
**Mohammad Yatim SAMİM ve Beytullah TEMEL**
- Akışkan Hatlarında Maliyet Düşürme ve Verimlilik Arttırma Amacıyla Tasarlanan Demontaj Sistemlerinin Prototip Üretimi ve Fizibilite Analizi ..... 157**  
*Prototype Production and Feasibility Analysis of Disassembly Systems Designed to Reduce Costs and Increase Efficiency in Fluid Lines*  
**Erhan ÖZKAN**

## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

<b>Energy Recovery Analysis of A Biomass Type of Installed Waste Water Treatment Plant.....</b>	<b>169</b>
<i>Biokütle Tipi Kurulu Atık Su Arıtma Tesisinin Enerji Geri Kazanım Analizi</i>	
<b>Akın İLHAN</b>	
<b>Çevrimsel Voltametri Tabanlı Mikroakışkan Sistem Tasarımı ve Analizi.....</b>	<b>185</b>
<i>Cyclic Voltammetry Based Microfluidic System Design and Analysis</i>	
<b>Çetin CANPOLAT ve Yonca TOGAY</b>	
<b>Energy Management Practices for Improving Energy Efficiency in Industries: Furnace, Steam Boiler, HVAC, and Cooling Systems .....</b>	<b>195</b>
<i>Sanayide Enerji Verimliliğini Artırıcı Enerji Yönetimi Uygulamaları: Fırın, Kazan HVAC ve Soğutma Sistemlerinde</i>	
<b>Hacer AKHAN</b>	
<b>Bir Konfeksiyon İşletmesinin Dikim Bölümünde İstatistiksel Proses Kontrol Tekniklerinin Uygulanması.....</b>	<b>211</b>
<i>Implementation of Statistical Process Control Techniques in the Sewing Department of an Apparel Plant</i>	
<b>Zehra KUMAŞ ve Pınar DURU BAYKAL</b>	
<b>Next-Month Prediction of Hourly Solar Irradiance Based on Long Short-Term Memory Network .....</b>	<b>225</b>
<i>Uzun Kısa Dönemli Bellek Ağına Dayalı Saatlik Güneş Işınımının Gelecek Ay Tahmini</i>	
<b>İnayet Özge AKSU</b>	
<b>Kangal Termik Santralının 3. Ünitesinin Enerji ve Ekserji Analizi.....</b>	<b>233</b>
<i>Energy and Exergy Analysis of the 3<sup>rd</sup> Unit of Kangal Thermal Power Plant</i>	
<b>Hasan Can ADEM ve Cahit GÜRLEK</b>	
<b>Numerical Investigation of the Passive Flow Control Around A Circular Cylinder .....</b>	<b>243</b>
<i>Dairesel Silindir Çevresindeki Pasif Akış Kontrolünün Sayısal İncelenmesi</i>	
<b>Tural TUNAY</b>	
<b>Anamur-Kaledran Arası (Mersin) T5 Tünelinin Kaya Kütle Sınıflaması.....</b>	<b>253</b>
<i>Rock Mass Classification of T5 Tunnel Between Anamur-Kaledran (Mersin)</i>	
<b>Mehmet AYDOĞDU ve Sedat TÜRKMEN</b>	
<b>A New Holistic Risk Analysis Approach Based on the House of Quality.....</b>	<b>265</b>
<i>Kalite Evi Yaklaşımına Dayalı Yeni Bir Holistik Risk Analizi Yöntemi</i>	
<b>Birsen İrem SELAMOĞLU ve Yusuf KUVVETLİ</b>	

## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

<b>Elektrik Yapım İşi Sektöründe Bulanık Fine-Kinney Metodu ile Risklerin Önceliklendirilmesi .....</b>	<b>281</b>
<i>Prioritization of Risks by Fuzzy Fine Kinney Method in Electrical Construction Sector</i>	
<b>Umut ERGÜN ve Funda KAHRAMAN</b>	

## Genlik Değişiminin Titreşimli Gerilim Giderme Verim Oranı Üzerindeki Etkisi

Can GÖNENLİ<sup>\*1</sup> ORCID 0000-0001-9163-1569  
Oğuzhan DAŞ<sup>2</sup> ORCID 0000-0001-7623-9278

<sup>1</sup>Ege Üniversitesi, Ege Meslek Yüksekokulu, İzmir

<sup>2</sup>Milli Savunma Üniversitesi, Hava Astsubay Meslek Yüksekokulu, İzmir

Geliş tarihi: 06.01.2022

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: GÖNENLİ, C., DAŞ, O., (2023). Genlik Değişiminin Titreşimli Gerilim Giderme Verim Oranı Üzerindeki Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 1-12.

### Öz

Bu çalışmada, literatürde “Vibratory Stress Relief” adıyla bilinen “Titreşimli Gerilim Giderme” yöntemi, ANSYS programı aracılığıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simüle edilmiştir. Paslanmaz çelik ve alüminyum malzeme kullanılarak modellenen üç farklı geometrideki öngerilmeli plakalar, üçer farklı öngerilme durumu için incelenmiştir. Öngerilmeli plaka oluşturabilmek için öncelikle plakaya yer değiştirme uygulanmış ve sonrasında serbest bırakılmıştır. Uygulanan yer değiştirme miktarı ile farklı değerlerde üçer öngerilme durumu yaratılmıştır. Öngerilmeli plakanın birinci rezonans frekansı tespit edilmiş ve devamında farklı genlik miktarlarında gerilim giderme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kare ve iki farklı dikdörtgen geometriye sahip plakalarda gerçekleştirilen ANSYS simülasyonlarına göre, paslanmaz çelik için %80 ile %95 arasında artık gerilme değerlerinin azaldığı görülürken alüminyum için ise bu aralığın %71 ile %91 bandında olduğu görülmüştür. Ayrıca her bir plaka için oluşturulan gerilim-gerilme grafiklerine göre, yapı içerisindeki öngerilme miktarının, farklı genlik değerlerindeki titreşimler ile farklı oranlarda azaldığı tespit edilmiştir. Öngerilme miktarının artmasıyla plakalara uygulanabilecek titreşimli gerilim giderme genliği aralığının da arttığı görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Titreşimli gerilim giderme, Genlik, Sonlu elemanlar yöntemi, Paslanmaz çelik, Alüminyum

### Effect of Amplitude Change on Vibratory Stress Relief Efficiency

#### Abstract

In this study, the “Vibratory Stress Relief” method, known as “Titreşimli Gerilim Giderme” in the Turkish literature, is simulated using the finite element method through the ANSYS. Prestressed plates in three different geometries, which are modeled using stainless steel and aluminum materials that are not suitable for conventional heat treatment, are examined for three different prestressed conditions. In order to model a prestressed plate, the plate is first displaced and then released. Three prestressed conditions at different values are modelled. The first resonance frequency of the prestressed plate is determined and

---

\* Sorumlu yazar (Corresponding Author): Can GÖNENLİ, [can.gonenli@ege.edu.tr](mailto:can.gonenli@ege.edu.tr)

then stress relief is performed at different amplitudes. According to ANSYS simulations, it is observed that the residual stress values decreased between 80% and 95% for stainless steel in different situations, while this range is between 71% and 91% for aluminum. According to strain-stress graphs, it is observed that the prestress value in the structure decreases at different rates with vibrations at different amplitudes, while the range of vibration stress relief amplitude that can be applied to the plates expands with the increasing the amount of prestress.

**Keywords:** Vibratory stress relief, Amplitude, Finite element method, Stainless steel, Aluminum

## 1. GİRİŞ

Kaynaklı imalat, özellikle metal sanayide sıklıkla kullanılan bir üretim yöntemidir. Farklı görevde ve büyüklüklerde kullanılan tonajlı yapılar, çözülemeyen bağlantı türlerinden biri olan kaynak işlemi ile birleştirilmekte ve farklı yüklere maruz kalmaktadırlar. Gerek kuvvet iletimi konusunda gerek değişken yüklere dayanım konusunda güvenilir bir yöntem olan kaynaklı imalat işlemi, uygulanması esnasındaki yüksek ısıdan dolayı parçalarda çarpılmaya neden olmaktadır. Yüksek ısıya maruz kalan yapılar, kaynakla birleştirilen parçalar sebebiyle geometrilerini korumakla beraber, bir yandan da iç yapılarında ihmal edilemeyecek seviyelerde öngerilme oluşmaktadır. Kontrol edilemeyen ve düzensiz öngerilmeler ise, yapıdan istenen dayanım özelliklerin yitirilmesine yol açmaktadır. İmalat esnasında yapıların içerisinde oluşan öngerilmeler, geleneksel ısı tavlama işlemleri ile giderilebilmektedir. Ancak, bazı yapılar gerek boyutları gerek malzemeleri dolayısıyla ısı işleme tabi tutulmaya uygun değildir. Bu durum, alternatif gerilim giderme metodlarına yönelimi arttırmıştır. 20. yüzyılın ortalarından itibaren dünyada kullanılan alternatif bir gerilim giderme yöntemi olan titreşimli gerilim giderme metodu, özellikle son yıllarda ülkemizde de kendisine bir pazar edinmeye başlamıştır.

Titreşim, yapının tamamını ilgilendiren dinamik bir harekettir. Özellikle rezonans frekansında titreşim, yapının tüm kütlelerini etkileyen özel bir titreşim durumudur. Literatürde, titreşimli gerilim giderme metodu ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Walker ve arkadaşları [1] titreşimli gerilim giderme yöntemi ile ilgili kapsamlı bir çalışma sunmuşlardır. Buna göre düşük alışımlı

EN3b çelik malzemeye haddeleme yöntemi ile ön gerilim verilmiştir. Buna göre 100 Hz frekansta düşük genlikli titreşimin uzun bir süre ile uygulanması ile %40 oranında gerilim giderilmesi sağlanmıştır. Zhu ve arkadaşları [2] çekme deformasyonunun GH4169 alaşımında meydana gelen artık gerilmeler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaç için, X-ray artık gerilme testi, X-ray difraktometresi ve elektron geri saçılım difraksiyonu yöntemlerini kullanmışlardır. Buna göre %3'lük bir çekme deformasyonu sonucunda %90'luk bir gerilim giderimi elde etmişlerdir. Cai ve arkadaşları [3], akuple yanal-torsiyonel rezonansından faydalanan bir titreşimli gerilim giderme (TGG) yöntemini ele almışlardır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yanal rezonans ve akuple yanal-torsiyonel rezonans frekanslarının gerilim giderme etkisi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Xu ve arkadaşları [4] termal titreşim gerilim giderme (TTGG) sürecinin ince alüminyum 7075 alaşım parçalarının boyutsal stabilitesi ve artık gerilmesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Buna göre eşdeğer eğilme direngenliğinin artması veya yapının topolojik güçlendirme ile yapı üzerinde meydana gelen deformasyonun azaldığı ve bu durumun TTGG yöntemini daha etkin kılarak daha fazla artık gerilme azalttığı sonucuna varmışlardır. Wu ve arkadaşları [5] Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak 7075 alüminyum alaşım halkalarında gerilim giderme yöntemlerinden titreşimli gerilim giderme (TGG) ve termal-titreşim gerilim giderme (TTGG) yöntemlerini ele almışlardır. Buna göre TTGG'nin TGG'ye göre %20 daha fazla gerilim giderebildiği sonucuna ulaşmışlardır. Li ve Fang [6] kaynaklanmış D36 dikdörtgen plakalarında titreşimli gerilim giderme (TGG) yöntemini uygulamışlardır. Buna göre yanal ve enine yönde

meydana gelen artık gerilmelerin birlikte düşmesi gerektiği aksi durumda bir yönde düşme gözlemlenirken diğer yönde artış gözlemlenebileceği sonucuna varmışlardır. Zhao ve arkadaşları [7] doğrusal olmayan süper harmonik titreşimli gerilim giderme yöntemi parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Buna göre yay direngenlik parametresi ve genliğinin bu titreşimli gerilim giderme yöntemini kullanan cihazlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Vardanjanı ve arkadaşları [8] işleme tekniğinden dolayı meydana gelen artık gerilmelerin titreşimli gerilim giderme (TGG) yöntemi ile azaltılması üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Buna göre doğrusal kinematik sertleşmeli plastisite teorisine dayalı geliştirilen matematiksel modelin analitik sonuçlarla dikkörtgen kesitli kirişler için benzer davranış gösterdiği sonucuna varmışlardır. Luh ve Hwang [9] ayarlanmış delik delme yöntemini dikkate alarak titreşimli gerilim giderme (TGG) yönteminin etkisini araştırmışlardır. Buna göre maksimum artık gerilmenin %5,8 ile %27 arasında değişen oranlarda azaldığı sonucuna varmışlardır. Kacar ve Yılmaz [10] titreşimli gerilim giderme (TGG) yönteminin kaynaklanmış S355J2 çelik bağlantılarının yorulma ömrü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Buna göre yapının çekme dayanımı ve yüzey sertliğinin küçük bir oranda arttığını, yorulma ömrünün yaklaşık üç kat arttığını ve TGG tekniğinin uygulanmasından sonra yüzey üzerinde artık gerilmenin azaldığı sonucuna varmışlardır. Tatar ve arkadaşları [11] deneysel ve nümerik bir yaklaşım ile kaynaklanmış östenitik paslanmaz çelikler üzerinde titreşimli gerilim giderme yönteminin etkisini incelemişlerdir. Bunun için arttırımlı merkezi delik delme metodu kullanılmış ve modal sarsıcı ile düşük ve yüksek frekans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Buna göre tahrik genliği arttıkça giderilen artık gerilme oranının arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, titreşimli gerilim giderme yönteminin etkinliğinin ilk çevrimde meydana geldiği sonucuna da ulaşmışlardır. Robinson ve arkadaşları [12] 2014A alüminyum alaşımında meydana gelen artık gerilmelerin giderilmesi ile ilgili olarak polialkalin glikol su verme (PAG) ve titreşimli gerilim

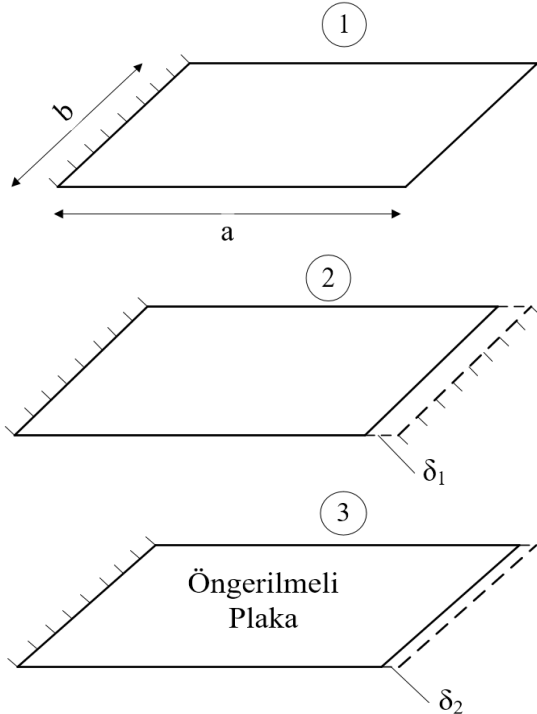
giderme (TGG) yöntemlerini araştırmışlardır. Buna göre her iki yöntemin de gerilim giderebildiğini ancak PAG yönteminin TGG'ye kıyasla çok daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Zhang ve arkadaşları [13] ultrasonik titreşim kullanarak kaynaklanmış alüminyum plakalarda artık gerilim giderme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak bu yöntem kullanılarak artık gerilimin en az %27 oranında giderildiği tespit edilmiştir. Huo ve arkadaşları [14] yüksek frekanslı titreşimli gerilim giderme (TGG) cihazı geliştirmişlerdir. Cihazın etkinliği ANSYS modeli ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak tasarlanan cihazın TGG yöntemini geliştirdiği anlaşılmıştır. Gao ve arkadaşları [15] titreşimli gerilim gidermeye (TGG) maruz kalan Ti-6Al-4V malzemesinin yorulma ömrünün incelenmesine dair deneysel bir çalışma sunmuşlardır. Sonuç olarak gerilim giderilmiş malzemenin yorulma ömrünün %10,60'a kadar arttığını tespit etmişlerdir. Lai ve arkadaşları [16] titreşimli gerilim giderimi sırasında düşük karbonlu çeliklerde meydana gelen iç sürtünmelerin gelişimini araştırmışlardır. Sonuç olarak titreşimin genliğine bağlı olarak yapının yorulma ömrüne etki eden iç sürtünmelerde zamana bağlı artışlar ve azalmalar tespit etmişlerdir. Gong ve arkadaşları [17] titreşimli gerilim giderme (TGG) yönteminin ince Al 7075 alüminyum alaşımlarının şekil stabilitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Buna göre TGG yöntemi sadece artık gerilmeyi düşürmemiş, aynı zamanda malzemenin şekilsel stabilite özelliğini de geliştirmiştir.

Bu çalışmada, titreşimli gerilim giderme yönteminde kullanılan parametrelerden biri olan genlik değerinin gerilim giderme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Genlik, aynı zamanda mekanik titreşimde de kullanılan ve ölçülebilen bir parametredir. Çekme deformasyonu ile öngerilme oluşturulan üç farklı geometriye ve iki farklı malzemeye sahip ince plakalarda, farklı genlikler uygulanarak titreşimli gerilim giderme yöntemi ANSYS aracılığıyla simüle edilmiş ve teorik olarak gerilimin azalma miktarı tespit edilmiştir. Literatürde bulunan birçok çalışmada elde edilen sonuçlara paralel olarak, yöntemin doğru

parametrelerle uygulanması ile ısı tavlama elde edilebilecek sonuçlara yaklaşılabileceği görülmektedir. Yapılar içerisindeki öngerilme miktarının fazla olması yöntemin uygulanma aralığını da genişletirken, her bir plaka için üç farklı öngerilme durumu için tekrarlanan simülasyonlarda gerilim giderme başarı oranının %70 ile %95 aralığında olduğu görülmektedir.

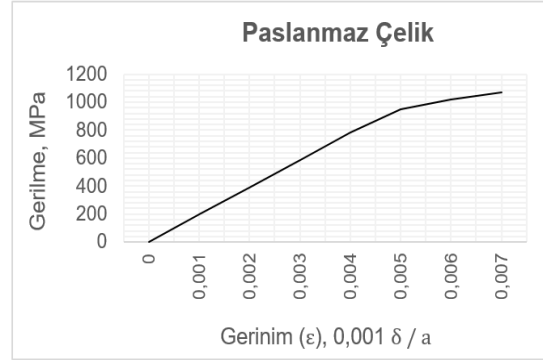
## 2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada incelenen plakaların öngerilmeli hale getirilebilmesi için, ilk olarak yapılar tek kenarı sabit halde modellenmiştir. Sabitlenen kenarın karşı kenarından yer değiştirme tanımlanarak, yapı içerisinde gerilme yaratılmıştır. Devamında ise karşı kenara verilen yer değiştirme kaldırılmış ve plaka yeniden ilk durumundaki gibi tek kenarı sabit hale getirilmiştir. Bu işlem sonucunda, yapıya uygulanan yer değiştirme değerine bağlı olarak yapı içerisinde farklı değerlerde öngerilme oluşması sağlanmıştır. Şekil 1’de üç aşamalı öngerilme oluşturma adımları verilmiştir.

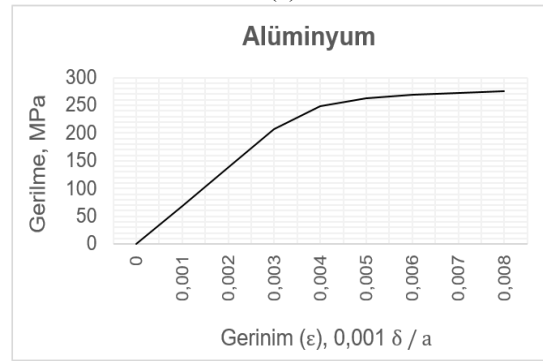


Şekil 1. Öngerilme oluşturma aşamaları

Malzeme olarak geleneksel ısı tavlama işlemlerine uygun olmayan paslanmaz çelik (17-4PH H1000) ve alüminyum (6061-T6) seçilmiştir [18]. Bu iki malzemeye ait gerilim-gerilme grafikleri, Şekil 2’de verilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2. Gerilim-gerilme grafikleri, (a) Paslanmaz çelik, (b) Alüminyum [18,19]

Paslanmaz çelik ve alüminyum olmak üzere toplamda iki farklı malzeme, kare ( $a/b=1$ ) ve dikdörtgen ( $a/b=2$  ve  $a/b=0,5$ ) olmak üzere üç farklı geometri ve her biri için üç farklı öngerilme durumu olmak üzere toplamda 18 farklı durum incelenmiştir. Çizelge 1’de, çalışmada kullanılan malzemelere ait mekanik özellikler ile incelenen ince plakaların geometrik değerleri sunulmaktadır.

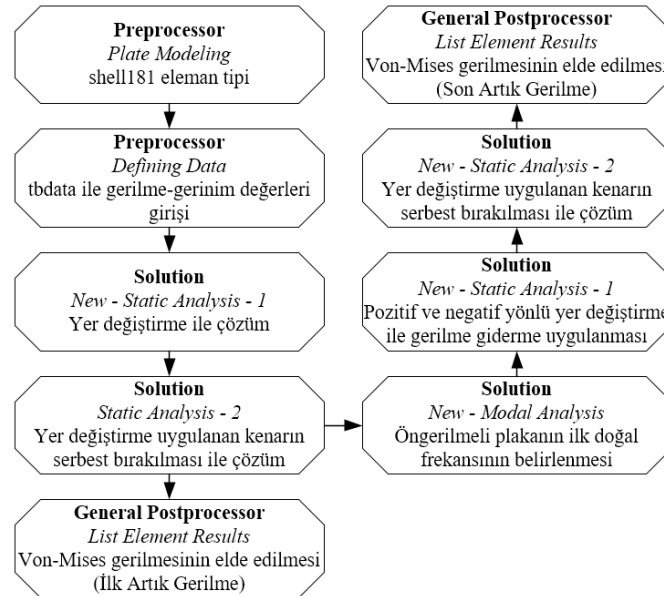


Çizelge 1. Malzeme özellikleri ve plaka geometrisi

Sembol	İsim	Değer
$E_{al}$	Elastisite modülü, alüminyum	68,94 GPa
$E_{ss}$	Elastisite modülü, paslanmaz çelik	196,5 GPa
$\rho_{al}$	Kütle yoğunluğu, alüminyum	2768 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{ss}$	Kütle yoğunluğu, paslanmaz çelik	7806 kg/m <sup>3</sup>
$\nu_{al}$	Poisson oranı, alüminyum	0,33
$\nu_{ss}$	Poisson oranı, paslanmaz çelik	0,27
$a$	Plaka uzunluğu	0,5 m – 0,25 m
$b$	Plaka genişliği	0,5 m – 0,25 m
$a/b$	Kare plaka (a=0,5 m, b=0,5 m)	1
$a/b$	Dikdörtgen plaka (a=0,5 m, b=0,25 m)	2
$a/b$	Dikdörtgen plaka (a=0,25 m, b=0,5 m)	0,5
$h$	Plaka kalınlığı	0,005 m
...	Mesh eleman ölçüsü	0,05 m

Seçilen malzeme tipleri ve geometrilere uygun olarak, öngerilmenin tüm eksenlerdeki toplam etkisinin incelenmesi amacıyla, altı serbestlik derecesini de temsil eden shell181 eleman tipi seçilmiştir [20]. Şekil 1’de verilen öngerilme oluşturma aşamalarını kapsayan ve Şekil 2’de verilen malzeme özelliklerine sahip öngerilmeli modeldeki gerilim giderme işlemi ANSYS ile simüle edilmiştir. ANSYS’de öngerilme oluşturma ve gerilim giderme işlemleri birbirini takip eden toplamda beş analiz ile gerçekleştirilmiştir. Yer değiştirme uygulanan kenar serbest bırakıldıktan

ve öngerilme oluşturulduktan sonra, yer değiştirme uygulanan kenara farklı genlik değerlerinde ve ilk rezonans frekansında pozitif ve negatif yönlü yer değiştirme uygulanmıştır. Rezonans frekansında plakaya uygulanan pozitif ve negatif yönlü yer değiştirme, ilgili kenarda titreşimi temsil etmekte ve böylece plakaya titreşimli gerilim giderme işlemi uygulanmış olmaktadır. Son olarak, titreşim uygulanan kenar serbest bırakılarak işlem tamamlanmaktadır. Şekil 3, ANSYS’te gerçekleştirilen tüm adımların akış şemasını göstermektedir.



Şekil 3. ANSYS APDL akış şeması

Şekil 3'te de görülebileceği gibi, öngerilme oluşturma aşamasından sonra yer değiştirme kaldırılarak plaka içerisinde oluşan öngerilme değeri kaydedilmektedir. İlgili öngerilme değeri korunarak, modal analiz ile öngerilmeli plakanın doğal frekans analizi gerçekleştirilmektedir. Devamında ise birinci doğal frekans değeri ve farklı genlikler kullanılarak titreşimli gerilim giderme işlemleri uygulanmaktadır. İşlemler tamamlandıktan sonra uygulanan döngüsel yer değiştirme kaldırılarak, plakanın içerisinde kalan artık gerilme değeri okunmakta ve öngerilme değeri ile karşılaştırılmaktadır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

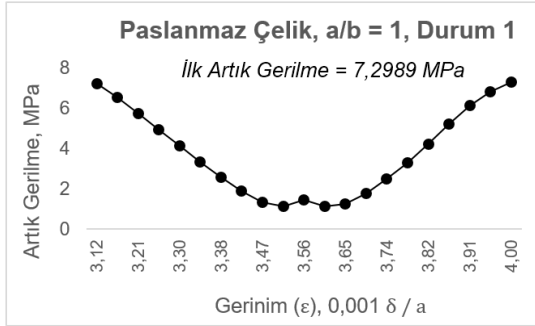
Çalışmada iki farklı malzeme, üç farklı öngerilme durumu ve üç farklı geometrideki ince plaka, farklı genlik değerlerindeki titreşimli gerilim giderme yöntemine maruz bırakılmışlardır. Farklı öngerilme değerlerindeki artık gerilme davranışlarının incelenbilmesi için yapılar Şekil 2'de verilen gerilim-gerilme eğrileri dikkate alınarak akma sınırı ve akma sınırının hemen üzerinde deformasyonlarda öngerilmeli hale getirilmişlerdir. Çizelge 2, her bir plaka ve her bir durum için oluşturulan öngerilmeli yapıların öngerilme değerlerini vermektedir.

**Çizelge 2.** Üç farklı durum ve iki farklı malzeme için oluşturulan ilk artık gerilme (öngerilme) değerleri

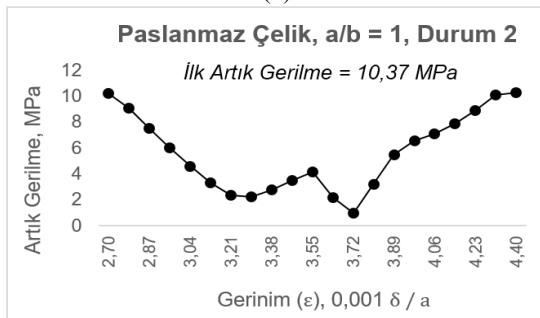
		<b>a/b = 1</b> <b>Artık gerilme (MPa)</b>	<b>a/b = 2</b> <b>Artık gerilme (MPa)</b>	<b>a/b = 0,5</b> <b>Artık gerilme (MPa)</b>
<i>Paslanmaz çelik</i>	Durum 1	7,299	4,418	6,960
	Durum 2	10,370	25,452	13,470
	Durum 3	89,878	69,806	88,110
	Durum 1	7,095	4,840	6,878
<i>Alüminyum</i>	Durum 2	15,376	10,298	16,391
	Durum 3	36,370	20,498	39,110

Kaynaklı imalat ile birleştirilerek üretilen paslanmaz çelik konstrüksiyonlar, paslanmazlık özelliğinin kaybolması sebebiyle ısıl işleme uygun olmayan tip bir malzemedir. Şekil 4, üç farklı öngerilme değerine sahip kare paslanmaz çelik plakaya ait gerinime bağlı olarak belirlenen farklı genlik değerlerindeki artık gerilme miktarlarını göstermektedir. Şekil 4-a'da verilen 0,004 gerinim değeri, yapının öngerilme oluşturulma aşamasında kullanılan parametreye eşittir. Buna göre yapı, 0,00312 ile 0,004 gerinim değerleri arasındaki bir genlikte titreşimli gerilim giderme yöntemine tabi tutulduğunda, yapıdaki artık gerilmenin farklı miktarlarda azaldığı görülmektedir. 0,00312 değerinin altındaki bir genlik değerinde plakadaki artık gerilme miktarı öngerilmeye eşit olurken 0,004 değerinin üstündeki bir genlik değerinde ise plakadaki artık gerilme miktarı öngerilme

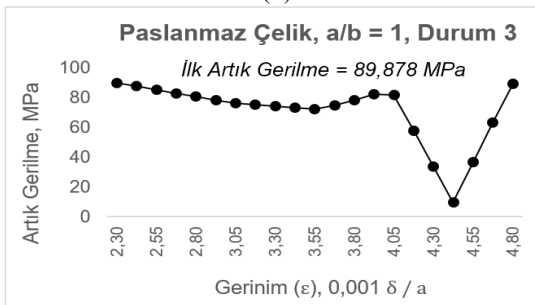
değerinin üzerine çıkmaktadır. Bu durum için en yüksek %84,55 gerilim giderme değerine ulaşılırken, iki farklı noktada benzer değerler ortaya çıkmıştır. Şekil 4/b'ye göre maksimum gerilim giderme oranı %90,19 olmaktadır. Bir diğer yüksek gerilim giderme tespit edilen noktada ise yine %80 civarında bir gerilim giderme değerine ulaşılmaktadır. Üçüncü durumda ise öngerilme değeri 89,878 MPa olarak verilmiştir. Artık gerilmenin en düşük seviyede ölçüldüğü gerinim genlik değerinde gerilim giderme miktarı %89,26 olmuştur. Ancak oldukça yüksek bir artık gerilme miktarı içeren bu durumda, titreşimli gerilim gidermenin uygulanabileceği genlik alanı oldukça geniş olmasına rağmen, gerilim gidermenin verimli olarak uygulanabileceği alan ise oldukça dar olarak gözükmektedir.



(a)



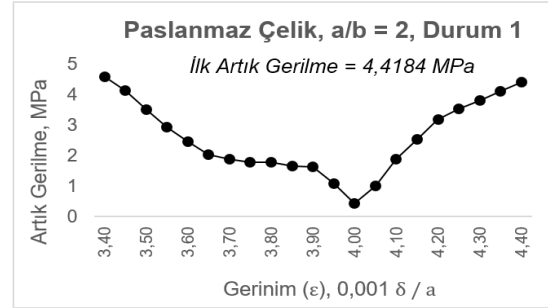
(b)



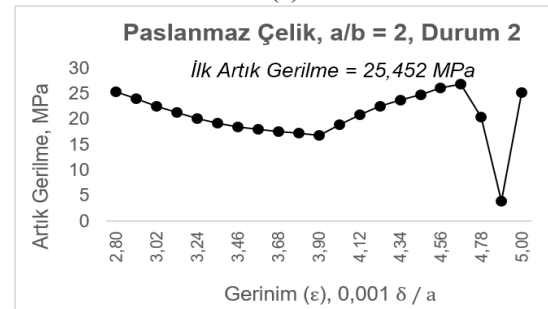
(c)

**Şekil 4.** Paslanmaz çelik kare plaka ( $a/b=1$ ) için gerilme giderme grafikleri, (a) Durum 1, (b) Durum 2, (c) Durum 3

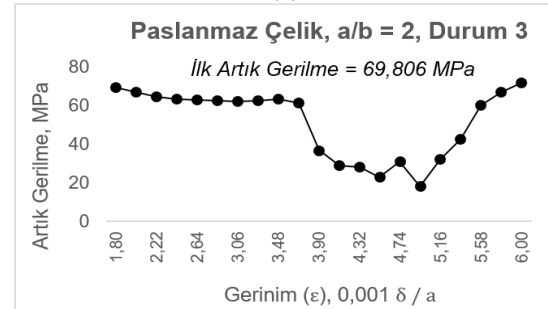
Şekil 5'te, kısa kenarı sabit, uzun kenarı ise serbest durumda olan paslanmaz çelik dikdörtgen plaka için üç farklı durum sunulmuştur. İlk durumda öngerilme miktarı 4,4184 MPa iken, uygun noktada artık gerilmenin %89,87 oranına kadar azalabildiği görülmektedir. İkinci durumda bu oran %84,34 olup gerilim giderme veriminin kabul edilebilir olduğu genlik bölgesi oldukça dar iken, üçüncü durumda ise ikinci duruma kıyasla daha geniş bir alanda bu oran %74,05 olarak hesaplanmıştır.



(a)



(b)

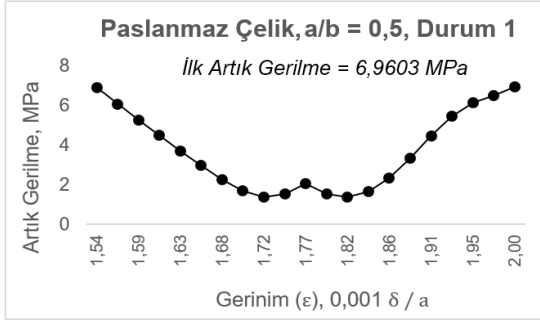


(c)

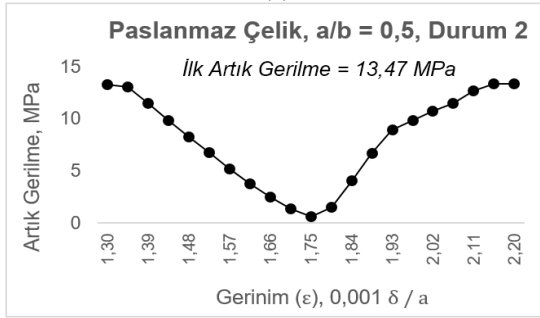
**Şekil 5.** Paslanmaz çelik dikdörtgen plaka ( $a/b=2$ ) için gerilme giderme grafikleri, (a) Durum 1, (b) Durum 2, (c) Durum 3

Paslanmaz çelik malzemeye ait incelenen son yapı, uzun kenarından sabit, kısa kenarı ise serbest dikdörtgen bir plakadır. Şekil 6'da uzun kenarından sabit dikdörtgen plakaya ait üç farklı durum için gerinim-artık gerilme grafikleri sunulmuştur. Şekil 6-a'da görülebileceği gibi, ilk durumdaki öngerilme miktarı 6,9603 MPa olarak belirlenmiştir. Uygun noktadaki genlik ile titreşimli gerilim giderme metodu uygulandığında artık gerilmenin %80,31 oranında azalabildiği görülmektedir. İkinci durumda bu oran %95,48

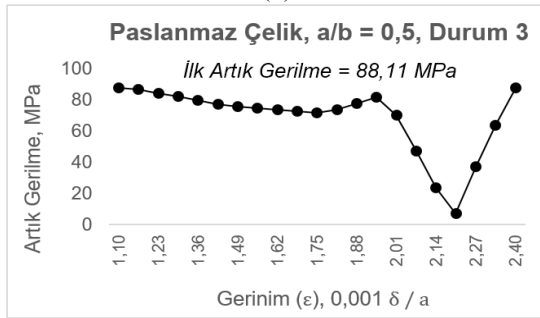
iken, üçüncü durumda ise %91,73 olarak hesaplanmıştır. Bu yapı için öngerilme miktarı arttıkça gerilim giderme işleminin uygulanabileceği aralığın arttığı, ancak yüksek verimin elde edilebileceği aralığın ise daraldığı görülmektedir.



(a)



(b)

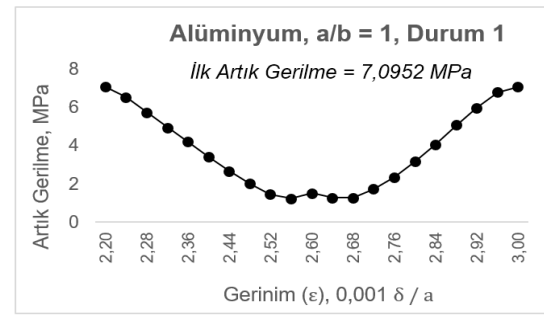


(c)

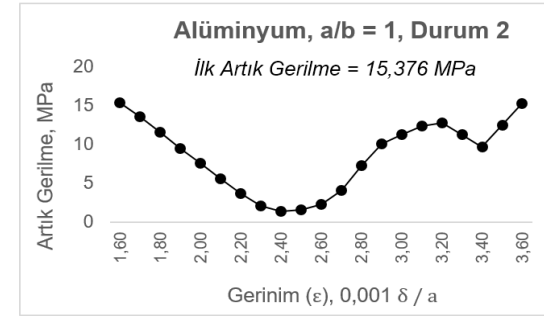
Şekil 6. Paslanmaz çelik dikdörtgen plaka (a/b=0,5) için gerilme giderme grafikleri, (a) Durum 1, (b) Durum 2, (c) Durum 3

İncelenen malzemelerden bir diğeri olan Alüminyum alaşımı (6061-T6) için kare geometrideki ilk durum için öngerilme değeri 15,376 MPa'dır ve Şekil 7-a'da gerilim-gerilme

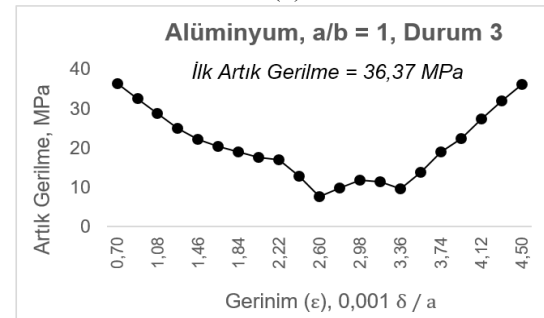
değişimi verilmektedir. Gerilim giderme oranı maksimum %82,27 olarak hesaplanmıştır. Şekil 7-b'de 15,376 MPa'lık öngerilmeye sahip plaka için gerilim-gerilme değişimi verilmektedir. Maksimum %90,84'lük gerilim giderme oranının elde edildiği bu durum için iki farklı bölgede artık gerilme miktarının azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Şekil 7-c'de ise kare geometrideki son öngerilme durumuna ait maksimum gerilim giderme oranı %78,67 olarak hesaplanmıştır.



(a)



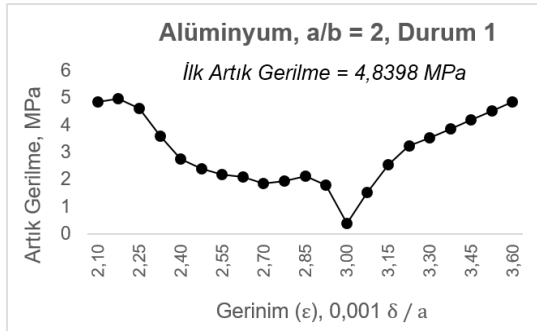
(b)



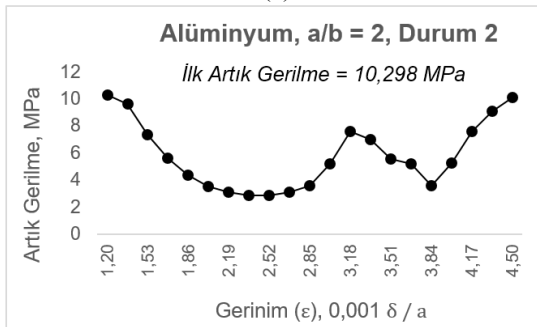
(c)

Şekil 7. Alüminyum kare plaka (a/b=1) için gerilme giderme grafikleri, (a) Durum 1, (b) Durum 2, (c) Durum 3

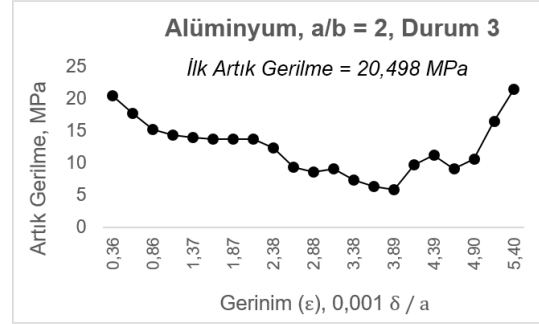
Kısa kenarı sabit, uzun kenarları serbest olan dikdörtgen alüminyum plakaya ait üç farklı öngerilmeli durum Şekil 8'de verilmektedir. Sırasıyla her bir durum için hesaplanan maksimum gerilim giderme oranları %91,83, %72,43 ve %71,59 olarak hesaplanmıştır. Öngerilme yaratan yer değiştirme miktarının artması ile, gerilim giderme işleminde kullanılabilir genlik oranının arttığı görülmektedir. Ancak bu artışla beraber, farklı genlik değerlerinde farklı oranda artık gerilmeler kaldığı da anlaşılmaktadır. İlk durumda, maksimum gerilim giderme oranı, öngerilme yaratan gerilim değerinin %80-%85'i oranındaki genlik değerinde gerçekleşmiştir. İkinci durumda iki farklı bölgede gerilim giderme maksimum verime ulaşmıştır. Bu verim bölgelerinden ilki, öngerilme yaratan gerilim değerinin yaklaşık %45-%55'i aralığında iken, ikincisi ise %85'i civarındadır. Üçüncü durumda ise öngerilme yaratan gerilim değerinin yaklaşık %70-%75'i aralığında maksimum verime ulaşılmaktadır.



(a)



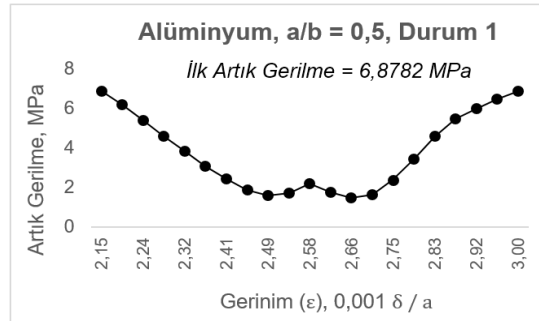
(b)



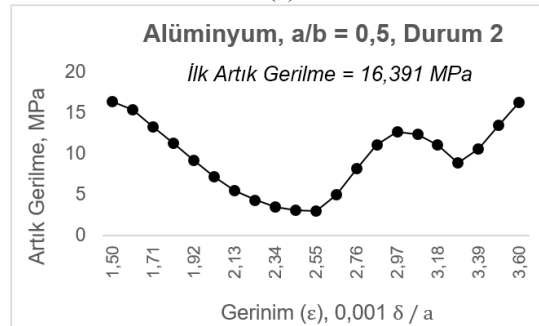
(c)

Şekil 8. Alüminyum dikdörtgen plaka ( $a/b=2$ ) için gerilme giderme grafikleri, (a) Durum 1, (b) Durum 2, (c) Durum 3

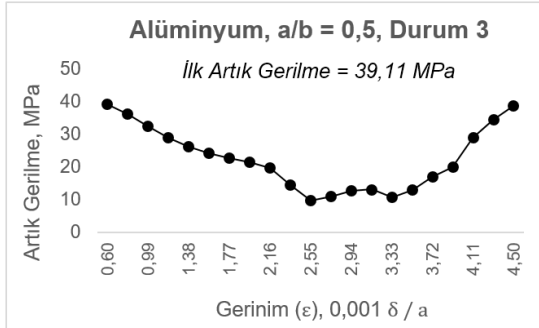
Uzun kenarından sabit, kısa kenarları serbest olan dikdörtgen plakada ise maksimum gerilim giderme oranları sırasıyla %78,58, %81,80, %75,65 olarak hesaplanmıştır ve gerilim-gerilme grafikleri Şekil 9'da verilmektedir. Bu geometriye ait elde edilen genliğe bağlı artık gerilme davranışları, alüminyum kare plakadakine benzerdir. Öngerilme yaratan gerilim değeri arttıkça, gerilim gideren genlik aralığının da yine genişlemektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 9. Alüminyum dikdörtgen plaka (a/b=0,5) için gerilim giderme grafikleri, (a) Durum 1, (b) Durum 2, (c) Durum 3

Şekil 4-9'daki gerinime bağlı genlik ve artık gerilme arasındaki davranışlara göre, tüm malzeme tipleri, tüm durumlar ve tüm geometriler için titreşimli gerilim giderme işlemi sonunda yapılar içerisinde kalan artık gerilme oranları ve ilk durumdaki öngerilmeye kıyasla gerilim giderme oranları toplu olarak Çizelge 3'te verilmektedir. Çizelge 3'e göre incelenen tüm yapılar içerisinde en yüksek gerilim giderme oranı %95,48 olarak hesaplanırken en düşük gerilim giderme oranı ise %71,59 olarak hesaplanmıştır. Kontrol edilen aralık ise, plakada öngerilme yaratan maksimum gerinim değeri ile artık gerilme değerinin öngerilme değerine eşit olduğu minimum gerinim değeri arasındadır.

Çizelge 3. İncelenen tüm durumlar için son artık gerilme değerleri ve gerilme giderme oranları

		a/b = 1		a/b = 2		a/b = 0,5	
		Son artık gerilme (MPa)	Gerilme giderme oranı	Son artık gerilme (MPa)	Gerilme giderme oranı	Son artık gerilme (MPa)	Gerilme giderme oranı
Paslanmaz çelik	Durum 1	1,128	%84,55	0,448	%89,87	1,370	%80,31
	Durum 2	1,017	%90,19	3,987	%84,34	0,609	%95,48
	Durum 3	9,654	%89,26	18,117	%74,05	7,285	%91,73
Alüminyum	Durum 1	1,258	%82,27	0,395	%91,83	1,474	%78,58
	Durum 2	1,408	%90,84	2,839	%72,43	2,983	%81,80
	Durum 3	7,758	%78,67	5,824	%71,59	9,525	%75,65

#### 4. SONUÇ

Çalışma kapsamında, ısıl işleme uygun olmayan paslanmaz çelik ve alüminyum olmak üzere iki farklı malzemeden elde edilen üçer farklı geometri ve üçer farklı öngerilmeli durum incelenmiştir. Alternatif bir gerilim giderme işlemi olan titreşimli gerilim giderme yönteminin, farklı genliklerde uygulanmasının yöntem verimi üzerindeki etkisi ANSYS ile simüle edilerek araştırılmıştır. Farklı genlikler, plakalara ilk verilen yer değiştirme ile oluşturulan gerinime bağlıdır. Titreşimli gerilim giderme ise, öngerilmeli plakaların ilk doğal frekansı elde edildikten sonra bu rezonans frekansında pozitif ve negatif yönlü yer değiştirmeler ile tanımlanmıştır. İncelenen tüm durumlar için gerilim giderme oranı %70'in üzerinde hesaplanırken, yöntemin benzer parametreler ile deneysel olarak çalışması ihtiyacı doğmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre:

- Yapı içerisindeki öngerilme miktarı arttıkça, titreşimli gerilim gidermede uygulanabilecek genlik aralığı da artmaktadır.
- Gerinime bağlı belirlenen genlik değeri, her durum için belli bir değer altına indiğinde titreşimli gerilim giderme sonucunda elde edilen artık gerilmenin öngerilmeye eşit olduğu görülmektedir.
- Gerinime bağlı belirlenen genlik değeri, her durum için öngerilme yaratan gerinim değerinin üzerine çıktığında gerilim giderme sonucunda elde edilen artık gerilmenin öngerilmeden daha yüksek olduğu görülmektedir. Önceki maddedeki durum ile bu maddedeki durum, çalışma aralığını belirlemek için kullanılmaktadır.
- Titreşimli gerilim gidermede kullanılan ve çalışma aralığı belirlenen gerinime bağlı genlik değeri, her bir durum için malzeme içerisinde farklı oranlarda artık gerilme bırakmaktadır. Bu durum malzemeye, geometriye ve öngerilme

miktarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

- Uygulamada ısı tavlama işlemleri ile elde edilen verim daha yüksek olsa da, titreşimli gerilim giderme işleminin doğru parametrelerle uygulanması ile ısı tavlama işlemlerinde elde edilen verime ulaşabileceği anlaşılmaktadır.
- Titreşimli gerilim giderme işleminde, uygulamada ihmal edilen parametrelerden biri olan genlik değerinin önemi, bu çalışmadan elde edilen sonuçlarla ortaya konulmaktadır.

## 5. KAYNAKLAR

- Walker, C. A., Waddell, A.J., Johnston, D.J., 1995. Vibratory Stress Relief—An Investigation of the Underlying Processes. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 209(1), 51–58.
- Zhu, W., Zhao, F., Yin, S., Liu, Y., Yang, R., 2021. Effect of Tensile Deformation on Residual Stress of Gh4169 Alloy. Materials, 14(7), 1773.
- Cai, G., Huang, Y., Huang, Y., 2017. Operating Principle of Vibratory Stress Relief Device Using Coupled Lateral-torsional Resonance. Journal of Vibroengineering, 19(6), 4083–4097.
- Xu, Y., Shi, Z., Li, B., Zhang, Z., 2021. Effects of TVSR Process on the Dimensional Stability and Residual Stress of 7075 Aluminum Alloy Parts. Reviews on Advanced Materials Science, 60(1), 631–642.
- Wu, S.F., Gao, X.S., Zhang, X.R., Gao, H.J., 2021. Finite Element Simulation Analysis on Residual Stress Relief of 7075 Aluminum Alloy Ring. Materials Science Forum, 1032, 135–140.
- Li, S., Fang, H., 2018. Vibration Stress Relief of DH 36 Rectangle Welded Plates. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 322, 042002.
- Zhao, L., Mo, R., Li, Y., Cai, G., 2021. Influence of the Nonlinear Stiffness Parameter of the Vibratory Stress Relief Device on Strong Nonlinear Superharmonic Resonance. IEEE Access, 9, 6899–6906.
- Vardanjani, M.J., Ghayour, M., Homami, R.M., 2016. Analysis of the Vibrational Stress Relief for Reducing the Residual Stresses Caused by Machining. Experimental Techniques, 40(2), 705–713.
- Luh, G.C., Hwang, R.M., 1998. Evaluating the Effectiveness of Vibratory Stress Relief by a Modified Hole-Drilling Method. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 14(11), 815–823.
- Kacar, S., Yilmaz, O., 2019. Effect of Vibratory Stress Relief on Fatigue Life of S355J2 Steel Welded Joints. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 17(1), 1-8.
- Tatar, F., Mahmoudi, A.H., Shoostari, A., 2020. Vibratory Stress Relief of Welded Austenite Stainless Steel Plates: A Numerical and Experimental Approach. Iranian Journal of Materials Forming. 8(1), 50-64.
- Robinson, J.S., Hossain, M.S., Truman, C.E., 2021. Residual Stresses in the Aluminium Alloy 2014A Subject to PAG Quenching and Vibratory Stress Relief. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 57(3), 167-176.
- Huo, Z., Gu, B., Jin, Z., Wang, Z., Hu, X., Xu, G., Lai, J., 2021. The Design of High-frequency Vibratory Stress Relief Device. International Core Journal of Engineering. 7(2), 288-292.
- Zhang, Q., Yu, L., Shang, X., Zhao, S., 2020. Residual Stress Relief of Welded Aluminum Alloy Plate Using Ultrasonic Vibration. Ultrasonics, 107, 106164.
- Gao, H.J., Zhang, Y.-D., Wu, Q., Song, J., 2017. Experimental Investigation on the Fatigue Life of Ti-6al-4v Treated by Vibratory Stress Relief. Metals, 7(5), 158.
- Lai, H.-H., Cheng, H.-C., Su, S.-H., Lin, C.-M., Wu, W., 2020. Evaluation of Internal Friction in Low-Carbon Steel During Vibratory Stress Relief. Journal of Materials Research and Technology, 9(3), 5403–5409.
- Gong, H., Sun, Y., Liu, Y., Wu, Y., He, Y., Sun, X., Zhang, M., 2018. Effect of Vibration Stress Relief on the Shape Stability of Aluminum Alloy 7075 Thin-Walled Parts. Metals, 9(1), 27.

- 18.** U.S. Dept. of Defense. (1998). *Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures*. Washington: GPO, December 1, 2396.
- 19.** Robbins, M.E., (2004). In *Topics in Vibratory Stress Relief of Weldments*, 36.
- 20.** Mechanical APDL Command Reference. (2017, July 14). Retrieved January 6, 2022, from [https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans\\_help\\_v182/ans\\_cmd/Hlp\\_C\\_CmdTOC.html](https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_cmd/Hlp_C_CmdTOC.html)



## The Influence of Climatological Variables on Particulate Matter and Sulphur Dioxide

Mine Tülin ZATEROĞLU\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-1050-6174

<sup>1</sup>Cukurova University, Vocational School of Adana Organized Industrial Region Technical Sciences, Electrical and Energy Department, Adana, Türkiye

Geliş tarihi: 06.01.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: ZATEROĞLU, M.T., (2023). The Influence of Climatological Variables on Particulate Matter and Sulphur Dioxide. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(1), 13-24.

### Abstract

The prediction of air pollutants has become an important issue because of the increasing effects on human health and environmental problems. This paper intends to build up predicting model for estimating air pollutants concentrations through a statistical approach based on the Multiple Linear Regression method. The analysis contains the daily concentration values of air pollutants and climatological variables such as cloudiness, wind speed, precipitation, relative humidity and air temperature at the monitoring station located in Kırıkkale. The influence of climate elements on air pollutants was defined using the regression analysis method as statistically significant (significance level smaller than 5%). Among the assessed climatological variables, cloudiness, precipitation and relative humidity were the most frequently chosen variables in stepwise regression models for particulate matter whereas relative humidity and minimum air temperature were the most for sulphur dioxide.

**Keywords:** Particulate matter, Climatological variables, Sulphur dioxide, Linear regression model

### İklimsel Değişkenlerin Partikül Madde ve Kükürt Dioksit Üzerindeki Etkisi

#### Öz

Hava kirleticilerin tahmin edilmesi, insan sağlığı üzerindeki etkilerinin artması ve çevre sorunları nedeniyle önemli bir konu haline gelmiştir. Bu makale, Çoklu Doğrusal Regresyon yöntemine dayalı istatistiksel yaklaşım yoluyla hava kirleticisi konsantrasyonlarını tahmin etmek için bir tahmin modeli oluşturmayı amaçlamaktadır. Analiz, Kırıkkale'de bulunan izleme istasyonunda hava kirleticilerin günlük konsantrasyon değerlerini ve bulutluluk, rüzgar hızı, yağış, bağıl nem ve hava sıcaklığı gibi iklimsel değişkenleri içermektedir. İklim elemanlarının hava kirleticileri üzerindeki etkisi, regresyon analizi yöntemi kullanılarak istatistiksel açıdan önemli olarak tanımlanmıştır (%5'ten küçük önem düzeyi). Değerlendirilen iklimsel değişkenler arasında, partikül madde için adimsal regresyon modellerinde en sık seçilen değişkenler bulutluluk, yağış ve bağıl nem olurken, kükürt dioksit için en çok bağıl nem ve minimum hava sıcaklığı seçilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Partikül madde, İklimsel değişkenler, Kükürt dioksit, Doğrusal regresyon modeli

---

\*Corresponding author (Sorumlu yazar): Mine Tülin ZATEROĞLU, [mtzateroglu@cu.edu.tr](mailto:mtzateroglu@cu.edu.tr)

## 1. INTRODUCTION

Rapid industrialization, increase in energy usage and demand, and population growth led to environmental deterioration such as air pollution in urban areas. Air pollutant-related problems have attracted attention and enhanced awareness all over the world [1-2]. Some of the biggest effects of air pollutant exposure on humans are evident in urban settings [3]. Air pollution adversely affects human health and the environment [4-6]. Studies show that there is a connection between air pollution and diseases such as cancer [7] and cardiovascular disease [8]. The high concentrations of air pollutants may cause some health problems such as dizziness, headache and asthma. Furthermore, they may be concluded in a heart attack [9]. Therefore, many authorities recommend measuring and predicting air pollutants in the atmosphere. The prediction of pollutants in the air is made through some dispersion models such as Gaussian, and Lagrangian which need detailed information for the sources and the other parameters for air pollutants. So, it is more convenient to utilize statistical models that simplify the prediction of air pollutant concentration [10-12].

Sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), a kind of air pollutant, is a suffocating, colourless and acidic gas formed by the release of sulfur compounds in the natural structure of fuels during combustion. SO<sub>2</sub> is regarded to be one of the major air pollutants which contributed to respiratory diseases and premature deaths over the World [13]. It also forms sulphuric acid which causes the degradation of ecological systems such as plants, soil, and water [14]. SO<sub>2</sub> is a kind of sulphate aerosol and has an impact on the radiation budget by inducing a cooling influence [15]. SO<sub>2</sub> is a short-lived (i.e. on the order of days) atmospheric element in the troposphere and has a high variability as temporal and spatial [15]. When SO<sub>2</sub> emission diffuses into the troposphere, it undergoes gas, and liquid phase oxidation by the OH, and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> molecules, respectively. Then it creates sulphate aerosols and goes inside cloud droplets [16-17]. Particulate matter is formed by the chemical conversion of gaseous emissions and their bulk formation. The main components of particulate matter are black

carbon, sulfate, ammonia, nitrates, sodium chloride, mineral dust and water [18]. Particles with a diameter of 5-10 micrometres are defined as suspended particles. It generally contains homogeneous mixtures and its characteristics vary considerably from place to place. Particulate matter less than 10 micrometres in diameter are called PM<sub>10</sub>. Some researchers have examined the characteristics, dispersion, and modelling of air pollutants, PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub>, in recent years [19-25]. Climatological parameters are in interact both with air pollutants and with each other in the atmospheric environment [26-30]. The occurrence of physical-chemical interactions in the atmospheric environment influences air quality. Climatological conditions can obstruct or support the air pollutants' dispersion in the atmosphere through dilution, diffusion, and deposition [31-33]. If the conditions such as low wind speed, orography, etc., obstruct the dispersion, in this case, there will be an increment in air pollutant concentration unrelated to the increment in emissions [34-36]. Similarly, air pollutant concentration is influenced by climate elements such as relative humidity, air temperature, wind speed and precipitation [37]. There have been many studies about the influence of climate variables on air pollutants i.e. particulate matter and sulphur dioxide [38-47]. In another research, a relationship was found between sulphur dioxide and some climate elements [48]. In general, an increment in wind speed provides a decrement in air pollutant concentration [49-50]. The results of these attempts have demonstrated that the concentration of sulphur dioxide is associated with wind speed, relative humidity and air temperature. The high value of relative humidity and low value of wind speed and air temperature causes the low concentration of sulphur dioxide. Furthermore, most precipitation among meteorological variables has effects on the concentration of particulate matter via reduction [51].

Modelling of air pollutant data is very complex due to fundamental interrelationships between a large number of variables of different types that provide a complex combination of relationships. Purposing the facilitation of the statistical complication, some methods have been used to

model and overcome those interrelationships. There are many models and techniques to predict the concentration of air pollutants such as principle component analysis and principal component regression [52-55], feed-forward backpropagation method [55-56], machine learning algorithms in artificial intelligence technologies [57]. Also, multiple linear regression [52,54,59], probabilistic modelling [60], and the various models [61-65]. In addition, the researchers, Nejadkoorki and Baroutian [66], and Chaloulakou et al. [67] operated an artificial neural network method whereas Chen et al. [68] used stepwise regression and wavelet analysis in prediction. Furthermore, Ramli et al. used the Bayesian Model Averaging method to estimate the concentration of particulate matter in Malaysia [46]. They used some air pollutants, i.e., NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub> and climate variables i.e., air temperature, wind speed and relative humidity. According to prediction models, wind speed and relative humidity were determined as crucial parameters. Furthermore, the multiple linear regression method has been operated by some researchers [69-70]. The estimation models are a significant tool because they are improved to minimize the error or autocorrelation in the model. In the present study, linear regression analysis which is one of the simplification methods has been applied to air pollutant and climate datasets. This method has been preferred and operated for many years by researchers [71-78]. Furthermore, there have been some studies about the relationship between air pollutants and climate variables [28-30,76-81].

The main purpose of this study is to develop predicting models for estimating the daily air pollutants such as particulate matter and sulphur dioxide which have interactions with meteorological variables in the atmospheric environment.

## 2. MATERIAL AND METHOD

### 2.1. Study Area and Data

Kırıkkale Province is located between 33° 20'-34° 25' east meridians and 39° 20'-40° 20' north

parallels in the northern hemisphere. It is in the temperate climate zone at an altitude of 747 meters from the sea. However, the climate becomes continental since the area where it is located is far from the sea, and the daily temperature difference changes due to the steppe. According to Thornthwaite climate classification, the climate class of the city is D, B<sup>1</sup>2, s, b<sup>3</sup> (means semi-arid, second-degree mesothermal, water surplus in winter and moderate, summer evaporation rate 55.6%). Due to this semi-arid climate, summers are hot and dry and winters are cold in the province. Precipitation is generally in the form of rain and snow. The wind blows from a North-East direction.

The province is among the provinces with air pollution in Turkey. The most important reason for this event is the use of poor-quality coal in domestic heating and industrial activities, wrong and irregular urbanization, insufficient thermal insulation in buildings and meteorological conditions. The increase in the number of vehicles is also a factor in the increase in pollution caused by exhaust emissions. Industrial activities are concentrated in the manufacturing industry, especially petro-chemistry and metal, feed and food industry, agricultural machinery, wood and furniture works, soil, and textile.

The daily average air pollution data as particulate matter (PM<sub>10</sub>) and sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>) measured in the air quality monitoring station; climate data as cloudiness (C), wind speed (WS), precipitation (P), relative humidity (H), maximum air temperature (Tmax), minimum air temperature (Tmin) measured in ground-based meteorological station located in central Kırıkkale were obtained from Ministry of Environment and Urbanisation, and Turkish State Meteorological Service respectively for 5 years period of 2012-2016.

### 2.2. Method

The Multiple Linear Regression method depends on one response (dependent) variable to be

estimated and two or more explanatory (independent) variables. The relationship between response and explanatory variables is expressed in the general formula shown below as (Equation 1):

$$Y = b_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p + \varepsilon \quad (1)$$

where  $p$  is the number of independent variables.  $Y$  determines the air pollutant concentration (dependent variable);  $X_1, X_2, \dots, X_p$  are climate variables (independent variables);  $b_1, b_2, b_3, \dots, b_p$  define the parameters of regression.  $\varepsilon$  is the forecasted error parameter that is provided from explanatory indiscriminate illustration with constant variance and means zero (normal distribution). To forecast the values of coefficient matrix  $b$ , the least square error parameter method is operated in regression analysis.

Equation 1 may be rewritten in matrix form shown in Equation 2:

$$Y = Xb + \varepsilon \quad (2)$$

where  $n$  is the number of observations,  $Y$  is a matrix in  $n \times 1$ ,  $X$  is a matrix in  $n \times p$ ,  $b$  is a  $p \times 1$  matrix and  $\varepsilon$  is a matrix in  $n \times 1$  size. At the end of the least square method, the result is provided as the parameters of matrix  $b$  through  $b = (X^T X)^{-1}(X^T Y)$  where  $X^T$  denotes the transpose of matrix  $X$ . Furthermore, the  $t$ -test and  $F$  test are utilized to find out the significance grades of the coefficient parameters. After operating the regression analysis, the forecasting models are built in a confidence interval of 95% (statistically significant value).

To evaluate the performance of the predicted models, some statistical measures are used in the analysis. One of the commonly used criteria is the multiple determination coefficient ( $R^2$ ) which describes the percentage of variance in the dependent variable expressed through the prediction models. It is defined as the square of the correlation coefficient ( $R$ ). A correlation coefficient is a measure between the

measured and estimated values. It changes between 0 (denotes no correlation) and 1 (-1 means perfect negative correlation whereas +1 is a perfect positive correlation). The  $R$ -value is calculated with the following formula [26,82]:

$$R = \frac{(\overline{C_o - C_p})(C_p - \overline{C_p})}{\sigma_{C_p} \sigma_{C_o}} \quad (3)$$

where  $C_o$  define the observed values,  $C_p$  identifies the estimated values,  $\overline{C_o}$  and  $\overline{C_p}$  denote the mean values of the datasets,  $\sigma_{C_p}$  and  $\sigma_{C_o}$  are the standard deviations of the predicted and observed datasets.

Standard Error of Estimation (SEE) is defined as the quantity of the difference between the predicted and observed values. The value of SEE should be as small as possible or close to zero (0 is ideal) and is computed by the formula shown below:

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum(C_o - C_p)^2}{n-2}} \quad (4)$$

where  $n$  is the number of observations.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. The Results of Regression Analysis for $PM_{10}$ and $SO_2$ with Climate Variables

Daily mean values of air pollutant concentrations and climatological variables were analyzed from 2012-2016. The data for all months of the year i.e. January (JAN) to December (DEC) have been used to establish the mathematical expressions in predicting the particulate matter and sulphur dioxide through climate elements as shown in Table 1 and Table 2 respectively. Additionally, the performance indices, i.e.  $R$ ,  $R^2$ , SEE and significance findings (statistically significance level which is lower than 5%) have been presented in the tables.

**Table 1.** Regression models for PM<sub>10</sub> with climate variables

Period	Mathematical expression	Significance	R	R <sup>2</sup>	SEE
JAN	-40.451+18.984*C-0.723*P	0.026	0.839	0.704	10.685
FEB	71.434+3.133*Tmin	0.035	0.586	0.343	17.532
MAR	28.901+29.769*WS	0.036	0.455	0.207	25.330
APR	88.976-17.888*C+0.343*P	0.011	0.851	0.724	11.659
MAY	87.317-18.052*C	0.023	0.705	0.497	14.680
JUN	-28.796+5.326*Tmin	0.030	0.625	0.390	14.041
JUL	110.639-1.899*H	0.005	0.773	0.598	11.238
AUG	46.408-16.487*C	0.038	0.600	0.360	16.548
SEP	159.046-2.512*H	0.003	0.837	0.701	11.412
OCT	13.605+0.418*P	0.040	0.582	0.339	21.257
NOV	174.138-28.665*C	0.047	0.713	0.508	38.280
DEC	109.211-30.822*WS	0.031	0.507	0.257	23.292

According to Table 1, the concentration of particulate matter was generally defined by a single parameter except for January and April. In both months, cloudiness and precipitation affected the particulate matter together explaining its variance nearly in the same grade as 70.4% and 72.4%. The lowest value of the multiple determination coefficient and the correlation coefficient was obtained in March for wind speed than in December while the highest value was in April for cloudiness and precipitation than in January. Tmax was not selected as an important parameter in the regression model by the stepwise

regression method to forecast PM<sub>10</sub>. Particulate matter is related to low precipitation in JAN, high minimum air temperature in FEB, high wind speed in MAR, low cloudiness and high precipitation in APR. Also, low cloudiness in MAY, high minimum air temperature in JUN, low relative humidity in JUL, low cloudiness in AUG, low relative humidity in SEP, high precipitation in OCT, low cloudiness in NOV, and low wind speed in DEC. In a similar study, relative humidity and wind speed were found as important parameters affecting particulate matter concentration [50].

**Table 2.** Regression models for SO<sub>2</sub> with climate variables

Period	Mathematical expression	Significance	R	R <sup>2</sup>	SEE
JAN	43.481+19.077*C-1.252*P	0.047	0.771	0.594	18.289
FEB	123.808-0.83*P	0.029	0.653	0.427	26.732
MAR	53.266-4.069*Tmin	0.025	0.444	0.197	21.450
APR	-18.795+12.781*C	0.041	0.600	0.36	14.023
MAY	-111.850+48.011*Tmin-1.830*P	0.009	0.833	0.694	58.440
JUN	284.919-25.783*Tmin	0.004	0.768	0.589	45.413
JUL	-356.755-34.597*Tmin+23.451*Tmax	0.017	0.799	0.638	50.143
AUG	148.643-8.808.Tmin	0.010	0.795	0.632	17.174
SEP	-173.657+3.801*H	0.013	0.717	0.515	26.447
OCT	-257.248-51.853*C+5.025*H+86.801*WS	0.042	0.788	0.622	30.841
NOV	548.775-6.771*H-9.216*Tmin	0.004	0.943	0.890	18.250
DEC	826.348-9.154*H	0.0003	0.946	0.896	20.413

All variables have been obtained as effective regressors in predicting SO<sub>2</sub>. In JAN, MAY, JUL, OCT and NOV, the concentration of sulphur dioxide was determined by two climate variables,

while in the rest months one variable i.e. precipitation, minimum air temperature, cloudiness and relative humidity. The value of the determination coefficient varied from 0.197 to

0.896 which means weak to a high level. Relative humidity and minimum air temperature provided better results in models than the other variables. Sulphur dioxide is associated with high cloudiness and low precipitation in JAN, low precipitation in FEB, low minimum air temperature in MAR, and high cloudiness in APR. Also, high minimum air temperature and low precipitation in MAY, a low minimum air temperature in JUN, a low minimum air temperature and high maximum air temperature in JUL, and a low minimum air temperature in AUG. Also, high relative humidity in SEP, low cloudiness, high relative humidity and wind speed in OCT, low relative humidity and minimum air temperature in NOV and low relative humidity in DEC. In some studies, the air temperature was obtained as a significant variable impacting sulphur dioxide concentration [41-42,44]. In another study, the coefficient of regression between sulphur dioxide and the temperature was

obtained as 73% [77]. Additionally, there has been a relation between sulphur dioxide and low wind speed in high grade while relative humidity in low grade [43]. Cuhadaroglu and Demirci [38] found a relationship between air pollutants, such as particulate matter and sulphur dioxide, and climate variables i.e. relative humidity, wind speed and air temperature in weak and moderate levels. Similar results were obtained in another study [40].

### 3.2. The Results of Regression Analysis for PM<sub>10</sub> With SO<sub>2</sub>

Air pollutants are related to each other. To determine the relationships between particulate matter and sulphur dioxide, four regression methods i.e. linear, logarithmic, quadratic and cubic have been operated on pollutant data via the SPSS package program.

**Table 3.** Regression models for PM<sub>10</sub> related to SO<sub>2</sub> for JAN-JUN

Period	Model	Mathematical expression	R	R <sup>2</sup>	SEE
JAN	Linear	-7.023+0.531*SO <sub>2</sub>	0.566	0.321	24.147
	Logarithmic	-232.614+60.806*ln(SO <sub>2</sub> )	0.557	0.310	24.334
	Quadratic	6.007+0.310* SO <sub>2</sub> +0.001**[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup>	0.567	0.322	25.298
	Cubic	-240.028+6.822* SO <sub>2</sub> -0.053**[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup> +0.000143*[SO <sub>2</sub> ] <sup>3</sup>	0.597	0.356	25.987
FEB	Linear	58.539-0.125*SO <sub>2</sub>	0.177	0.031	24.060
	Logarithmic	106.192-13.292*ln(SO <sub>2</sub> )	0.247	0.061	23.687
	Quadratic	86.213-0.772* SO <sub>2</sub> +0.003**[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup>	0.315	0.099	24.234
	Cubic	54.824+0.618* SO <sub>2</sub> -0.013**[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup> +0.000056**[SO <sub>2</sub> ] <sup>3</sup>	0.340	0.116	25.178
MAR	Linear	65.076-0.373* SO <sub>2</sub>	0.354	0.125	25.38
	Logarithmic	171.169-31.489*ln(SO <sub>2</sub> )	0.431	0.185	24.493
	Quadratic	176.683-3.667* SO <sub>2</sub> +0.022**[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup>	0.601	0.361	22.573
	Cubic	319.735-10.072*SO <sub>2</sub> +0.11*[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup> -0.000379*[SO <sub>2</sub> ] <sup>3</sup>	0.627	0.393	22.984
APR	Linear	31.836-0.213* SO <sub>2</sub>	0.269	0.073	17.412
	Logarithmic	78.357-15.142*ln(SO <sub>2</sub> )	0.404	0.163	16.538
	Quadratic	69.904-1.875* SO <sub>2</sub> +0.015**[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup>	0.534	0.285	16.032
	Cubic	207.066-11.212* SO <sub>2</sub> +0.199**[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup> -0.001*[SO <sub>2</sub> ] <sup>3</sup>	0.789	0.623	12.275
MAY	Linear	19.439-0.028*SO <sub>2</sub>	0.139	0.019	17.692
	Logarithmic	46.692-8.605*ln(SO <sub>2</sub> )	0.456	0.208	15.899
	Quadratic	40.535-0.949*SO <sub>2</sub> +0.003*[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup>	0.550	0.302	15.653
	Cubic	40.535-0.949*SO <sub>2</sub> +0.003*[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup>	0.550	0.302	15.653
JUN	Linear	22.979-0.105*SO <sub>2</sub>	0.409	0.168	14.827
	Logarithmic	57.551-11.613*ln(SO <sub>2</sub> )	0.771	0.594	10.348
	Quadratic	35.040-0.585*SO <sub>2</sub> +0.002*[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup>	0.674	0.455	12.487
	Cubic	49.701-1.553*SO <sub>2</sub> +0.015*[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup> -0.00003668*[SO <sub>2</sub> ] <sup>3</sup>	0.834	0.695	9.760

**Table 4.** Regression models for PM<sub>10</sub> related to SO<sub>2</sub> for JUL-DEC

Period	Model	Mathematical Expression	R	R <sup>2</sup>	SEE
JUL	Linear	21.999-0.084*SO <sub>2</sub>	0.401	0.161	14.884
	Logarithmic	51.388-10.055*ln(SO <sub>2</sub> )	0.793	0.629	9.898
	Quadratic	33.521-0.545*SO <sub>2</sub> +0.002*[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup>	0.698	0.487	12.157
	Cubic	43.649-1.186*SO <sub>2</sub> +0.009*[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup> -0.000019*[SO <sub>2</sub> ] <sup>3</sup>	0.839	0.703	9.699
AUG	Linear	33.092-0.450*SO <sub>2</sub>	0.518	0.268	18.642
	Logarithmic	79.930-19.176*ln(SO <sub>2</sub> )	0.805	0.648	12.924
	Quadratic	67.506-2.716*SO <sub>2</sub> +0.025*[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup>	0.856	0.733	11.809
	Cubic	87.532-5.769*SO <sub>2</sub> +0.128*[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup> -0.00084*[SO <sub>2</sub> ] <sup>3</sup>	0.935	0.874	8.560
SEP	Linear	24.776-0.215*SO <sub>2</sub>	0.408	0.166	16.034
	Logarithmic	62.170-13.470*ln(SO <sub>2</sub> )	0.635	0.403	13.571
	Quadratic	44.809-1.313*SO <sub>2</sub> +0.009*[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup>	0.637	0.406	14.132
	Cubic	72.209-3.838*SO <sub>2</sub> +0.066*[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup> -0.0003369*[SO <sub>2</sub> ] <sup>3</sup>	0.794	0.631	11.690
OCT	Linear	44.039-0.319*SO <sub>2</sub>	0.480	0.231	22.727
	Logarithmic	122.974-25.868*ln(SO <sub>2</sub> )	0.747	0.558	17.230
	Quadratic	75.451-1.462*SO <sub>2</sub> +0.007*[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup>	0.727	0.528	18.530
	Cubic	138.360-6.528*SO <sub>2</sub> +0.099*[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup> -0.000388*[SO <sub>2</sub> ] <sup>3</sup>	0.919	0.844	11.120
NOV	Linear	116.864-0.586*SO <sub>2</sub>	0.600	0.360	37.155
	Logarithmic	279.246-49.462*ln(SO <sub>2</sub> )	0.646	0.418	35.421
	Quadratic	153.505-1.558*SO <sub>2</sub> +0.005*[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup>	0.648	0.420	37.074
	Cubic	176.994-2.569*SO <sub>2</sub> +0.017*[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup> -0.0000385*[SO <sub>2</sub> ] <sup>3</sup>	0.652	0.425	38.923
DEC	Linear	59.422-0.011*SO <sub>2</sub>	0.025	0.001	26.400
	Logarithmic	79.388-4.730*ln(SO <sub>2</sub> )	0.111	0.012	26.245
	Quadratic	78.313-0.387*SO <sub>2</sub> +0.001*[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup>	0.251	0.063	26.610
	Cubic	97.908-1.110*SO <sub>2</sub> +0.008*[SO <sub>2</sub> ] <sup>2</sup> -0.0000173*[SO <sub>2</sub> ] <sup>3</sup>	0.291	0.085	27.465

In all models for Tables 3 and 4, the cubic prediction models are more successful than the others. The lowest correlation coefficient and multiple determination coefficient have been observed in December, then in February.

In general, the high levels of particulate matter and sulphur dioxide are related to the low levels of wind speed and air temperature, and high levels of relative humidity [83]. Anyway, these relations could change for different periods and also locations with various effective parameters such as other meteorological conditions, topography, inversion, and street canyons.

#### 4. CONCLUSION

This research demonstrates that daily mean concentration values of particulate matter and sulphur dioxide could be estimated using climatological parameters. The estimated models have been established as statistically significant through the stepwise regression method which

allowed the most crucial climate parameters to be included in the models. These models indicate that cloudiness, precipitation and relative humidity are the most frequently elected variables in models to estimate particulate matter while relative humidity and minimum air temperature are the most for sulphur dioxide. Furthermore, the computed values of the correlation coefficient and multiple determination coefficient for the judgement of model performance indicate that the established models are commonly in acceptable weak, moderate and high grades. The highest level of model performance has been obtained in April with parameters cloudiness and precipitation for particulate matter whereas in December with a parameter relative humidity for sulphur dioxide.

Air pollutant data were modelled with climate variables using the multiple linear regression method. Moreover, to reveal the relationships between particulate matter and sulphur dioxide, various regression methods, such as linear, logarithmic, quadratic and cubic were applied to

the air pollution dataset. As the result of that analysis, among all methods, the cubic estimated models which have bigger determination coefficients were much more successful than the rest models for air pollutants.

The usage of poor-quality coal that contains high sulphur and ash, population growth, and traffic density contribute to air pollution in Kırıkkale. Additionally, the topography of the province, the settlements of the building block the wind and also the turbulence created by the blowing wind in the city cause the pollutants not to be dispersed and remained in the environment.

Since the concentrations of air pollution parameters are commonly significantly associated with climatological variables, the findings from the present research could ensure some beneficial information for studies on air pollution management and planning.

## 5. REFERENCES

1. Aas, W., Mortier, A., Bowersox, V., Cherian, R., Faluvegi, G., Fagerli, H., Hand, J., Klimont, Z., Galy-Lacaux, C., Lehmann, C.M.B., Myhre, C.L., Myhre, G., Olivie, D., Sato, K., Quaas, J., Rao, P.S.P., Schulz, M., Shindell, D., Skeie, R.B., Stein, A., Takemura, T., Tsyro, S., Vet, R., Xu, X., 2019. Global and Regional Trends of Atmospheric Sulfur. *Sci. Rep.*, 9(1), 1-11, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37304-0>.
2. Theys, N., Hedelt, P., De Smedt, I., Lerot, C., Yu, H., Vlietinck, J., Pedergnana, M., Arellano, S., Galle, B., Fernandez, D., Carlito, C.J.M., Barrington, C., Taisne, B., Delgado-Granados, H., Loyola, D., Van Roozendaal, M., 2019. Global Monitoring of Volcanic SO<sub>2</sub> Degassing with Unprecedented Resolution From TROPOMI Onboard Sentinel-5 Precursor. *Sci. Rep.*, 9, 2643, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39279-y>.
3. Baklanov, A., Molina, L.T., Gauss, M., 2016. Megacities, Air Quality and Climate. *Atmospheric Environment*, 126, 235–249. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.059>.
4. Chen, R., Huang, W., Wong, C.M., Wang, Z., Thach, T.Q., Chen, B., Kan, H., 2012. Short-Term Exposure to Sulfur Dioxide and Daily Mortality in 17 Chinese Cities: The China Air Pollution and Health Effects Study (CAPES). *Environmental Research*, 118, 101-106.
5. Fischer, P.H., Marra, M., Ameling, C.B., Janssen, N., Cassee, F.R., 2011. Trends in Relative Risk Estimates for the Association Between Air Pollution and Mortality, 1992-2006. *Environmental Research*, 111(1), 94-100.
6. Deryugina, T., Heutel, G., Miller, N.H., Molitor, D., Reif, J., 2019. The Mortality and Medical Costs of Air Pollution: Evidence from Changes in Wind Direction. *Am. Econ. Rev.*, 109, 4178-4219.
7. Nascimento, A., Santos, M., Mill, J., Bottoni, J., Costa, N., Anselmo, V., 2017. Association Between the Concentration of Fine Particles in the Atmosphere and Acute Respiratory Diseases in Children. *Revista de Saúde Pública*, 51, 1-10.
8. Saunders, R., Waught, D., 2015. Variability and Potential Sources of Summer PM<sub>2.5</sub> in the Northeastern United States. *Atmospheric Environment*, 117, 259-270.
9. Künzli, N., Kaiser, R., Medina, S., Studnicka, M., Chanel, O., Filliger, P., Herry, M., Horak Jr, F., Puybonnieux-Texier, V., Quenel, P., Schneider, J., Seethaler, R., Vergnaud, J.C., Sommer, H., 2000. Public-Health Impact of Outdoor and Traffic-Related Air Pollution: A European Assessment. *Lancet*, 356(9232), 795-801.
10. Finzi, G., Tebaldi, G., 1982. A Mathematical Model for Air Pollution Forecast and Alarm in an Urban Area. *Atmospheric Environment*, 16, 2055-2059.
11. Ziomas, I.C., Melas, D., Zerefos, C.S., Bais, A.F., Paliatatos, A.G., 1995. Forecasting Peak Pollutant Levels From Meteorological Variables. *Atmospheric Environment*, 29(24), 3703-3711.
12. Polydoros, G.N., Anagnostopoulos, J.S., Bergeles, G., 1998. Air Quality Predictions: Dispersion Model vs Box-Jenkins Stochastic Models. An Implementation and Comparison for Athens, Greece. *Applied Thermal Engineering*, 18, 1037-1048.



13. Orellano, P., Reynoso, J., Quaranta, N., 2021. Short-Term Exposure to Sulphur Dioxide (SO<sub>2</sub>) and All-Cause and Respiratory Mortality: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environ. Int.*, 150, Article 106434, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106434>.
14. Grennfelt, P., Engleryd, A., Forsius, M., Hov, Ø., Rodhe, H., Cowling, E., 2020. Acid Rain and Air Pollution: 50 Years of Progress in Environmental Science and Policy. *Ambio*, 49 (4), 849-864, <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01244-4>.
15. Szopa, S., Naik, V., Adhikary, B., Artaxo, P., Bernsten, T., Collins, W.D., Fuzzi, S., Gallardo, L., Kiendler-Scharr, A., Klimont, Z., Liao, H., Unger, N., Zanis, P., 2021. Short-Lived Climate Forcers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V.P., Zhai, A., Pirani, S.L., Connors, C., Péan, S., Berger, N., Caud, Y., Chen, L., Goldfarb, M.I., Gomis, M., Huang, K., Leitzell, E., Lonnoy, J.B.R., Matthews, T.K., Maycock, T., Waterfield, O., Yelekçi, R., Yu, and B., Zhou, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 817–922, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.008>.
16. Jacob, D.J., 2021. *Introduction to Atmospheric Chemistry: Supplemental Questions and Problems* (eleventh ed.), Harvard University. [https://projects.iq.harvard.edu/files/acmg/files/edu\\_jacob\\_atmchem\\_problems\\_jan\\_2021.pdf](https://projects.iq.harvard.edu/files/acmg/files/edu_jacob_atmchem_problems_jan_2021.pdf)
17. Von Schneidmesser, E., Monks, P.S., Allan, J.D., Bruhwiler, L., Forster, P., Fowler, D., Lauer, A., Morgan, W.T., Paasonen, P., Righi, M., Sindelarova, K., Sutton, M.A., 2015. Chemistry and The Linkages Between Air Quality and Climate Change. *Chem. Rev.*, 115(10), 3856-3897, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00089>.
18. WHO, “Ambient (Outdoor) Air Pollution,” WHO, Geneva, 2018.
19. Barnaba, F., Romero, N.A., Bolignano, A., Basart, S., Renzi, M., Stafoggia, M., 2022. Multiannual Assessment of the Desert Dust Impact on Air Quality in Italy Combining PM10 Data with Physics-Based and Geostatistical Models. *Environment International*, 163, 107204.
20. Sharma, E., Deo, R.C., Soar, J., Prasad, R., Parisi, A.V., Raj, N., 2022. Novel Hybrid Deep Learning Model for Satellite Based PM10 Forecasting in the Most Polluted Australian Hotspots. *Atmospheric Environment*, 279, 119111.
21. Sánchez-Ccoyllo, O.R., Ordoñez-Aquino, C.G., Muñoz, A.G., Llacza, A., Andrade, M.F., Liu, Y., Reategui-Romero, W., Brasseur, G., 2018. Modeling Study of the Particulate Matter in Lima with the WRF-Chem Model: Case Study of April 2016. *International Journal of Applied Engineering Research: IJAER*, 13(11), 10129-10141.
22. Feng, X., Zhang, X., Wang J., 2023. Update of SO<sub>2</sub> Emission Inventory in the Megacity of Chongqing, China by Inverse Modeling. *Atmospheric Environment*, 294, 119519. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119519>.
23. Ju, T., Lei, M., Guo, G., Xi, J., Zhang, Y., Xu, Y., Lou, Q., 2022. A New Prediction Method of Industrial Atmospheric Pollutant Emission Intensity Based on Pollutant Emission Standard Quantification. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 17, Article number: 8.
24. Jeong, G.-R., Baker, B., Campbell, P.C., Saylor, R., Pan, L., Bhattacharjee, P.S., Smith, S.J., Tong, D., Tang, Y., 2023. Updating and Evaluating Anthropogenic Emissions for NOAA’s Global Ensemble Forecast Systems for Aerosols (GEFS-Aerosols): Application of An SO<sub>2</sub> Bias-Scaling Method. *Atmosphere*, 14(2), 234. <https://doi.org/10.3390/atmos14020234>.
25. Opio, R., Mugume, I., Nakatumba-Nabende, J., Mbogga, M., 2023. Modeling The Atmospheric Dispersion of SO<sub>2</sub> from Mount Nyiragongo. *Journal of African Earth Sciences*, 197, 104771.
26. Zateroglu, M.T., 2021a. Evaluating the Sunshine Duration Characteristics in Association with Other Climate Variables. *European Journal of Science and Technology, Special Issue 29*, 200-207, <https://doi.org/10.31590/ejosat.1022639>.
27. Zateroglu, M.T., 2021b. Statistical Models for Sunshine Duration Related to Precipitation and

- Relative Humidity. *European Journal of Science and Technology*, Special Issue 29, 208-213. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1022962>.
28. Zateroglu, M.T., 2021c. Assessment of the Effects of Air Pollution Parameters on Sunshine Duration in Six Cities in Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 30(02A), 2251-2269.
29. Zateroglu, M.T., 2021d. The Role of Climate Factors on Air Pollutants (PM10 and SO<sub>2</sub>). *Fresenius Environmental Bulletin*, 30(11), 12029-12036.
30. Zateroglu, M.T., 2022. Modelling the Air Quality Index for Bolu, Turkey. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 17(1), 119-130. <https://doi.org/10.26471/cjees/2022/017/206>.
31. Wang, J., Ogawa, S., 2015. Effects of Meteorological Conditions on PM<sub>2.5</sub> Concentrations in Nagasaki, Japan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12, 9089-9101.
32. Pohjola, M., Kousa, A., Kukkonen, J., Härkönen, J., Karppinen, A., Aarnio, P., Koskentalo, T., 2002. The Spatial and Temporal Variation of Measured Urban PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in the Helsinki Metropolitan. *Water, Air and Soil Pollution*, 2, 189-201.
33. Tai, A., Loretta, J., Daniel, J., 2010. Correlations Between Fine Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>) and Meteorological Variables in the United States: Implications for the Sensitivity of PM<sub>2.5</sub> to Climate Change. *Atmospheric Environment*, 44, 3976-3984.
34. Radaideh, J., 2017. Effect of Meteorological Variables on Air Pollutants Variation in Arid Climates. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 7, 1-12.
35. Gorai, A., Tului, F., Tchounwou, P., Ambinakudige, S., 2015. Influence of Local Meteorology and NO<sub>2</sub> Conditions on Ground-Level Ozone Concentrations in the Eastern Part of Texas, USA. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 8, 81-96.
36. Shouquan, C., Campbell, M., Li, Q., Li, G., Auld, H., Day, N., Pengelly, D., Gingrich, S., Yap, D., 2007. A Synoptic Climatological Approach to Assess Climatic Impact on Air Quality in South-Central Canada. Part II: Future Estimates. *Water, Air, and Soil Pollution*, 182, 117-130.
37. Camalier, L., Cox, W., Dolwick, P., 2007. The Effect of Meteorology on Ozone in Urban Areas and Their Use in Assessing Ozone Trends. *Atmospheric Environment*, 41, 7127-7137.
38. Cuhadaroglu, B., Demirci, E., 1997. Influence of Some Meteorological Factors on Air Pollution in Trabzon City. *Energy and Building*, 25, 179-184.
39. Akpınar, E.K., Öztıp, H.F., 2008. Evaluation of Relationship Between Meteorological Parameters and Air Pollutant Concentrations During the Winter Season in Elazığ, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 146, 211-224.
40. Akpınar, E.K., Akpınar S., Öztıp, H.F., 2009. Statistical Analysis of Meteorological Factors and Air Pollution at Winter Months in Elazığ, Turkey. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 3(1), 7-16.
41. Luvsan, M.E., Shie, R.H., Purevdorj, T., Badarch, L., Baldorj, B., Chan, C.C., 2012. The Influence of Emission Sources and Meteorological Conditions on SO<sub>2</sub> Pollution in Mongolia. *Atmospheric Environment*, 61, 542-549.
42. Çelik, M.B., Kadi, İ., 2007. The Relation Between Meteorological Factors and Pollutants Concentrations in Karabük City. *G.U. Journal of Science*, 20(4), 87-95.
43. Turalioglu, F.S., Nuhoglu, A., Bayraktar, H., 2005. Impacts of Some Meteorological Parameters on SO<sub>2</sub> and TSP Concentrations in Erzurum, Turkey. *Chemosphere*, 59, 1633-1642.
44. Banerjee, T., Singh, S.B., Srivastava, R.K., 2011. Development and Performance Evaluation of Statistical Models Correlating Air Pollutants and Meteorological Variables at Pantnagar, India. *Atmospheric Research*, 99, 505-517.
45. Jegathesan, A., Lokupitiya, E., Premasiri, S., 2022. Trends of Air Pollutants in Colombo City and Relationship with Meteorological Variables. *International Journal of Environmental Pollution and Environmental Modelling*, 5(2), 93-98. Retrieved from

- <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijepem/issue/71152/1102902>.
46. Ramli, N., Abdul Hamid, H., Yahaya, A.S., Ul-Saufie, A.Z., Mohamed Noor, N., Abu Seman, N.A., Kamarudzaman, A.N., Deák, G., 2023. Performance of Bayesian Model Averaging (BMA) for Short-Term Prediction of PM<sub>10</sub> Concentration in the Peninsular Malaysia. *Atmosphere*, 14, 311. <https://doi.org/10.3390/atmos14020311>.
  47. Bose, A., Roy Chowdhury, I., 2023. Investigating the Association Between Air Pollutants' Concentration and Meteorological Parameters in A Rapidly Growing Urban Center of West Bengal, India: A Statistical Modeling-Based Approach. *Model. Earth Syst. Environ.* <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01670-6>.
  48. Bridgman, H.A., Davies, T.D., Jickells, T., Hunova, I., Tovey, K., Bridges, K., Surapipith, V., 2002. Air Pollution in the Krusne Hory Region, Czech Republic During the 1990s. *Atmospheric Environment*, 36, 3375-3389.
  49. Pearce, J.L., Beringer, J., Nicholls, N., Hyndman, R.J., Tapper, N.J., 2011. Quantifying the Influence of Local Meteorology on Air Quality Using Generalized Additive Models. *Atmospheric Environment*, 45, 1328-1336.
  50. Giri, D., Kirishna Murthy, V., Adhikary, P.R., 2008. The Influence of Meteorological Conditions on PM<sub>10</sub> Concentrations in Katmandu Valley. *International Journal of Environmental Resources*, 2(1), 49-60.
  51. Czarnecka, M., Kalbarczyk, R., Kalbarczyk, E., 2007. Variability in Particulate Matter Concentration Versus Precipitation in Pomerania Region. *Polish Journal of Natural Science*, 22(4), 645-659.
  52. Abdullah, S., Ismail, M., Fong, S.Y., Mahfoodh, A., Ahmed, A.N., 2016. Evaluation for Long Term PM<sub>10</sub> Concentration Forecasting Using Multi Linear Regression (MLR) and Principal Component Regression (PCR) Models. *Environ. Asia*, 9, 101-110.
  53. Dominick, D., Juahir, H., Latif, M.T., Zain, S.M., Aris, A.Z., 2012. Spatial Assessment of Air Quality Patterns in Malaysia Using Multivariate Analysis. *Atmos. Environ.*, 60, 172-181.
  54. Fong, S.Y., Abdullah, S., Ismail, M., 2018. Forecasting of Particulate Matter (PM<sub>10</sub>) Concentration Based on Gaseous Pollutants and Meteorological Factors for Different Monsoons of Urban Coastal Area in Terengganu. *J. Sustain. Sci. Manag. Spec. Issue Number*, 5, 3-18.
  55. Ul-Saufie, A.Z., Yahaya, A.S., Ramli, N.A., Rosaida, N., Hamid, H.A., 2013. Future Daily PM<sub>10</sub> Concentrations Prediction by Combining Regression Models and Feedforward Backpropagation Models with Principle Component Analysis (PCA). *Atmos. Environ.*, 77, 621-630.
  56. Ul-Saufie, A.Z., Yahaya, A.S., Ramli, N.A., Hamid, H.A., 2015. PM<sub>10</sub> Concentrations Short Term Prediction Using Feedforward Backpropagation and General Regression Neural Network in a Sub-Urban Area. *J. Environ. Sci. Technol.*, 8, 59-73.
  57. Kumar, K., Pande, B.P., 2022. Air Pollution Prediction with Machine Learning: A Case Study of Indian Cities. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 1-16.
  58. Tan, C., Chen, Q., Qi, D., Xu, L., Wang, J.A., 2022. Case Analysis of Dust Weather and Prediction of PM<sub>10</sub> Concentration Based on Machine Learning at the Tibetan Plateau. *Atmosphere*, 13, 897. <https://doi.org/10.3390/atmos13060897>.
  59. Abdullah, S., Ismail, M., Ahmed, A.N., Abdullah, A.M., 2019. Forecasting Particulate Matter Concentration Using Linear and Non-Linear Approaches for Air Quality Decision Support. *Atmosphere*, 10, 667.
  60. Hamid, H.A., 2013. Probabilistic and Distribution Modelling for Predicting PM<sub>10</sub> Concentration in Malaysia; Universiti Sains Malaysia: George Town, Malaysia.
  61. Suleiman, A., Tight, M.R., Quinn, A.D., 2016. Hybrid Neural Networks and Boosted Regression Tree Models for Predicting Roadside Particulate Matter. *Environ. Model. Assess.*, 21, 731-750.
  62. Qin, S., Liu, F., Wang, J., Sun, B., 2014. Analysis and Forecasting of the Particulate Matter (PM) Concentration Levels over Four

- Major Cities of China Using Hybrid Models. *Atmos. Environ.*, 98, 665–675.
63. Chen, J., Yuan, C., Dong, S., Feng, J., Wang, H., 2023. A Novel Spatiotemporal Multigraph Convolutional Network for Air Pollution Prediction. *Applied Intelligence*, 1-14.
64. Choi, H.S., Song, K., Kang, M., Kim, Y., Lee, K.K., Choi, H., 2022. Deep Learning Algorithms for Prediction of PM10 Dynamics in Urban and Rural Areas of Korea. *Earth Science Informatics*, 15(2), 845-853.
65. Shaziayani, W.N., Ahmat, H., Razak, T.R., Zainan Abidin, A.W., Warris, S.N., Asmat, A., Noor, N.M., Ul-Saufie, A.Z., 2022. A Novel Hybrid Model Combining the Support Vector Machine (SVM) and Boosted Regression Trees (BRT) Technique in Predicting PM<sub>10</sub> Concentration. *Atmosphere*, 13, 2046.
66. Nejadkoorki, F., Baroutian S., 2012. Forecasting Extreme PM10 Concentrations Using Artificial Neural Networks. *Int. J. Environ. Res.* 6(1), 277–284.
67. Chaloulakou, A., Grivas, G., Spyrellis, N., 2003. Neural Network and Multiple Regression Models for PM10 Prediction in Athens: A Comparative Assessment. *J Air Waste Manage Assoc.*, 53(10),1183–1190.
68. Chen, Y., Shi, R., Shu, S., Gao, W., 2013. Ensemble and Enhanced PM10 Concentration Forecast Model Based on Stepwise Regression and Wavelet Analysis. *Atmos Environ* 74, 346–359.
69. Zaman, N.A.F.K., Kanniah, K.D., Kaskaoutis, D.G., 2017. Estimating Particulate Matter Using Satellite Based Aerosol Optical Depth and Meteorological Variables in Malaysia. *Atmos. Res.*, 193, 142-162. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.04.019>.
70. Lin, C.-Y., Chiang, M.-L., Lin, C.-Y., 2016. Empirical Model for Evaluating PM10 Concentration Caused by River Dust Episodes. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 13, 553. <https://doi.org/10.3390/ijerph13060553>.
71. Millionis, A.E., Davies, T.D., 1994. Regression and Stochastic Models for Air Pollution – I. Review, Comments and Suggestions. *Atmospheric Environment*, 28(17), 2801-2810.
72. Robeson, S.M., Steyn, D.G., 1990. Evaluation and Comparison of Statistical Forecast Models for Daily Maximum Ozone Concentrations. *Atmospheric Environment*, 24B(2), 303-312.
73. Ryan, W.F., 1995. Forecasting Severe Ozone Episodes in The Baltimore Metropolitan Area. *Atmospheric Environment*, 29(17), 2387-2398.
74. Shi, J.P., Harrison, R.M., 1997. Regression Modelling of Hourly NO<sub>x</sub> and NO<sub>2</sub> Concentrations in Urban Air in London. *Atmospheric Environment*, 31(24), 4081-4094.
75. Witz, S., Moore, A.B., 1981. Effect of Meteorology on the Atmospheric Concentrations of Traffic-Related Pollutants at A Los Angeles Site. *JAPCA*, 31, 1098-1101.
76. Ocak, S., Demircioglu, N., 2002. Erzurum İli Kasım 1995-Nisan 1996 Hava Kalitesi Profili. I. Ulusal Çevre Sorunları Sempozyumu, Atatürk Univ. Çevre Sorunları Araştırma Merkezi, Erzurum.
77. Turaloglu, F.S., Nuhoglu, A., Bayraktar, H., 2005. Impacts of Some Meteorological Parameters on SO<sub>2</sub> and TSP Concentrations in Erzurum, Turkey. *Chemosphere*, 59, 1633-1642.
78. Katsoulis, B.D., 1996. The Relationship Between Synoptic, Mesoscale and Microscale Meteorological Parameters During Poor Air Quality Events in Athens, Greece. *The Science of the Total Environment*, 181, 13-24.
79. Elminir, H.K., 2005. Dependence of Urban Air Pollutants on Meteorology. *The Science of the Total Environment*, 350, 225-237.
80. Chiu, K.H., Sree, U., Tseng, S.H., Wu, C-H., Lo, J-G., 2005. Differential Optical Absorption Spectrometer Measurement of NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, HCHO and Aromatic Volatile Organics in Ambient Air of Kaohsiung Petroleum Refinery in Taiwan. *Atmospheric Environment*, 39, 941-955.
81. Spellman, G., 1999. An Application of Artificial Neural Networks to the Prediction of Surface Ozone Concentrations in The United Kingdom. *Applied Geography*, 19, 123-136.
82. Chan, J.C., Hanna, S.R., 2004. Air Quality Performance Evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87, 167-196.
83. Ilten, N., Selici, A.T., 2008. Investigating the Impact of Some Meteorological Parameters on Air Pollution in Balıkesir, Turkey. *Environmental Monitoring Assessment*, 140, 267-277.

## Çelik Doğal Gaz Boruların Eğrilik Kapasitesi Üzerine Örnek Bir Çalışma: İstanbul Boğaz Geçişi

Adil YİĞİT\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0003-1045-6127

<sup>1</sup>*İstanbul Gaz Dağıtım A.Ş., Kavacık, Beykoz-İstanbul*

Geliş tarihi: 17.01.2023 Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: YİĞİT, A., (2023). Çelik Doğal Gaz Boruların Eğrilik Kapasitesi Üzerine Örnek Bir Çalışma: İstanbul Boğaz Geçişi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 25-33.

### Öz

Doğal gaz boru hatları iletim ve dağıtım hattı olarak genellikle iki ana gruba ayrılmaktadır. Ancak doğal gazı bir bölgeden diğerine taşıyabilmek için ise çelik boru hatları (iletim hatları) kullanılmaktadır. Doğal gaz çelik şebeke inşasında bazen düşey veya yatay kurpların dönülmesi gerekebilmektedir. Böyle durumlarda çelik boruların eğrilik kapasiteleri belirleyici olmaktadır. Bunun yanında bu kapasiteyi sınırlayan önemli bir faktör de lokal burkulma durumudur. İstanbul'daki doğal gaz şebekesinin arz güvenliğini güçlendirmek için İstanbul Boğazı'nın her iki yakasında bulunan doğal gaz çelik iletim hatlarının birbirine entegrasyonu planlanmaktadır. Boğaz'ın en kesiti dikkate alındığında bir düşey karp örnek çalışması olarak değerlendirilebilecek tasarımda sadece boruların eğrilik kapasiteleri, et kalınlıkları ve lokal burkulma sınırları göz önüne alınmıştır. İstanbul doğal gaz şebekesinde kullanılmakta olan çelik borular dikkate alınarak hangi çaptaki boruların hangi eğrilik kapasitelerine ve hangi lokal burkulma sınır değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre X-52 çelik malzemeden üretilmiş 12" çelik borunun en optimum çözümü verdiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Boğaz boru hattı geçişi, Çelik boru, Eğrilik, Yerel burkulma

### A Sample Study on Curvature Capacity of Steel Natural Gas Pipes: Bosphorus Crossing

#### Abstract

Natural gas pipelines are usually divided into two main branches as transmission and distribution pipelines. Natural gas is usually distributed with polyethylene pipelines for domestic use. However, steel pipelines (transmission pipelines) are used to transport natural gas from one region to another. In the construction of natural gas steel network, it is sometimes necessary to build vertical or horizontal curves. In such cases, the curvature capacities of steel pipes are decisive. Besides, an important factor limiting this capacity is local buckling. To strengthen the supply security of the natural gas network in Istanbul, it has been planned to integrate each other the natural gas steel transmission pipelines on both sides of the Bosphorus. Considering the cross-section of the Bosphorus, only the curvature capacities and thicknesses of the pipes and the local buckling limits have been taken into consideration in the plan, which can be

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Adil YİĞİT, [adilyigit75@hotmail.com](mailto:adilyigit75@hotmail.com)

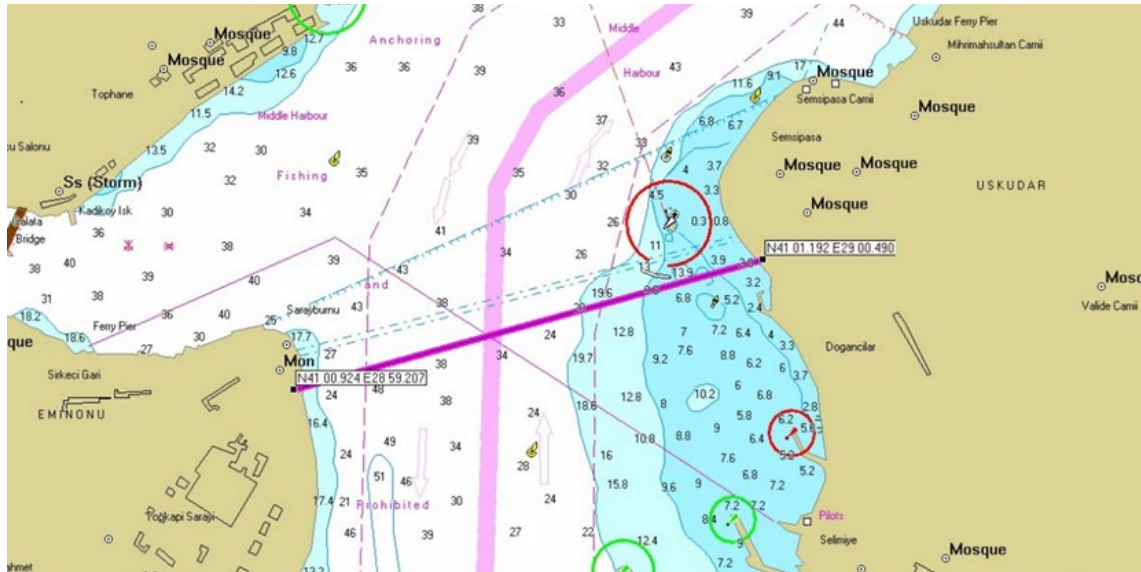
considered as a vertical curve case study. Considering the steel pipes used in the Istanbul natural gas network, it has been determined which diameter pipes have which curvature capacities and local buckling limit values. Depending on the obtained results, it has been concluded that 12" steel pipe made of X-52 steel material gives the most optimum solution.

**Keywords:** Bosphorus pipeline crossing, Steel pipe, Curvature, Local buckling

## 1. GİRİŞ

Doğal gaz arzının sürekliliğinin temini güvenli gaz arzının temelini oluşturmaktadır. Bu amaç doğrultusunda güçlü şebeke ağları tasarlamak veya var olan bu ağları güçlendirmek son derece ehemmiyet göstermektedir. İstanbul gibi hem Avrupa hem de Asya Kıtası'nda toprakları olan, ortasından uluslararası su yolu geçen bir şehrin her iki kıtadaki doğal gaz şebekeleri kendi içinde güçlü olsa da bu iki ağı birbirini desteklemesi planları her daim gündemde kalmaktadır. Bu bağlamda, bu makale kapsamında yapılan çalışmada her iki yakadaki şebekenin birbirini desteklemesi için gerekli analizler yapılmıştır.

Doğal gaz şebekeleri genel olarak iletim ve dağıtım hatları şeklinde sınıflandırılmaktadır. İletim hatları doğal gazı bir noktadan diğerine taşıyan genel olarak nispeten yüksek basınçta çalışan (İstanbul için 20 bar) çelik boru hatlarıdır. Dağıtım hatları ise şehir içinde evsel kullanım amacıyla doğal gaz arzını sağlayan nispeten düşük basınçta çalışan (İstanbul için 4 bar) polietilen boru hatlarıdır. Bu çalışma kapsamında Boğaz'ın çelik boru hattıyla (iletim hattıyla) geçilerek her iki yakadaki şebekenin birbirini desteklemesi planlanmıştır. Bu geçiş dizaynı çalışması için Sarayburnu ile Salacak arasındaki güzergah ele alınmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Boğaz geçişi güzergâhı [1]

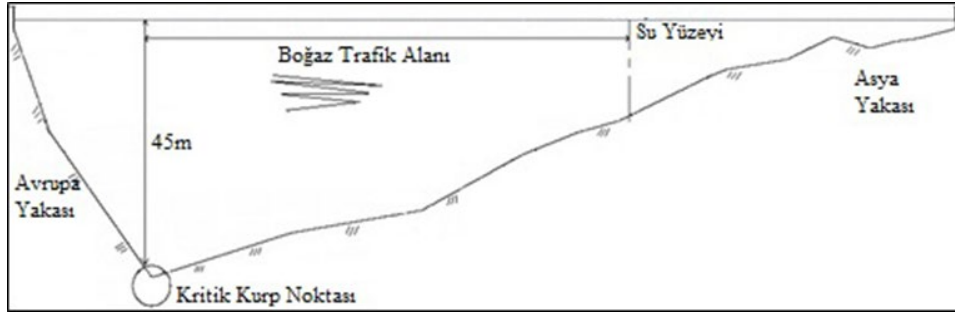
Yukarıda gösterilen (Şekil 1) güzergahtan inşa edilecek olan çelik boru hattı üzerine statik ve dinamik bazı yüklerin etki edeceği, ayrıca beklenen İstanbul Depremi ( $M=7,5$ ) nedeniyle boru hattının sismik dizaynının gerekeceği gibi

hususlar birer mühendislik yaklaşımı gerçeğidir [1-3]. Ancak bu çalışma kapsamında tasarımın sadece düşey kurp geçişine odaklanılmış olup dinamik ve sismik yüklere karşı analizler bu kapsam dışında tutulmuştur.

### 1.1. Güzergah Topoğrafyası

Çelik doğal gaz boru hattının geçilmesi planlanan Salacak-Sarayburnu hattı uluslararası su yolu olan İstanbul Boğazı içinde kalmakta olup Boğaz yüzeyinde Karadeniz'den Marmara Denizine (Kuzey-Güney) doğru ve tabanda ise Marmara Denizinden Karadeniz'e doğru (Güney-Kuzey) bir akıntı mevcuttur. Yüzey akıntısı bazen 4-5 m/s gibi bir hıza ulaşabilmektedir. Dip akıntıları yüzey akıntılarına göre daha yavaş olup Özellikle deniz tabanında akıntının deniz tabanı ile teması sebebi ile iyice azalmaktadır. Tüm bunların yanı sıra dip akıntıları için 100 yıllık yinleme dönemi akıntı hızı 1,4 m/s olarak bilinmektedir [4].

Güzergah en kesiti (batimetrik verileri) dikkate alındığında, yaklaşık 1800 metre olan hat üzerinde Asya Kıtası tarafında deniz derinliğinin yatık bir eğimle 45 metrelere ulaştığı, Avrupa Kıtası kısmının ise oldukça sert ve dik bir eğimle 45 metre derinliklerden kıyı hattına çıktığı tespit edilmiştir (Şekil 2). Burada (Avrupa Yakası kıyısında) oluşan bu çukur düşey karp tespitinde belirleyici olmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında, kritik çap tespitinde bu kurba odaklanılmıştır. Bu noktada iki tane ana belirleyici unsur gündeme gelmektedir. Birincisi çelik boruların bu kurbu dönebilme kapasitesi, ikincisi de boru yüzeylerinde lokal burkulmaya sebebiyet verilmemesi hususudur.



Şekil 2. Güzergah en kesit krokisi

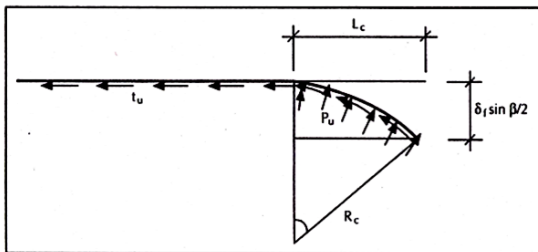
### 1.2. Çelik Boruların Eğrilik Yarıçapı

Boruların eğrilik kapasiteleri ile ilgili bazı çalışmalar yapılmakla beraber karp dönüşüne bağlı eğilme şekil değiştirmesi durumu için Kennedy vd. (1977) tarafından toprak-boru etkileşim kuvveti de dikkate alınarak aksenal çekme halindeki karp durumunda meydana gelebilecek eğilme şekil değiştirmesi aşağıdaki gibi modellenmiştir (Şekil 3) [5-7].

Bu modellemeye göre eğilme şekil değiştirmesi ( $\epsilon_b$ ) ve eğrilik yarıçapı ( $R_c$ ), sırasıyla, Eşitlik (1) ve Eşitlik (2)'deki gibi açıklanmıştır.

$$\epsilon_b = \frac{D}{2R_c} \quad (1)$$

$$R_c = \frac{\sigma \pi D t}{P_u} \quad (2)$$



Şekil 3. Boru eğrilik yarıçapı modellemesi [5]

Burada;  $\sigma$  aksenal çekme gerilmesi, D boru çapı, t boru et kalınlığı,  $P_u$  ise çekme nedeniyle dolgu-boru arasında oluşan, birim boya düşen kuvvettir. Bu kuvvetin hesabında zeminin kumlu veya killi olmasına göre iki ayrı formülden söz edilirken burada Boğaz tabanının kumlu zemin olması dikkate alınarak aşağıdaki Eşitlik (3)'ten faydalanılmıştır.

$$P_u = \bar{\gamma} H N_{qh} D \quad (3)$$

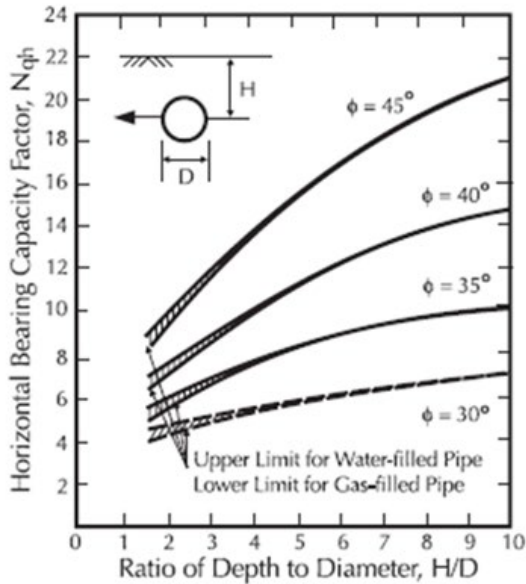


Burada  $D$  boru çapı,  $\bar{\gamma}$  toprağın efektif birim hacim ağırlığı,  $H$  boru hattı ekseninin gömülme derinliğidir.  $N_{qh}$  ise kum için yatay taşıma kapasitesidir (Şekil 4) [8].

Ayrıca  $x = H/D$  olarak tanımlanarak;

$$N_{qh} = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 \quad (4)$$

olacak şekilde aşağıdaki Çizelge 1’de kullanılabilir [8].



Şekil 4. Kum için yatay kapasite faktörü [9]

Çizelge 1. Yatay taşıma kapasite faktörü

	$\emptyset$	a	b	c	$dx10^{-3}$	$e x10^{-5}$
$N_{qh}$	20	2,399	0,439	-0,03	1,059	-1,754
$N_{qh}$	25	3,332	0,839	-0,09	5,606	-13,19
$N_{qh}$	30	4,565	1,234	-0,089	4,275	-9,159
$N_{qh}$	35	6,816	2,019	-0,146	7,651	-16,83
$N_{qh}$	40	10,959	1,783	0,045	-5,425	-11,53
$N_{qh}$	45	17,658	3,309	0,048	-6,443	-12,99

Eşitlik (1)’den elde edilen şekil değiştirme oranı için sınırlayıcı bir durum olan lokal burkulma durumunun analizlerde mutlaka dikkate alınması önemli bir gerekliliktir.

### 1.3. Çelik Boruların Lokal Burkulma Analizi

Burkulma, basınç yüküne maruz bir yapı elemanının kararlı durumdan kararsız duruma aniden geçiş yaptığı yapısal bir sorunlu durumu ifade etmektedir. Lokal burkulma ise boru cidarının (çeperinin) yerel istikrarsızlık durumu olarak ifade edilmektedir (Şekil 5). Lokal çeper burkulmasının başlamasından sonra burkulma bölgesinde iç ve dış kuvvetlerin etkisiyle gerilme yığılmaları meydana gelir. Bu yığılmalar nedeniyle meydana gelen boru cidarındaki büyük eğilmeler (çöküntü ve çıkıntılar) boruda çevresel çatlamalara ve sonunda da sızıntıların ortaya çıkmasına neden olurlar. Borularda lokal burkulma üzerine yapılan birçok çalışmanın yanı sıra önceden yapılmış olan laboratuvar testlerine dayanarak Hall ve Newmark (1977) bir boruda basınç nedeniyle ortaya çıkan yerel burkulmanın ( $\epsilon_{cr}$ ), teorik değer ( $\epsilon_{teorik}$ ) 1/3 ile 1/4’ü kadar bir şekil değiştirme oranında başladığını ortaya koymuştur [10-14]. Buna göre  $t$  boru et kalınlığı ve  $R$  yarıçap olacak şekilde Eşitlik (5) ve Eşitlik (6) elde edilmiştir.

$$\epsilon_{teorik} = 0,6 \frac{t}{R} \quad (5)$$

$$0,15 \frac{t}{R} \leq \epsilon_{cr} \leq 0,20 \frac{t}{R} \quad (6)$$



Şekil 5. Boruların lokal burkulması [14]

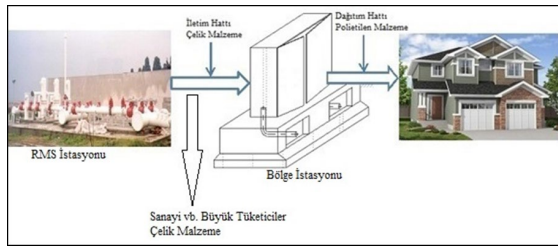
Kritik lokal burkulma (buruşma) şekil değiştirme oranı ( $\epsilon_{cr}$ ) sınırlayıcı bir boru hattı yetersizlik kriteri olup çalışmanın hassasiyetine bağlı olarak kıyas yapmak için alt veya üst sınır değerleri kullanılabilirdiği gibi bu iki değer ortalaması da kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında ise minimum değer kullanılmıştır.



## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Malzeme

Üzerinde çalışma yapılmakta olan doğal gaz şebeke ağında çelik ve polietilen (PE) olmak üzere iki tür boru malzemesi mevcuttur. RMS istasyonu olarak adlandırılan ana merkezden teslim alınan doğal gaz 20 bar basınçta gaz taşıyan iletim hatları (çelik boru) ile büyük tüketici ve bölge istasyonlarına taşınmaktadır. Bölge regülatörlerinde 4 bar basınca düşürülen doğal gaz polietilen borular ile evsel kullanım için arz edilmektedir (Şekil 6). Değerlendirilmeye alınan gaz şebekesinde kullanılmakta olan polietilen ve çelik borular için bu çalışma kapsamında yapılmakta olan analizlerde kullanılacak gerekli bazı değerler aşağıda Çizelge 2’de verilmiştir [15,16].



Şekil 6. İstanbul doğal gaz arz krokisi

Çizelge 2. Boru malzemesi özellikleri [7,8]

Malzeme adı	D (mm)	t (mm)	E (MPa)	Akma dayanımı $\sigma$ (MPa)
PE 63	63	5,8	850	19
PE110	110	10,0	850	19
PE125	125	11,4	850	19
4" Çelik	114,3	4,37	200.000	241 (Grade B)
6" Çelik	168,3	4,37	200.000	241 (Grade B)
8" Çelik	219,1	4,78	200.000	241 (Grade B)
12" Çelik	323,8	5,56	200.000	241 (Grade B)
16" Çelik	406,4	6,35	200.000	241 (Grade B)
20" Çelik	508	7,14	200.000	241 (Grade B)
24" Çelik	609,6	7,92	200.000	241 (Grade B)
28" Çelik	711,2	9,52	200.000	241 (Grade B)
30" Çelik	762	11,13	200.000	241 (Grade B)

Boğaz geçişi özel bir imalat şekli olup bu tür özel imalatlar için çelik boruların kullanılması tercih edilen bir husustur. Ancak bunun yanı sıra Boğaz geçişinin esas amacı her iki yakadaki şebeke ağını

birbirleriyle desteklemek olduğundan 20 bar basınçta gaz taşıyan şebeke elemanının 4 bar taşıyana göre tercih edilmesi diğer bir önemli nedendir. Bu nedenlerle bu çalışma kapsamındaki analizlerde çelik borulara odaklanılmıştır.

### 2.2. Analizler

Batimetrik detayı Şekil 2’de görülmekte olan kesit tabanına boru hattı serilerle imalat yapılabileceği gibi güzergah boyunca deniz dibinde tranşe açılıp planlanmakta olan çelik boru hattı bu tranşeye gömülerek de imalatın yapılması mümkündür. Gömülerek yapılacak olan böyle bir imalatta tabanın yüzey şekillerine uyma zorunluluğu nispeten az olup eğrilik yarıçapı yüksek olan yerlerde tranşe kazısı ayarlanarak bu eğriliğin yumuşatılması sağlanabilir. Yüzeye serme yaklaşımına göre böyle bir uygulamanın gömme derinliğine bağlı gelecek ilave dolgu yükü, İstanbul’da beklenmekte olan yaklaşık 7,5 büyüklüğündeki bir depremden kaynaklanacak dolgu-boru hattı arasındaki sürtünmelere bağlı ilave sismik yükler gibi dezavantajları olacaktır. Ayrıca gemilerin çapa atma ihtimalleri dikkate alındığında gömülü olmayan imalatta boru hattının bu tür dış müdahalelere açık olması istenen bir durum değildir. İstanbul Boğazı dünya deniz yolları arasında kritik geçiş noktalarından, düğüm noktalarından biri olup bu trafiği aksatmadan en kısa sürede planlanan imalatın tamamlanması elzem bir durumdur. Hem bu imalat hızı hem de beklenen deprem etkileri dikkate alındığında dış müdahalelere karşı boru hattının beton/betonarme korumayla muhafaza edilerek ilgili imalatın gerçekleştirilmesi ön plana çıkmaktadır.

Her ne şekilde proje ve planlama yapılırsa yapılsın Boğaz dibi topoğrafyası (Şekil 2) dikkate alındığında mutlaka kurp dönüşleriyle karşılaşılacağı açıktır. Burada yapılmakta olan analizler geçiş tipine göre boru hattında oluşacak yükler ve bunlara bağlı tasarımlardan ziyade bu kurp dönüşlerine odaklanmaktadır. Çelik boru ile yapılması planlanan doğal gaz Boğaz geçişi imalatı için elastik sınırlar içinde kalacak şekilde analizler yapılmıştır. Analizlerde akma gerilmesinin %70 ( $\sigma=0,70\sigma_a$ ) değeri emniyetli tarafta kalmak için kullanılmıştır. Buna göre eğrilik yarıçapı;

$$R_c = \frac{ED}{1,4\sigma_a} \quad (7)$$

olarak elde edilmiştir. Burada E elastisite modülü, D boru çapıdır.

Irgat yardımıyla uç uca kaynaklanan boruları 135 tonluk çekme kuvveti uygulayarak tabana yerleştirme yöntemi kullanılacak olup böyle bir uygulamada boru kesit alanı, dolayısıyla da boru et kalınlığı diğer önemli bir belirleyici parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu analizler Şekil 2’de verilmiş olan kritik kurp noktasına göre yapılmış olup bu kurban doğal yüzey eğrilik yarıçapı ise yaklaşık olarak 150 metre olarak tespit edilmiştir [1]. Burada bahsedilen genel analiz yaklaşımları kapsamında elde edilen bulgular aşağıda değerlendirilmeye tabi tutulmaktadır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

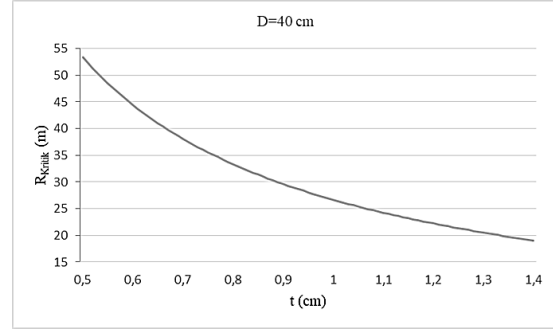
Boru hattında burkulma oluşmayacak şekilde bir imalat yapılabilmesi için gerekli olan minimum eğrilik yarıçapları, Eşitlik 6’daki minimum kritik burkulma şekil değiştirme oranı değeri dikkate alınarak, Çizelge 2’deki çelik boru özelliklerine göre aşağıdaki gibi elde edilmiştir (Çizelge 3). Buna göre her bir boru çapı için elde edilmiş olan minimum kritik eğrilik yarıçapı ( $R_{kritik}$ ) ilgili boruda lokal burkulmanın başladığı alt sınır olarak kabul edilmiştir. Diğer bir deyişle bu durum, bu eğrilik yarıçapından daha düşük değerdeki kurpların söz konusu boru malzemesiyle dönülemeyeceğinin tespitidir. Çelik boru burkulmasına bağlı minimum kritik eğrilik yarıçapı;

$$R_{Kritik} = \frac{D^2}{0,6t} \quad (8)$$

şeklinde elde edilmiştir.

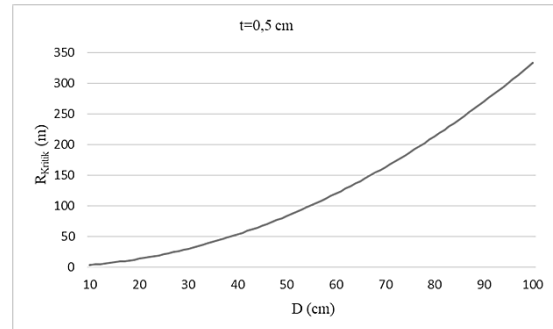
Lokal burkulmaya dayalı elde edilen minimum kritik eğrilik yarıçapının et kalınlığına (Şekil 7) ve boru çapına (Şekil 8) göre değişimi incelenmiştir. Örnek olarak ele alınan ve çapı 40 cm olan çelik bir boru için et kalınlığı arttıkça kritik minimum

eğrilik yarıçapının düştüğü görülmektedir. İstenen bir durum olarak değerlendirilen bu husus et kalınlığı arttığında bir boruda lokal burkulma riskinin azaldığını ve daha keskin (küçük) kurpların dönülebilmesine olanak sağladığını göstermektedir.



Şekil 7. Boru et kalınlığı - kritik eğrilik yarıçapı

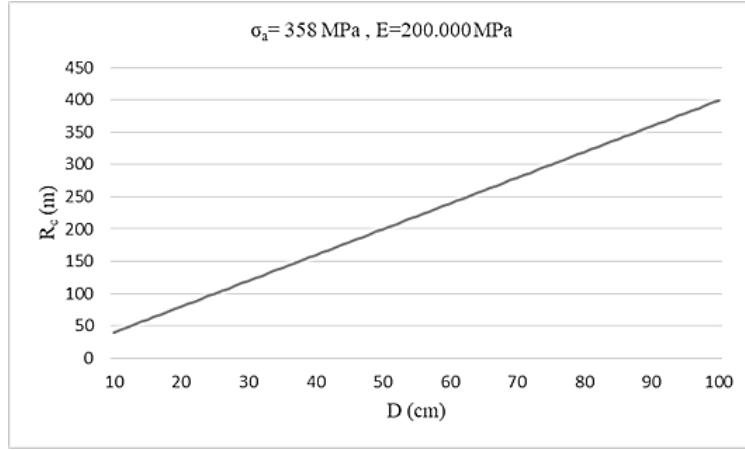
Ayrıca sabit bir et kalınlığı ( $t=0,5$  cm) dikkate alınarak boru çapına göre kritik minimum eğrilik yarıçapının arttığı görülmektedir. Bu durum boru çapı arttıkça lokal burkulma riskinin artması ve buna bağlı olarak küçük kurpların dönülebilme kapasitesinin azalması olarak değerlendirilebilir. Şekil 8’e göre örneğin 100 cm çaplı bir boru ancak 333 metrelik bir kurptan daha düşük bir kurbu dönemezken 40 cm çaplı bir boruda ise bu alt sınır 53 metre olarak tespit edilmiştir.



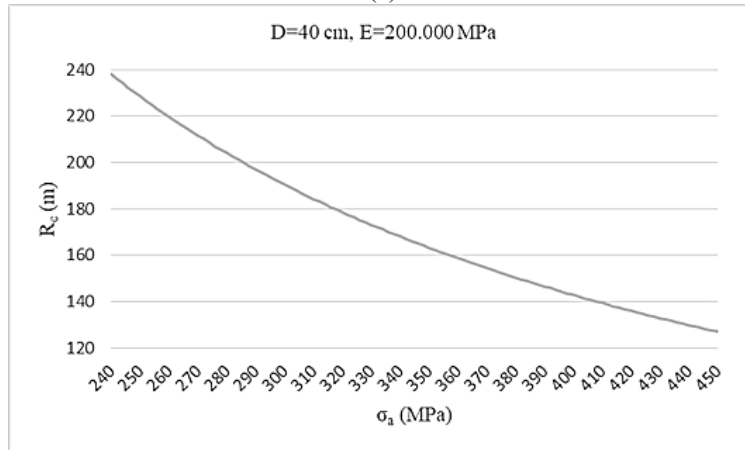
Şekil 8. Boru çapı- kritik eğrilik yarıçapı

Bir boruda çap arttıkça akma dayanımına göre dönebileceği kurp yarıçapı da artmaktadır (Şekil 9a). Yani lokal burkulma analizinde olduğu gibi çapın artması daha küçük (keskin) kurpların dönülebilme kapasitesini azaltmaktadır. Akma

dayanımı yüksek boru malzemesi kullanılması tespit edilmiştir (Şekil 9b).  
durumunda ise söz konusu bu kapasitenin arttığı



(a)



(b)

Şekil 9. a) Çapa göre, b) Akma dayanımına göre boru kurp kapasitesi

### 3.1. İncelenen Sahaya Uygulama - Boğaz Geçiş Uygulaması

İmalat aşamasında, elastik sınırlar dahilinde kalabilmek için, ırgatın uygulayacağı kuvvetten (135 ton) kaynaklı kesitte oluşacak olan gerilme emniyetli akma dayanımını aşmamalıdır. Bu şartlar altında Çizelge 2’de verilmiş olan Grade B çelik borular için gerekli boru cidar kalınlıkları ( $t_{hesap}$ ) ve kurp kapasiteleriyle (Max.  $R_c$ ) birlikte kritik minimum eğrilik yarıçapları ( $R_{kritik}$ ) Çizelge 3’teki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 3. Mevcut çelik boru tipleri için sonuçlar

Çap	Çap (mm)	t (mm)	$R_{kritik}$ (m)	$t_{hesap}$ (mm)	Max. $R_c$ (m)	$R_{Mevcut}$ (m)
4"	114,3	4,37	5	30,34	68	150
6"	168,3	4,37	11	16,82	100	150
8"	219,1	4,78	17	12,32	130	150
12"	323,8	5,56	31	8,07	192	150
16"	406,4	6,35	43	6,37	241	150
20"	508	7,14	60	5,06	301	150
24"	609,6	7,92	78	4,21	361	150
28"	711,2	9,52	89	3,60	422	150
30"	762	11,13	87	3,36	452	150

Analizlerden elde edilen sonuçlara göre hem et kalınlığı hem de kurp yapabilme kapasitesi açısından her iki gerekliliği de sağlayan kısımlar Çizelge 4’te gölgelendirilmiştir. Buna göre X-52 çelik malzeme için sadece 12” çelik borunun gerekli şartları sağladığı, X-80 çelik malzeme için ise 12”, 16” ve 20” çelik boruların bu şartları sağladığı görülmektedir. Mühendislik yaklaşımı anlamında en optimum durumun ise X-52

malzemeden üretilmiş 12” çelik boru olduğu, örneğin X-80 malzemeden üretilmiş 20” borunun et kalınlığının ise gerekenden fazla olduğu anlaşılmaktadır. Standartlarda Psi cinsinden minimum akma dayanımına göre ( $\sigma_a$ ) sınıflandırılmış olan (örneğin X-42 için min.  $\sigma_a=42.100$  Psi) çelik boruların minimum akma dayanımları MPa cinsinden Çizelge 4’te verilmektedir.

**Çizelge 4.** Çelik boru malzeme için analizler

Çap	t (mm)	R <sub>Mevcut</sub> (m)	X-52 ( $\sigma_a=290$ Mpa)		X-60 ( $\sigma_a=415$ Mpa)		X-65 ( $\sigma_a=450$ Mpa)		X-70 ( $\sigma_a=485$ Mpa)		X-80 ( $\sigma_a=555$ Mpa)	
			t <sub>hesap</sub> (mm)	Max. R <sub>c</sub> (m)	t <sub>hesap</sub> (mm)	Max. R <sub>c</sub> (m)	t <sub>hesap</sub> (mm)	Max. R <sub>c</sub> (m)	t <sub>hesap</sub> (mm)	Max. R <sub>c</sub> (m)	t <sub>hesap</sub> (mm)	Max. R <sub>c</sub> (m)
4"	4,37	150	17,76	46	14,96	40	13,61	36	12,51	34	10,76	30
6"	4,37	150	10,89	67	9,35	58	8,58	54	7,94	50	6,90	44
8"	4,78	150	8,13	87	7,01	76	6,44	70	5,98	65	5,21	57
12"	5,56	150	5,39	129	4,66	112	4,29	103	3,98	96	3,48	84
16"	6,35	150	4,26	162	3,69	141	3,40	130	3,16	120	2,76	105
20"	7,14	150	3,40	203	2,94	176	2,71	162	2,52	151	2,20	132
24"	7,92	150	2,83	243	2,45	211	2,26	194	2,10	181	1,83	158
28"	9,52	150	2,42	284	2,10	246	1,93	227	1,80	211	1,57	184
30"	11,13	150	2,26	304	1,96	264	1,80	243	1,68	226	1,46	198

#### 4. SONUÇLAR

Gömülü sürekli (birbirine kaynakla birleştirilen) boru hatları imal edilirken yatay veya düşey kurpların dönülmesi gerekliliği ortaya çıkabilmektedir. Bu tür dönüşler dirsekler yardımıyla yapılabileceği gibi çelik boruların kurp yapabilme kapasitesinden de faydalanılabilir. Bu çalışmada ele alınan İstanbul Boğaz geçişinde olduğu gibi dirseklerden her zaman bu anlamda teknik kısıtlılıklar nedeniyle faydalanılması mümkün olmamaktadır. Böyle durumlarda veya boru kaynağının fazla olması nedeniyle ortaya çıkabilecek işçilik ve maliyetlerden, zaman kayıplarından kaçınmak istenildiğinde boruların kurp yapabilme kapasitelerinden yararlanmak gerekmektedir.

Borularda çap arttıkça kurp yapabilme kapasiteleri azalmakta, et (cidar) kalınlığı ve akma dayanımı arttıkça da bu kapasite artmaktadır. Buna göre ihtiyacı karşılayacak derecede mümkün olan en düşük çap, yüksek et kalınlığı olan ve yüksek

akma dayanımına sahip boru malzemesi tercih edilmelidir. Bu çalışmada örnek olarak ele alınan İstanbul Boğaz’ı çelik doğal gaz geçişi proje çalışması çelik boruların düşey kurp yapma kapasitelerinin ele alınması anlamında önemli bir analizdir. Yapılan analizler sonucu, Boğaz geçişi için, mevcut doğal gaz şebekesinde kullanılmakta olan Grade-B çelik malzemeden üretilmiş olan borular yerine en az X-52 çelik malzemeden üretilmiş boruların kullanılması gerektiği tespit edilmiştir. Ayrıca bu örnek çalışma için en optimum boru çapının ise 12” olduğu tespit edilmiştir.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Yigit, A., Lav, M.,A, Gedikli, A., 2018. Vulnerability of Natural Gas Pipelines Under Earthquake Effects. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 9(1).
2. O’Rourke, M.J., Liu, X., 1999. Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects. Monograph No. 3, Multidisciplinary Center for

- Earthquake Research, University of Buffalo, Buffalo, 249.
3. Yiğit, A., 2021. Embedment Depths of Natural Gas Pipelines. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 8(1); 471-480.
  4. İstanbul Gaz Dağıtım A.Ş., 2007. Salacak – Sarayburnu Arası Boğaz Geçiş Hattı Proje Raporu, Proje Çalışmaları, İGDAŞ, İstanbul, Türkiye, 12.
  5. Kennedy, R.P., Chow, A.W., Williamson, R. A., 1977. Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline. *Journal of the Transportation Engineering Division, ASCE*, May, 103, No. TE5, 617-633.
  6. Polenta, V., Garvey, S., Chronopoulos, D., Long, A., Morvan, H., 2015. Effects of Pipe Curvature and Internal Pressure on Stiffness and Buckling Phenomenon of Circular Thin-Walled Pipes. *ICAMME 2015: XIII International Conference on Applied Mechanics and Materials*, February, London.
  7. Ye, S., Ding, H., Wei, S., Ji, J.C., Chen, L., 2021. Non-trivial Equilibriums and Natural Frequencies of A Slightly Curved Pipe Conveying Supercritical Fluid. *Ocean Engineering*, 227(12).
  8. American Society of Civil Engineers (ASCE), 1984. *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems*, Committee on Gas and Liquid Fuel Lifeline, ASCE, 473.
  9. Trautmann, C.H., O'Rourke, T.D., 1983. Load-Displacement Characteristics of a Buried Pipe Affected by Permanent Earthquake Ground Movements. *Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment*, PVP-77, ASME, New York, June, 254-262.
  10. Hall, W., Newmark, N., 1977. *Seismic Design Criteria for Pipelines and Facilities. Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering*, ASCE, New York, 18-34.
  11. Li, Y., Shuai, J., Jin, Z., Zhao, Y., Xu, K., 2012. Local Buckling Failure Analysis of High-strength Pipelines. *Petroleum Science*, 14, 549-559.
  12. Gresnigt, A.M., Foeken, R.J., 2001. Local Buckling of UOE and Seamless Steel Pipes. *The Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, Stavanger, Norway, June.
  13. Mantovano, L., Bravo, R.E., Cravero, S., Cravero, S., Ernst, H.A., 2010. Offshore Installation of Welded Pipe: Local Buckling Evaluation. *8<sup>th</sup> International Pipeline Conference*, Calgary, Alberta, Canada.
  14. Karamanos, S., A., Gresnigt, A., M., 2007. Failure of Locally Buckled Pipelines. *Journal of Pressure Vessel Technology, ASME*, 129(2), 272-279.
  15. Türkel, V., 2012. Doğal Gz Dağıtımında Tasarım, İmalat ve Yönetim. İstanbul: İBB İstanbul Gaz Dağıtım A.Ş. (İGDAŞ) Yayınları, 518.
  16. Yiğit A., 2015. Deprem Etkisi Altındaki Gömülü Sürekli Boru Hatları, Doktora Tezi, I.T.U. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 140.



## Performance Analysis of CNN Channel Attention Modules for Image Classification Task

Mehmet SARIGÜL<sup>\*1,2</sup> ORCID 0000-0001-7323-6864

<sup>1</sup>Iskenderun Technical University, Computer Engineering Department, Iskenderun, Hatay

<sup>2</sup>Cukurova University, Computer Engineering Department, Adana, Türkiye

Geliş tarihi: 05.01.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: SARIGÜL., M., (2023). Performance Analysis of CNN Channel Attention Modules for Image Classification Task. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(1), 35-39.

### Abstract

Increasing the representation power of convolutional neural networks, a popular deep learning model, is one of the hot study topics recently. Channel attention is a common strategy followed in this regard. In this strategy, the inter-channel relationship is exploited by a module placed after the convolution operation. Recently, successful channel attention modules are proposed in this context. In this article, a performance analysis of three popular channel attention structures which are Squeeze-and-Excitation Networks (SeNet), Efficient Channel Attention Networks (Eca-Net), and Convolutional Block Attention Module (CBAM), is performed using five different image datasets for the classification task. According to the obtained results, SeNet is the most successful channel attention module surpassing the other's performance in the majority of the experiments. In experiments with the ResNet18 and ResNet34 base models, the SeNet module showed the highest performance in three of the five datasets. For the ResNet50 baseline, SeNet was the channel attention module with the highest accuracy values for all datasets.

**Keywords:** Convolutional neural networks, Channel Attention, Image classification

### Görüntü Sınıflandırma Görevi için CNN Kanal Dikkat Modüllerinin Performans Analizi

#### Özet

Popüler bir derin öğrenme modeli olan evrişimli sinir ağlarının temsil gücünün artırılması, son zamanlarda sıcak çalışma konularından biridir. Kanal dikkati bu konuda izlenen yaygın bir stratejidir. Bu stratejide, konvolüsyon işleminden sonra yerleştirilen bir modül ile kanallar arası ilişkiden yararlanır. Son zamanlarda, bu bağlamda başarılı kanal dikkat modülleri önerilmiştir. Bu makalede, üç popüler kanal dikkat yapısı olan Sıkıştır-ve-uyarım ağları (SeNet), Etkin Kanal Dikkat Ağları (Eca-Net) ve Evrişimsel Blok Dikkat Modülü (CBAM) üzerine beş farklı görüntü veriseti kullanılarak sınıflandırma görevi için performans analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre SeNet, deneylerin çoğunda diğerlerinin performansını geride bırakan en başarılı kanal dikkat modülü olmuştur. ResNet18 ve ResNet34 temel

---

\*Corresponding author (Sorumlu yazar): Mehmet SARIGÜL, [msarigul@cu.edu.tr](mailto:msarigul@cu.edu.tr)

modelleriyle yapılan deneylerde, SeNet modülü beş veri kümesinden üçünde en yüksek performansı göstermiştir. ResNet50 temel modeli içinse SeNet, tüm veri kümeleri için en yüksek doğruluk değerlerine sahip kanal dikkat modülü olmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Evrişimli sinir ağları, Kanal dikkati, Görüntü sınıflandırması

## 1. INTRODUCTION

Channel attention is a recent idea to improve the performance of a deep convolutional neural network. The convolution operation focuses on the spatial relationship of the input, while the channel attention focuses on and takes advantage of the inter-channel relationships. According to this idea, each channel entering the convolution layer has different importance and can be weighted accordingly. In order to achieve this, the features coming out of the CNN layer are first compressed along the channel, then the relationship between the channels is calculated and each channel is weighted.

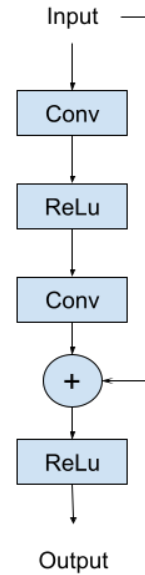
Recently, there are many successful plug-and-play modules that have emerged with channel attention idea. Some of them are Squeeze-and-Excitation Networks (SeNet) [1], Efficient Channel Attention Networks (ECA-Net) [2], and Convolutional Block Attention Module (CBAM) [3]. These additional modules add a negligible amount of computational cost to the deep convolutional neural networks and provide a good performance increase. In this article, the performances of these three modules are compared on five different datasets using different versions of the ResNet [4] structures as base models. According to the test results, the most successful module is determined as SeNet. SeNet surpasses other modules' performance along the baseline model and achieves the best accuracy results in the majority of the experiments.

## 2. METHODS AND MATERIALS

In this section, brief information about the baseline model ResNet is given, three popular channel attention modules which are SeNet, ECA-Net and CBAM are explained, and, information about the datasets used in the experiments is demonstrated.

### 2.1. Residual Network (ResNet)

Residual Network (ResNet) was proposed by He et al [4] to enable the training of very deep network structures. It includes a large number of ResBlocks (a ResBlock is demonstrated in Figure 1) and achieved the best accuracy values in ILSVRC 2015 for the classification task of ImageNet dataset [5]. There are different ResNet structures named accordingly with their depths such as ResNet18, ResNet34, ResNet50, etc.



**Figure 1.** A standard residual block containing two convolutional layers

### 2.2. Squeeze-and-Excitation Networks (SeNet)

Squeeze-and-Excitation Networks (SeNet) proposed by Hu et al [1] is a recent channel attention technique enhancing convolutional operator's efficiency by considering channel-wise relationship. This technique proposes a module that adaptively recalibrates feature responses on a



channel-by-channel basis. This module contains three parts which are squeeze block, excitation block and scale block. While squeeze block is used to reduce the spatial sizes of the feature maps, excitation block is utilized to learn the adaptive scaling weights for all input channels. The scaling module, on the other hand, allows each channel to be scaled with the weight calculated for it.

### 2.3. Efficient Channel Attention Networks (ECA-Net)

Efficient Channel Attention (ECA) block is designed to focus on the most important channels in a given image, and is similar in structure to a Squeeze-and-Excitation block. It has two parts: a compression module which collects global spatial information, and an excitation module which examines interactions between channels. Unlike a Squeeze-and-Excitation block, an ECA block only looks at the direct relationship between each channel and its closest  $k$  neighbours [6], which helps to keep the model simple.

### 2.4. Convolutional Block Attention Module (CBAM)

Convolutional Block Attention Module (CBAM) was proposed by Woo et al. CBAM considers inter-channel relationships of the input features. It squeezes the spatial dimension and, then collects spatial information of a feature map using both average pooling and maximum pooling. The squeezed features are then passed to a multilayer perceptron (MLP[7]) which contains one hidden layer. Finally, the output feature vectors are combined using element-by-element summation.

### 2.5. Datasets

In this paper, five different datasets are utilized in the experiments which are KTH Animals [8], Leeds Butterflies [9], Oxford Flowers [10], Ponce Birds [11] and Ponce Butterflies [12]. KTH Animal contains 1740 images of 19 different animals. Leeds butterflies dataset includes 832 images of 10 different butterfly species. Oxford

Flowers consist of 1360 images belonging to 17 different flower types. Ponce Birds contains 600 images of 6 bird species and Ponce Butterflies includes 619 images of 7 different butterfly species. Some images from these datasets are given in Figure 2. All images in the datasets are resized to 224x224 which is the standard size for the ResNet model used as a baseline. Eighty percent of each dataset is split as training data and twenty percent is reserved as validation set.



Figure 2. Some samples from the datasets [8-12]

## 3. EXPERIMENTS, RESULTS AND DISCUSSION

In the experiments, different ResNet structures (ResNet18, ResNet34 and ResNet50) containing different numbers of ResNet blocks were utilized as the base models. Each channel attention module was embedded in these base network structures and the performance of each channel attention module was evaluated, separately. Each model was trained for 100 epochs for each dataset by using Adam Optimizer with a learning rate of 0.0001. Beta1 and beta2 parameters of Adam optimizer were set to 0.9 and 0.99. Twenty percent of the images in each dataset were reserved as test data and training was carried out with the remaining images. The performance of each model on the test data was evaluated and reported.

For the ResNet18 and ResNet34 base models, the SeNet structure performed the best accuracy values in three of the five datasets. For the ResNet50 base model, SeNet reached the highest performance value for all datasets. The results for the ResNet18 base model and channel attention modules are given in Table 1, the results for the ResNet34 base model and channel attention modules are shown in Table 2, and the results for the Resnet50 base model and channel attention modules are given in Table 3. The test loss and test accuracy values of the ResNet50 model and the Oxford Flowers dataset are given in Figure 3. Figure 3 shows that the Squeeze-and-Excitation module reaches the highest accuracy values and the lowest loss values during training.

In general, at least one of the channel attention modules increases the performance of the base models in the experiments. However, the highest and most consistent performance increase was achieved by the Squeeze-and-Excitation channel attention module.

**Table 1.** Performance values of different channel attention modules on ResNet18 baseline

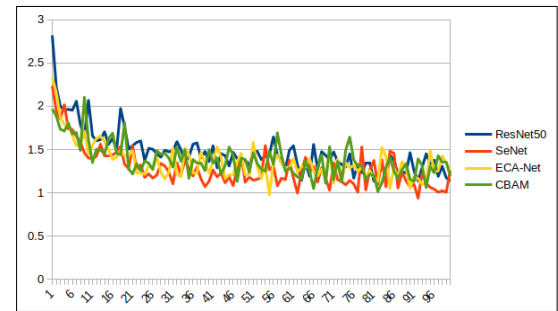
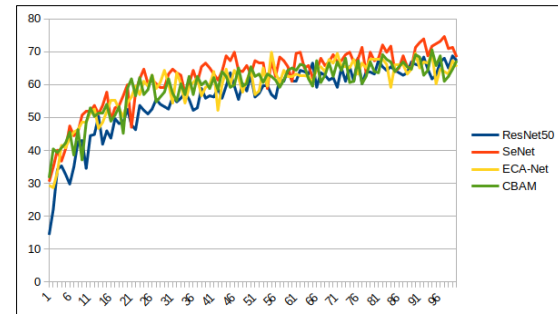
Dataset	Resnet	SeNet	EcaNet	CBAM
KTH Animals	73.851	<b>77.874</b>	75.575	69.253
Leeds butterflies	<b>90.419</b>	<b>90.419</b>	89.222	<b>90.419</b>
Oxford flowers	68.382	70.221	<b>70.588</b>	67.279
Ponce birds	83.333	<b>89.167</b>	<b>89.167</b>	87.5
Ponce butterflies	<b>95.161</b>	92.742	94.355	93.548

**Table 2.** Performance values of different channel attention modules on ResNet34 baseline

Dataset	Resnet	SeNet	EcaNet	CBAM
KTH Animals	72.126	<b>76.149</b>	<b>76.149</b>	74.425
Leeds butterflies	90.419	89.82	<b>91.018</b>	89.222
Oxford flowers	72.059	<b>74.632</b>	69.118	70.221
Ponce birds	<b>91.667</b>	90.833	90.833	<b>91.667</b>
Ponce butterflies	<b>95.968</b>	<b>95.968</b>	<b>95.968</b>	91.935

**Table 3.** Performance values of different channel attention modules on ResNet50 baseline

Dataset	Resnet	SeNet	EcaNet	CBAM
KTH Animals	72.701	<b>76.724</b>	76.437	74.138
Leeds butterflies	90.419	<b>92.216</b>	<b>92.216</b>	89.222
Oxford flowers	68.75	<b>74.632</b>	69.853	70.588
Ponce birds	87.5	<b>91.667</b>	90.833	<b>91.667</b>
Ponce butterflies	91.935	<b>93.548</b>	92.742	<b>93.548</b>



**Figure 3.** Accuracy values(top) and Cross-Entropy loss values(bottom) for different Channel attention modules on ResNet50 baseline for Oxford Flowers validation set

#### 4. CONCLUSION

Channel attention is one of the strategies developed recently to improve the performance of convolutional neural networks. This strategy

focuses on the inter-channel relationship within the feature maps that emerge from the convolutional layer. It calculates scale values for each channel and weights the channels according to their importance.

In this paper, classification accuracy values on five different datasets are reported and compared by adding different channel attention modules which are SeNet, ECA-Net and CBAM, on ResNet baseline models. It has been observed that all channel attention modules provide performance increases at different rates. As a result of the experiments, the most consistent performance increase was achieved by the SeNet module. It gave the best accuracy values in 73.3 percent of the experiments.

## 5. ACKNOWLEDGEMENT

This work has been supported by project number 120E447 from the TUBITAK (Scientific and Technological Research Council of Türkiye). The authors contributed equally to this work.

## 6. REFERENCES

1. Hu, J., Shen, L., Sun, G., 2018. Squeeze-and-Excitation Networks. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 7132-7141.
2. Wang, Q., Wu, B, Zhu, P., Li, P., Zuo, W., Hu Q., 2020. Supplementary Material for ‘ECA-Net: Efficient Channel Attention for Deep Convolutional Neural Networks. In Proceedings of the 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, Seattle, WA, USA, 13-19.
3. Woo, S., Park, J., Lee, J.Y., Kweon, I.S., 2018. Cbam: Convolutional Block Attention Module. In Proceedings of the European Conference on Computer Vision, 3-19.
4. He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J., 2016. Deep Residual Learning for Image Recognition. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 770-778.
5. Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G. E., 2017. Imagenet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. Communications of the ACM, 60(6), 84-90.
6. Peterson, L.E., 2009. K-Nearest Neighbor. Scholarpedia, 4(2), 1883.
7. Gardner, M. W., Dorling, S. R., 1998. Artificial Neural Networks (The Multilayer Perceptron)-A Review of Applications in the Atmospheric Sciences. Atmospheric Environment, 32(14-15), 2627-2636.
8. Afkham, H.M., Targhi, A.T., Eklundh, J.O., Pronobis, A., 2008. Joint Visual Vocabulary for Animal Classification. In 2008 19<sup>th</sup> International Conference on Pattern Recognition, 1-4.
9. Wang, J., Markert, K., Everingham M., 2009. Learning Models for Object Recognition from Natural Language Descriptions. In BMVC, 1, 2.
10. Nilsback M.E., Zisserman, A., 2006. A Visual Vocabulary for Flower Classification. In 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2, 1447-1454.
11. Lazebnik, S., Schmid, C., Ponce, J., 2005. A Maximum Entropy Framework for Part-based Texture and Object Recognition. In Tenth IEEE International Conference on Computer Vision. 1, 832-838.
12. Lazebnik, S., Schmid, C. Ponce, J., 2004. Semi-local Affine Parts for Object Recognition. In British Machine Vision Conference, 779-788.



## İstatistiksel Yöntemlerin Dekapaj Miktarının Belirlenmesinde Kullanılabilirliği ve Bir Açık Ocak Krom Sahasına Uygulanması

Ali Can ÖZDEMİR\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0003-3064-4264

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

Geliş tarihi: 02.01.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: ÖZDEMİR; A.C., (2023). İstatistiksel Yöntemlerin Dekapaj Miktarının Belirlenmesinde Kullanılabilirliği ve Bir Açık Ocak Krom Sahasına Uygulanması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 41-47.

### Öz

Açık işletme madenciliğinin hazırlık çalışmalarında maliyetlerin büyük bir miktarını dekapaj işlemleri oluşturmaktadır. Bu nedenle, maden planları hazırlanırken en önemli aşamalardan birisi dekapaj miktarının belirlenmesidir. Ayrıca, sürdürülebilir bir madencilik için dekapaj miktarındaki belirsizlik probleminin çözülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, regresyon yöntemi kullanılarak çalışma süresi ile dekapaj miktarının modellenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında örnek bir açık ocak madenine ait 2014-2021 dönemi arasındaki aylık çalışma süresi ve dekapaj miktarı bilgileri toplanarak veri seti elde edilmiştir. Bu veri setine dayanarak üstel, doğrusal, logaritmik ve polinom olmak üzere dört farklı regresyon modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerin başarısı korelasyon katsayısına göre değerlendirilmiştir. Sonuç olarak en başarılı regresyon modelinin polinom model ( $R^2= 0,8497$ ) olduğu belirlenmiştir. Bu modeli sırasıyla üstel ( $R^2= 0,8487$ ), doğrusal ( $R^2= 0,8485$ ) ve logaritmik ( $R^2= 0,8378$ ) modeller takip etmektedir. Çalışmanın bulguları açık ocak madenciliğinde dekapaj miktarının belirlenmesinde önerilen modellerin alternatif olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Dekapaj miktarı, Çalışma süresi, Regresyon analizi, Açık ocak madeni

### Modelling of Stripping Amount by Working Time in Open-Pit Mines

#### Abstract

In open pit mining, a large part of the costs is due to stripping operations. Therefore, one of the most important steps while preparing mine plans is to determine the amount of stripping. In addition, the problem of uncertainty in a sustainable mining stripping amount needs to be resolved. This study, it is aimed to model the working time and the amount of stripping using the regression method. Within the scope of the study, the data set was obtained by collecting the monthly working times and the amount of stripping between the 2014-2021 period of a sample open pit mine. Based on this data set, four different regression models were developed as exponential, linear, logarithmic, and polynomial. The success of the developed models was evaluated according to the correlation coefficient. As a result, it was determined that the most successful regression model was the polynomial model ( $R^2= 0,8497$ ). This model is followed by exponential ( $R^2= 0,8487$ ), linear ( $R^2= 0,8485$ ) and logarithmic ( $R^2= 0,8378$ ) models,

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ali Can ÖZDEMİR, [acozdemir@cu.edu.tr](mailto:acozdemir@cu.edu.tr)

respectively. The study's findings show that the proposed models can be used as an alternative to determining the amount of stripping in open-pit mining.

**Keywords:** Stripping amount, Regression analysis, Working time, Open-pit mine

## 1. GİRİŞ

Günümüz ekonomik şartları, birçok sektörde olduğu gibi madencilik sektöründe de maliyetlerin artmasına neden olmuştur. Bu durum özellikle ilk yatırım maliyetinin yüksek olduğu bilinen madencilik sektörü için oldukça kritiktir. Bu nedenle, madencilik faaliyetlerine başlamadan önce detaylı fizibilite çalışmalarının hassas bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu aşamadaki olası bir hata ileriki yıllarda büyük sorunlara yol açabilir.

Madencilik faaliyetlerinin yürütülmesinde temel olarak açık ocak ve yeraltı işletme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu üretim yöntemleri madenciliği karşılaştırdığında, açık ocak madenciliğinin daha yüksek verimlilik ve emniyetli iş koşulları gibi avantajları sayesinde yüksek ilk yatırım maliyeti dezavantajı göz ardı edilmektedir. Açık ocak işletmelerinde dekapaj kazısı yapılarak yer kabuğunda bulunan cevherin üretilmesi sağlanmaktadır. Dekapaj faaliyeti; örtü tabakasının kazılması, yüklenmesi ve döküm sahasına nakliyesi sırasındaki tüm faaliyetleri ifade etmektedir [1,2].

Açık ocak madenciliğinde, dekapaj, akaryakıt, işçilik, bakım-onarım, eğitim vb. birçok maliyet kalemleri bulunmaktadır [3-5]. Ancak bunlar arasında dekapaj maliyeti ön plana çıkmaktadır. Buyruk [6], dekapaj işlemlerinde oluşan maliyetleri kullanılan makine ve ekipmanların (kamyon, ekskavatör vb.) amortisman, enerji, akaryakıt, yağ ve bunları kullanan personelin işçilik giderleri, patlayıcı malzeme giderleri vb. şekilde sıralamıştır.

Dekapaj maliyetinin dekapaj miktarına bağlı olduğu düşünüldüğünde doğru bir maliyet analizi için dekapaj miktarının güvenilir bir şekilde hesaplanması gerektiği anlaşılmaktadır. Ancak, literatürde bu konu üzerine gerçekleştirilen çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Cengiz ve arkadaşları

[7] çalışmalarında, coğrafi bilgi sistemi kullanılarak Sivas-Kangal-Kalburçayırı linyit yatağı'nın dekapaj miktarını tespit etmişlerdir. Dekapaj miktarının belirlenmesinde regresyon analizinin kullanılması ile ilgili bir çalışma olmaması literatürde boşluk oluşturmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, açık ocak maden işletmelerinde regresyon analizi kullanılarak çalışma süresinden faydalanılarak dekapaj miktarının modellenmesidir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Çalışma Sahası ve Veri Seti

Bu çalışmada, uygulama sahası olarak Bursa İli, Harmancık İlçesi'nde yer alan bir açık ocak krom madeni seçilmiştir. Bu sahada kazı ve nakliye işlemleri açık ocak madenlerinde yaygın olarak kullanılan ekskavatör + kamyon sistemi ile gerçekleştirilmektedir. Üretim faaliyetleri sırasında öncelikle delme-patlama yapılmaktadır. Bu sayede kazılacak malzeme gevşetilerek ekskavatörlerin daha kolay kazı yapması sağlanmaktadır. Sonrasında kazılan malzeme yine ekskavatörler kullanılarak nakliye kamyonlarına yüklenmektedir. Bu aşamada, nakliye kamyonlarına yüklenen malzeme pasa ise döküm, cevher ise stok sahasına yönlendirilmektedir. İşletmenin sahip olduğu makine ve ekipman parkı düşünüldüğünde aylık kazı kapasitesi ortalama 120.000–150.000 m<sup>3</sup> arasında değişmektedir.

Çalışma dönemi 2014-2021 yıllarını kapsamaktadır. Bu dönem içerisinde gerçekleştirilen aylık dekapaj miktarı (m<sup>3</sup>) ve çalışma süresi (saat/ay) kayıt altına alınarak veri seti oluşturulmuştur. Tüm modelleme işlemlerinde aynı veri seti kullanılmıştır.

### 2.1. Regresyon Analizi

Regresyon analizi, bağımlı değişkenin bağımsız değişkenler yardımıyla tahmin edilmesini sağlayan

bir tahmin yöntemi olarak bilinmektedir. Bu değişkenlerin sayılabilir veya ölçülebilir nitelikte olması gerekmektedir. Regresyon analizi sayesinde iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkinin fonksiyonel şeklini tespit edilebilir. Ayrıca, değişkenlerden herhangi birinin değeri bilindiği zaman diğer değişkenin değeri tahmin edilebilir [10-14].

Doğrusal regresyon analizi, basit ve çoklu olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Bir bağımlı değişken ve bir bağımsız değişken arasındaki ilişki basit regresyon, bir bağımlı değişken ve birden çok bağımsız değişken arasındaki ilişki ise çoklu regresyon analizi ile açıklanabilmektedir [15]. Basit doğrusal regresyonda bağımlı değişken Y ve bağımsız değişken X ile ifade edilir ise regresyon denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir (Eşitlik 1);

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (1)$$

Bu eşitlikteki  $\beta_0$  doğrunun y-eksenini kestiği yeri,  $\beta_1$  doğrunun eğimini ve  $\varepsilon$  rastgele hata değerini ifade etmektedir.

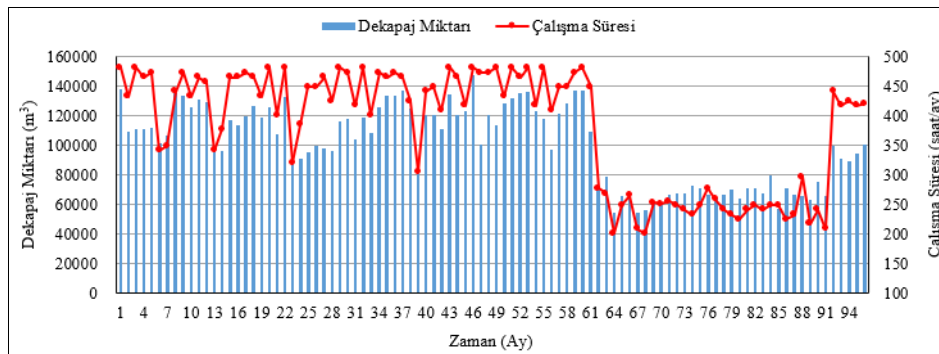
Bu çalışmada, regresyon analizinin gerçekleştirilmesinde Excel programı kullanılmıştır. Geliştirilen modellerin başarısı korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) ile değerlendirilmektedir. Bu katsayı, gerçek değer ile tahmin edilen değer arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir.  $R^2$  değeri, 0 ile 1 arasında değer almaktadır ve bu değer 1'e yaklaşırsa tahminin doğruluğu artar, 0'a yaklaşırsa tahminin doğruluğu azalır [14,15].

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışma kapsamında, veri setinin tanımlayıcı istatistiksel analizi yapılmış olup elde edilen sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 1'de, değişken değerlerin ortalama etrafındaki yayılmasını temsil eden standart sapma değerinin her iki değişken için ortalamadan küçük olduğu görülmektedir [8]. Ayrıca, bir veri setinin normal dağılım gösterebilmesi için basıklık değerinin [-1,+1] ve çarpıklık değerinin [-2,+2] aralığında olması beklenmektedir [9]. Hem çalışma süresi hem de dekapaj miktarı değişkenlerine ait basıklık ve çarpıklık değerlerinin normal dağılıma uygun aralıkta olduğu anlaşılmaktadır.

**Çizelge 1.** Tanımlayıcı özet istatistik analizi sonuçları

Parametre	Çalışma Süresi (saat/ay)	Dekapaj Miktarı (m <sup>3</sup> )
Ortalama	378,94	100.391,90
Ortanca	424,00	105.209,0
Standart Sapma	99,90	26.540,05
Basıklık	-1,40	-1,32
Çarpıklık	-0,57	-0,22
En Büyük	480,00	147.152,00
En Küçük	200,00	54.268,00
Veri Sayısı	96	96

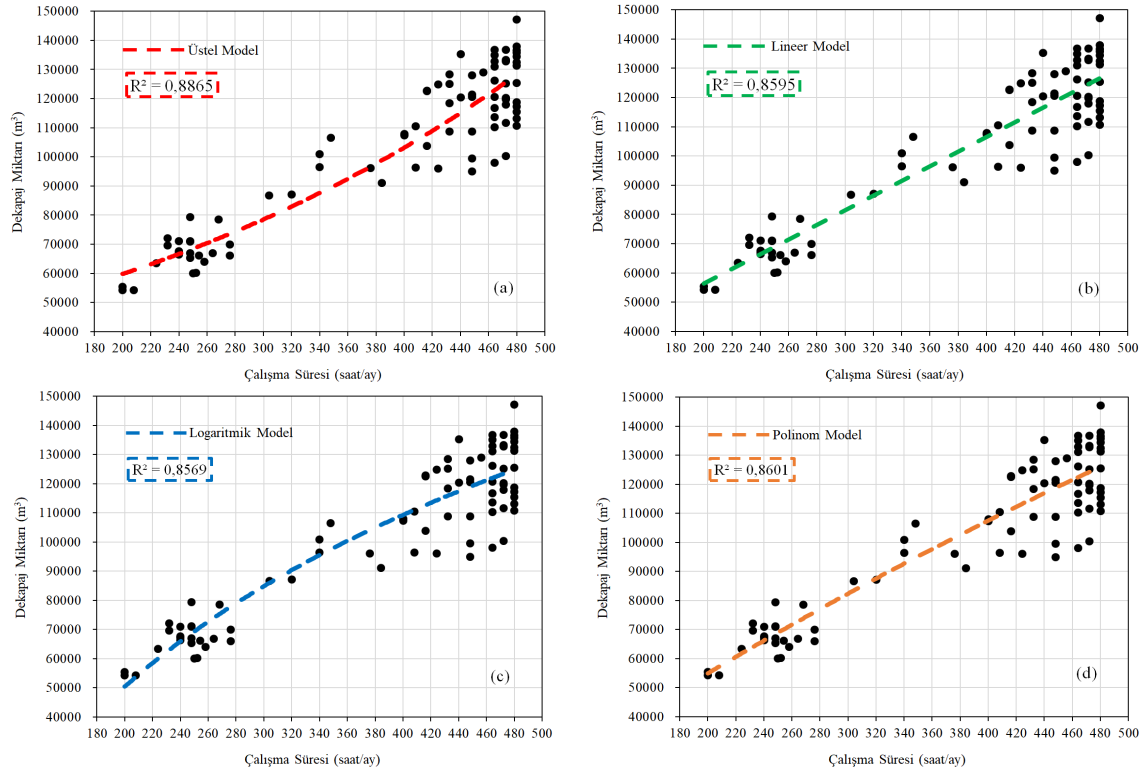


**Şekil 1.** Aylık dekapaj miktarının ve çalışma sürelerinin değişimi

2014-2021 yılları arasındaki aylık dekapaj miktarının ve çalışma süresinin değişimi Şekil 1’de verilmiştir. Burada, 2019 yılının sonları ve 2020 yılını kapsayan 64-88 no’lu aylarda bir azalma olduğu gözlenmektedir. Bu durumun Covid-19 pandemisinden kaynaklı kısıtlamaların bir sonucu olarak yorumlanmaktadır. Dekapaj miktarı ve çalışma süresi değişkenlerinin beklendiği gibi birbirine benzer bir eğilim gösterdiği anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada, regresyon analizi yöntemi kullanılarak çalışma süresi ile dekapaj miktarının tahmin edilmesi gerçekleştirilmiştir. Regresyon modellerinin geliştirilmesinde dekapaj miktarı

bağımlı değişken (Y) ve çalışma süresi ise bağımsız değişken (X) olarak belirlenmiştir. Örnek bir açık ocak maden sahasının 2014-2021 yılları arasındaki aylık çalışma süresi ve dekapaj miktarı değerlerinden oluşan veri seti kullanılmıştır. Bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki ilişkinin belirlenmesinde 2014-2020 periyodun ait veriler, geliştirilen modellerin tahmin başarısını test etmek için 2021 yılına ait veriler kullanılmıştır. Regresyon analizleri üstel, doğrusal, logaritmik ve polinom olmak üzere dört farklı model için uygulanmıştır. Şekil 2’de her farklı model için regresyon analizi sonucu elde edilen dağılım grafikleri görülmektedir.



**Şekil 2.** Her regresyon modeli için elde edilen dağılım grafikleri; a) üstel, b) doğrusal, c) logaritmik, d) polinom

Dağılım grafikleri incelendiğinde tüm modellerin  $R^2$  değerlerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum çalışma süresi ile dekapaj miktarı arasındaki ilişkinin belirlenmesinde tüm modellerin başarılı olduğuna işaret etmektedir. Ancak, en iyi ilişki sonucu veren modelin  $R^2 = 0,8865$  değeri ile en yüksek değere sahip olan üstel model olduğu belirlenmiştir. Bu modeli

sırasıyla polinom, doğrusal ve logaritmik modeller takip etmektedir.

Regresyon modellerinin dağılım grafiklerinin yanı sıra her model için denklemler elde edilmiştir. Bu denklemler ve  $R^2$  değerleri Çizelge 2’de topluca verilmiştir.

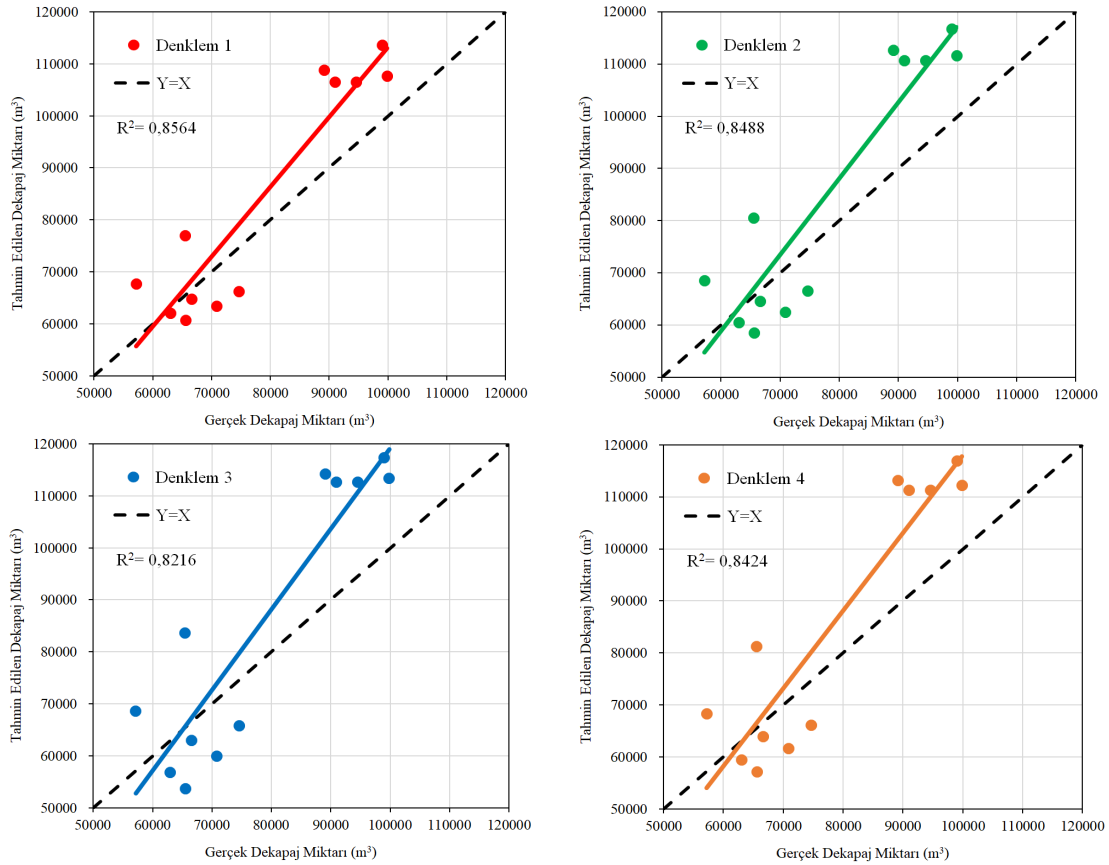


**Çizelge 2.** Regresyon analizi sonucu her model için elde edilen denklemler

Model	Denklem no	Denklem	R <sup>2</sup>
Üstel	1	$Y=34646 * e^{0,0027X}$	0,8865
Doğrusal	2	$Y=250,62 * X + 6317$	0,8595
Logaritmik	3	$Y=85002 * \ln(X) - 399980$	0,8569
Polinom	4	$Y=-0,1134 * X^2 + 330,95 * X - 6723,3$	0,8601

Regresyon analizi sonucu elde edilen model denklemleri kullanılarak dekapaj miktarı tahmin edilmiştir. Gerçek ve tahmin edilmiş dekapaj miktarları arasındaki ilişkiyi gösteren korelasyon grafiği Şekil 3'te görülmektedir. Burada, geliştirilen tüm modellerin dekapaj miktarı tahmini için oldukça başarılı sonuçlar ürettiği

anlaşılmaktadır. Ancak, en başarılı tahmin modeli en yüksek korelasyon katsayısına sahip olan ( $R^2=0,8564$ ) üstel model olarak belirlenmiştir. Benzer alanda çalışma yürütecek olan araştırmacıların öncelikli olarak üstel modeli tercih etmeleri tavsiye edilmektedir.

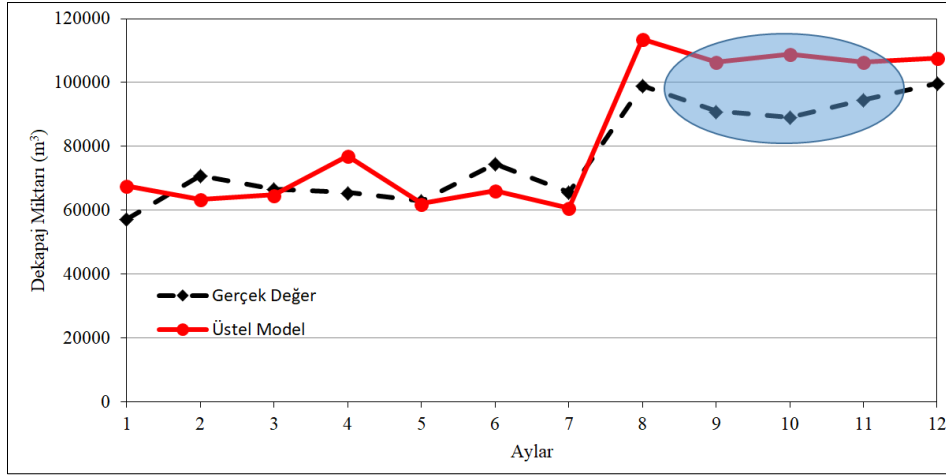
**Şekil 3.** Gerçek ve tahmin edilen dekapaj miktarları arasındaki korelasyon grafiği

Üstel model ile elde edilen ve gerçek dekapaj miktarlarının aylara göre değişimi Şekil 4'te yansıtılmaktadır. Bu değerlerin genel olarak benzer

bir değişkenlik eğilimi göstermesine rağmen son aylara gelindiğinde bir miktar sapmaların olduğu gözlenmektedir. Kış aylarında yoğun kar yağışı

nedeniyle dekapaj faaliyetlerinin verimli bir şekilde yürütülemediği ve gerçekleşen dekapaj miktarlarında önceki aylara göre dalgalanmalar

olduğu bilinmektedir. Tahmindeki sapmalara bu olumsuz iklim koşullarının yol açtığı düşünülmektedir.



Şekil 4. Gerçek ve üstel model ile tahmin edilen dekapaj miktarının değişimi

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, regresyon analizi yöntemi kullanılarak bir açık ocak krom sahasının çalışma süresi ile dekapaj miktarının modellenmesi gerçekleştirilmiştir. 2014-2021 yılları arasındaki aylık çalışma süresi ve dekapaj miktarı değerleri kayıt altına alınarak çalışma için veri seti oluşturulmuştur. Regresyon analizinde üstel, doğrusal, logaritmik ve polinom olmak üzere dört farklı model uygulanmıştır. Öncelikle, bu modeller kullanılarak çalışma süresi ve dekapaj miktarı arasındaki ilişki belirlenmiştir. Sonra, regresyon analizi elde edilen model denklemleri kullanılarak dekapaj miktarı tahmin edilmiştir. Çalışma süresi ve dekapaj miktarı arasındaki ilişkinin ve tahmin performansının değerlendirilmesi için korelasyon katsayısı hesaplanmıştır. Çalışmanın bulgularına dayanarak, çalışma süresi ile dekapaj miktarı arasındaki ilişkiyi en iyi temsil eden regresyon modelinin en yüksek  $R^2=0,8865$  değerine sahip olan üstel model olduğu belirlenmiştir. Bu modeli  $R^2=0,8601$  değeri ile polinom model takip etmektedir ve sonrasında sırasıyla doğrusal ve logaritmik model yer almaktadır. Dekapaj miktarının tahmin edilmesinde ise en güvenilir sonuçlar  $R^2=0,8564$  değeri ile üstel modelden elde

edilmiştir. Diğer modellerin tahmin performansı başarısı sırasıyla şu şekilde gerçekleşmiştir; doğrusal, polinom ve logaritmik model. Regresyon analizi ile geliştirilen modeller planlama mühendisleri için dekapaj miktarının hesaplanması için bir alternatif olacaktır.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Saban, M., 2016. Yer Üstü Maden İşletmelerinde Dekapaj Maliyetlerinin Muhasebeleştirilmesi ve Raporlanması. Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi, 30 (12), 39-61.
2. Çelikkaya, A., 2003. Dekapajın Yıllara Yaygın İnşaat ve Onarım İşleri Kapsamındaki Durumu. Süleyman Demirel Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 8(3), 27-48.
3. Albayrak, I.H., 1977. İşçilik Maliyetleri ve İmalat Sanayiinde İşçilik Maliyetlerinin Bünyesi, Muhasebe Enstitüsü Dergisi, 3(9), 32-38.
4. Bilginoğlu, F., 1977. İşletmelerde Maliyet Bilgilerinin Oluşumu. Muhasebe Enstitüsü Dergisi, 3(8), 73-81.
5. Akçakoca, H., Aykul, H., Yuvka, Ş., Çokçeken, İ.M., Ediz, İ.G., 2005. Garp

- Linyitleri İşletmesi ve Seyitömer Linyitleri İşletmelerinde Birim Üretim Maliyetleri ve Etki Eden Parametreler. Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, İzmir, 143-150.
6. Buyruk, A.N., 2013. Muhasebe Standartlarına Göre Maden Kaynaklarının Araştırılması, Değerlendirilmesi, Dekapaj İşlemleri ve Muhasebeleştirilmesi. JASSS The Journal of Academic Social Science Studies, 77-90.
  7. Cengiz, T., Nurlu, Y., Kumtepe, P., Sütçü, E., 2009. Rezerv ve Dekapaj Miktarının Coğrafi Bilgi Sistemi Kullanılarak Tespiti ve Diğer Yöntemler ile Karşılaştırılması: Sivas-Kangal-Kalburçayırı Linyit Yatağı Örneği. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, İzmir, 1-8.
  8. Ozdemir, A.C., Buluş, K., Zor, K., 2022. Medium- to Long-term Nickel Price Forecasting Using LSTM and GRU Networks. Resources Policy, 78, 102906.
  9. Desgagné, A., de Micheaux, P.L., 2018. A Powerful and Interpretable Alternative to the Jarque–Bera test of Normality Based on 2<sup>nd</sup>-Power Skewness and Kurtosis, Using the Rao's Score Test on the APD Family. Journal of Applied Statistics, 45, 2307-2327.
  10. Dawson, B., Trapp, R.G., 2001. Statistical Methods for Multiple Variables. Basic & Clinical Biostatistics. Lange Medical Books/McGraw Hill Medical Publishing Division, USA, 236-242.
  11. Kirkwood, B.R., Sterne J.A.C., 2003. Essential Medical Statistics, Wiley Blackwell Science, Australia, 315-342.
  12. Alpar, R., 2010. Spor, Sağlık ve eğitim Bilimlerinden Örneklerle Uygulamalı İstatistik ve Geçerlik Güvenirlilik. Detay Yayıncılık, Ankara, 672.
  13. Kılıç, S., 2013. Doğrusal Regresyon Analizi. Journal of Mood Disorders, 3(2), 90-92.
  14. Öztürk, E.E., Basit Doğrusal Regresyon Nedir?, <https://www.veribilimiokulu.com/basit-dogrusal-regresyon/#:~:text=Basit%20do%C4%9Frusal%20regresyon%3B%20ba%C4%9F%C4%B1ms%C4%B1z%20de%C4%9Fi%C5%9Fken,ifade%20eden%20do%C4%9Frusal%20fonksiyonu%20bulmakt%C4%B1r.> Erişim Tarihi: 03.11.2022, 2020.
  15. Arı, A., Önder, H., 2013. Farklı Veri Yapılarında Kullanılabilecek Regresyon Yöntemler. Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi, 28(3), 168-174.



## Kanaldaki Jet Akış Sayısına Bağlı Olarak Farklı Model Yüzeylerinden Olan Isı Transferi ve Akış Yapısının Analizi

Koray KARABULUT<sup>\*1</sup> ORCID 0000-0001-5680-0988  
Yeliz ALNAK<sup>2</sup> ORCID 0000-0003-4383-3806

<sup>1</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Doğalgaz ve Tesisatı Teknolojisi Programı, Sivas

<sup>2</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Sivas

Geliş tarihi: 14.02.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: KARABULUT, K., ALNAK, Y., (2023). Kanaldaki Jet Akış Sayısına Bağlı Olarak Farklı Model Yüzeylerinden Olan Isı Transferi ve Akış Yapısının Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 49-60.

### Öz

Çalışmada,  $D_h$  jet giriş genişlikli kanallardaki düz ve üçgen basamak modellenmiş yüzeylerden olan ısı transferi üç adet hava jeti akışı kullanılarak araştırılmıştır. Araştırmalar, sayısal olarak sürekli ve üç boyutlu k-ε türbülans modeli kullanılarak Ansys-Fluent bilgisayar programıyla gerçekleştirilmiştir. Kanal yüzeyleri adyabatik olup yalnızca model yüzeylerinde sabit ısı akısı bulunmaktadır. Çalışmanın sonuçları literatürde bulunan çalışmanın sayısal ve deneysel çıktılarıyla karşılaştırılmış ve uyumlu oldukları belirlenmiştir. Sonuçlar, her bir model yüzeyi için ortalama Nu sayısı ve yüzey sıcaklığının değişimi olarak verilmiştir. Farklı Re sayıları ve  $H/D_h$  oranlarında model yüzeyleri için kanal boyunca jet akışının hız-akım ve sıcaklık konturu dağılımları değerlendirilmiştir.  $Re=10000$  için  $H/D_h=3$ 'de düz basamak desenli model yüzeyinin  $Nu_o$  sayısının, üçgen basamaklı yüzeyden %45,18 daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Üçlü hava jeti, Model yüzey, Soğutma

### Analysis of Heat Transfer and Flow Structure from Distinct Model Facets Depending on the Number of Jet Flows in Channel

#### Abstract

In study, heat transfer from flat and triangular step pattern facets in channels with  $D_h$  jet inlet width was investigated using three air jet streams. The studies were carried out with the Ansys-Fluent computer program using the numerical time-independent and three-dimensional k-ε turbulence model. The channel facets are adiabatic and only the model facets have a constant heat flux. The outcomes of the work were

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Koray KARABULUT, kkarabulut@cumhuriyet.edu.tr

matched with the scalar and empiric outcomes of the work in the litterateur, and it was achieved that they are comparable. The outcomes are performed as the mean Nu number and diversity of facet temperature for each model facet. Velocity-flow and temperature contour dispersions of the jet flow throughout the duct were commented for the model facets with distinct Re numbers and  $H/D_h$  ratios. It was interpreted that the  $Nu_o$  number of the flat step patterned model facet at  $H/D_h=3$  for  $Re=10000$  is 45.18% higher than the triangular step facet.

**Keywords:** Triple air jet, Model surface, Cooling

## 1. GİRİŞ

Hızlı teknolojik gelişim, sanayileşme süreci ve nüfus artışına bağlı olarak enerji tüketimindeki artış, günümüzün önemli problemlerinden biri olan küresel ısınmaya bağlı iklim değişikliğinin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Bu sebeple, enerjiyle ilgili bilim dallarında çalışan mühendisler enerji tüketimi daha az olan ve verimliliği yüksek cihazların geliştirilmesi üzerine daha fazla araştırma ve geliştirme yapma gayreti içerisindeyler. Böylece, günümüz yüksek teknolojili ürünlerinde karşılaşılan en büyük problemlerden biri olan ısınma ve bunun sonucunda güvenilir sıcaklık sınırlarını aşma problemiyle karşılaşma olasılığı da azalacaktır. Çarpan jet tekniği ile ısı transferi, elektronik sistemlerde fazla ısı üreten cihaz ve ekipmanların soğutulmasında kullanılan yüksek ısı transferi karakteristiğine sahip gelişmiş bir soğutma teknolojisidir [1-2]. Soğutma işleminin çarpan jet tekniği kullanılarak gerçekleştirilmesiyle yüksek ısı üretim kapasiteli cihazlardan daha fazla ısının transferi olanaklı hale gelmektedir [3].

Literatürde çarpan jet ile ısı transferi hakkında çeşitli çalışmalar bulunmakla birlikte; yapılan çalışmaların birinde Arguis ve arkadaşları [4] laminer hava jeti akışına sahip bir kanalda ısıtılmış bloklardan olan ısı transferini incelemişler ve bunun için jet Re sayısı, kanal yüksekliği, jet giriş genişliği, soğutma plakaları arasındaki mesafe, plakaların yüksekliği ve ısı transfer katsayılarının etkisini değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, genel itibarıyla kanal yüksekliğinin azalması ve Re sayısının artmasıyla blokların etkili bir şekilde soğutulmasının mümkün olduğunu belirlemişlerdir. Karabulut ve Alnak [5] sabit ısı

akışına sahip bakır plaka yüzeylerinin hava jeti akışı ile soğumasını incelemişlerdir. Çalışmada, desenli model yüzeylerin soğutma performanslarının desen şekli ve jet ile plaka arasındaki uzaklığın Re sayısı ile kıyaslandığında daha önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bir diğer çalışmada, Karabulut ve Alnak [6] çatı ve ters yamuk şeklinde iki farklı modele sahip bakır plakalı yüzeylerden olan ısı transferini farklı jet giriş genişliklerinde bir tek hava jeti akışı kullanarak incelemişlerdir. Çalışma, Re sayısının 5000-11000 değerlerinde ve jet-plaka arası uzaklığın 3 ve 6 oranlarında yapılmıştır.  $0,5D_h$  jet giriş genişliğinde,  $H/D_h=6$  iken  $Re=5000$  için ortalama Nu sayısı değerinin çatı desenli yüzey için ters yamuk desenli yüzeyden %25,92 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Zou ve arkadaşları [7] deneylerinde ve sayısal simülasyonlarında hava soğutma sürecinde ara yüzey ısı transferini ve gaz akışını araştırmak için yüksek hızlı sıkıştırılmış hava çarpmasını kullanmışlardır. Numune çapının ve jet mesafesinin (jetten soğutma yüzeyine olan mesafe) akış modeli ve sıcaklık alanları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Barbosa ve arkadaşları [8] sınırlandırılmış ve çevrelendirilmiş çoklu hava jeti çarpmasının ayrıntılı bir analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla, çoklu hava jeti çarpma sistemlerindeki jetin akış dinamikleri ve ısı transfer karakteristiklerinin bir incelemesi sunmuşlardır. Ayrıca, bu çalışmada taşınım ısı transfer sürecini etkileyen yüzey tasarımı ve hareketi, jet eğimi ve yüksek jet sıcaklığı gibi parametreler incelenmiştir. Sonuç olarak, tekli ve çoklu jet çarpmasının ısı transferini karakterize etmek için ortalama Nu sayısı ile ilgili bağıntılar özetlenmiştir. Belarbi ve arkadaşları [9] ise bilgisayar işlemcisinin soğutma performansını artırmak için hava jeti çarpmalı bir kanalda bloğun

ısı ve aerodinamik özelliklerinin deneysel araştırmasını gerçekleştirmişlerdir. Hız profili ve sıcaklık üzerinde jet çarpma mesafesinin etkisini incelemişlerdir. Radmard ve arkadaşları [10] su jeti çarpmasına maruz kalan çipe bağlı bir mikro iğne kanatlı soğutma cihazından ısı transferini araştırmıştır. Bu amaçla, iğne kanat kesiti, kanatçık aralığı ve kanat yükseklik profili gibi tasarım parametrelerinin davranış parametreleri üzerindeki etkisi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ve tam faktöriyel deney tasarımı (FFD) kullanılarak incelenmiştir. Genel analiz, optimize edilmiş soğutma cihazının termal ve hidrolik performansta ilk çalışma tasarımını geçebileceğini göstermiştir. Rathore ve Verma [11] Re sayısındaki ve kaydırma oranındaki (OR) değişimin türbülanslı akış ve eğik kaydırılmış jetlerin termal özellikleri üzerindeki etkileri hakkında sayısal çalışma yapmışlardır. Jet eğiklik açısı ve Reynolds sayısının daha yüksek olması durumunda, ısıtılmış çarpma duvarından akışkana ısı transferinin daha yoğun olduğunu elde etmişlerdir. Karabulut [12] içerisinde sabit ısı akısı altında ısıtılmış beşer adet ters ve düz daire olmak üzere bulunan farklı desenli model yüzeylerinden olan ısı transferini tek bir hava jeti akışı kullanarak sayısal olarak araştırmıştır. Model yüzeylerinin soğuma performansları üzerinde model deseninin ve jet-plaka arası uzaklığın Re sayısı ile kıyaslandığında daha büyük bir öneme sahip olduğunu bulmuştur. Mushatat [13] çarpan jet akışlarının ısı transferi ve akış özelliklerini sayısal olarak araştırmıştır. Nu sayısı ve türbülans kinetik enerji değerlerinin, jetin Re sayısı ve jetler arası mesafeden önemli derecede etkilendiğini saptamıştır. Oluşturulan modellerin ısı kaynağı üzerine yerleştirilen dairesel, kare ve üçgen kanatların ısı transfer performansları  $500 \leq Re \leq 10.000$  aralığında Koca ve Güder [14] tarafından incelenmiştir. İncelenen modellerde ısı transferi açısından en iyi çalışma sonucunu  $Re = 5000$  ile  $Re = 6500$  arasında elde etmişlerdir. Bununla birlikte, en iyi ısı performansına dairesel kanatlı modelde ulaşılmıştır.

Bu çalışmada,  $a=D_h$  jet giriş genişlikli kanallar içerisindeki düz basamak ve üçgen basamak

modelli bakır plakalı yüzeylerin üç adet hava jeti akışı ile ısı transferinin sayısal incelemesi yapılmıştır. İncelenen jet Re sayısı aralığı 4000-10000 iken jet-plaka arası uzaklığı ise 3, 6 ve  $10D_h$ 'dir. Elde edilen sonuçlar, düz basamak ve üçgen basamak olarak her bir model yüzeyi için ortalama Nu sayısı ve yüzey sıcaklık değişimleri olarak incelenmiştir. Farklı  $H/D_h$  oranları ve modeller için kanal boyunca üçlü jet akışın sıcaklık ve hız-akım çizgisi konturu dağılımları model yüzeyleri için değerlendirilmiştir.

## 2. SAYISAL MODELLEME

Çalışmada, zorlanmış taşınım ısı transferinin sayısal olarak hesaplamalı çözümünde Ansys-Fluent programından yararlanılmıştır.

Gövde kuvvetinin bulunmadığı, zamandan bağımsız türbülanslı akış için zaman ortalamalı kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemlerinden türetilen kısmi türevli diferansiyel denklemlerin çözümüyle çalışmanın sonuçları elde edilmiştir [15].

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (2)$$

Enerji denklemi

$$\rho c_p \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{T' u'_i} \right] \quad (3)$$

Türbülans kinetik enerji denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k' u_i) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho k') = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k'}{\partial x_j} \right] + \quad (4)$$

$$G_k - \rho \varepsilon$$

Türbülans kinetik enerji yutulma terimi

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \quad (5)$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k'} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k'}$$

Bu denklemlerde,  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu,  $k'$  türbülanslı akışın kinetik enerjisini,  $u_i$ , x, y ve z eksenleri doğrultusundaki hız bileşenlerini,  $\mu$  akışkanın viskozitesini,  $\sigma_k$  türbülanslı kinetik enerji Prandtl sayısını ( $\sigma_k = 1$ ) göstermektedir. Türbülanslı kinetik enerji üretimi ( $G_k$ ) ve türbülanslı akışın viskozitesini ( $\mu_t$ ) veren eşitlikler aşağıda verilmiştir [16].

$$G_k = -\rho u_i' u_j' \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k'^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

$C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  ve  $C_\mu$  katsayıları,  $\sigma_\varepsilon$  ise türbülans yutulma Prandtl sayısını temsil etmektedir ve sırasıyla  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1,92$ ,  $C_\mu = 0,09$  ve  $\sigma_\varepsilon = 1,3$  olarak alınmıştır [15].

Reynolds sayısı ( $Re$ ) Eşitlik (8) ile hesaplanmaktadır

$$Re_k = \frac{V_\infty D_h}{\nu} \quad (8)$$

Burada  $D_h$ , jet girişinin hidrolik çapıdır.

$$D_h = \frac{4A_c}{P} = \frac{4(aW)}{2(a+W)} \quad (9)$$

Bu denklemden  $A_c$  ve  $P$  sırasıyla jet girişinin kesit alanı ve çevre uzunluklarıdır.

Ortalama ısı taşınım katsayısı

$$h_o = \frac{1}{L} \int_0^L h dx \quad (10)$$

Ortalama Nu sayısı

$$Nu_o = \frac{h_o D_h}{k} \quad (11)$$

Eşitlik (10) ve (11)' de  $h$  ve  $h_o$  sırasıyla yerel ve ortalama ısı taşınım katsayılarını belirtmektedir.

### 3. MODELLERİN TASARIMI

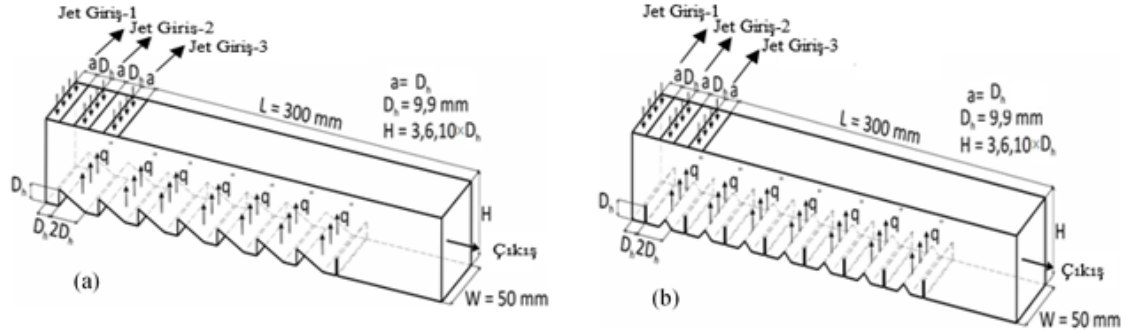
Şekil 1'de çalışmada kullanılan model yüzeylerinin olduğu kanalların perspektif görüntüleri verilmektedir. Şekil 1 (a) ve (b)' de gösterilen düz ve üçgen basamak modellerin şekilleri kanal sonuna kadar 50 mm' lik kanal genişliği boyunca devam etmektedir. Ayrıca, üçlü jet girişi Şekil 1' deki her iki kanal için de gösterilmiş olup; kanallarda yedişer adet desenli model yüzeyi bulunmaktadır. Uniform hız profilli dikdörtgen jet püskürtücüsünün boyutları 4,95×50mm ve 9,9×50 mm ölçülerindedir. Kanal ölçülerine bağlı olarak iki farklı kanal içerisinde yedi adet düz basamak ve

yedi adet üçgen basamak modelli ardışık yüzey bulunmaktadır. Bununla birlikte, modellerin genişlik ve yükseklikleri  $2D_h$  ve  $D_h$ ' dir.

Bu çalışma için uygulanan kabuller ise şunlardır:

- Üç boyutlu, sürekli ve türbülanslı akış mevcuttur.
- Sıkıştırılmaz hava, jet akışkanı olarak kullanılmıştır.
- Model yüzeylerine uygulanan ısı akısı sabit ve  $1000 \text{ W/m}^2$  değerindedir.
- Akışkanın ısıl özellikleri, 300 K sıcaklıkta sabit olarak alınmıştır.
- Akışkan ve model yüzeylerinde ısı üretimi bulunmamaktadır.





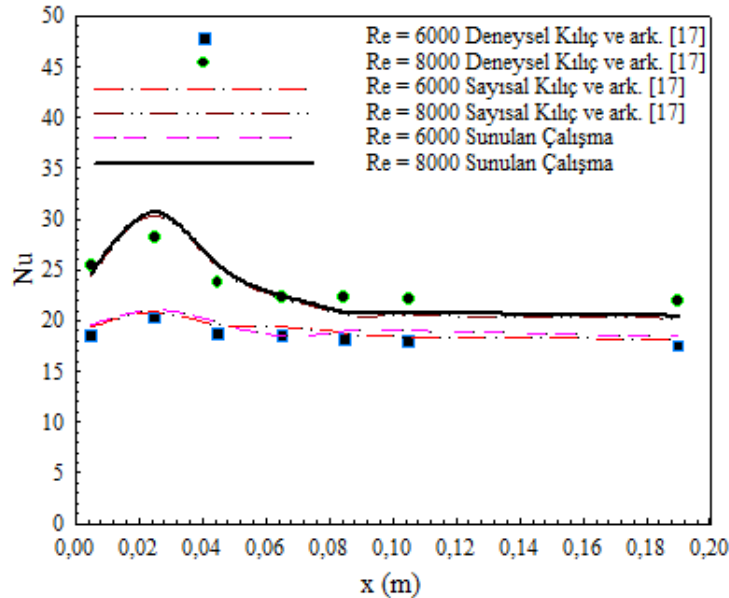
Şekil 1. Kanalların ve modellerin perspektif görüntüleri (a) düz basamak (b) üçgen basamak model yüzeyi

#### 4. SONUÇLAR VE BULGULAR

Kılıç ve arkadaşları [17]'nin gerçekleştirdikleri çalışmanın deneysel ve sayısal Nu sayısı sonuçları,  $H/D_h=6$  ve  $Re=6000$  ve  $8000$ ' de bu çalışmanın sayısal sonuçlarıyla kıyaslanmış ve ulaşılan sonuçlar Şekil 2'de verilmiştir. Buna göre, farklı Re sayılarında Kılıç ve arkadaşları [17]'nin deneysel sonuçlarıyla bu çalışmanın sayısal sonuçları arasındaki fark %3,99-%9,15 arasında değişirken; Kılıç ve arkadaşları [17]'nin sayısal sonuçları ile bu çalışma arasındaki sapma ise %1 dolaylarındadır. Buna göre, bu çalışmanın sayısal

sonuçlarının kabul edilebilir doğrulukta olduğu sonucuna varılabilmektedir.

$H/D_h=4$  için kanaldaki ağ sayısının model yüzeylerinin ortalama Nu sayıları ( $Nu_o$ ) üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla düz basamak ve üçgen basamak modellenmiş yüzeyleri dikkate alınarak gerçekleştirilen ağ bağımsızlık testlerinin sonuçları sırasıyla Çizelge 1 ve 2'de verilmektedir. Ulaşılan sonuçlar, düz ve üçgen basamak modellenmiş yüzeylerin bulunduğu kanallar için sırasıyla 1785450 ve 1364330 adet ağ elemanın yeterli olduğunu göstermiştir.



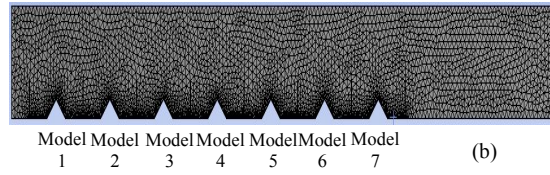
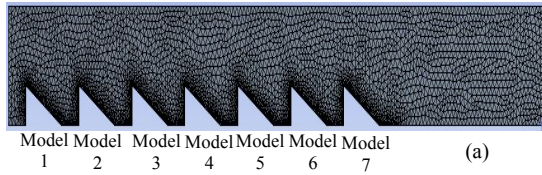
Şekil 2. Literatürle sonuçların kıyaslanması

**Çizelge 1.** Düz basamak modellenli kanal için  $Nu_o$  için ağ sayısından bağımsızlık testi

Ağ sayısı	$Nu_o$ Re=4000	$Nu_o$ Re=6000	$Nu_o$ Re=8000	$Nu_o$ Re=10000
478514	20,14	28,47	37,48	45,78
1683451	21,43	30,45	39,29	47,36
1785450	21,42	30,44	39,27	47,37

**Çizelge 2.** Üçgen basamak modellenli kanal için  $Nu_o$  için ağ sayısından bağımsızlık testi

Ağ sayısı	$Nu_o$ Re=4000	$Nu_o$ Re=6000	$Nu_o$ Re=8000	$Nu_o$ Re=10000
547821	13,47	19,84	25,47	30,58
1364330	15,11	21,17	26,91	32,64
1547812	15,11	21,17	26,89	32,63



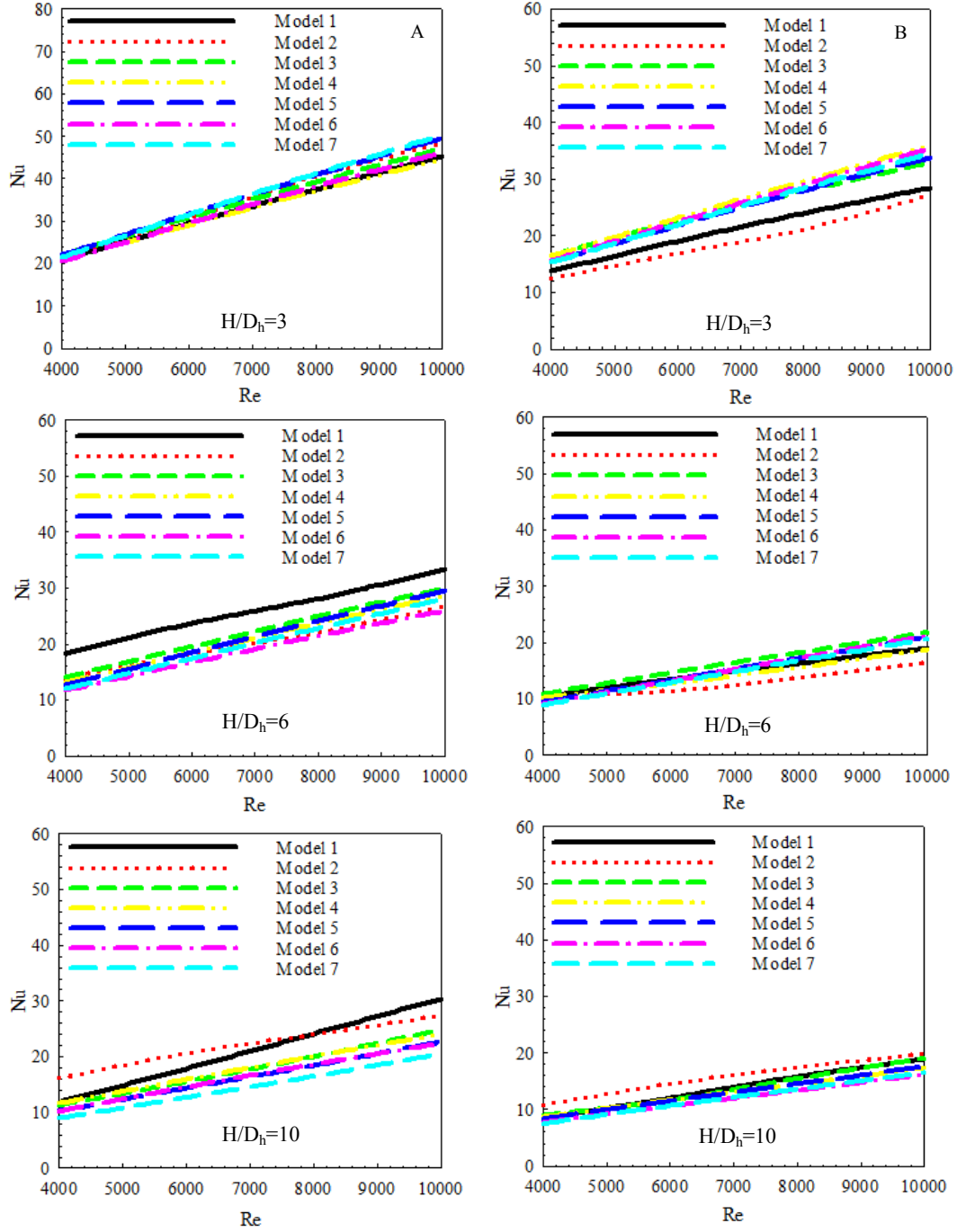
**Şekil 3.** Hesaplamada kullanılan (a) düz basamak (b) üçgen basamak modellenli kanalların ağ yapıları

Düz basamak ve üçgen basamak modellenli yüzeyler için kanallardaki ağ yapıları, görünürlük için yakınlştırılarak Şekil 3 (a) ve (b)'de sunulmuştur.

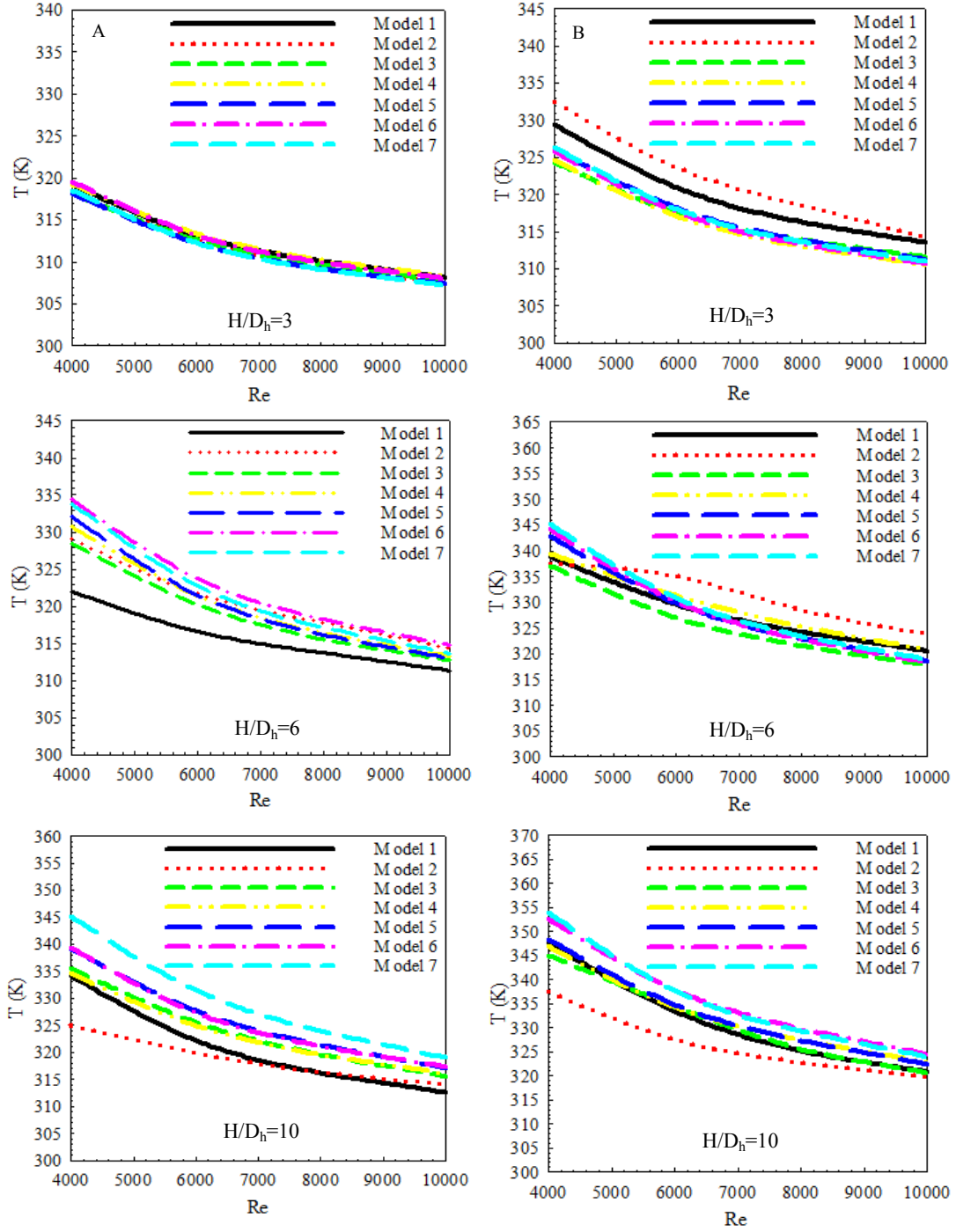
Şekil 4. A-Düz basamak ve B-Üçgen basamak desenli model yüzeyleri için  $a=D_h$  jet giriş genişliklerinde üçlü hava jeti akışının olduğu kanallardaki model sıralarına göre ortalama  $Nu$  sayısının  $Re$  sayısına göre farklı  $H/D_h$  (3, 6 ve 10) oranlarında verilmektedir. Kanallarda bulunan desenli model yüzeylerine,  $Re$  sayılarına ve  $H/D_h$  kanal yükseklik oranlarına bağlı olarak jet akışların desenli yüzeyler üzerindeki etkileşimleri değişmektedir. Buna bağlı olarak, modeller için farklı desen sıralarında ortalama  $Nu$  sayılarının değerleri değişkenlik göstermektedir.  $H/D_h=3$  için düz basamaklı Model 7 için en yüksek ortalama  $Nu$  sayısı değerlerine ulaşılırken; üçgen basamak için Model 4' de ulaşılan  $Nu$  sayısı değerleri diğer desen sıralarına göre daha fazladır.  $H/D_h$ ' in 6 ve 10 değerleri için de benzer durum görülmekle birlikte,  $Nu$  sayısı değerleri  $H/D_h=3$ ' e göre azalış sergilemektedir. Bu duruma, kanal yüksekliği arttıkça model yüzeyleri üzerinde görülen üçlü çarpan jet akış etkisinin azalmasının neden olduğu söylenebilir.  $H/D_h$  oranı 3' den 10' a çıkarıldığında  $Re=6000$ ' de birinci sıradaki Model 1 için düz basamaklı ve üçgen basamaklı model yüzeylerindeki ortalama  $Nu$  sayısı değerlerindeki azalma miktarları sırasıyla %64,74 ve %58,7 olmaktadır. Ayrıca, tüm  $H/D_h$  oranlarında düz

basamak model için elde edilen  $Nu$  sayısı değerleri; üçgen basamak model yüzeylerinden daha fazladır.  $H/D_h=6$  ve  $Re=8000$  değerinde düz basamak Model 6 için ulaşılan  $Nu$  sayısı değeri, üçgen basamaklı model yüzeyinden %24,03 daha yüksektir. Çarpan jet akışlarının düz basamak model yüzeyleriyle olan daha iyi etkileşimi sonucu artan ısı transferi etkisiyle üçgen basamaklı model yüzeylerine göre daha yüksek  $Nu$  sayıları elde edilebilmektedir.

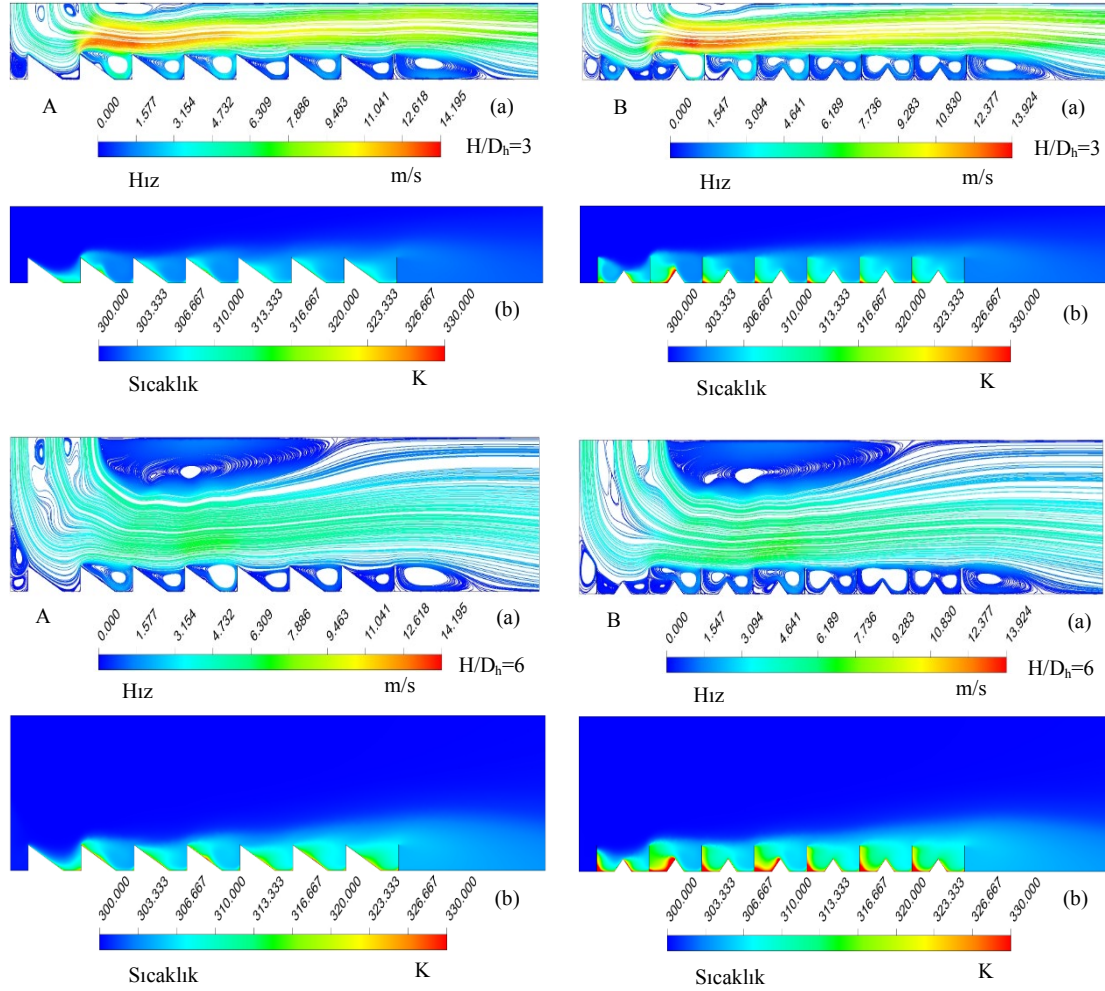
$a=D_h$  jet girişliğine sahip üçlü jet akışlı kanallarda bulunan A-Düz basamak ve B-Üçgen basamak desenli model yüzeylerinin kanal girişinden itibaren sıralanış düzenlerine göre ortalama yüzey sıcaklıklarının  $H/D_h$  oranlarına ve  $Re$  sayılarına göre değişimleri Şekil 5' de gösterilmektedir.  $Re$  sayısındaki artışla artan ısı transferiyle her iki model şekli ve tüm  $H/D_h$  oranları için yüzey sıcaklıkları azalmaktadır. Soğuma etkisinin daha yüksek olduğu model sırasında daha düşük yüzey sıcaklıkları elde edilmektedir. Bununla birlikte,  $H/D_h$  oranının artışıyla model yüzey sıcaklık değerleri artmakta olup; üçlü çarpan hava jeti akışı etkisinin daha az olduğu üçgen basamaklı modellerdeki sıcaklık değerleri; düz basamaklı modellere göre daha fazla olmaktadır. Buna göre, üçlü çarpan jet akışının model yüzeyleriyle olan temaslarının artırılması; jet akışkana olan ısı transferini artırarak soğuma performansını iyileştirmektedir.



**Şekil 4.**  $a=D_h$  giriş genişlikli üçlü jet akışlı kanallardaki A-düz basamak B-üçgen basamak modelli yüzeylerin kanaldaki sıralanış düzenlerine göre ortalama Nu sayısının Re sayısı ile değişimi



Şekil 5.  $a=D_h$  giriş genişlikli üçlü jet akışlı kanallardaki A-düz basamak B-üçgen basamak modelli yüzeylerin kanaldaki sıralanış düzenlerine göre ortalama yüzey sıcaklıklarının  $Re$  sayısı ile değişimi



**Şekil 6.**  $a=D_h$  giriş genişlikli ve üçlü jet akışlı A-düz basamak B-üçgen basamak model yüzeyli kanallardaki (a) hız-akım (b) sıcaklık konturu dağılımları

$a=D_h$  jet giriş genişliğine sahip üçlü jet akışı girişli ve  $H/D_h=3$  ve 6 olan kanallarda bulunan A-Düz basamak ve B-Üçgen basamak desenli model yüzeyleri için (a) Hız-akım, (b) Sıcaklık konturu dağılımları  $Re=6000$  değerinde Şekil 6'da sunulmaktadır.  $H/D_h=3$  kanal yüksekliği oranında kanala giriş yapan ilk jet akışları birinci desenli yüzeylere çarptıktan sonra model desene şekline bağlı olarak diğer jet akışıyla birleşerek üçlü olarak model yüzeyleri üzerinden kanalları terk etmektedir. Hız-akım konturu dağılımlarından da görülebildiği gibi özellikle üçgen basamak model yüzeyli kanalda düz basamak modele göre

model aralarında oluşan yeniden dolaşım bölgelerinin yoğunluğu daha fazladır. Yeniden dolaşım bölgeleri, akışkanın kendi içinde sirkülasyon halinde olduğu bölgeler olduğundan bu bölgelerin varlığı ısı transferinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, üçgen basamak modellenmiş kanalda model yüzeyi etrafındaki sıcaklık daha yüksek olmaktadır. Kanal yükseklik oranı ( $H/D_h$ ) 6 değerine çıkarıldığında ise oluşan yeniden dolaşım bölgeleri kendi aralarında birleşerek kanal içerisindeki büyüklükleri artmaktadır. Bu durum da jet akışının desenli model yüzeyleri üzerindeki etkisini azalttığından her iki

desenli model yüzeyi için de yüzeylerden olan ısı transferi azalarak model yüzey sıcaklıklarının artmasına neden olmaktadır.

Çizelge 3’de kanallarda bulunan yedişer adet desenli düz basamak ve üçgen basamak model yüzeylerinin hepsi için ortalama Nu sayısı ( $Nu_o$ ) ve üçlü hava jeti akışlarının kanallardan çıkış sıcaklıklarının ( $T_c$ ) farklı kanal yükseklikleri oranlarında Re sayısına bağlı değişimleri gösterilmektedir. Tablodan da görüldüğü gibi Re sayısının artışıyla  $Nu_o$  değerleri artarken;  $H/D_h$  oranındaki artışla azalmaktadır. Bununla birlikte, düz basamak desenli model yüzeylerinde üçlü jet akışı etkisinin kanal içerisindeki akışkan

hareketinde ve özellikle model yüzeyleri arasında ısı transferini daha iyi artırmasıyla üçgen basamaklı modele göre  $Nu_o$  değerleri daha fazla olmaktadır.  $Re=10000$  için  $H/D_h=3$ ’ de düz basamak desenli model yüzeyinin  $Nu_o$  sayısı, üçgen basamak desenli yüzeyden %45,18 daha yüksektir. Ayrıca, jet akışların kanaldan çıkış sıcaklığı değerleri ( $T_c$ ) artan  $Nu_o$  sayısı ile akışkanın ısı transferinin gerçekleşmesi için yeterli zaman bulamaması nedeniyle daha düşük değerlerdedir. Bu durumun sebebi, iletimle olan ısı transferinin daha fazla olmasıyla birlikte; taşınım ısı transferi direncinin düşük olması genel ısı transferini artırıcı etki sağlamaktadır.

**Çizelge 3.**  $a=D_h$  giriş genişlikli ve üçlü jet akışlı kanallardaki model yüzeylerinin tümü için ortalama Nu sayısı ( $Nu_o$ ) ve jet akışların kanaldan çıkış sıcaklıkları ( $T_c$ )

Düz Basamak Desen	$H/D_h=3$		$H/D_h=6$		$H/D_h=10$	
	$T_c$ (K)	$Nu_o$	$T_c$ (K)	$Nu_o$	$T_c$ (K)	$Nu_o$
<b>Re=4000</b>	311,97	21,43	311,9	13,69	311,47	11,53
<b>Re=6000</b>	311,32	30,45	311,26	18,99	310,96	15,98
<b>Re=8000</b>	310,98	39,29	310,95	23,91	310,71	20,29
<b>Re=10000</b>	310,79	47,39	310,75	28,94	310,57	24,64
Üçgen Basamak Desen	$H/D_h=3$		$H/D_h=6$		$H/D_h=10$	
	$T_c$ (K)	$Nu_o$	$T_c$ (K)	$Nu_o$	$T_c$ (K)	$Nu_o$
<b>Re=4000</b>	312,08	15,11	311,91	10,01	311,67	8,68
<b>Re=6000</b>	311,39	21,17	311,27	13,16	310,75	11,83
<b>Re=8000</b>	311,04	26,91	310,94	16,52	310,55	14,98
<b>Re=10000</b>	310,84	32,64	310,75	19,87	310,44	17,91

## 5. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada,  $D_h$  jet giriş genişliğindeki kanallarda bulunan sabit ısı akılı ve bakır plakalı düz basamak ve üçgen basamak modellenmiş yüzeylerin üç adet jet akışı kullanılarak soğutulması ve kanallardaki akış yapıları incelenmiştir. Çalışma sonucunda ulaşılan veriler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Kanallarda bulunan desenli model yüzeylerine, Re sayılarına ve  $H/D_h$  kanal yükseklik oranlarına bağlı olarak jet akışların desenli yüzeyler üzerindeki etkileşimleri değişmektedir.

- $H/D_h=3$  için düz basamaklı Model 7 için en yüksek ortalama Nu sayısı değerlerine ulaşılmışken; üçgen basamak için Model 4’ de ulaşılan Nu sayısı değerleri diğer desen sıralarına göre daha fazladır.
- $H/D_h$ ’ in 6 ve 10 değerleri için de benzer durum görülmekle birlikte, Nu sayısı değerleri  $H/D_h=3$ ’ e göre azalış sergilemektedir.
- $H/D_h$  oranı 3’ den 10’ a çıkarıldığında  $Re=6000$ ’ de birinci sıradaki Model 1 için düz basamaklı ve üçgen basamaklı model yüzeylerindeki ortalama Nu sayısı

değerlerindeki azalma miktarları sırasıyla %64,74 ve %58,7 olmaktadır.

- Tüm  $H/D_h$  oranlarında düz basamak model için elde edilen  $Nu$  sayısı değerleri; üçgen basamak model yüzeylerinden daha fazladır.
- $H/D_h=6$  ve  $Re=8000$  değerinde düz basamak Model 6 için ulaşılan  $Nu$  sayısı değeri, üçgen basamaklı model yüzeyinden %24,03 daha yüksektir.
- $Re$  sayısının artışıyla artan ısı transferiyle her iki desenli model şekli ve tüm  $H/D_h$  oranları için yüzey sıcaklıkları azalmaktadır.
- $H/D_h$  oranının artışıyla model yüzey sıcaklık değerleri artmakta olup; üçlü çarpan hava jeti akışı etkisinin daha az olduğu üçgen basamaklı modellerdeki sıcaklık değerleri; düz basamaklı modellere göre daha fazla olmaktadır.
- Kanallardaki tüm model yüzeyleri düşünüldüğünde,  $Re$  sayısının artışıyla  $Nu_o$  değerleri artarken;  $H/D_h$  oranındaki artışla azalmaktadır.
- Düz basamak desenli model yüzeylerinde üçlü jet akışı etkisinin kanal içerisindeki akışkan hareketinde ve özellikle model yüzeyleri arasında ısı transferini daha iyi artırmasıyla üçgen basamaklı modele göre  $Nu_o$  değerleri daha fazla olmaktadır.
- $Re=10000$  için  $H/D_h=3$ ' de düz basamak desenli model yüzeyinin  $Nu_o$  sayısı, üçgen basamak desenli yüzeyden %45,18 daha yüksektir.
- Sonuç olarak, üçlü çarpan jet akışının model yüzeyleriyle olan temaslarının artırılması; jet akışkana olan ısı transferini artırarak soğuma performansını iyileştirmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Narumanchi, S.V.J., Amon, C.H., Murthy, J.Y., 2003. Influence of Pulsating Submerged Liquid Jets on Chip-Level Thermal Phenomena, Journal of Electronic Packaging, 125 (3), 354-361.
2. Kercher, D.S., Lee, J.B., Brand, O., Allen, M.G., Glezer, A., 2003. Microjet Cooling Devices for Thermal Management of Electronic, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 26(2), 359-366.
3. Babic, D., Murray, D.B., Torrance, A.A., 2005. Mist Jet Cooling of Grinding Processes, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45, 1171-1177.
4. Arguis, E., Rady, M.A., Nada, S.A., 2007. A Numerical Investigation and Parametric Study of Cooling An Array of Multiple Protruding Heat Sources by A Laminar Slot Air Jet, International Journal of Heat and Mass Transfer, 28, 787-805.
5. Karabulut, K., Alnak, D.E., 2020. Değişik Şekilde Tasarlanan Isıtılmış Yüzeylerin Hava Jeti Çarpmalı Soğutulmasının Araştırılması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26 (1), 88-98.
6. Karabulut, K., Alnak, D.E., 2021. Dikdörtgen Bir Kanaldaki Farklı Desenli Yüzey Geometrilerinin Isı Transferine Olan Etkilerinin İncelenmesi, Tesisat Mühendisliği, 183, 37-49.
7. Zou, L., Ning, L., Wang, X., Li, Z., He, L., Li, H., 2022. Evaluation of Interfacial Heat Transfer Coefficient Based on the Experiment and Numerical Simulation in the Air-Cooling Process, Heat and Mass Transfer, 58, 337-354.
8. Barbosa, F.V., Teixeira, S.F.C.F., Teixeira, J.C.F., 2023. Convection from Multiple Air Jet Impingement- A Review, Applied Thermal Engineering, 218, 119307.
9. Belarbi, A.A., Beriache, M., Bettahar, A., 2018. Experimental Study of Aero-Thermal Heat Sink Performances Subjected to Impinging Air Flow, International Journal of Heat and Technology, 36(4), 1310-1317.
10. Radmard, V., Hadad, Y., Rangarajan, S., Hoang, C.H., Fallahtafi, N., Arvin, C.L., Sikka, K., Schiffres, S.N., Sammakia, B.G., 2021. Multi-Objective Optimization of A Chip-Attached Micro Pin Fin Liquid Cooling System, Applied Thermal Engineering, 195, 117187.



11. Rathore, S.S., Verma, S.K., 2022. Numerical Investigation on the Efficacy of Jet Obliquity for Fluid Flow and Thermal Characteristics of Turbulent Offset Jet, *Heat and Mass Transfer*, 58, 1223-1246.
12. Karabulut, K., 2019. Heat Transfer Improvement Study of Electronic Component Surfaces Using Air Jet Impingement, *Journal of Computational Electronics*, 18, 1259-1271.
13. Mushatat, K.S., 2007. Analysis of the Turbulent Flow and Heat Transfer of the Impingement Cooling in A Channel with Cross Flow, *Engineering Science*, 18(2), 101-122.
14. Koca F., Güder T.B. 2022 Numerical Investigation of CPU Cooling with Micro-Pin-Fin Heat Sink in Different Shapes, *European Physical Journal Plus*, 137(11), 1276.
15. Wang, S.J., Mujumdar, A.S., 2005. A Comparative Study of Five Low Reynolds Number  $k-\epsilon$  Models for Impingement Heat Transfer. *Applied Thermal Engineering*, 25, 31-44.
16. Saleha, N., Fadela, N., Abbas, A., 2015. Improving Cooling Effectiveness by Use Chamfers on the Top of Electronic Components, *Microelectronics Reliability*, 55, 1067-1076.
17. Kılıç, M., Çalışır, T., Başkaya, Ş., 2017. Experimental and Numerical Study of Heat transfer from A Heated Flat Plate in A Rectangular Channel with an Impinging Air Jet, *Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(1), 329-344.



## Esnek Üretim Sistemlerinin Dinamik Çizelgelenmesi için Çoklu Etmen Yaklaşımı ve Yönlendirme Kurallarının Karşılaştırılması

Cenk ŞAHİN\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-6076-7794  
Rızvan EROL<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-6914-5062

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

Geliş tarihi: 19.01.2023 Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: ŞAHİN, C., EROL, R., (2023). Esnek Üretim Sistemlerinin Dinamik Çizelgelenmesi için Çoklu Etmen Yaklaşımı ve Yönlendirme Kurallarının Karşılaştırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 61-71.

### Öz

Üretim ortamlarında, makineler ve otomatik yönlendirmeli araçlar gibi sistem öğelerinin kontrol edilmesi zor olabilmektedir. Etmen tabanlı sistemler, üretim ortamlarında iş kesintileri, makine arızaları gibi dinamik olaylar meydana geldiğinde operasyonları yönetmek için etkili yöntemler sunmaktadır. Bu çalışmada, Çoklu Etmen Sistemi (MAS) mimarisi aracılığıyla esnek bir üretim sistemindeki AGV'lerin ve makinelerin dinamik çizelgeleme problemlerine uygulanmış ve elde edilen sonuçları literatürde yaygın olarak kullanılan yönlendirme kurallarıyla karşılaştırılmıştır. Çoklu etmen tabanlı yaklaşımlar dağıtılmış, stokastik, sürekli ve yüksek hesaplama karmaşıklığına sahiptir. Etmenler arasında yapılan müzakereler ve teklif verme sonucunda uygun çizelgeler ortaya çıkar. Literatürden alınan bir vaka çalışması etmen mimarisine uygulanmış ve çevrimiçi çizelgeleme kuralları (yönlendirme/sevk kuralları) ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, MAS gerçek zamanlı olarak iyi çizelgeler üretebildiği ve makespan performans metriği açısından yaygın olarak kullanılan yönlendirme kuralları ile karşılaştırılabilir olduğu bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Etmen-tabanlı sistemler, Esnek üretim, Çizelgeleme, Simülasyon, Yönlendirme kuralları

### Comparison of Multi-Agent Approach and Dispatching Rules for Dynamic Scheduling of Flexible Manufacturing Systems

#### Abstract

In production environments, controlling system elements such as machines and automated guided vehicles can be challenging. Agent-based systems provide effective methods for managing operations when such dynamic events occur, such as job interruptions in production environments, machine breakdowns. Through a Multi-Agent System (MAS) architecture, this study attempts to solve the dynamic scheduling problem of AGVs and machines in a flexible manufacturing system, and compares it to dispatching rules commonly used in the literature. Multi-agent-based approaches are distributed,

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Cenk ŞAHİN, [cenksahin@cukurova.edu.tr](mailto:cenksahin@cukurova.edu.tr)

stochastic, continuous, and have high computational complexity. As a result of negotiations and bidding among agents, appropriate schedules emerge. A case study taken from the literature is applied to the architecture and compared to online scheduling rules (dispatching rules). Based on the results, it was found that the MAS is capable of generating good schedules in terms of makespan performance criteria in real time and is comparable to commonly used dispatching rules in terms of performance.

**Keywords:** Multi-agent system, Flexible manufacturing, Scheduling, Simulation, Dispatching rules

## 1. GİRİŞ

Teknolojideki hızlı ilerlemeler ve üretilen ürünlerde özelleştirilmiş özellikleri içerecek şekilde talep kalıplarındaki değişiklikler ve üretilen ürünlerin nispeten kısa yaşam döngüsü nedeniyle, imalat, giderek artan çeşitli talebi karşılamak için seri üretimden yarı özelleştirilmiş üretime bir ‘paradigma kayması’ geçirmektedir [1,2]. Bu nedenle hem akademi hem de endüstride, üretim sistemlerinin performansını ve değişen müşteri gereksinimlerine cevap verebilirliğini geliştirmek için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Esnek Üretim Sistemleri (FMS), yirminci yüzyılın sonlarında oldukça rekabetçi bir üretim stratejisi olarak ortaya çıktı ve orta parti büyüklüklerinde ve orta çeşitlilikte iş parçaları üretmenin verimli bir yolu olarak geleneksel üretim sistemleri arasında yerini almıştır [2-4]. Son birkaç on yılda, üretim sistemlerinin üretkenliğini, kalite seviyesini ve maliyet rekabetçiliğini iyileştirmek için üretim sistemlerinin işleyişine yeni yönetim yaklaşımları önerilmiş ve bu yeni paradigmanın ortaya koyduğu zorlukların üstesinden gelmek için, üretim sistemleri için bazı temel gereksinimler tanımlanmıştır. En önemli gereksinim, üretim ortamında meydana gelen değişikliklere (talepteki dalgalanmalar, makine arızaları vb.) tepki verebilmektir. Son yıllarda, diğer yeni kavramlarla birlikte, holonik üretim sistemleri (HMS’ler) olarak adlandırılan, geleceğin üretim sistemlerinin bir sınıfını oluşturmak için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Kısaca, HMS, üretim alanına yeni ortaya çıkan yazılım yaklaşımlarını (örneğin Çoklu-Ajanlı Sistemler, doğadan ilham alan yöntemler) kullanarak sosyal organizasyon ve doğal sistemler felsefelerinin uygulanmasını içermektedir [1,5,6].

Esnek üretim sistemleri, günümüzün rekabetçi pazarlarının taleplerini karşılamak için hem üretim

esnekliği hem de yüksek üretkenlik elde etmeye çalışmaktadır [7]. Literatürde bulunan üretim esnekliği tanımları, ya doğrudan firmanın bağlamına atıfta bulunur ya da diğer disiplinlerde doğan esnekliğin genel tanımlarından türer. Genel bir bakış açısından esneklik, bir sistem ile dış ortamı arasındaki arayüzün özelliği olarak anlaşılabilir [8]. FMS, üretim esnekliğini ve verimliliğini kazanmak için bilgisayar kontrolü altında otomatik bir malzeme taşıma sistemi ile entegre edilmiş çeşitli parça tiplerinin orta büyüklükteki hacimlerini işleyebilen bir grup sayısal olarak kontrol edilen (NC) makinelerle donatılmıştır [2,9-12].

Tanımların aralığına rağmen, FMS’nin aşağıdaki üç alt sistemi içerdiği genel olarak kabul edilmektedir.

- Bir işleme sistemi: değişen kapasiteye sahip bir grup NC veya bilgisayarla sayısal olarak kontrol edilen (CNC) makineler. Bu öğeler, FMS’nin aynı anda farklı ürün türlerini işlemesini sağlar (parça esnekliği).
- Bir malzeme taşıma ve depolama sistemi: ara depolar ve robotlar, AGV’ler ve konveyörler gibi malzeme taşıma ekipmanları. Bu elemanlar, parça hareketinde esneklik sağlar.
- Bir bilgisayar kontrol sistemi: bu, tüm sistemin çalışmasını kontrol eder.

MacCarthy ve Liu’nun çalışmasında [7], FMS, geniş bir üretim sistemleri koleksiyonu için genel bir terim olarak kullanılmış ve dört sınıflandırma tanımlanmıştır. Bu sınıflandırmayı, malzeme taşıma sistemlerinin özellikleri karakterize etmektedir. Tek bir esnek makinenin (SFM), takım değiştirme kabiliyetine sahip tek bir CNC veya NC makinesinden, bir malzeme taşıma cihazından ve bir parça depolama tamponundan oluşan bilgisayar kontrollü bir üretim birimi olduğu bu FMS

türlerinde, Esnek bir üretim hücresi (FMC) bir ortak malzeme taşıma cihazını paylaşan bir grup SFM'den oluşan bir FMS türüdür. Çok makineli esnek üretim sistemi (MMFMS), iki veya daha fazla malzeme taşıma cihazı içeren veya başka bir şekilde Aynı anda iki veya daha fazla makineyi ziyaret etme ve bunlara hizmet verme yeteneğine sahip bir FMS türüdür. Çok hücreli esnek üretim sistemi (MCFMS) ise, tamamı otomatik bir malzeme taşıma sistemi ile birbirine bağlanan birkaç FMC'den ve gerekirse birkaç SFM'den oluşan bir FMS türüdür [7].

Modern üretim sistemleri tüm üretim süreci boyunca ürünleri verimli bir şekilde hareket ettirebilen bir malzeme taşıma sistemi (MHS) gerektirir. Tipik bir işin akış süresinin yalnızca %5'i işlemeye harcanır. Akış süresinin geri kalanında, iş bir depolama arabelleğindedir veya bir malzeme taşıma cihazı tarafından taşınmaktadır [13]. Malzeme taşıma, malzemelerin en ekonomik ve güvenli şekilde taşınmasıdır. Bu nedenle, MHS'nin birincil hedefi maliyetleri ve israfı azaltmak, ancak aynı zamanda üretkenliği ve hizmet kalitesini artırmaktır.

FMS'de kullanılan çeşitli malzeme taşıma ekipmanı türleri arasında, otomatik yönlendirmeli araçlar (AGV'ler), esnek imalatın malzeme taşıma desteği için verimli bir seçenek olarak kabul edilebilir ve modern üretim tesislerinin üretim hatlarında malzeme transferi için giderek daha fazla kullanılmaktadır. AGV'ler, itme arabaları, forkliftler veya konveyörler gibi sabit malzeme taşıma cihazlarına göre birçok avantaj sunabilmektedir. Alan kullanımı ile ilgili olarak, AGV'ler yalnızca belirli bir alanda geçici olarak çalışma alanı işgal eder. Ayrıca fabrika zemininde konveyörlerin yaptığı gibi fiziksel engeller oluşturmazlar ve bu nedenle koridor alanını diğer kullanıcılarla paylaşabilirler. Yayaları uyararak için ışık ve korna kullanmaları ve insan hatasını ortadan kaldırmaları nedeniyle forkliftlerden daha iyi bir güvenlik siciline sahiptirler [13-19].

Pratik imalat problemlerinin çoğu için, klasik çizelgeleme yaklaşımı, olası çizelgelerin sayısında üstel bir büyümeye yol açar. Ayrıca, saatler, hatta dakikalar süren bir karar verme süresi çok

uzundur. İyi çözümlere genellikle gerçek zamanlı olarak ihtiyaç duyulmaktadır [6]. Gerçek zamanlı çizelgeleme konusu son yıllarda birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Sayısal/niceliksel yaklaşım, simülasyon tabanlı yaklaşım, fırsatçı ve sezgisel tabanlı yaklaşım, öğrenme/örnek (sinir ağı) tabanlı yaklaşım, uzman sistem tabanlı yaklaşım, bilgi tabanlı yaklaşım ve Petri ağı tabanlı yaklaşım gibi gerçek zamanlı veya çevrimiçi çizelgeleme işlevini gerçekleştirmek için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Ancak bu yeni yaklaşımların etkinliği, hiyerarşik ve merkezi bir kontrol yapısı gerekliliği nedeniyle sınırlıdır. Başka bir deyişle, bir FMS'deki parça programları, çizelgeler ve üretim rotaları merkezi olarak bir hücre kontrol bilgisayarı tarafından atanır. Her makine, hücre denetleyicisi tarafından yapılan atamalara göre önceden atanmış görevleri gerçekleştirir. Bu yaklaşım, kaynak kesintilerini ele alma esnekliğinden yoksundur, bu nedenle bu sistemler yalnızca sistem çalışması sırasında hiçbir dalgalanma olmadığında iyi çözümler üretebilmektedir [5]. Bu nedenle, klasik çizelgeleme teorisini kullanarak optimal çözümler bulmaya çalışmak çoğu durumda gerçekçi değildir. Ancak, problem alanının karmaşıklığı, araştırmacıları merkezi optimizasyon yaklaşımları dışında bazı dağıtık yöntemlere yöneltmiştir [5,6]. Etmen (Ajan) tabanlı sistemler, bu tür dinamik sistemlerin yönetimi için etkili mekanizmalar sağlar. Ayrıca etmen teknolojisi, müzakere için ihtiyaç duyulan gerçek zamanlı bilgiyi sağlar ve değişen ortama uygun dinamik bir yapıya sahiptir. Bu dinamik yapının, üretim sistemlerinin planlaması ve kontrolü problemlerinin çözümüne uygulanması ile elde edilebilecek etkili sonuçlar simülasyon yardımı ile gösterilmiştir [20-24]. Bu bağlamda, bu çalışmanın öncelikli konusu, Çoklu Etmen Tabanlı Sistem yaklaşımı kullanan bir FMS'de diğer sistem öğelerini (makinelerin kullanılabilirliği ve işlerin işlem rotaları vb.) dikkate alarak AGV'lerin çizelgeleme probleminin incelenmesidir. Bu çalışmanın özel amacı ise, MAS yaklaşımıyla gerçek zamanlı çizelgeleme için literatürden alınan bir vaka çalışması üzerinde simülasyon çalışması gerçekleştirmek ve bunu En Kısa Seyahat Mesafesi (STD), İlk Gelen İlk Hizmet Alır (FCFS) ve En Uzun Seyahat Mesafesi (LTD) gibi literatürde

sıklıkla kullanılan yönlendirme kurallarının sonuçları ile karşılaştırmaktır.

## 2. YÖNTEM

Etmen tabanlı sistemler oldukça genç bir araştırma alanıdır, bu nedenle yazılım ajanı için kesin bir tanım yoktur [25]. Etmen sistemleri, çok çeşitli karmaşık problemleri çözmek için giderek daha popüler hale gelmektedir. Etmen sistemleri teoride önemli bir temele ve aynı zamanda zorlu uygulamalar için kullanılan bir dizi uygulanmış sisteme sahiptir [26]. Çoklu etmen sistemleri (MAS), tek bir yazılım etmenin çözmesi karmaşık olan sorunlara yanıt bulmak için birlikte çalışan veya rekabet eden organize akıllı yazılım etmenlerinin bir koleksiyonudur. MAS, birbirleriyle ve çevreleriyle etkileşime giren bir dizi özerk etmeden oluşur. Buradaki özerklik terimi, etmenlerin kendi kararlarını alabilen aktif varlıklar olduğu anlamına gelir. Bu, başka birinin onlardan istediği işlemleri gerçekleştirmek için önceden belirlenmiş olduklarından, nesnelere için aynı değildir. Ancak bir etmen, hedeflerini ve önceliklerini ve bildiği bağlamı göz önünde bulundurarak talep edilen bir işlemi gerçekleştirip gerçekleştirmeyeceğine karar verebilmektedir [27].

Wooldridge ve Jennings'in [28] tanımına göre, "Etmen, bir ortamda bulunan ve tasarım hedeflerini karşılamak için bu ortamda özerk hareket etme yeteneğine sahip bir bilgisayar sistemidir". Farahvash ve Boucher'ın [29] tanımına göre, "Etmen, çevresini algılayan ve ona göre hareket eden özerk, hesaplamalı bir varlıktır". Etmenler, belirli görevleri kontrol etmek için otomatikleştirilmiş üretim ortamlarına entegre edilebilen olay güdümlü nesnelere sahiptir. Bir akıllı etmen ise, yerleşik (bir çevrede bulunan), otonom (bağımsız, dışarıdan kontrol edilmez), reaktif (çevresindeki değişikliklere tepki veren), proaktif (sürekli hedeflerin peşinden koşan), esnek (hedeflere ulaşmak için birden fazla yola sahiptir), sağlam (başarısızlıktan kurtulur, dirençli), sosyal (diğer ajanlarla etkileşime girer) özelliklere sahip bir yazılım parçasıdır [25,30]. Etmen mimarileri, gerçek dünyadaki, dinamik ve açık ortamlarda etkili davranışı destekleyen otonom bileşenlerin

altında yatan temel mekanizmalardır. Etmen mimarileri dört ana gruba ayrılabilir: mantık tabanlı, reaktif, katmanlı mimariler ve İnanç-Arzu-Niyet (BDI) [31,32].

**Mantık tabanlı etmenler:** Bu tür etmenlerde karar verme, mantıksal çıkarım yoluyla gerçekleşir. Bu etmenler, karar vermek için daha fazla muhakemenin gerekli olduğu durumlarda yararlıdır [32].

**Reaktif etmenler:** Bu tür etmenlerde, karar verme, durumdan eyleme bir tür doğrudan haritalama şeklinde uygulanır. Reaktif etmenlerin davranışları, basit bir akıl yürütme ile durumdan eyleme olarak uygulanır ve bu davranışlar birkaç düzeyde ortaya çıkabilir. Alt seviyedeki davranışlar, failin daha yüksek seviyedeki davranışlarına göre daha yüksek önceliğe sahiptir [32].

**Katmanlı etmenler:** Bu tür etmenlerde karar verme, çeşitli yazılım katmanları aracılığıyla gerçekleştirilir. Bir etmen için reaktif ve proaktif davranışlara sahip olmak için, açık bir ayrışma, etkileşimli katmanlar hiyerarşisinde bu farklı davranış türleriyle başa çıkmak için ayrı alt sistemler oluşturmayı içerir. Katmanlı mimarilerde katmanlar arasında iki tür kontrol akışı gözlenebilir: yatay ve dikey katmanlama [32].

BDI mimarileri en popüler etmen mimarileridir. BDI paradigması, planlama sorununa yönelik mevcut yapay zekâ yaklaşımlarıyla algılanan bir soruna yanıt olarak geliştirilmiştir. Planlama problemi şu şekilde ifade edilebilir: "Bir hedef verildiğinde, bu amaca ulaşacak bir dizi eylem oluşturun" [30]. Bu tür araçlarda karar verme, etmenin inançlarını, arzularını ve niyetlerini temsil eden veri yapılarının manipülasyonuna bağlıdır. Bu etmenler, insan benzeri davranışa ihtiyaç duyan sistemler için kullanışlıdır [32].

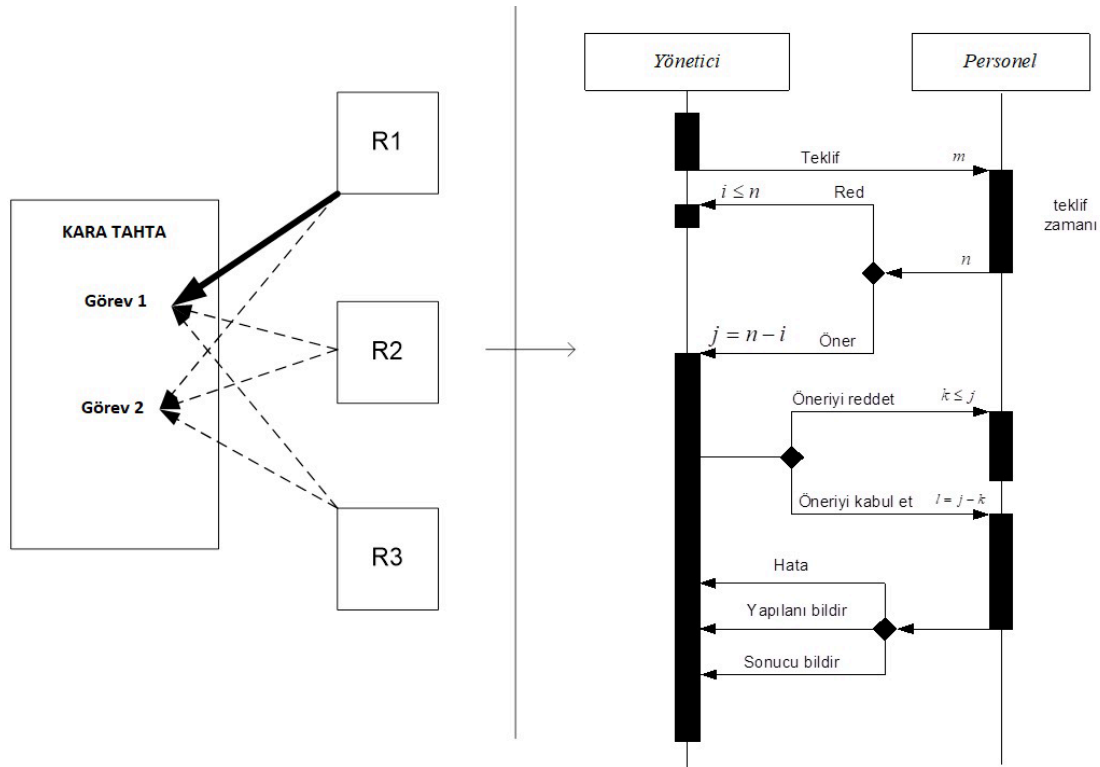
Müzakere mekanizması, merkezi olmayan bir ortamda iş birliğine dayalı karar vermeyi destekler. Mekanizma, üretim planlama, çizelgeleme ve izleme işlevselliği için geçerlidir. Mekanizma, karar verme süreçlerinde iletişim için bir protokol ve bir mesaj dili sağlar. Ajanlar arasında görev ve

kaynak tahsisi ve organizasyon yapısının belirlenmesi için önemli bir koordinasyon tekniği, Sözleşme Ağı Protokolüdür (CNP) [31]. Belki de en popüler müzakere protokolü, Sözleşme-Ağı protokolüdür. Protokol, iki rolü (yönetici ve teklif veren) içeren dört etkileşim aşamasından oluşur:

- **Duyuru aşaması:** Yönetici, kaynağı bir dizi ortak aracıya (teklif verenler) duyurur.
- **Teklif aşaması:** İstekliler tekliflerini yöneticiye gönderir.
- **Atama aşaması:** Yönetici en iyi teklifi seçer ve buna göre kaynağı atar.
- **Confirmation phase:** Seçilen teklif sahibi, kaynağı elde etme niyetini teyit eder.

Herhangi bir etmen, bu iki rolden birisini üstlenerek ve protokolü izleyerek bir etkileşim başlatabilir. Protokol birden çoğa bir protokoldür ve tek bir görevin (veya kaynağın) tek bir yükleniciye atanmasına yol açar (yani, ortaya

çıkan anlaşma, tek bir öğeyle ilgili bire bir anlaşmadır) [33]. Bir sipariş etmen ile AGV etmen arasındaki bu etkileşim protokolünün gösterimi Şekil 1’de verilmiştir. Saf heterarşik sistemlerde kullanılan CNP’nin orijinal versiyonu ile karşılaştırıldığında, karar tamamen sistemin yapısını oluşturan varlıklar arasında dağıtılır ve her düğüm genellikle eş zamanlı olarak hem yönetici hem de yüklenici rollerini üstlenirler. Önerilen sistemde CNP ve karatahta mekanizmaları birlikte yürütülmektedir. Tüm görevler öncelikle bir kamusal alan olan karatahta sistemine yazılır. Yetenekli ve mevcut kaynaklardan biri (teklif veren) görevlerden birini seçer ve çözümünü veya önerisini CNP mekanizmasını başlatan rasyonel yöneticiye gönderir. Şekil 1’deki örnekte karatahtada iki görev vardır. Görev 1, Kaynak 1 tarafından seçilir ve Kaynak 1’in (R1) teklifi Görev 1’e gönderilir. İlk teklifin alınmasından sonra Görev 1 etmeni, CNP’de gösterilen bir yönetici olur ve müzakere aşamasını yürütür.



Şekil 1. Modifiye edilmiş sözleşme-ağ etkileşim protokolü [34]

## **2.1. Esnek Üretim Sistemi için Önerilen Çoklu Etmen Tabanlı Sistem**

Esnek Üretim Sistemleri için önerilen mimari iki paradigmaya dayanmaktadır: çok etmenli sistemler ve holonik sistemler. Bu sistemde dört ana holon türü ve bunlar arasında üç temel holon türü vardır: sipariş holonu, ürün holonu ve kaynak holonu. Personel holonu, temel holonları tamamlayıcı bir holon görevi görür. Bu dört holon, genel holon taksonomisine karar verir. Önerilen model, PROSA referans mimarisi üzerine inşa edilmiştir. Referans mimarisinin yapısı, üç tür temel holon etrafında inşa edilmiştir: “sipariş holonları”, “ürün holonları” ve “kaynak holonları”. Esnek üretim sistemi açısından önerilen mimari, yönetici etmeni, AGV sistem holonu, sipariş sistemi holonu ve makine sistemi holonundan oluşmaktadır.

Çoklu Etmen tabanlı tasarımdaki etmen türleri, işlevlerine ve ilgili sistem hedeflerine göre belirlenir. Önerilen modelde, iki grup etmen tanımlanmaktadır: mantıksal ve fiziksel etmenler.

AGV ve Makine Etmenleri, simülasyonun başlangıcından simülasyonun sonuna kadar sistemde bulunurken, Operasyon Etmeni gibi diğer etmenler ise işin geliş saatinde başlayıp işten ayrıldıktan sonra sistemdeki işlevleri sona erer. Başlangıçta ikisi hariç tüm etmenler etmen tipi olarak tanımlanmaktadır. Personel Etmen ve Yönetici Etmen bir tür olarak tanımlanmamıştır. Bunun nedeni, önerilen etmen sisteminde yalnızca bir Yönetici ve bir Personel Temsilcisi olmasıdır. Diğer etmen türleri ise gerektiğinde birden fazla üretilebilen yani sisteme dahil edilebilen etmenlerdir. Önerilen bu mimaride yer alan etmenlerin tarafından kendi programlarını oluşturmak için kullanılan iş birliği algoritmaları hakkında ayrıntılar için Şahin'in (2010) [34] tez çalışmasına atıfta bulunuyoruz. Çoklu Etmen tabanlı sistemin performans sonuçları, literatürde yaygın olarak kullanılan STD, FCFS ve LTD yönlendirme kuralları ile karşılaştırılırken, etmenlerin işbirlikçi özellikleri kaldırılıp bunların

yerine sadece yönlendirme kuralları ile çalışması sağlanarak sonuçlar elde edilmiştir.

## **3. SONUÇLAR**

MAS sistemini, çevrimiçi çizelgelenimin ana araçları olan bazı yönlendirme kuralları ile karşılaştırılması için Bilge ve Ulusoy'un çalışmasında [35] yer alan test problemleri ve tesis yerleşim düzenleri kullanılarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu test problemlerinde farklı işlem sıralarına ve işlem sürelerine sahip on farklı iş seti ve dört farklı tesis yerleşimi oluşturulmuş ve problem tanımında sunulmuştur. Problemler oluşturulurken dikkate alınan önemli bir özellik, seyahat sürelerinin ve işlem sürelerinin göreceli büyüklüğüdür. Bu özellik, oran ( $t/p$ ) olarak temsil edilir, burada  $t$  seyahat süresi matrisindeki sıfır olmayan tüm girişlerin ortalamasıdır ve  $p$ , tüm işlem sürelerinin ortalamasıdır. Problemler iki grupta toplanmıştır; biri nispeten düşük ( $t/p$ ) oranlı ve diğeri nispeten yüksek ( $t/p$ ) oranlıdır. Bu on iş setinin ve dört tesis yerleşiminin farklı kombinasyonları 82 örnek problem oluşturmak için kullanılmıştır. Bu çalışmada MAS ile karşılaştırmada kullanılan AGV yönlendirme kuralları, En Kısa Seyahat Mesafesi (STD), İlk Gelen Hizmet Alır (FCFS) ve En Uzun Seyahat Mesafesidir (LTD).  $t/p$  oranı  $>0,25$  için vaka çalışmasının sonuçlarından elde edilen makespan değerleri Çizelge 1'de gösterilmektedir ve çizelgede ilk sütunda verilen örnek problemleri belirtmek için bir kod kullanılmıştır. D'yi takip eden rakam, iş setini ve tesis yerleşimini belirtmektedir. Örneğin D41 ile ifade edilen deneyde, 4 numaralı iş seti ve 1 numaralı tesis yerleşimi kullanılmıştır. Çizelge 1'den görülebileceği gibi, MAS,  $t/p$  oranı  $>0,25$  için diğer yönlendirme kurallarına göre daha kısa bir makespan değerine sahip çizelgeler üretmiştir. 40 örnekten 30'unda MAS en iyi çizelgeleri üretmiştir. Bu sonuçlara göre MAS, makespan açısından Tesis Yerleşimi 2 ve 3'te Tesis Yerleşimi 1 ve 4'e göre daha iyi performans sergilemektedir. Yönlendirme kuralları arasında STD diğer kurallara hakimdir ve 40 örnekten 31'inde en iyi çizelgeleri üretmiştir.

**Çizelge 1.** t/p oranı>0,25 için yönlendirme kuralları ile MAS sonuçlarının karşılaştırılması

Deney numarası	MAS	FCFS	STD	LTD	Deney numarası	MAS	FCFS	STD	LTD
D11	130	133	126*	144	D13	<b>109*</b>	110	110	126
D 21	<b>143*</b>	162	147	160	D23	<b>98*</b>	132	118	128
D 31	142	138*	138*	144	D33	<b>103*</b>	130	126	130
D 41	<b>198*</b>	210	220	237	D43	155	172	143*	197
D51	130	134	124*	140	D53	109	117	103*	126
D61	<b>153*</b>	166	162	166	D63	<b>128*</b>	143	143	159
D71	<b>129*</b>	147	143	155	D73	<b>93*</b>	109	109	135
D81	<b>196*</b>	251	217	246	D83	<b>172*</b>	210	182	210
D91	178	155*	163	170	D93	<b>119*</b>	122	132	130
D101	<b>188*</b>	155	163	170	D103	<b>158*</b>	180	180	183
D12	<b>98*</b>	110	104	118	D14	168	160*	164	182
D22	<b>86*</b>	118	104	114	D24	<b>169*</b>	198	172	200
D32	<b>114*</b>	116	116	116	D34	<b>167*</b>	184	182	203
D42	<b>129*</b>	155	151	179	D44	<b>242*</b>	246	247	270
D52	<b>98*</b>	104	101	118	D54	<b>168*</b>	172	168	170
D62	<b>123*</b>	135	135	133	D64	<b>189*</b>	200	190	200
D72	<b>92*</b>	107	109	135	D74	<b>156*</b>	188	173	200
D82	<b>172*</b>	204	180	204	D84	251	308	246*	313
D92	123	119*	128	119*	D94	<b>181*</b>	183	190	190
D102	<b>154*</b>	164	164	160	D104	246	230*	249	255

**Çizelge 2.** t/p oranı<0.25 için yönlendirme kuralları ile MAS sonuçlarının karşılaştırılması

Deney numarası	MAS	FCFS	STD	LTD	Deney numarası	MAS	FCFS	STD	LTD
D11	<b>135*</b>	140	140	143	D13	<b>151*</b>	174	178	156
D21	<b>157*</b>	171	171	171	D23	<b>129*</b>	149	146	144
D31	<b>154*</b>	159	159	159	D33	228	170	170	162
D41	<b>211*</b>	220	220	220	D43	111	107	113	107
D51	118	116	116	117	D53	<b>198*</b>	203	203	203
D61	<b>204*</b>	211	211	211	D63	<b>132*</b>	137	138	137
D71	<b>138*</b>	145	145	148	D73	<b>273*</b>	325	326	325
D81	<b>330*</b>	335	337	335	D83	<b>187*</b>	191	199	190
D91	<b>191*</b>	200	201	200	D93	<b>266*</b>	274	275	274
D101	<b>269*</b>	281	288	281	D103	<b>137*</b>	145	145	145
D12	<b>127*</b>	136	135	135	D14	<b>230*</b>	245	245	245
D22	<b>151*</b>	160	162	162	D24	<b>155*</b>	159	170	162
D32	<b>144*</b>	147	147	147	D34	<b>227*</b>	237	237	235
D42	<b>161*</b>	167	167	220	D44	<b>344*</b>	348	348	348
D52	<b>110*</b>	110	113	111	D54	<b>158*</b>	170	170	170
D62	<b>196*</b>	198	198	198	D64	<b>211*</b>	217	217	217
D72	<b>132*</b>	136	137	135	D74	158	156	157	152
D82	<b>319*</b>	324	327	324	D84	<b>206*</b>	211	211	211
D92	<b>187*</b>	191	196	191	D94	<b>331*</b>	350	351	339
D102	<b>266*</b>	275	281	275	D104	<b>195*</b>	205	206	205
D130	<b>134*</b>	134	134	134	D13	<b>276*</b>	287	287	287

Çizelge 2’de, t/p oranı<0,25 için vaka çalışmasının sonuçları gösterilmektedir. Çizelge 2’den de görülebileceği gibi, MAS, t/p oranı<0,25 için diğer yönlendirme kurallarından daha iyi makespan değerine sahip çizelgeler üretmiş ve daha iyi bir performans göstermiştir. 42 örnekten 38’inde MAS en iyi çizelgeleri üretmiştir. Gönderim kuralları arasında hiçbir yöntem diğer kurallara baskın değildir ve hemen hemen aynı çizelgeleri üretmişlerdir.

Literatürden alınan test problemleri statik problemlerdir ve problem setleri en fazla sekiz iş içermektedir ve sistemde her zaman iki adet AGV olduğu varsayılmıştır. MAS ve STD dağıtım kuralı arasında daha fazla analiz ve daha doğru karşılaştırma yapmak için, çizelgeleme kuralları aşağıdaki deneysel koşullar altında test edilmiştir;

- Değişken sayıda AGV
- Değişken sayıda iş (uzun süreli çalışma).
- Yeni işlerin rastgele varış zamanı.

İşlerin sisteme gelişinin, ortalama 10 zaman birimiyle üstel olarak dağıldığı varsayılmıştır. Beş farklı iş seti sisteme gelebilir olarak ayarlanmıştır. Her bir iş setinin sisteme ulaşma olasılıkları 0,20 olarak ayarlanmıştır. Bilge ve Ulusoy’un [35] çalışmasında, İş Seti 3 (Job Set 3) başlığı altında verilen her iş setinin rotaları ve işlem süreleri kullanılmıştır. Makineler arasındaki taşıma sürelerinin de önceden bilindiği varsayılmıştır ve örnek olay incelemesinde, makineler arasındaki taşıma sürelerini temsil etmek için Tesis Yerleşimi 1 ve 4 (Layout 1 ve 4) olarak anılan tesis yerleşimleri kullanılmıştır [30]. Diğer simülasyon modeli özellikleri örnek olay incelemesiyle aynıdır.

**Çizelge 4.** Deneysel tasarım sonuçları

Deneysel numarası	Tesis yerleşimi	AGV sayısı	İş sayısı	MAS (Makespan)	Deneysel numarası	Tesis yerleşimi	AGV sayısı	İş sayısı	STD (Makespan)
D1	4	2	20	354	D13	4	2	20	533
D2	4	3	20	275	D14	4	3	20	378
D3	4	4	20	302	D15	4	4	20	404
D4	1	2	20	380	D16	1	2	20	423
D5	1	3	20	314	D17	1	3	20	395
D6	1	4	20	278	D18	1	4	20	299
D7	4	2	50	1129	D19	4	2	50	1215

**Çizelge 3.** Faktörler ve seviyeleri için deneysel tasarım

Factor	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A. AGV sayısı	2	3	4
B. İş sayısı	20	50	-
C. Tesis yerleşimi	1	4	-

Çizelgeleme yaklaşımlarını değerlendirmek için tam faktör analizi kullanılmıştır. Yapılan ön simülasyon çalışmalarında, sistemde 4 AGV bulunması durumunda neredeyse üretim sisteminin tam kapasitesine ulaştığı ve sisteme daha fazla AGV eklenirse kaynak israfı olacağı tespit edilmiştir. Buna göre deneysel tasarım, üç farklı sayıda AGV (2, 3, 4), iki farklı yerleşim (Tesis Yerleşimi 1 ve 4) ve iki farklı sayıda iş (20 ve 50) içermektedir ve tüm faktör seviyesi kombinasyonlarını araştırmak için 12 deney (3x2x2) gereklidir. Ortak rasgele sayılar, her faktör kombinasyonu için çalışmalar boyunca aynı deneysel koşulu sağlamak için kullanılmıştır. Tam faktöriyel tasarımda kullanılan faktörler ve seviyeleri Çizelge 3’te, sonuçlar ise Çizelge 4’te verilmiştir.

Çizelge 4’te görüldüğü gibi, MAS tüm deneyler için STD’ye göre daha iyi çizelgeler üretmiştir. STD için hesaplanan Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) değeri %21’dir. Bu sonuçlara göre dinamik bir ortamda MAS’ın ürettiği çizelgeler makespan performans değeri açısından STD’den elde edilen çizelgelere göre daha kısa olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni, MAS’ın kendi aralarında ve çevreleriyle etkileşime giren bir dizi otonom etmeden oluşmasıdır; bu nedenle daha isabetli kararlar alabilmektedirler.



Çizelge 4. (Devam)

<b>D8</b>	4	3	50	941	<b>D20</b>	4	3	50	1132
<b>D9</b>	4	4	50	688	<b>D21</b>	4	4	50	756
<b>D10</b>	1	2	50	1032	<b>D22</b>	1	2	50	1215
<b>D11</b>	1	3	50	850	<b>D23</b>	1	3	50	942
<b>D12</b>	1	4	50	711	<b>D24</b>	1	4	50	853

#### 4. TARTIŞMA

Pratik imalat problemlerinin çoğu için, klasik çizelgeleme yaklaşımı, olası çizelgelerin sayısında üstel bir büyümeye yol açar. Ayrıca, saatler, hatta dakikalar süren bir karar verme süresi çok uzundur. İyi çözümlere genellikle gerçek zamanlı olarak ihtiyaç duyulur. Etmen tabanlı sistemler, bu tür dinamik sistemlerin yönetimi için etkili mekanizmalar sağlar. Ayrıca etmen teknolojisi, müzakere için ihtiyaç duyulan gerçek zamanlı bilgileri sağlar ve değişen ortama uygun dinamik bir yapıya sahiptir. Bu bağlamda, AGV'lerin çizelgelenmesi için diğer sistem öğeleri (makinelere kullanılabilirliği ve işlerin işleme yolları vb.) dikkate alınarak MAS tabanlı kontrol mekanizması önerilmiştir. Bu çalışmada, esnek üretim sistemi için MAS tabanlı çizelgeleme sistemi yaklaşımı, klasik sevk kuralları ile karşılaştırılmış ve bu durumda MAS sisteminin oldukça rekabetçi olduğu görülmüştür.

Literatürde bu alanda hala daha derinlemesine çalışılması gereken bazı boşluklar vardır. Bu boşluklar, gelecekteki araştırmalar için yön gösterici olacaktır. En umut verici olanlar şu şekilde sunulmaktadır:

- Bir üretim sisteminde meydana gelebilecek kaynak kesintileri gibi diğer beklenmeyen olay türleriyle başa çıkmak için çok etmenli sistemi tasarımlarına ihtiyaç vardır.
- Üretim sistemlerinde başka bir performans kriteri sınıfı, teslim tarihlerine dayanmaktadır. Son zamanlarda "ortalama gecikme ve maksimum gecikme" performans kriteri, tam zamanında üretim ortamını yakından yansıttığı için daha sık kullanılmaktadır. Önerilen sistem, güvenilir teslim tarihi atamak için genişletilebilir ve teslim tarihleri performans

kriterine dayalı olarak performansını test edebilir.

- Trafik kontrolü, sıkışıklık, makine arızası veya duruş süresi, hurda, yeniden çalışma, akü değiştirici için araç sevkiyatı gibi konular bu çalışmada dikkate alınmamıştır ve gerçek zamanlı kontrol sırasında dikkate alınması gereken konular olarak bırakılmıştır. Bu tür sorunlarla başa çıkmak için çok etmenli bir sistem geliştirilebilir ve performans sonuçları tartışılabilir.

#### 5. REFERANSLAR

1. Gou, L., Luh, P.B., Kyoya, Y., 1998. Holonic Manufacturing Scheduling: Architecture, Cooperation Mechanism, and Implementation. *Computers in Industry*, 37(3), 213-231.
2. Jerald, J., Asokan, P., Saravanan, R., Delphin Carolina Rani A., 2006. Simultaneous Scheduling of Parts and Automated Guided Vehicles in an FMS Environment Using Adaptive Genetic Algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(5), 584-589.
3. Wang, J., Deng, Y., 1999. Incremental Modeling and Verification of Flexible Manufacturing Systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 10(6), 485-502.
4. Veeravalli, B., Rajesh, G., Viswanadham, N., 2002. Design and Analysis of Optimal Material Distribution Policies in Flexible Manufacturing Systems Using a Single AGV. *International Journal of Production Research*, 40(12), 2937-2954.
5. Lun, M., Chen, F., 2000. Holonic Concept Based Methodology for Part Routing on Flexible Manufacturing Systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16(7), 483-490.

6. Babiceanu, R.F., Chen, F.F., Sturges, R.H., 2005. Real-Time Holonic Scheduling of Material Handling Operations in A Dynamic Manufacturing Environment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21(4-5), 328-337.
7. McCarthy, B., Liu, J., 1993. A New Classification Scheme for Flexible Manufacturing Systems. *The International Journal of Production Research*, 31(2), 299-309.
8. De Toni, A., Tonchia, S., 1998. Manufacturing Flexibility: A Literature Review. *International Journal of Production Research*, 36(6), 1587-1617.
9. Ross, E.A., Mahmoodi, F., Mosier, C.T., 1996. Tandem Configuration Automated Guided Vehicle Systems: A Comparative Study. *Decision Sciences*, 27(1), 81-102.
10. Seo, Y., Egbelu, P.J., 1999. Integrated Manufacturing Planning for an AGV-Based FMS. *International Journal of Production Economics*, 60, 473-478.
11. Farling, B., Mosier, C., Mahmoodi, F., 2001. Analysis of Automated Guided Vehicle Configurations in Flexible Manufacturing Systems. *International Journal of Production Research*, 39(18), 4239-4260.
12. Haq, A.N., Karthikeyan, T., Dinesh, M., 2003. Scheduling Decisions in FMS Using A Heuristic Approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22(5), 374-379.
13. Hall, N.G., Sriskandarajah, C., Ganesharajah, T., 2001. Operational Decisions in AGV-Served Flowshop Loops: Scheduling. *Annals of Operations Research*, 107(1), 161-188.
14. Ganesharajah, T., Hall, N.G., Sriskandarajah, C., 1998. Design and Operational Issues in AGV-Served Manufacturing Systems. *Annals of Operations Research*, 76, 109-154.
15. Shen, Y.-C., Kobza, J.E., 1998. A Dispatching-Rule-Based Algorithm for Automated Guided Vehicle Systems Design. *Production Planning & Control*, 9(1), 47-59.
16. Reveliotis, S.A., 2000. Conflict Resolution in AGV Systems. *Iie Transactions*, 32(7), 647-659.
17. Qiu, L., Hsu, W.J., Huang, S.Y., Wang, H., 2002. Scheduling and Routing Algorithms for Agvs: A Survey. *International Journal of Production Research*, 40(3), 745-760.
18. Dotoli, M., Fanti, M., 2004. Coloured Timed Petri Net Model for Real-Time Control of Automated Guided Vehicle Systems. *International Journal of Production Research*, 42(9), 1787-1814.
19. Singh, N., Sarngadharan, P., Pal, P.K., 2011. AGV Scheduling for Automated Material Distribution: A Case Study. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22(2), 219-228.
20. Komma, V.R., Jain, P.K., Mehta, N.K., 2011. an Approach for Agent Modeling in Manufacturing on JADE™ Reactive Architecture. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52, 1079-1090.
21. Erol, R., Şahin, C., Baykasoğlu, A., Kaplanoğlu, V., 2012. A Multi-Agent Based Approach to Dynamic Scheduling of Machines and Automated Guided Vehicles in Manufacturing Systems. *Applied Soft Computing*, 12(6), 1720-1732.
22. Sahin, C., Demirtaş, M., Erol, R., Baykasoğlu, A., Kaplanoğlu, V., 2017. A Multi-Agent Based Approach to Dynamic Scheduling with Flexible Processing Capabilities. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28, 1827-1845.
23. Ricardo Rodríguez, A.R., Benítez, I.F., González Yero, G., Núñez Alvarez, J.R., 2022. Multi-Agent System for Steel Manufacturing Process. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 12(3), 2441-2453.
24. Azeroual, M., Boujoudar, Y., Aljarbouh, A., Fayaz, M., Qureshi, M.S., El Moussaoui, H., El Markhi, H., 2022. Advanced Energy Management and Frequency Control of Distributed Microgrid Using Multi-Agent Systems. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 23(5), 755-766.
25. Padgham, L., Winikoff, M., 2005. *Developing Intelligent Agent Systems: A Practical Guide*. John Wiley & Sons, England, 221.
26. Padgham, L., Lambrix, P., 2005. *Formalisations of Capabilities for BDI-Agents*.

- Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 10(3), 249-271.
27. Cil, I., Mala M., 2010. A Multi-Agent Architecture for Modelling and Simulation of Small Military Unit Combat in Asymmetric Warfare. *Expert Systems with Applications*, 37(2), 1331-1343.
  28. Wooldridge, M., Jennings, N.R., 1995. Intelligent Agents: Theory and Practice. *The Knowledge Engineering Review*, 10(2), 115-152.
  29. Farahvash, P., Boucher, T.O., 2004. A Multi-Agent Architecture for Control of AGV Systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 20(6), 473-483.
  30. Evertsz, R., Fletcher, M., Jones, R., Jarvis, J., Brusey, J., Dance, S., 2003. Implementing Industrial Multi-Agent Systems Using JACK™. In *Programming Multiagent Systems, First International Workshop (ProMAS'03)*, 3067, 18-48.
  31. Bellifemine, F.L., Caire, G., Greenwood, D., 2007. *Developing Multi-Agent Systems with JADE*. John Wiley & Sons, England, 312.
  32. Komma, V.R., Jain, P.K., Mehta, N.K., 2011. An Approach for Agent Modeling in Manufacturing on JADE™ Reactive Architecture. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52(9), 1079-1090.
  33. Bordini, R.H., Braubach, L., Dastani, M., Seghrouchni, A.E.F., Gomez-Sanz, J.J., Leite, J., O'Hare, G., Pokahr, A., Ricci, A., 2006. A Survey of Programming Languages and Platforms for Multi-Agent Systems. *Informatica*, 30(1).
  34. Şahin, C., 2010. Multi-Agent Approach for the Scheduling of Manufacturing Systems. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, 116.
  35. Bilge, Ü., Ulusoy, G., 1995. A Time Window Approach to Simultaneous Scheduling of Machines and Material Handling System in an FMS. *Operations Research*, 43(6), 1058-1070.



## Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Eğri Eksenli Petek Kirişlerin Eğilme Analizi

Duygu ERTÜRKMEN\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-7073-6465  
Ahmad Reshad NOORİ<sup>2</sup> ORCID 0000-0001-6232-6303

<sup>1</sup>Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mersin  
<sup>2</sup>İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

Geliş tarihi: 03.01.2023 Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: ERTÜRKMEN, D., NOORİ, A.R., (2023). Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Eğri Eksenli Petek Kirişlerin Eğilme Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 73-83.

### Öz

Bu çalışmada, eğri eksenli petek kirişlerin statik davranışı, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, gövde boşluk geometrisinin petek kirişlerin yer değiştirme ve gerilme değerlerine etkisinin detaylı bir şekilde araştırılmasıdır. Analizlerde daire, kare, beşgen ve altıgen olacak şekilde 4 farklı gövde boşluk tipi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile model kurulurken 10 düğümlü tetrahedral tipi sonlu eleman kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan malzeme lineer izotropik ve homojen olup, çeliğin mekanik özellikleri kullanılmıştır. Sınır koşulları ankastre – ankastre, ankastre – basit ve ankastre – serbest olarak ele alınmıştır. Sonuçlar, IPE220 ve IPE300 profillerinden oluşan daire eksenli petek kirişler için detaylı bir şekilde sunulmuştur. Yapılan tahkiklere göre gövde boşluk tipinin, bu tür yapı elemanlarının yer değiştirme değerleri, von-Mises gerilmeleri ve maksimum asal gerilme değerleri üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu görülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Sonlu elemanlar yöntemi, Eğri eksenli kirişler, Eğilme davranışı, Gerilme analizi, Statik analiz

### Bending Analysis of Curved Castellated Beams Via the Finite Element Method

#### Abstract

In this study, the static behavior of curved castellated beams is investigated via the three-dimensional finite element method. The main purpose of the study is to investigate the effect of the geometry of the web opening on the displacement and stress values of the castellated beams in detail. In the analysis, 4 different web opening types circle, square, pentagon, and hexagon are used. To generate the models via the finite element method a 10-node tetrahedral type finite element is implemented. The material used in this study is linear isotropic homogeneous and the mechanical properties of steel are used. Fixed – fixed, fixed – pinned and fixed – free are considered as boundary conditions. The results are presented in detail

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Duygu ERTÜRKMEN, [derturkmen@mersin.edu.tr](mailto:derturkmen@mersin.edu.tr)

for circular castellated beams made up of IPE220 and IPE300 profiles. Based on the results, it is seen that the type of web opening has a significant effect on the displacements, von-Mises stresses, and maximum principal stress values of the considered structures.

**Keywords:** Finite element method, Curved beams, Bending response, Stress analysis, Static analysis

## 1. GİRİŞ

Betonarme elemanlar ile geçilemeyecek geniş açıklıkların mevcut olduğu yapı sistemlerinde, söz konusu açıklıkların geçilmesinde çelik taşıyıcı elemanların kullanımı büyük bir kolaylık sağlamaktadır. Çelik taşıyıcı elemanlar, sadece geniş açıklıkların geçilmesinde değil, küçük açıklıklı yapı sistemlerinde de oldukça ekonomik bir tercih olmaktadır. Stadyum, spor salonu, alışveriş merkezi gibi geniş alanlara sahip yapılarda çelik kirişlerin kullanımı son derece yaygındır. Geniş gövde yüksekliğine sahip, dairesel veya altıgen boşluklu olarak planlanmış petek kiriş olarak da adlandırılan bu çelik kirişler kullanıldıkları mekana dayanım ve ekonomi yönünden katkı sağlamalarının yanı sıra estetik yönden de ayrı bir güzellik katmaktadır.

Çelik kiriş profillerinin ortalarında petek şeklinde bırakılan boşluklardan ismini alan bu petek kirişler, ekonomik ve hafif olmaları nedeniyle tercih edilmektedir. Genellikle  $H$  ve  $I$  profil türlerinin gövdeleri boyunca zikzaklı olarak kesilip, kesilen iki parçanın kesilmiş yüksek uçları birbirine denk getirilerek kaynaklanması sureti ile birleştirilmesi sonucunda ortaya çıkarlar. Petek kirişlere en sık çatı açıklıklarında rastlanmaktadır.

Petek kirişler, yüksek gövdeleri sayesinde yapının düşey eğilme rijitliğini arttırmaları, aynı ağırlıktaki diğer kesit türlerine göre atalet momentlerinin, dolayısı ile rijitliklerinin fazla olması, yarattıkları boşluk alanlarının içerisinde her türlü tesisatın geçmesine olanak sağlaması ve bu sayede yerden tasarruf sağlamaları ve diğer kiriş türlerine nazaran kullanılmış oldukları yapılara daha estetik ve şık bir görünüm katmaları sebebiyle tercih edilmektedirler.

Jiang ve arkadaşları, [1] tarafından yapılan çalışmada, üzerinde yayılı yük bulunan iki

ucundan basit mesnetli, eğri eksenli, altıgen delik açıklıklı petek kirişler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları burkulma yükü ve burkulma modları bakımından değerlendirilmiş ve burkulma yükünün açıklıkların dairesel yarıçap değeri arttıkça kademeli olarak azaldığı, açıklıklar arasındaki boşluk değeri arttıkça arttığı sonucuna varılmıştır.

Elaiwi ve arkadaşları, [2] yaptıkları çalışmada, gövde boşluklarının petek kirişlerin enine şekil değiştirmesi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, değişken başlık genişlikli, çeşitli uzunluktaki iki açıklıklı sürekli kirişler yayılı yük etkisinde analiz edilmiştir. Çalışmalarında petek kirişlerin sehimi üzerinde gövdede oluşan kesme kuvvetlerinin etkisinin de dikkate alınması gerektiğini savunan araştırmacılar, kesme etkisinin göz ardı edilmesinin sehimin olduğundan az elde edilmesine yol açacağını savunmuş ve gövdedeki kesme kuvvetlerinin kirişin sehimi üzerindeki etkisinin, petek kirişin uzunluğu arttıkça azaldığı sonucuna varmışlardır.

Pandya ve Dhankot, [3] iki ucundan basit veya ankastre mesnetli eğri eksenli dairesel boşluklu çelik petek kirişlerin Sonlu Eleman Analizine odaklanmıştır. Çalışmalarında eğri eksenli çelik kirişlerin üzerindeki deliklerin açılma çapı değerleri ve kiriş yüksekliğinin kirişin davranışı üzerindeki etkisi farklı sıcaklık dereceleri de dikkate alınarak incelenmiştir. Kirişin açıklığı ile orantılı değişken eğrilik dereceleri için çeşitli derinlik-açıklık çap oranları ele alınarak kemerli petek kiriş üzerinde parametrik bir çalışma yapılmıştır. Yapılan sonlu eleman çalışması sonuçlarından, açıklık boyutu arttıkça kirişin orta açıklığında meydana gelen sehimin arttığı sonucu ortaya çıkmıştır. Açıklık/yükseklik oranı 7'den 6'ya düşürüldüğünde, gerilmelerde ani bir azalma olduğu da gözlemlenmiştir.

Zaher ve arkadaşları, [4] çalışmalarında eğri eksenli petek kirişlerin deneysel performansını incelemiştir. Çalışma kapsamında, iki tarafından basit mesnetli desteklere sahip eğri eksenli  $I$  kesitli dairesel boşluklu dört adet numune, orta açıklıklarına uygulanan düşey tekil yük altında test edilmiştir. Deneysel araştırmada ele aldıkları dört numunede yay uzunluğu, yay yüksekliği, alt açılar ve eğrilik yarıçapları gibi değerler değişken tutularak numunelere ait maksimum taşıma gücü değerleri, sehim değerleri ve göçme modları araştırılmıştır. Deneysel çalışmaya ek olarak, eğri eksenli çelik petek kirişlerin davranışını analiz etmek için bir sonlu eleman modeli önerilmiş ve önerilen modelin deneysel sonuçları doğruladığı belirtilmiştir.

De Oliveira ve arkadaşları, [5] başlık ve gövde kesiti arasındaki etkileşimi göz önünde bulundurarak, eğilme etkisine maruz kalan petek kirişlerin kritik elastik yerel burkulma gerilmelerinin tahmini için açık denklemlerin geliştirilmesini sunmaktadır.

Chang ve arkadaşları, [6] tarafından yapılan çalışmada, petek kirişe benzer görünüme sahip, gövdesi boyu boyunca çelik sekizgen boşluklardan oluşturulan yeni bir çelik kiriş tasarımı ele alınmıştır. Çelik sekizgen gövdeli boşluklu kirişin, eğilme yükleri altındaki mekanik özellikleri teorik olarak analiz edilmiştir.

Jia ve arkadaşları, [7] basit mesnetli altıgen boşluklu düzlemsel petek kirişleri yanal destekli ve yanal desteksiz olacak şekilde ortasından tekil yük uygulamak sureti ile test etmişlerdir. Deneysel çalışmaya ek olarak sonlu eleman analizi yoluyla, petek kirişlerin farklı düzenlemelerinin altıgen delikli petek kirişlerin göçme modu, yerel burkulma ve genel performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Mehetre ve Talikot, [8] sinüs eğrisi şeklinde zikzaklar oluşturularak kesilip tekrar birleştirilmiş boşluklu petek kirişlerin dört nokta eğilme yüklemesi etkisindeki davranışlarını altıgen boşluklu petek kirişlerin davranışları ile karşılaştırmışlardır. Çalışmada, altıgen boşlukların köşelerinde oluşan kayma gerilmelerinin

yoğunluğundan dolayı, kirişin göçmesini önlemek ve ayrıca maksimum moment taşıma kapasitesinin değişimini incelemek için sinüzoidal bir açıklık olarak yeni bir gövde boşluk şekli denenmiştir.

Morkhade ve arkadaşları, [9] toplamda 15 adet değişik geometrik şekillerde boşluklar kullanılarak oluşturulmuş çelik petek kirişlerin farklı boşluk derinliklerine göre hem deneysel hem de doğrusal olmayan analizini ele almışlardır. Kullandıkları boşluk şekilleri kenarları yuvarlatılmış biçimde kare, altıgen, sekizgen ve daire şeklinde olup boşluk çap ve yükseklik değerleri kesit yüksekliğinin belli oranları kadar değişken tutularak hazırlanmış ve analizlerde o şekilde dikkate alınmıştır.

Waryosh ve Ali, [10] beş adet basit mesnetli altıgen boşluklu kompozit petek kiriş oluşturmuş, boşluk boyutlarının kompozit geopolimer beton petek kirişlerin davranışı ve mukavemeti üzerindeki etkilerini, tam etkileşimli ve (%70) kısmi etkileşimli statik yükler altında incelemiştir. Çalışmada ele alınan çelik petek kirişlerin gövdedeki deliklerinin açılma şekli altıgen olup, gövde alanından açılma boyutuna göre %35 ve %70 olarak farklı oranlardadır.

Rajana ve arkadaşları, [11] çeşitli geometrik parametrelerin etkisini araştırmak ve ayrıca sinir ağı tabanlı bir formülü doğrulamak ve geliştirmek için güçlü aksenal eğilmeye maruz kalan hücreli (delikli petek) kirişlerin elastik ve elastik olmayan burkulmasına ilişkin kapsamlı bir parametrik çalışma gerçekleştirmiştir. Yapmış oldukları çalışma sonucunda, delikli petek kirişlerin kritik elastik burkulma yükünün, basınç başlığının yanal hareketine karşılık geldiği, sonuçları etkileyen en kritik parametrelerin ise gövde kalınlığı ve başlık geometrisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Xi ve Zhang, [12] çalışmalarında yerel gövde burkulmasına izin verilen  $I$  kesitli, gövde içinde dairesel boşlukları bulunan iki ucundan mafsallı eğri eksenli çelik petek kirişlerin düzlem içi stabilite analizini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemiştir.

Abu-Sena ve arkadaşları, [13] 12 adet kısa ve uzun altıgen boşluklu olarak planlanmış petek kiriş-kolon elemanı üzerinde deneysel bir inceleme yapmıştır. Söz konusu petek kiriş-kolonlar, farklı yük eksantrikliği altında, elemanlar üzerindeki deliklerin kiriş-kolon mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmak için test edilmiştir. ANSYS yazılımı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak test edilen petek kiriş-kolonun davranışı ve mukavemeti sayısal olarak da incelenmiştir. Al-Mawashee ve Al-Kannoon, [14] aynı uzunluktaki (1,7m) dört kiriş üzerinde, açıklık ortasında tek bir noktasal yük altında deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma, yanal takviyeleri olan ve olmayan oluklu ağlara sahip iki petek kiriş ile ilgilidir. Deneylerdeki en önemli değişken, kirişlerin toplam yüksekliğidir. Düz ve oluklu ağ kirişlere kıyasla delikli-oluklu ağ kirişlerin nihai yük kapasitesi karşılaştırılmıştır. Anbarasu ve arkadaşları, [15] boşluklu petek kiriş uygulamasının kare en kesitli sıcak haddelenmiş çelik boru kirişlerin eğilme mukavemeti ve rijitliği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla 8 adet boşluklu boru kesit numune oluşturmuş ve deneysel olarak ortasında tekil bir yük olacak şekilde basit eğilme altında test etmişlerdir.

Barkiah ve Darmawan, [16] kesit ortasında bırakılan boşluğun dolu kesitli çelik kirişlere kıyasla altıgen delikli petek kirişlerin eğilme kapasiteleri üzerindeki etkisini elde etmek amacıyla ANSYS programını kullanarak sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Braga ve arkadaşları, [17] yanal olarak desteklenmiş kompozit olmayan Litzka tipi petek kirişlerin göçme modlarını sonlu eleman simülasyonları kullanarak araştırmış, kirişi oluşturan parçaların davranışa karşılıklı etkisini, bireysel modların etkileşimi ve burkulma sonrası dayanım rezervi gibi hususları değerlendirmiştir. Doori ve Noori, [18] farklı gözenekli petek kirişlerin statik davranışını incelemiştir. Benzer üniform yayılı yük ve sınır şartları etkisinde, hangi kiriş tipinin daha iyi performans gösterdiğini belirlemek için ABAQUS programı yardımıyla kirişlerin sonlu eleman analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Pandey ve Rathour, [19] 25 adet farklı başlık genişliği ve gövde yüksekliğindeki  $I$  profilden

çelik kirişlere ait sonlu eleman analiz sonuçlarını incelemiştir. Analizlerde en çok zorlanan bölgenin gövde ortaları olduğu ve bu kısmın yüksekliğinin artırılması ile oluşacak sehim değerlerinin azalacağı sonucuna varılmıştır. Singh, [20] gövde ortasında profil yüksekliğinin yarısı çapında dairesel bir boşluk bulunan 20 adet farklı sınır koşullarında tanımlanan kirişin düzgün yayılı yük altındaki sonlu eleman analizini ABAQUS programı yardımıyla gerçekleştirerek kirişlere ait gerilme ve deformasyon değerlerini incelemiştir.

Subramanian ve Jagadeesan, [21] petek kirişlerde kesme mukavemetinin artırılmasını sağlamak amacı ile  $I$  profilleri zikzak şeklinde kesip sonrasında uç bölgelerinden kaynaklamak sureti ile birleştirerek oluşturdukları altıgen boşluklu petek kirişlerin kesme kuvvetlerinin yoğun olarak kiriş mukavemetini etkilediği bölgelerde rijitliği artırıcı çapraz çubuk elemanlar ve düşey elemanlar kullanarak deneysel ve analitik bir çalışma yapmışlardır. Weidlich ve arkadaşları, [22] petek kirişlerin yanal burkulma ve basınç altındaki yerel burkulma modları arasındaki etkileşimi araştırmıştır. Geliştirdikleri yöntemi, mevcut standart yöntemlerle karşılaştırmış ve sonuçların önerilen denklemin özellikle göçme modlarının kirişin davranışına hakim olduğu durumlarda dayanım değerlerini daha gerçekçi bir şekilde verdiğini belirtmişlerdir.

Nabil ve arkadaşları, [23] altıgen açıklıklara sahip betonarme petek kirişlerin eğilme davranışını incelemiştir. Kirişlerin maksimum taşıma kapasitesini tahmin etmek için petek kiriş yüksekliği ve açıklık boyutları üzerinde sayısal olarak bir parametrik çalışma yapmışlardır.

Yazarların bilgisine göre, boşluk tipinin eğri eksenli petek kirişlerin eğilme davranışına etkisini sonlu elemanlar yöntemi ile analiz eden herhangi bir çalışma ile literatürde karşılaşılmamıştır. Bu çalışmada, düzgün yayılı yük etkisine olan daire eksenli petek kirişlerin eğilme davranışı üç boyutlu sonlu elemanlar ile araştırılmıştır. Araştırmada farklı sınır koşullarının ve ele alınan petek kirişlerin gövdesinde açılan delik geometrisinin (kare, daire, beşgen ve altıgen) yer değiştirmeler

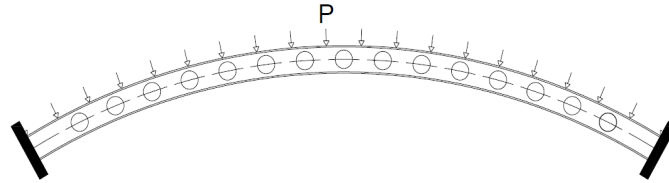


ve gerilmeler üzerindeki etkileri parametrik olarak incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Şekil 1'de verilen eğri eksenli sisteme düzgün yayılı yük ekti etmektedir. Bu sistem için ankastre

– ankastre, ankastre – basit ve ankastre – serbest olmak üzere üç farklı sınır koşulu dikkate alınmıştır. İzotropik homojen malzemeden yapılmış olan bu yapının malzeme özellikleri Çizelge 1'de sunulmuştur.



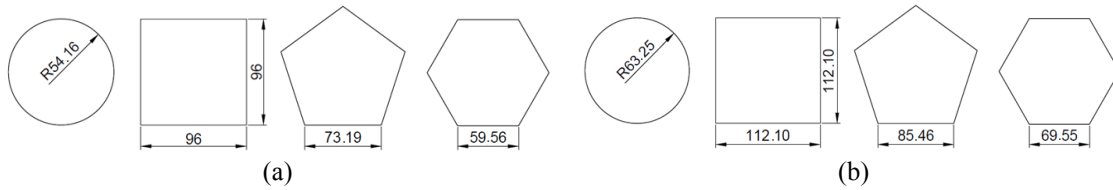
Şekil 1. Eğri eksenli petek kiriş geometrisi

Çizelge 1. Malzeme özellikleri

Elastisite modülü (Pa)	Poisson oranı	Hacim modülü (Pa)	Kayma modülü (Pa)
2E+11	0,3	1,667E+11	7,692E+10

Bu çalışmada, farklı boşluk geometrisine sahip eğri eksenli petek kirişlerin zamandan bağımsız statik yükler etkisindeki davranışı sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS Workbench [24] ile analiz edilmiştir. Analizlerde IPE220 ve IPE300 profilleri kullanılmış olup, bu kirişler için gövde boşluklarının geometrik özellikleri Şekil 2'de sunulmuştur.

Şekil 2'de verilen boşluk tiplerinin geometrik ölçüleri toplam boşluk alanı eşit olacak şekilde belirlenmiştir. Ele alınan daire eksenli petek kirişin uzunluğu 3 metre, yay açısı  $60^\circ$  ve yarıçapı ise 2.865 metre olarak dikkate alınmıştır. Tüm durumlarda boşluk sayısı 15 adet ve boşluklar arası mesafe ( $\alpha$ ) ise 0,18 metredir, mesnet ile kenar boşluğu arasındaki uzunluk ( $\beta$ ) 0,24 metre olarak tayin edilmiştir. Bu özellikler Çizelge 2'de özetlenmiştir.



Şekil 2. Gövde boşluk geometrisi (a) IPE220 ve (b) IPE300 kesitleri için

Çizelge 2. Geometrik özellikler

Model	Profil tipi	Gövde boşluk tipi	Boşluk alanı (mm <sup>2</sup> )	$\alpha$ (m)	$\beta$ (m)	Boşluk sayısı
I	IPE220	Daire	9216	0,18	0,24	15
II	IPE220	Kare	9216	0,18	0,24	15
III	IPE220	Beşgen	9216	0,18	0,24	15
IV	IPE220	Altıgen	9216	0,18	0,24	15
V	IPE300	Daire	12566.41	0,18	0,24	15
VI	IPE300	Kare	12566.41	0,18	0,24	15
VII	IPE300	Beşgen	12566.41	0,18	0,24	15
VIII	IPE300	Altıgen	12566.41	0,18	0,24	15

Sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS Workbench ile analiz yaparken, SOLID187 elemanı kullanılmıştır. Bu dörtyüzlü (tetrahedral) sonlu eleman 10 adet düğüm noktasına sahip olup, her düğüm noktasında 3 adet serbestlik derecesi vardır. Elemandaki serbestlik dereceleri  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenleri yönünde ötelenmelerden oluşmaktadır. Bu elemanın teorisi, yapılan kabuller ve kısıtlamalar ANSYS programının teorileri kaynağında [25] mevcuttur. Mesnet sınır koşullarını tanımlamak için, ankastre mesnet için programın ara yüzünde bulunan “Fixed” koşulu kullanılmıştır. Basit mesnet için ise “Remote Displacement” komutu kullanılarak dönme değerleri sıfır olarak girilmiştir. Serbest uç için ise herhangi bir sınır şartı girilmemiştir. Bu çalışmada düzgün yayılı yükler Pa cinsinden girilmiştir. Bu çalışmada, sistemlerin sonlu eleman ağını oluştururken programın “Mesh” ayarlarında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Her bir durum için eleman ve düğüm noktası sayısı Çizelge 3’te sunulmuştur.

**Çizelge 3.** Sonlu eleman ağı özellikleri

Model	Eleman sayısı	Düğüm noktası sayısı
I	5655	12943
II	4835	10331
III	4515	10027
V	4886	11067
V	4379	9661
VI	4388	9521
VII	4748	10378
VIII	4968	11019

Maksimum asal gerilmeler ve von-Mises gerilmeleri, ele alınan yapı elemanlarının kırılma varsayımları hakkında fikir edinebilmek için incelenmiştir. Literatürde von-Mises gerilmeleri ( $\sigma_v$ ) için çeşitli bağıntılar verilmektedir. Bu çalışmada von-Mises gerilmesi asal gerilmeler ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) cinsinden verilmiştir [25].

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (1)$$

### 3. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu çalışmada, eğri eksenli petek kirişlerin statik analizi üç boyutlu sonlu elemanlar yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Analizlerde ANSYS Workbench paket programı kullanılmıştır. Boşluk tipi geometrisinin ele alınan yapı elemanların eğilme performansına etkisi detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Bu kapsamda, her bir profil için karşılaştırılan durumlarda kirişin uzunluğu, eğrilik yarıçapı, boşluk alanı ve boşluklar arasındaki mesafe eşit tutularak yalnız boşluk tipi değiştirilmiştir. Basınç kirişin üst başlığına uygulanıp, değeri 10 Pa olarak alınmıştır. Bu bölümde, öncelikle tüm modeller için elde edilen toplam yer değiştirme değerleri ele alınacaktır.

**Çizelge 4.** En büyük toplam yer değiştirme değeri (m) x  $10^{-8}$

Mesnet koşulu	Profil	Model	En büyük toplam yer değiştirme değeri (m) x $10^{-8}$
Ankastre - Ankastre	IPE220	I	2,5894
		II	2,6473
		III	2,6117
		IV	2,5941
	IPE300	V	2,1664
		VI	2,2804
		VII	2,2127
		VIII	2,1751
Ankastre - Basit	IPE220	I	2,7910
		II	2,8180
		III	2,8165
		IV	2,7960
	IPE300	V	2,3532
		VI	2,4161
		VII	2,3853
		VIII	2,3577
Ankastre - Serbest	IPE220	I	306,400
		II	310,680
		III	307,710
		IV	306,480
	IPE300	V	166,610
		VI	172,280
		VII	168,220
		VIII	166,810

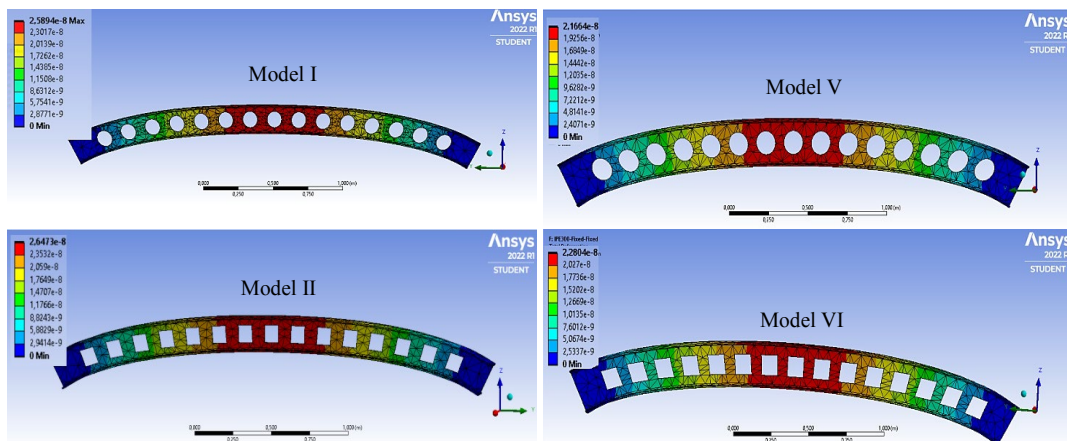
Elde edilen sonuçlar Ankastre – Ankastre sınır koşulu için Şekil 3'te gösterilmiş olup, diğer sınır koşulları için liste halinde Çizelge 4'te verilmiştir. Şekil 3 ve Çizelge 4 incelendiğinde tüm mesnet koşullarında, eğri eksenli petek kirişte en büyük yer değiştirmeler kare boşluk durumunda oluşmakta olup, en küçük toplam yer değiştirmeler ise dairesel boşluk kullanıldığı zaman meydana gelmektedir. Altıgen boşluk geometrisi kullanıldığında ise, toplam deplasman değerleri

daireysel boşluklu eğri eksenli petek kirişlerin sonuçlarına yaklaşmaktadır.

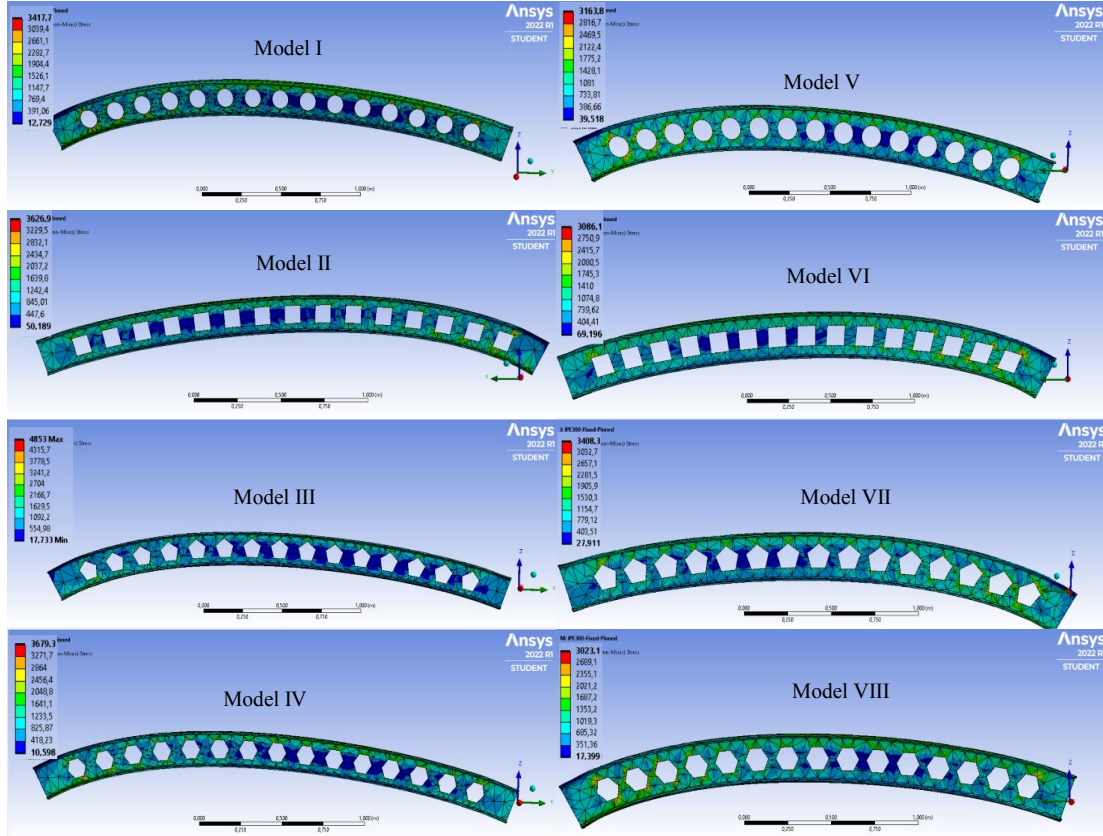
Çalışma kapsamında ele alınan tüm modeller için yapılan statik analiz sonucunda elde edilen von Mises gerilme değerleri ise Ankastre – Basit mesnet sınır koşulu için Şekil 4'te verilmiş olup, diğer tüm sınır şartları için hesaplanan minimum ve maksimum von Mises gerilme değerleri tablo halinde Çizelge 5'te incelemeye sunulmuştur.

**Çizelge 5.** von Mises Gerilme değerleri (Pa)

Mesnet koşulu	Profil	Model	En büyük gerilme değerleri	En küçük gerilme değerleri
Ankastre - Ankastre	IPE220	I	3551,9	3,6361
		II	3959,5	34,425
		III	4233,9	20,137
		IV	4153,2	8,2929
	IPE300	V	3250,8	15,025
		VI	3315,5	41,737
		VII	3549,1	15,525
		VIII	3122,7	27,206
Ankastre - Basit	IPE220	I	3417,7	12,729
		II	3626,9	50,189
		III	4853,0	17,733
		IV	3679,3	10,598
	IPE300	V	3163,8	39,518
		VI	3086,1	69,196
		VII	3408,3	27,911
		VIII	3023,1	17,399
Ankastre - Serbest	IPE220	I	26189	0,35321
		II	26255	1,2285
		III	30940	1,3505
		IV	30676	0,64518
	IPE300	V	24810	2,4311
		VI	25582	2,8404
		VII	27956	1,5756
		VIII	21549	1,5098



**Şekil 3.** Ankastre – Ankastre mesnetli eğri eksenli petek kirişleri için toplam deplasman değerleri



Şekil 4. Ankastre – Basit mesnetli eğri eksenli petek kirişleri için von-Mises gerilme değerleri

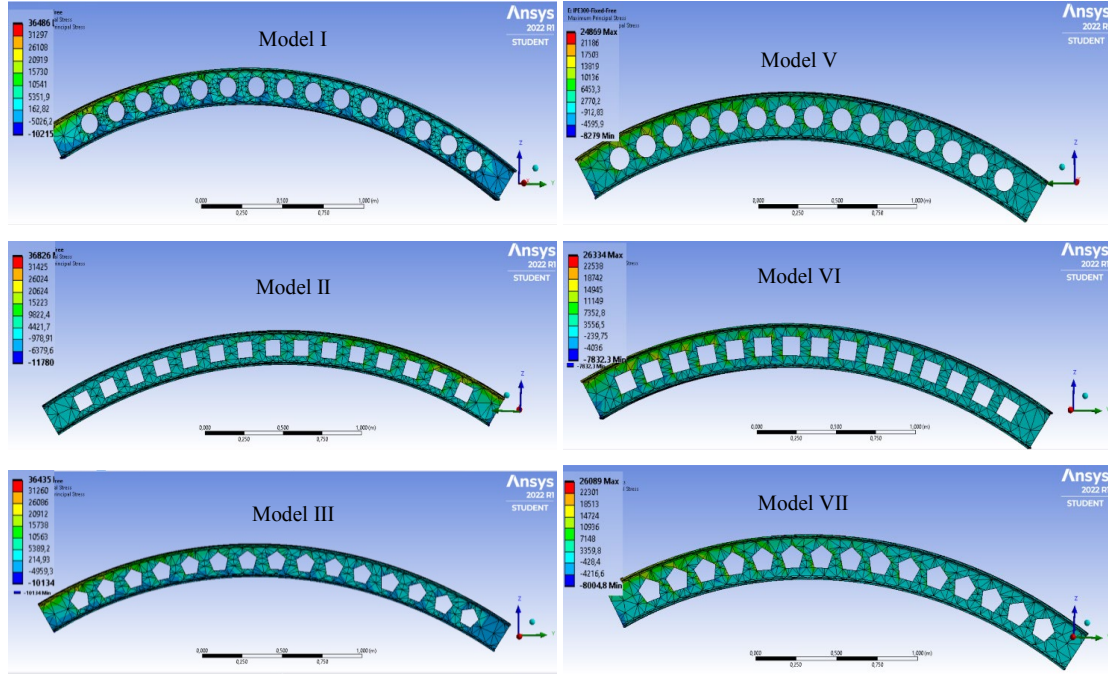
Şekil 4 ve Çizelge 5’te görüldüğü gibi IPE220 profili için en düşük von-Mises gerilme değerleri dairesel boşluk kullanıldığında meydana gelmektedir. IPE300 profili için ise, bu değerler altıgen boşluk kullanıldığında en küçük değerleri almaktadır.

Her iki profil için de beşgen boşluk tipi kullanıldığında von-Mises gerilmeleri en büyük değerleri almaktadır.

Gövde boşluk geometrisinin eğri eksenli petek kirişlerin statik davranışına etkisinin daha iyi bir şekilde belirlenebilmesi için maksimum asal gerilme değerleri elde edilmiştir. Konsol kiriş için bu değerler Şekil 5’te verilmiştir. Ele alınan tüm mesnet koşulları için bu değerler Çizelge 6’da sunulmuştur.

Çizelge 6. Maksimum asal gerilme değerleri (Pa)

Mesnet koşulu	Profil	Model	En büyük gerilme	En küçük gerilme
Ankastre - Ankastre	IPE220	I	2059,6	-878,39
		II	2010,1	-941,91
		III	1917,2	-885,05
		IV	1644,8	-928,8
	IPE300	V	2644,2	-828,15
		VI	2159	-766,76
		VII	2880,4	-832,03
		VIII	2197,8	-833,77
Ankastre - Basit	IPE220	I	1580,8	-939,37
		II	1413,7	-925,28
		III	1467,9	-829,5
		IV	1276,3	-893,92
	IPE300	V	36486	-10215
		VI	1837,9	-770,39
		VII	2461,1	-821,05
		VIII	1888,6	-838,1



Şekil 5. Ankastre – Serbest mesnetli eğri eksenli petek kirişleri için maksimum asal gerilme değerleri

Çizelge 6 ve Şekil 5 incelendiğinde, Ankastre – Ankastre ve Ankastre – Basit mesnet durumlarında IPE200 profili için maksimum asal gerilme değerleri gövdesinde altıgen boşluk olan eğri eksenli petek kirişlerinde en düşük değerleri almaktadır. IPE 300 profili için ise en küçük maksimum asal gerilme değerleri kare tipi boşluk kullanıldığında oluşmaktadır. Konsol kiriş durumunda, en küçük maksimum asal gerilme IPE200 profili için beşgen ve IPE300 profili için dairesel boşluk kullanıldığında oluşmaktadır.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, boşluk tipinin eğri eksenli petek kirişlerin statik davranışına etkisi teorik olarak araştırılmıştır. Analizlerde sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS Workbench programı kullanılmıştır. Ele alınan yapı elemanlarının üç boyutlu sonlu elemanlar modelleri kurulmuştur. Dairesel, kare, beşgen ve altıgen olmak üzere dört adet farklı boşluk tipi kullanılmıştır. IPE200 ve IPE300 profillerinden yapılmış olan daire eksenli petek kirişlerin statik analizi gerçekleştirmek için

ankastre – ankastre, ankastre – basit, ve ankastre – serbest sınır koşulları kullanılmıştır. Çalışmanın önemli sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

Maksimum toplam yer değiştirme değerleri kare boşluklu eğri eksenli petek kirişlerinde oluşurken, en küçük toplam yer değiştirme değerleri dairesel boşluk tipi kullanıldığında meydana gelmektedir. Gövdesinde altıgen boşluk bulunan petek kirişlerin toplam yer değiştirme değerleri dairesel boşluklu duruma yaklaşmaktadır. Beklendiği gibi en büyük toplam yer değiştirmeler ankastre–serbest durumunda oluşmuştur. Von-Mises ve maksimum asal gerilme değerlerine, boşluk tipinin yanı sıra profil tipi ve mesnet koşulları da etki etmektedir. IPE220 ve IPE300 profilleri için en büyük von-Mises gerilme değerleri beşgen boşluk kullanıldığında meydana gelmektedir. IPE 220 profili için maksimum asal gerilme değerleri, gövdesinde dairesel boşluk olan eğri eksenli petek kirişlerinde en büyük değerleri almaktadır. IPE 300 profili için ise en büyük maksimum asal gerilme değerleri beşgen tipi boşluk kullanıldığında oluşmaktadır.

## 5. KAYNAKLAR

1. Jiang, L.Y., Liu, M.X., Kang, L.Q., 2012. Studies on in-Plane Stability Behavior of Arches with Web Openings. *Applied Mechanics and Materials*, 193-194, 1296-1299.
2. Elaiwi, S., Kim, B., Li, L.Y., 2017. Bending Analysis of Continuous Castellated Beams. *The 2017 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM17)*, IIsan (Seoul), Korea, 28 August- 1 September 2017.
3. Pandya, S., Dhankot, M., 2017. FE Analysis of Curved Castellated Girder for Variable Thermal Condition. *International Conference on Research and Innovations in Science, Engineering and Technology*. Kalpa Publications in Civil Engineering, 1, 192-197.
4. Zaher, O.F., Yossef, N.M., El-Boghdadi, M.H., Dabaon, M.A., 2018. Structural Behaviour of Arched Steel Beams with Cellular Openings. *Journal of Constructional Steel Research*, 148, 756-767.
5. Oliveira, J.P., De, Cardoso, D.C.T., Sotelino, E.D., 2019. Elastic Flexural Local Buckling of Litzka Castellated Beams: Explicit Equations and FE Parametric Study. *Engineering Structures*, 186, 436-445.
6. Chang, S., Yang, M., Tian, L., Yuan, P., 2020. Bending Behavior of Steel Octagon-Web Beam. *Advances in Structural Engineering*, 23(12), 2694-2708.
7. Jia, L.G., Bi, R., Lang, Y.X., Li, X.F., 2020. Experimental Study and Theoretical Analysis on Seismic Performance of Castellated Beam with Hexagonal Holes. *Advanced Steel Construction*, 16(3), 233-245.
8. Mehetre, A.J., Talikoti, R.S., 2020. Effect of Fillet Radii on Moment Carrying Capacity of Sinusoidal Web Opening Castellated Steel Beams in Comparison with Hexagonal Web Openings. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44(1), 151-161.
9. Morkhade, S.G., Lokhande, R.S., Gund, U.D., Divate, A.B., Deosarkar, S.S., Chavan, M.U., 2020. Structural Behaviour of Castellated Steel Beams with Reinforced Web Openings. *Asian Journal of Civil Engineering*, 21(6), 1067-1078.
10. Waryosh, W.A., Ali, A.S., 2020. Effects of Web Opening Size on the Behavior of Castellated Concrete Geopolymer Composite Beam. *International Journal of Latest Engineering Research and Applications (IJLERA)*, ISSN: 2455-7137, 05(05), 17-28.
11. Rajana, K., Tsavdaridis, K.D., Koltsakis, E., 2020. Elastic and Inelastic Buckling of Steel Cellular Beams under Strong-Axis Bending. *Thin-Walled Structures*, 156, 106955.
12. Xi, K., Zhang, Y., 2020. Design Method of Compression-Bending Arches with Web Openings Considering Local Buckling of Web. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 1676(1), 012116.
13. Abu-Sena, A.B.B., Fares, M.W., El-Tobgy, H.H., 2021. Experimental and Numerical Investigation of the Behavior of Castellated Steel Beam-Columns. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 10(4), ISSN: 2277-8616.
14. Al-Mawashee, H.S., Al-Kannoon, M.A.A., 2021. Flexural Strength of Castellated Beams with Corrugated Webs. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 1973(1), 012213.
15. Anbarasu, M., Pandey, A.K.P.K., Patton, M.L., Carvalho, H., 2021. Testing and Modelling of Hot-Rolled Steel Castellated Hollow Tubular Beams. *Structures*, 34, 4025-4040.
16. Barkiah, I., Darmawan, A.R., 2021. Comparative Analysis of the Flexural Capacity of Conventional Steel Beams with Castellated Beams. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 780(1), 012013.
17. Braga, J.J., Linhares, D.A., Cardoso, D.C., Sotelino, E.D., 2021. Failure Mode and Strength Prediction of Laterally Braced Litzka-Type Castellated Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 184, 106796.
18. Doori, S., Noori, A.R., 2021. Finite Element Approach for the Bending Analysis of Castellated Steel Beams with Various Web Openings. *ALKU Journal of Science*, 3(2), 38-49, ISSN: 2667-7814.

19. Pandey, D., Rathour, T.S., 2021. Numerical Analysis and Validation with Experimental Method of Castellated Steel Beams with Hexagonal Web Opening. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 4(3), 66-69.
20. Singh, S., 2021. Static Bending Analysis of Arbitrary Supported Steel Beams with Circular Web Opening Using Finite Element Method. *Materials Today: Proceedings*, 37, 3700-3705.
21. Subramanian, R., Jagadeesan, K., 2021. Experimental Analysis and Study on Shear Performances of Castellated Beam Chassis under Three Cases of Stiffener. *Journal of Engineering Research*, DOI:10.36909/jer.11907.
22. Weidlich, C.M., Sotelino, E.D., Cardoso, D.C., 2021. An Application of the Direct Strength Method to the Design of Castellated Beams Subject to Flexure. *Engineering Structures*, 243, 112646.
23. Nabil, A., Afefy, H.M., Kassem, N.M., 2022. Ultimate Capacity of Reinforced Concrete Castellated Beams Subjected to External Pre-Stressing. *Engineering Structures*, 250, 113471.
24. ANSYS, Inc Release Ansys 2022 R2, Canonsburg, PA, 2022.
25. Mechanical APDL Element Reference, 2013, Inc., 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317.





## Optimization of Nd:YAG Laser Welding Factors of Cold Rolled Strenx 700 CR Steel by Taguchi Method

Oğuz TUNCEL\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-6886-6367  
Hakan AYDIN<sup>2</sup> ORCID 0000-0001-7364-6281

<sup>1</sup>Siirt University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Siirt, Türkiye

<sup>2</sup>Bursa Uludag University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Bursa, Türkiye

Geliş tarihi: 09.01.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: TUNCEL, O., AYDIN, H., (2023). Optimization of Nd:YAG Laser Welding Factors of Cold Rolled Strenx 700 CR Steel by Taguchi Method. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(1), 85-92.

### Abstract

In this study, cold rolled Strenx 700 CR steel with a minimum yield strength of 700 MPa, which is typically used in load bearing structures to produce stronger and lighter structures, is butt welded with Nd:YAG laser welding. The effect of welding factors on tensile strength is investigated by using laser power rate (20%, 40% and 60%), pulse duration (2, 4 and 6 ms) and pulse frequency (3, 5 and 7 hz). By using Taguchi L9 orthogonal experimental design, the number of experiments, which should be 27 when full factorial, is reduced to 9 experiments. The tensile strength test results are optimized by the Taguchi method's larger is better control characteristic. The optimum test combination for maximum tensile strength is determined as A3B2C2 (60%-4 ms-5 hz). The effect of the welding factors on the tensile strength results is analyzed using the analysis of variance (ANOVA) method and it is found that the most effective factor is the laser power rate with 84.26%.

**Keywords:** Nd:YAG laser welding, Strenx 700 CR steel, Taguchi method, Optimization, ANOVA

### Soğuk Haddelenmiş Strenx 700 CR Çeliğinin Nd:YAG Lazer Kaynak Faktörlerinin Taguchi Yöntemi ile Optimizasyonu

### Öz

Bu çalışmada, daha güçlü ve hafif yapılar üretmek için tipik olarak yük taşıyıcılarda kullanılan ve minimum 700 MPa akma dayanımına sahip soğuk haddelenmiş Strenx 700 CR çeliği Nd:YAG lazer kaynağı ile alın şeklinde birleştirilmiştir. Birleştirme işlemlerinde; lazer güç oranı (20%, 40% ve 60%), darbe süresi (2, 4 ve 6 ms) ve darbe frekansı (3, 5 ve 7 hz) kullanılarak, kaynak faktörlerinin çekme dayanımına etkisi incelenmiştir. Taguchi L9 ortogonal deney tasarımı kullanılarak tam faktöriyel iken 27 adet olması gereken deney sayısı 9 adet deneye indirgenmiştir. Çekme dayanımı testi sonuçları Taguchi

---

\*Corresponding author (Sorumlu yazar): Oğuz TUNÇEL, oguz.tuncel@siirt.edu.tr

metodunun en büyük-en iyi kontrol karakteristiği ile optimize edilmiştir. Maksimum çekme dayanımı için belirlenen optimum test kombinasyonu, A3B2C2 (60%-4 ms-5 Hz) olarak belirlenmiştir. Çekme dayanımı sonuçlarına, kaynak faktörlerinin etkisi ise varyans analizi (ANOVA) metodu kullanılarak incelenmiş ve en etkin faktör %84.26 ile lazer güç oranı olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Nd:YAG lazer kaynağı, Strenx 700 CR çeliği, Taguchi yöntemi, Optimizasyon, ANOVA

## 1. INTRODUCTION

Steel is one of the most significant structural materials in the world, hence innovations in structural steels have industrial consequences on a global scale. The industry is always trying to decrease weight, increase performance, safety, and production techniques. The usage of ultra-high-strength steels (UHSSs) with good formability and weldability is becoming an increasingly popular method for achieving these goals. The advantages inspire many technical sectors, especially the building and automotive industries, to seek out new applications for steel of greater quality. Structural steels with a high yield strength are known as high strength steels (HSS). Furthermore, steels having a yield strength greater than 700 MPa are regarded as UHSSs [1,2].

The transportation sector is progressing to a new level with an increasing variety of materials. High-strength fine-grain steels are preferred materials for vehicle structural elements because they have higher mechanical qualities than traditional steels [3,4]. The use of new steel grades, including high-strength fine grain steels of the Strenx type, will be dependent on their good weldability. Therefore, the tensile strength of welded joints of such steels is an important research topic.

Nowadays, laser welding is commonly preferred technique due to its obvious advantages in industrial applications, such as high precision, high productivity, high power density, high beam quality, adaptability, and automation adaptability [5,6]. The Neodymium-Doped Yttrium Aluminum Garnet (Nd:YAG) laser is one of the most widely preferred lasers because of its capacity to produce high quality welds at relatively high speed [7]. Due to its high energy density and low heat input,

Nd:YAG laser welding offers the advantage of low deformation and a narrow heat affected zone in welded parts [8,9]. In this welding method, especially the precise control of the welding factors provides great advantages [10].

In manufacturing industries, many optimization methods are used to obtain the most suitable welding factors with the developing technology. One of the most widely used optimization methods for material applications is the Taguchi method. Taguchi method stands out among other optimization methods with its many advantages such as simplicity, applicability and cost-effective solutions [11]. In this study, the Taguchi design of experiments (DOE) approach is used to evaluate the effects of different welding factors such as laser power rate, pulse duration, and pulse frequency on the tensile strength of cold rolled Strenx 700 CR steel joined by Nd:YAG laser welding. In addition, Taguchi optimization is used to identify the optimal welding factors. Significance levels of the welding factors are also obtained using analysis of variance (ANOVA). In the conclusion section of the paper, suggestions for future studies are made based on the findings obtained.

## 2. MATERIAL AND METHOD

### 2.1. Material

In this research, cold-rolled Strenx 700 CR structural steel is used for welding production. The utilized steel sheet has a thickness of 1.2 mm and is commercially available. The tensile test results and chemical composition of the Strenx 700 CR material are detailed in Table 1. Moreover, the carbon equivalent of the steel utilized is presented in Table 1 as 0.41.

**Table 1.** Tensile test results chemical composition of Strenx 700 CR steel (% wt.)

Tensile test	Yield strength Rp0.2 [MPa]		Tensile strength Rm [MPa]		Elongation A <sub>80</sub> [%]	
	836		1142		11.5	
Chemical composition	C	Si	Mn	P	S	Cr
	0.151	0.19	1.52	0.01	0.002	0.02
	Ni	V	Cu	Al	C <sub>ekv.</sub>	Fe
	0.04	0.02	0.01	0.047	0.41	Balance

## 2.2. Method

### 2.2.1. Weld Sample Preparation

Commercially supplied large-sized sheets are laser cut into 100 mm x 220 mm pieces as part of the laser welding sample preparation studies. To achieve quality welding, it is crucial to connect these specimens to be butt-welded tightly before welding. For this purpose, we manufactured a specimen-fixing apparatus. Before welding, the plates are also cleaned to eliminate any potential surface contamination.

### 2.2.2. Laser Welding System

Laser welding studies are performed with the Sisma SWA 300 brand Nd:YAG laser device, the technical details of which are listed in Table 2. The assembly of laser welded joints is butt-joint type. During laser welding, argon shielding gas is utilized. The flow rate of argon gas is 4 lt/min. Laser focal length is 120 mm above the surface of the sheet. And the butt welding operations are carried out on both sides of the prepared specimens.

**Table 2.** Specifications of the laser welding system used in this study

Sisma SWA 300 Welding machine	
Average power	300 W
Maximum power	12 kW
Impact energy	150 J
Pulse frequency	0-100 Hz
Pulse duration	0.3-25 ms
Beam diameter	0.6-2 mm

### 2.2.3. Taguchi Method

In this study, the Taguchi approach is used to optimize the factors (laser power rate, pulse

duration, and pulse frequency) that influence the tensile strength properties of laser-welded joints. Minitab 20.3 statistical software program is used for optimization and analysis studies [12]. As the number of factors influencing the tensile strength properties increases, the number of necessary tests also rises. This increases costs and complicates the application process. In conclusion, the Taguchi approach is applied, which is effective in scenarios involving multiple factors where decisions must be made. In this procedure, an orthogonal array is selected based on the total degrees of freedom (Total DoF) calculated by adding the DoF values for each factor [13,14].

In this study, 3 levels are selected for each of the 3 factor values. The total DoF value for each factor is obtained by subtracting 1 from the levels of the factors. There are 6 total DoFs for 3 levels of 3 factor values (see Table 3). The numbering of the samples indicating the levels of welding factors and the experimental design selected using Taguchi L9 orthogonal array are given in Table 4. Experimental results are converted to signal-to-noise (S/N) ratio in the Taguchi method. In data analysis, the S/N ratio is used to allow control of the response and reduce the variability associated with the response. In the Taguchi method, the S/N ratio has three performance criteria: minimum (smaller-the-better), maximum (larger-the-better) and average (nominal-the-best). In this study, objective functions are defined for maximum tensile strength. Equation 1 is used for maximum performance values [15-17].

$$\frac{S}{N_{max}} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

Where n is the number of tests and y<sub>i</sub> is the number of observed experimental data for the performance characteristics.

**Table 3.** Welding factors and levels used in the study

Factors	Unit	DoF	Level 1	Level 3	Level 3
A-Laser power rate	%	2	20	40	60
B-Pulse duration	ms	2	2	4	6
C-Pulse frequency	Hz	2	3	5	7
Total DoF	---	6	---	---	---

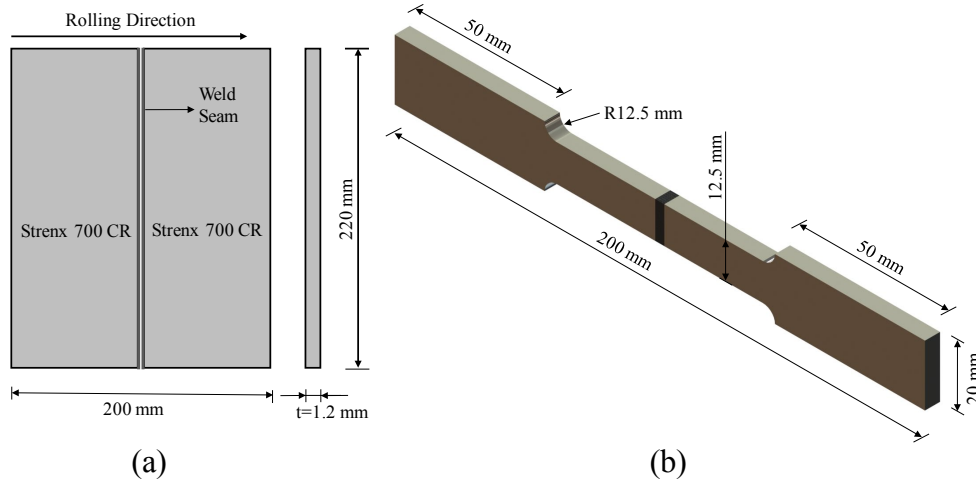
A2B1C2	4	40	2	5
A2B2C3	5	40	4	7
A2B3C1	6	40	6	3
A3B1C3	7	60	2	7
A3B2C1	8	60	4	3
A3B3C2	9	60	6	5

**Table 4.** Taguchi L9 orthogonal experiment design

Orthogonal array	Test number	A-Laser power rate [%]	B-Pulse duration [ms]	C-Pulse frequency [Hz]
A1B1C1	1	20	2	3
A1B2C2	2	20	4	5
A1B3C3	3	20	6	7

**2.2.4. Tensile Test**

Tensile test specimens are prepared perpendicular to the weld direction in accordance with ASTM, E8/E8M standard (see Figure 1). To determine the tensile strength of the welded specimens, tensile tests are performed on a computer-controlled UTEST-7014 tensile-compression testing machine at room temperature and a constant crosshead displacement speed of 5 mm/min. In order to ensure the accuracy of the tensile test results, the data at each level are obtained by averaging five test results. Standard deviations are also provided.



**Figure 1.** (a) Schematic representation of laser welded sheets, (b) Tensile specimen produced in accordance with the specifications (ASTM, E8/E8M)[18]

**3. RESULTS AND DISCUSSION**

**3.1. Tensile Test Results**

The tensile strength values obtained as a result of the experiments performed according to the experimental setup created within the scope of the Taguchi L9 orthogonal series are converted into S/N ratio and expressed in decibels (dB) by using

the Taguchi method [19]. Tensile strength and S/N ratios are given in Table 5. The aim of this study is to obtain the highest tensile strength values. The specimen with the highest tensile strength among all specimens is A3B2C1 with 953.33 MPa. The laser power rate is 60%, the pulse duration is 4 ms, and the pulse frequency is 3 hz for this specimen's welding.

**Table 5.** Tensile strength values with the calculated S/N ratios of the welded joints

Orthogonal array	Tensile strength [MPa]	Standard deviation	S/N Rate
A1B1C1	628.0	32.36	55.9592
A1B2C2	764.0	23.05	57.6619
A1B3C3	740.67	29.7	57.3925
A2B1C2	859.5	10.5	58.6849
A2B2C3	910.67	35.39	59.1872
A2B3C1	939.5	31.67	59.4579
A3B1C3	892.5	9.98	59.0122
A3B2C1	953.33	38.42	59.5849
A3B3C2	948.25	13	59.5385

**3.2. Optimization of Results with Taguchi Method**

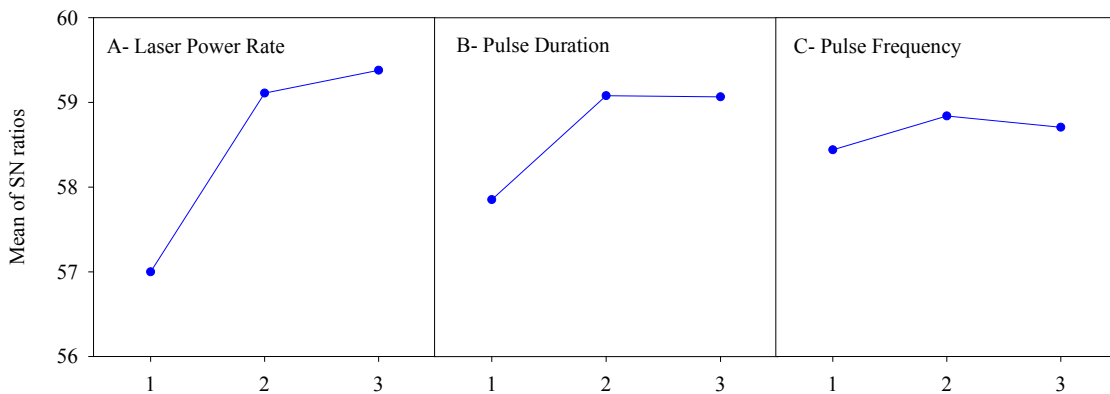
The table showing the change of S/N ratio of tensile strength according to "Larger is better" is given in Table 6. In addition, the results of the control factors mentioned in Table 6 are presented graphically in Figure 2. The best value for any

factor is found based on the highest S/N ratio obtained among all levels of that factor. According to the graphical representation of the S/N ratios shown in Table 6, the optimum test combination determined for maximum strength is A3B2C2. This result shows that optimum tensile strength is achieved for high values of laser power ratio and medium values of pulse duration and frequency. According to the delta values, the order of the effects of the parameters on the tensile strength is 1, 2 and 3.

**Table 6.** Response table for the S/N ratios for the tensile strength (Larger is better).

Level	A-Laser power rate	B-Pulse duration	C-Pulse frequency
1	57.00	57.89	58.33
2	59.11	58.81*	58.63*
3	59.38*	58.80	58.53
Delta	2.37	0.93	0.29
Rank	1	2	3

\*Optimum level



**Figure 2.** S/N ratio graph of control factors for tensile strength

**3.3. Evaluation of Factors with ANOVA**

ANOVA statistical methods are used to analyze and interpret the data obtained in the experimental studies and to make decisions on the results. ANOVA analysis is a statistical method that allows to examine the interaction of independent

variables with each other and defines the difference between them [20]. In this study, since the effects of three factors on one variable are examined, the One-Way ANOVA method is preferred. Variance tables for tensile strength are shown in Table 7. The percentages of the laser welding factors affecting the tensile strength are

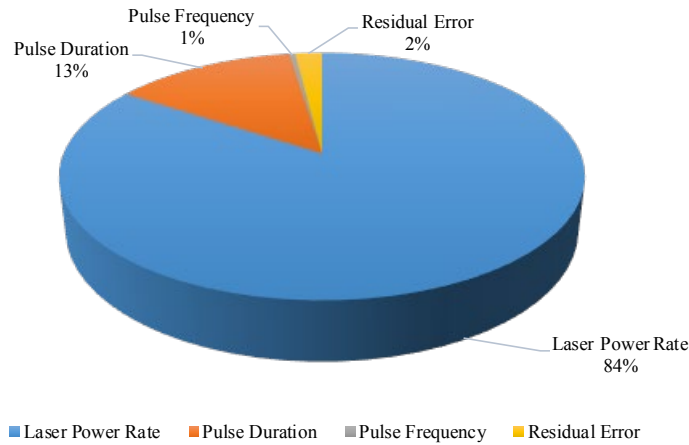
given in the same table. The percentage contribution of the welding factors is also shown graphically in Figure 3.

ANOVA determines the ratio between the regression mean square and the mean square error and is called the F ratio or variance ratio. This ratio is also a factor due to the error term and a ratio due to the effect of variance. If the calculated value of the F ratio is high, the factor is significant at the desired level. In general, when the F value

increases, the importance of the particular factor and its contribution the percentage also increases [21]. When the effect of welding factors is analyzed through ANOVA results, it is observed that the most effective welding factor on tensile strength is the average power rate with a rate of 84.26%. It is noticeable that the effect of pulse duration is around 13%. Compared to other factors, pulse frequency has the lowest effect on tensile strength with 0.823%. The residual error rate is found to be 1.97% as well.

**Table 7.** Analysis of variance (ANOVA) results for tensile strength S/N ratios

Source	(DoF)	Adj SS	Adj MS	F-Value	Contribution [%]
A-Laser power rate	2	86391	43195.4	42.87	84.26
B-Pulse duration	2	13691	6845.4	6.79	13.35
C-Pulse frequency	2	433	216.7	0.22	0.42
Residual error	2	2015	1007.6	---	1.97
Total	8	102530	---	---	100



**Figure 3.** Effect of factors on tensile strength as a percentage

### 3.4. Verification of Experiments

In the experimental study using Taguchi optimization method, optimal results of tensile strength values are obtained. Sometimes these results can be any of the existing experiments, and sometimes they can be the results of an experiment other than the experiments performed [22]. In this study, a different optimum result is found from the experiments performed. The optimum result for tensile strength is reached in A3B3C2

experimental conditions different from the existing experiments. In this direction, the values obtained as a result of the calculations, where the optimal conditions are estimated, and the tensile strength values obtained as a result of the verification tests are presented in Table 8. The results obtained from the validation experiment reflect the success of the optimization. The tensile strength obtained as a result of the verification tests is measured as 969.33 MPa. Thus, an improvement of 1.68% is achieved at the end of optimization compared to

the tensile strength value obtained in the initial experiments (953.33). When the results of the verification experiment are examined, it is seen that the result obtained for the estimated welding factor is sufficient and Taguchi optimization is successfully applied.

**Table 8.** Optimum results and validation experiment results

Optimum level: A3B2C2	Predicted value [MPa]	Experimental result [MPa]
	967.628	969.33
Prediction error [%]	0.18	

#### 4. CONCLUSIONS

In this study on the optimization of the tensile strength of 1.2 mm thick Strenx 700 CR sheets joined by Nd:YAG laser welding using the Taguchi method, the following results are obtained as a result of the experiments performed.

- In the experimental studies, Taguchi L9 experimental design and optimization is successfully applied for the Nd:YAG laser welding process of Strenx 700 CR sheets.
- The best tensile strength value (969.33 MPa) is achieved at 60% laser power rate, 4 ms pulse duration and 5 hz frequency value.
- According to the ANOVA results, it is determined that the most effective factor on the tensile strength value is the laser power rate with a rate of 84.26%, the pulse duration is the second effective factor with a rate of 13.35%, and finally the factor with a much lower effect than the others is the pulse frequency with a rate of 0.42%.
- After Nd:YAG laser welding performed under optimum conditions, the predicted and experimental weld strength values are 967.628 MPa and 969.33 MPa respectively. The prediction error is 0.18%.
- In future studies, higher laser power rates can be tested to check their effects on tensile strength.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Amraei, M., Ahola, A., Afkhami, S., Björk, T., Heidarpour, A., Zhao, X.L., 2019. Effects of Heat Input on the Mechanical Properties of Butt-Welded High and Ultra-High Strength Steels. *Engineering Structures*, 198,1-15.
2. Asal, Ö., 2019. Optimization of Surface Roughness in Turning of AZ31 Magnesium Alloys with Taguchi Method., 6(1), 25–32.
3. ASTM-E8/E8M 2009. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International.
4. Ayer, Ö., 2019. Kalıp Parametrelerinin Ekstrüzyon Kuvveti Üzerine Etkisinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(2), 633640.
5. Baghjari, S.H., Akbari Mousavi, S.A.A., 2013. Effects of Pulsed Nd:YAG Laser Welding Parameters and Subsequent Post-Weld Heat Treatment on Microstructure and Hardness of AISI 420 Stainless Steel. *Materials & Design*, 43, 1–9.
6. Chen, H., Pinkerton, A.J., Li, L., Liu, Z., Mistry, A.T., 2011. Gap-Free Fibre Laser Welding of Zn-Coated Steel on Al Alloy For Light-Weight Automotive Applications. *Materials and Design*, 32(2), 495–504.
7. Fernandes, F.A.O., Oliveira, D.F., Pereira, A.B., 2017. Optimal Parameters for Laser Welding of Advanced High-Strength Steels Used in the Automotive Industry. *Procedia Manufacturing*, 13, 219–226.
8. Gnanasekaran, S., Kumar, S.S., Venugopal, N., Upadhyaya, M., Manjunath, T.C., Chelladurai, S.J.S., Padmanaban, G., 2020. Effect of Laser Power on Microstructure and Tensile Properties of Pulsed Nd:YAG Laser Beam Welded AISI 301 Austenitic Stainless Steel Joints. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 934–939.
9. Gundogdu Ceylan, Y., Gunduz, T., Atici Ulusu, H., 2021. Polymer Raw Material Mixture Optimization with Taguchi Method. *Journal of Industrial Engineering*, 32(2), 164–176.
10. Iordachescu, D., Blasco, M., Lopez, R., Cuesta, A., Iordachescu, M., Ocaña, J.L., 2011.

- Development of Robotized Laser Welding Applications for Joining Thin Sheets. *Optirob, Mai (Optirob)*, 26–28.
11. Kekik, M., Aslanlar, S., Apay, S., 2021. AHSS Sacların Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9, 702–711.
  12. Meral, G., Sarıkaya, M., Dilipak, H., 2011. Delme İşlemlerinde Kesme Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu. *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(4), 332–338.
  13. Minitab 2020. Getting Started with Minitab Statistical Software. 1–62.
  14. Patel, N.S., Parihar, P.L., Makwana, J.S., 2021. Parametric Optimization to Improve the Machining Process by Using Taguchi Method: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 47, 2709–2714.
  15. Sivarajan, S., Padmanabhan, R. 2021. Formability Enhancement of High Strength Steel Using Modification of Contact with Friction Conditions. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 7(2), 227–240.
  16. Sun, Q., Di, H.S., Li, J.C., Wang, X.N., 2016. Effect of Pulse Frequency on Microstructure and Properties of Welded Joints for Dual Phase Steel by Pulsed Laser Welding. *Materials and Design*, 105, 201–211.
  17. Taguchi, G., 1990. Introduction to Quality Engineering. Asian Productivity Organization, Tokyo.
  18. Türkan, B., Etemoğlu, A.B., 2020. Optimization of Parameters Effecting Food Drying Using Taguchi Method. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(4), 654–665.
  19. Ulewicz, R., Szataniak, P., 2016. Fatigue Cracks of Strenx Steel. *Materials Today: Proceedings*, 3(4), 1195–1198.
  20. Ulewicz, R., Szataniak, P., Novy, F., Trsko, L., Bokuvka, O., 2017. Fatigue Characteristics of Structural Steels in the Gigacycle Region of Loading. *Materials Today: Proceedings*, 4(5), 5979–5984.
  21. Yıldırım, M.S., Kaya, Y., Çakıroğlu, R., Gülenç, B., Kahraman, N., Durgutlu, A., 2018. Nokta Direnç Kaynağı ile Birleştirilen Titanyum Levhaların Çekme-Makaslama Dayanımlarının Taguchi Metoduyla Optimizasyonu. *Journal of Polytechnic*, 0900(3), 567–573.
  22. Yurdakul, M., Güneş, S., İç, Y.T., 2016. Improvement of the Surface Quality in the Honing Process Using Taguchi Method. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(2), 347–360.



## Atmosferik Afetlerin Sentinel-2 ile İncelenmesi: Antalya İli 13.11.2017 Hortum Olayı ve Uzaktan Algılama Yaklaşımı ile Hasar Tespiti

Şerife Pınar GÜVEL\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-3175-5938  
Mehmet Ali AKGÜL<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-5517-9576

<sup>1</sup>DSİ Genel Müdürlüğü, 6. Bölge Müdürlüğü, Adana

Geliş tarihi: 03.01.2023 Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: GÜVEL, Ş.P., AKGÜL, M.A., (2023). Atmosferik Afetlerin Sentinel-2 ile İncelenmesi: Antalya İli 13.11.2017 Hortum Olayı ve Uzaktan Algılama Yaklaşımı ile Hasar Tespiti. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 93-103.

### Öz

Bu çalışmada, Antalya İli sınırları içerisinde tarımsal alanlarda 13.11.2017 tarihli hortum olayından dolayı oluşan hasarların Sentinel-2 verisiyle değerlendirilmesi yapılarak uydu tabanlı uzaktan algılama yaklaşımının afet yönetiminde kullanılabilirliği ve sağladığı katkılar irdelenmektedir. Çalışmada, Spektral Açık Farkı (Spectral Angle Difference) yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada, hortum olayı öncesi 11.11.2017 ve olay sonrası 21.11.2017 tarihli görüntüler arasında değişim analizi yapılarak, Kumluca İlçesinde, hortumdan kısmen veya tamamen etkilenen 68 adet parsel ve 49.75 ha toplam tarımsal alan bulunduğu belirlenmiştir. Su hortumunun karaya çıktıktan sonra izlediği yörünge başarılı biçimde belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hortum, Uzaktan algılama, Hasar tespiti, Atmosferik afetler

### Investigation of Atmospheric Disasters with Sentinel-2: Antalya Province 13.11.2017 Waterspout Event and Damage Estimation by Remote Sensing

#### Abstract

In this study, the usability of the satellite-based remote sensing approach in disaster management and its contributions are examined by evaluating the damages caused by the waterspout event on 13.11.2017 in agricultural areas within the borders of Antalya Province by using Sentinel-2 data. In the study, the Spectral Angle Difference method was used. In this study, it was determined that there are 68 parcels and a total agricultural area of 49.75 ha in Kumluca District that were partially or completely affected by the waterspout by analyzing the changes between the images dated 11.11.2017 before the waterspout and 21.11.2017 after the event, The path of waterspout after the landfall was determined successfully.

**Keywords:** Waterspout, Remote sensing, Damage estimation, Atmospheric disasters

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Şerife Pınar GÜVEL, [spinar.guvel@dsi.gov.tr](mailto:spinar.guvel@dsi.gov.tr)

## 1. GİRİŞ

Doğal afetlerin aniden meydana gelmesi ve canlılar üzerindeki yıkıcı etkileri, afetlere karşı önleyici ve korunma tedbirlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Afet yönetimi temel olarak; hazırlık, müdahale ve kurtarma aşamalarından oluşmaktadır ve veri toplama, arşivleme ve analiz, etkin afet yönetimi için esas oluşturmaktadır [1]. Afetlerin etkin yönetiminde, insanlarda farkındalık bilincinin oluşturulması, risk ve tehlike analizlerinin yapılması afet öncesi hazırlık planlamalarında önemli aşamalar arasındadır [2]. Afet yönetimi faaliyetleri, afet olaylarında can ve mal kaybının önlenmesi için gerçekleştirilen risklerin değerlendirilmesi ve planlama faaliyetlerinin yanı sıra, afet olayları anında ve sonrasında oluşan hasarların tespitinde ve kurtarma faaliyetlerinde hızlı ve güvenli müdahaleyi gerektiren, zaman planlamasının büyük öneme sahip olduğu çalışmaları da kapsamaktadır. Dünyanın birçok bölgesinde, doğal afetlerle karşılaşan veya risk altında bulunan ülkelerde, afet olayları teknik, ekonomik veya sosyal boyutlarıyla irdelenmektedir [3-5].

Uzaktan algılama, geniş alanlarda kısa zaman aralıklarında bilgi sunması özelliği ile afet yönetimi için etkin bir araçtır [6]. Son yıllarda bilişim teknolojilerinin afet yönetiminde etkin bir rol kazanması nedeniyle, meteorolojik afetlerin incelenmesinde, afetler sonrasında hasar tespitinin kara ölçümleri ve yersel gözlemlerin yanı sıra uydu ve radar görüntüleri ile değerlendirilmesi, uzaktan algılama yaklaşımının önemini ortaya koymaktadır. Geçmiş yıllarda, uzaktan algılama teknikleri ile büyük ölçekli fırtınalar, tayfun, hortum ve kasırgaların [7-8], kentsel, nehir ve kıyı taşkınlarının [9], tsunami [10-12] ve kuraklık afetinin [13-15], don olaylarının [16], yangınların [17] ve dolu olaylarının [18], gerçekleşme nedenleri, oluşumları veya etki alanlarının incelenmesi gibi konular çeşitli bilimsel çalışmalara konu olmuştur.

Hortum olayları, dünyanın farklı ülkelerinde, örneğin Brezilya [19-20], Türkiye [21], Japonya

[22], Yunanistan [23], Amerika Birleşik Devletleri [24], Avustralya [25], Çin [26], Hırvatistan [27] bilimsel olarak incelenmiştir. Lambropoulou ve Antoniou (2016) tarafından yapılan çalışmada bir doğa olayı olarak tornadoların (hortumların) oluşma süreçleri dinamikleri ile anlatılmıştır [28]. Türkiye’de de Muğla ili Sarıgerme köyünde 2013 yılında [29], Adana İli Karataş’ta 2017 yılında [30], Ankara İli Çubuk İlçesinde Sönlü Köyü çevresinde 2004 yılında [31], Bodrum’da 2018 yılında [32] gerçekleşen hortum olayları bilimsel araştırmalarla değerlendirilmiştir. Türkeş (2021) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye’de meydana gelen hortum olaylarının alansal dağılım deseni verilmiştir [33]. İklim değişiminin etkisi ile ekstrem yağışlar, sıcak hava dalgaları, hortumlar gibi şiddetli hava olaylarının şiddet süre ve frekanslarında artışlar görülmesi beklenmektedir [34-36].

Uzaktan algılama, hortum olaylarının neden olduğu hasarların olay sonrası incelemelerinde ve yeniden yapılanma çalışmalarında değerli bilgiler sağlayabilmektedir [24]. Burow ve arkadaşları (2020) tarafından yapılan çalışmada, Amerika Birleşik Devletlerinde 3 Mart 2019 tarihli hortum afetleri için Sentinel-2 görüntüleri kullanılarak NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) bitki örtüsü indeksi ile hasar değerlendirmesi yapılmıştır; Sentinel-2 MSI’daki gibi 10 m çözünürlüklü görüntülerin bitki örtüsüyle kaplı alanlarda hortumlardan kaynaklanan hasarın belirlenmesinde yeni bir yaklaşım olarak kullanılabileceği değerlendirilmiştir [24].

Antalya İli ve çevresinde daha önceki yıllarda gerçekleşen hortum olayları, hem afetlere karşı korunma hem de afet sonrası hasarların tespit edilerek iyileştirme çalışmalarının yapılması bakımından afet yönetim faaliyetlerinde araştırma önceliği taşıyan önemli konular arasındadır. Bu çalışmada, Antalya’da 13.11.2017 tarihinde meydana gelen hortum olayının tarımsal alanlar üzerinde neden olduğu hasarlar ve etkileri Sentinel-2 görüntüleri ile irdelenmekte ve uzaktan algılama yaklaşımının afet yönetiminde sağladığı katkılar ve kolaylıklar değerlendirilmektedir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Materyal

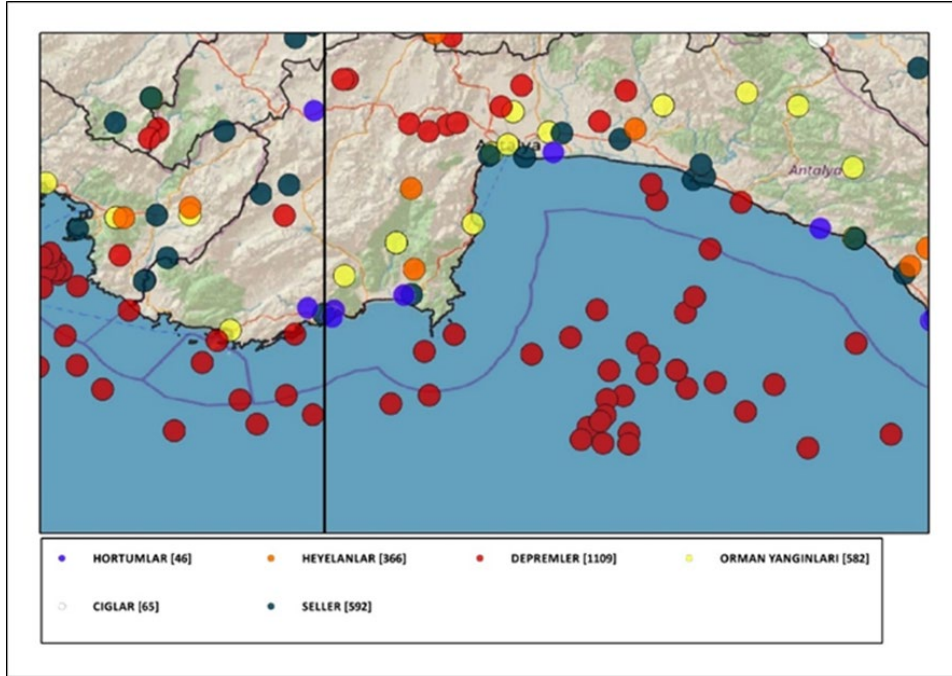
Çalışma alanı olarak seçilen Antalya İlindeki Kumluca İlçesi, Türkiye'nin güneyinde Akdeniz Bölgesinde yer almaktadır (Şekil 1). Meteorolojik Karakterli Doğal Afetler 2017 Yılı Değerlendirmesi [37] raporunda belirtildiği üzere, 2017 yılında Türkiye'de Antalya İli meteorolojik afetlerin en çok görüldüğü iller arasındadır. Denizler üzerinde gelişen hortumların kara üzerinde ilerlemesi, şiddetli rüzgar hızı ve bazı durumlarda yağışlar ile yerleşimler ve canlılar

üzerinde yıkıcı etkiler oluşturabilmektedir. Önceki yıllarda Akdeniz kıyılarında yer alan Antalya İli ve çevresinde bu tür doğa olaylarının görüldüğü bildirilmiştir [38-39]. Kumluca İlçesinde yazları kurak ve sıcak, kış ayları ise yağışlı olarak Akdeniz iklimi görülmektedir.

2017 yılında Türkiye'de meydana gelen meteorolojik afetler içerisinde oransal dağılıma bakıldığında, fırtına ve hortumların %36 oranında olduğu belirtilmektedir [40] (MGM, 2018b). Antalya İli ve çevresi 2010-2017 yılları doğa kaynaklı afet olayları, afet türleri ile birlikte Şekil 2'de verilmektedir [41].



Şekil 1. Çalışma alanı genel konumu



Şekil 2. Antalya İli ve çevresinde 2010- 2017 doğa kaynaklı afet olayları (AFAD, 2018, Türkiye 2010-2017 Doğa kaynaklı afet olayları haritasından)

Sentinel-2 ESA (European Space Agency) tarafından geliştirilmiştir. Sentinel-2 uydusu, geniş alanlı, yüksek çözünürlüklü, multi-spektral görüntüleme özelliğine sahiptir; aynı yörüngede bulunan ikiz uyduların aynı noktayı ziyaret sıklığı 5 gün olarak tasarlanmıştır; 13 spektral banda sahiptir ve şerit genişliği 290 km'dir [42].

Sentinel-2 için uydu bant özellikleri Çizelge 1'de verilmektedir [42]. Sensörler, yeryüzünün yüzeyi üzerindeki nesnelere algılayan ve kaydeden araçlardır. Tasarım ve özel ihtiyaçlara bağlı olarak farklı uydu sistemlerinin farklı türlerde sensörleri olabilir [11].

Çizelge 1. Sentinel-2 uydu görüntüleri bant özellikleri [42]

Bantlar	Bant adı	Dalga boyu (nm)	Bant genişliği (nm)	Çözünürlük (m)
B1	Kıyıları aerosolü	443	20	60
B2	Mavi	490	65	10
B3	Yeşil	560	35	10
B4	Kırmızı	665	30	10
B5	Vejetasyon kırmızı kenar	705	15	20
B6	Vejetasyon kırmızı kenar	740	15	20
B7	Vejetasyon kırmızı kenar	783	20	20
B8	NIR (Yakın Kızıl Ötesi)	842	115	10
B8B	Narrow NIR (Daraltılmış yakın kızıl ötesi)	865	20	20
B9	Su Buharı	945	20	60
B10	SWIR-Cirrus	1375	30	60
B11	SWIR 1	1610	90	20
B2	SWIR 2	2190	180	20

Çalışma için uygun görüntü seçiminde, optik uydu görüntülerinin en önemli sorunlarından biri olan bulutluluk göz önüne alınmıştır. Arşiv taramaları neticesinde olayın olduğu 13.11.2017 tarihinden önce ve sonra olmak üzere en yakın tarihli görüntüler seçilmiştir. Olay öncesi için en uygun görüntünün olaydan iki gün öncesine ait olan 11.11.2017 tarihli, sonrası için ise olaydan üç gün

sonrasına ait olan 16.11.2017 ve olaydan sekiz gün sonrasında ait olan 21.11.2017 tarihli görüntüler uygun bulunmuş olup uydu görüntüleri <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> sitesinden temin edilmiştir (Çizelge 2). Analiz için yıkımın büyüklüğünü daha çok göz önüne seren 21.11.2017 tarihli görüntü kullanılmıştır.

**Çizelge 2.** Bu çalışmada kullanılan görüntü isimleri

No	Görüntü isimleri	Tarih
1	S2B_MSIL1C_20171111T085159_N0206_R107_T36STF_20171111T110647	11.11.2017
2	S2A_MSIL2A_20171116T085231_N0206_R107_T36STF_20171116T123714	16.11.2017
3	S2B_MSIL1C_20171121T085239_N0206_R107_T36STF_20171121T104914	21.11.2017

## 2.2. Metot

Hortumdan etkilenen alanların tespit edilmesinde kullanılacak olan olay öncesi 11.11.2017 ve olay sonrası 21.11.2017 tarihine ait Sentinel-2 uydusu ham görüntülerinin kullanılabilmesi için öncelikle radyometrik ve atmosferik düzeltmelerinin yapılması gerekmektedir. Çalışmamızda bu düzeltmeler ENVI yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Yazılım içerisinde Radyometrik düzeltmeler yapıldıktan sonra atmosferik düzeltmeler için ABD Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı (U.S. Air Force Research Laboratory) işbirliği ile Spectral Sciences Inc. firması tarafından geliştirilmiş olan QUAC (Quick Atmospheric Correction) modülü kullanılmıştır [43].

Radyometrik ve atmosferik düzeltmeleri yapılan 11.11.2017 ve 21.11.2017 tarihli Sentinel-2 uydu görüntüleri arasındaki değişim analizi için yazılım içerisinde üç farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlar; Giriş Bandı Farkı yöntemi (Difference of Input Band), Özellik İndeksi Farkı yöntemi (Difference of Feature Index) ve Spektral Açık Farkı yöntemidir (Spectral Angle Difference).

İlk yöntem olan Giriş Bandı Farkı yöntemi iki farklı tarihli görüntüdeki sadece tek bir bant arasındaki değişimi hesaplar. Özellikle bitkiler ile yapılan çalışmalarda en belirleyici bant olan yakın kızılötesi (NIR, Near-infrared) bandın kullanılması ve benzeri çalışmalar için uygun bir yöntemdir.

Fakat çalışma alanımız ekili alanlardan oluşmadığından bu yöntem tercih edilmemiştir.

İkinci yöntem olan Özellik İndeksi Farkı yönteminde ise iki farklı görüntüden elde edilen indeksler arasındaki fark hesaplanmaktadır. Bunlar bitki indeksi olan NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), su indeksi olan NDWI (Normalized Difference Water Index) veya yanan alan indeksi NDR (Normalized Burn Ratio) ve benzerleridir. Çalışma alanı, ekili bir alan, taşkına maruz kalmış bir alan veya yangından etkilenen bir alan olmadığından bu yöntem de tercih edilmemiştir.

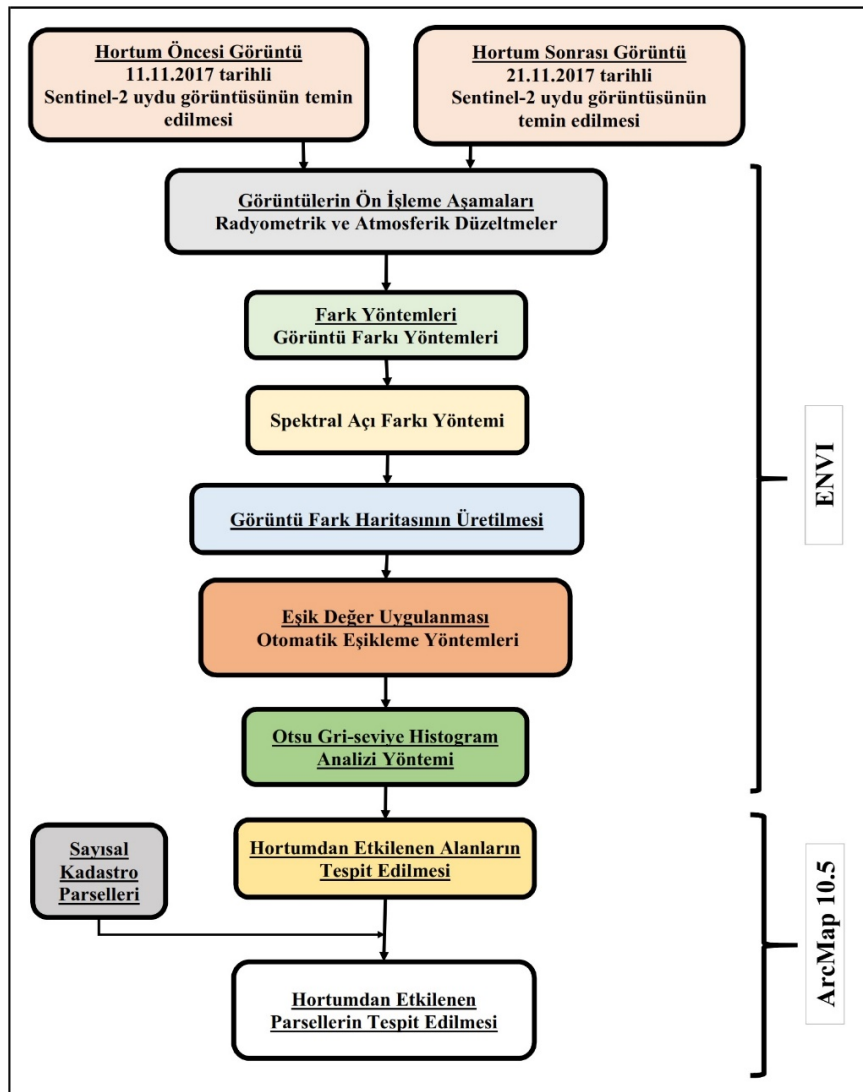
Üçüncü ve çalışmada kullandığımız yöntem olan Spektral Açık Farkı yöntemi ise özellikle çok bantlı görüntüler olan hiperspektral görüntülerde önerilen bir yöntemdir [44]. Bu yöntem, her piksel için birinci görüntü spektrumu ile ikinci görüntü spektrumu arasındaki spektral benzerliği belirler. Her piksel spektrumu, boyutsallığı bant sayısına eşit olan uzayda bir vektör ile temsil edilir. İki vektör arasındaki açı hesaplanır, bu açı ne kadar küçük olursa, iki spektrum o kadar benzer olur [44]. Şekil 5’de verilen haritada görüleceği üzere değişikliğin az olduğu bölgeler 0’a yakın değerler alırken, değişimin en fazla olduğu bu çalışma için hortumdan zarar gören alanlar ise maksimum değer olan 1’e yakın değerler almıştır.

Şekil 5’de verilen, 0 ile 1 arasında değerler alan değişim haritasında hortumdan etkilenen alanlar ile etkilenmeyen alanları ayırt edebilmek için yazılım

içinde bulunan Otomatik Eşikleme yöntemleri içerisindeki Otsu yöntemi ile bir eşik değeri tespit edilmiştir. Otsu yöntemi, görüntünün histogramı üzerinde oluşan iki tepe arasındaki eşik değeri gri-seviye histogram analizi kullanılarak hesaplamaktadır [45]. Yöntemde bahsedilen iki tepe bu çalışma için hortumdan etkilenen alanlar ile etkilenmeyen alanların görüntünün histogramı üzerinde oluşturduğu tepelerdir.

Otsu yöntemi uygulanarak hortumdan etkilenen alanlar ve etkilenmeyen alanlar olarak iki sınıfa ayrılmış harita ArcMap yazılımına aktarılmış olup etkilenen alanların büyüklüğü hesaplanmıştır. Ayrıca sayısal kadastro verileri yardımıyla hortumdan kısmen veya tamamen etkilenen parseller tespit edilmiştir.

Çalışmaya ait akış diyagramı Şekil 3'de verilmektedir.



Şekil 3. Çalışma akış diyagramı



### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

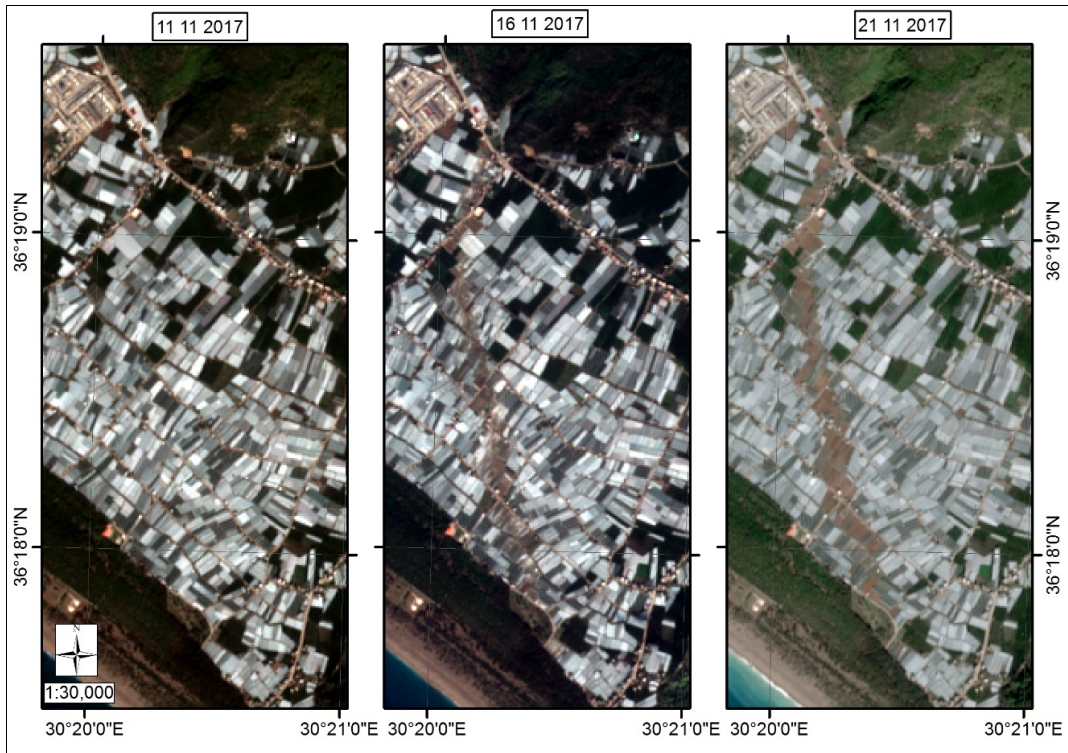
13 Kasım 2017'de Antalya'da meydana gelen hortum olayı öncesi (11.11.2017 tarihli) ve hortum olayı sonrası (16.11.2017 ve 21.11.2017 tarihli) Sentinel-2 uydu görüntüleri Şekil 4'de verilmektedir.

Görüntülerin karşılaştırılması sonucunda, sera alanlarında meydana gelen hasarın izleri alansal olarak incelenmiş olup Spektral Açık Farkı (Spectral Angle Difference) yöntemi ile üretilen değişim haritası Şekil 5'de verilmiştir.

21 Kasım 2017 tarihli açıklamada, bir su hortumunun şiddetli bir fırtına ile birleşerek saatte 200 km'ye varan hızlara ulaşan kasırga oluşturduğu bildirilmiştir. Türkiye'nin Antalya ilinde Akdeniz kıyılarını vuran kasırganın 38 kişinin yaralanmasına, tarım arazileri ve evlerde önemli hasar oluştuğu belirtilmektedir. European Space Imaging tarafından, kasırgadan üç gün

sonra, 16 Kasım'da WorldView-2 uydusunu kullanarak Kumluca İlçesindeki Mavikent sahil köyünün çok yüksek çözünürlüklü bir görüntüsünün yakalandığı, uydu görüntüsünde yıkım izlerinin net olarak görüldüğü belirtilmektedir [46].

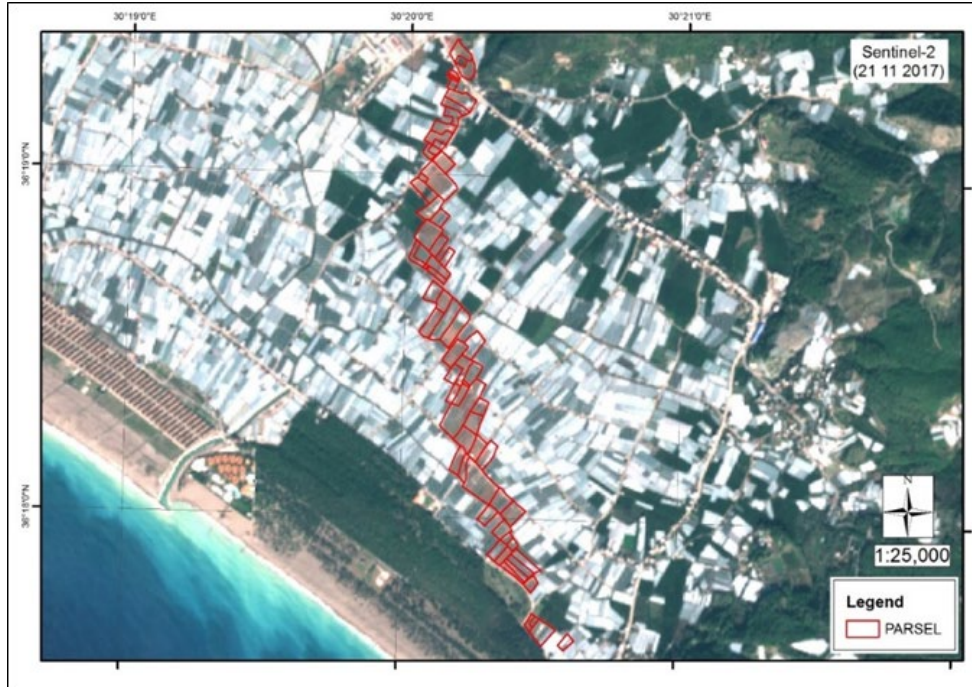
Bu çalışmada, 13 Kasım 2017'de Antalya'da meydana gelen hortumdan etkilenen Kumluca İlçesinde hortumdan kısmen veya tamamen etkilenen 68 adet parsel ve 49.75 ha toplam tarımsal alanın bulunduğu belirlenmiştir (Şekil 6). Bu çalışma ile afet yönetiminde kurumlar arası koordinasyon ve karar verme sürecinde afet olaylarının olumsuz etkilerinin en aza indirilebilmesi, yıkıcı hasarlar olup olmadığının tespiti, zarar-zıyan durumunun araştırılmasında iş programlarına ve arama kurtarma faaliyetlerine yön verilebilmesi amacıyla uzaktan algılama yaklaşımı ile sağlanacak katkılar araştırılmıştır. Analizler sonucunda zarar gören sera alanları konum olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4. Hortum öncesi ve sonrasında ait Sentinel-2 görüntüleri



Şekil 5. 21.11.2017 – 11.11.2017 tarihleri arasındaki değişim haritası



Şekil 6. Hortumdan kısmen veya tamamen etkilenen parseller



Seraların fiziksel özellikleri, sera örtü malzemelerinin özellikleri, yetiştirilen bitki, sebze ve meyve ürünlerinin miktarı, meydana gelen hasarların ekonomik boyutunun belirlenmesinde dikkate alınmaktadır. Tarımsal üretim, tarım sigortaları ve ekonomik koşullar gibi konular, hasar tespit çalışmalarının tespitinde gündeme gelmektedir. Bu kapsamda hortum olaylarından kaynaklanan hasarların belirlenmesi ve ön değerlendirilmesinde uzaktan algılama tekniğinin kullanılabileceği bu çalışma kapsamında belirlenmiştir.

#### 4. SONUÇLAR

Akdeniz kıyılarında Antalya İli ve çevresinde son yıllarda en tehlikeli doğal afetlerden birisi olan hortum olaylarına sıklıkla rastlanması, can ve mal güvenliğinin sağlanması amacıyla afet risklerinin değerlendirilmesi ve teknik önlemlerin alınması konularının önemini gündeme getirmektedir. Uydu tabanlı uzaktan algılama yaklaşımının afet yönetiminde kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla, örnek bir uygulama olarak, 13.11.2017 tarihli hortum olayı nedeniyle Antalya İlinde bulunan tarımsal alanlardaki zararları araştırılmıştır. Çalışmada, Sentinel-2 uydu verileri kullanılmış ve Kumluca İlçesinde, hortumdan kısmen veya tamamen etkilenen toplam tarımsal alan 68 adet parsel ve 49.75 ha olarak tespit edilmiştir. Hortumların hasarlarının tespit edilmesi ile hortum karakteristikleri konusunda detaylı bilgiler edinilmesi de mümkün olacaktır. Örneğin su üzerinde oluşan bir hortumun karaya çıktıktan sonra katettiği mesafe önemli bir bilgidir.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Rahman, M.S., Di, L., Esraz-Ul-Zannat, M., 2017. The Role of Big Data in Disaster Management, Proceedings, International Conference on Disaster Risk Mitigation, Dhaka, Bangladesh, September 23-24, 2017.
2. Anılan, T., Durmuş, H., Akçalı, E., Yüksek, Ö., 2021. Taşkın Farkındalık ve Erken Uyarı Sistemleri Değerlendirmesi: Trabzon Beşikdüzü Örneği, Doğ Afet Çev Derg, 7(1), 110-123, DOI: 10.21324/dacd.722798.
3. Özşahin, E., 2013. Türkiye’de Yaşanmış (1970-2012) Doğal Afetler Üzerine Bir Değerlendirme, 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 25-27 Eylül 2013, MKÜ, Hatay.
4. Carbajal, N., León-Cruz, J.F., Pineda-Martínez, L.F., Tuxpan-Vargas, J., Gaviño-Rodríguez, J.H., 2019. Occurrence of Anticyclonic Tornadoes in a Topographically Complex Region of Mexico, Advances in Meteorology, Volume 2019, Article ID 2763153, 11.
5. Lekoloane, L.E., Bopape, M.M., Rambuwani, T.G., Ndarana, T., Landman, S., Mofokeng, P., Gijben, M., Mohale, N., 2021. A Dynamic and Thermodynamic Analysis of the 11 December 2017 Tornadic Supercell in the Highveld of South Africa, Weather Clim. Dynam., 2, 373-393, 2021.
6. Van Westen, C., 2000. Remote Sensing for Natural Disaster Management, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B7. Amsterdam 2000.
7. Avotniece, Z., Briede, A., Klavins, M., Aniskevich, S., 2017. Remote Sensing Observations of Thunderstorm Features in Latvia, Environmental and Climate Technologies, Dec. 2017, 21, 28-46, doi: 10.1515/rtuect-2017-0014.
8. Womble, J.A., Wood, R.L., Mohammadi, M.E., 2018. Multi-Scale Remote Sensing of Tornado Effects, Front. Built Environ. 4, 66, doi: 10.3389/fbuil.2018.00066.
9. Jiménez-Jiménez, S.I., Ojeda-Bustamante, W., Ontiveros-Capurata, R.E., de Jesús Marcial-Pablo, M., 2020. Rapid Urban Flood Damage Assessment Using High Resolution Remote Sensing Data and An Object-based Approach, Geomatics, Natural Hazards and Risk, 11(1), 906-927, Doi: 10.1080/19475705.2020.1760360.
10. Koshimura, S., Kayaba, S., Matsuoka, M., 2010. Integrated Approach to Assess the Impact of Tsunami Disaster, Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems-Furuta, Frangopol & Shinozuka (eds), 2010 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47557-0.
11. Roopa, V., 2012. Remote Sensing & its Applications in Disaster Management Like

- Earthquake and Tsunamis, International Journal of Science and Research (IJSR), ISSN (Online): 2319-7064.
12. Pandiammal, C., Senthil, J., Anand, P.H., 2015. Tsunami Flood Damages Assessment in Cuddalore District using Remote Sensing Technology, *Advances in Applied Science Research*, 2015, 6(8), 96-100.
  13. Gaikwad, S.V., Kale, K.V., Kulkarni, S.B., Varpe, A.B., Pathare, G.N., 2015. Agricultural Drought Severity Assessment using Remotely Sensed Data: A Review, *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 2015, 4(1), 1195-1203, Article ID Tech-440.
  14. Laosuwan, T., Sangpradid, S., Gomasathit, T., Rotjanakusol, T., 2016. Application of Remote Sensing Technology for Drought Monitoring in Mahasarakham Province, Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, 12(3), 17-25.
  15. Nikam, B.R., Aggarwal, S.P., Thakur, P.K., Garg, V., Roy, S., Chouksey, A., Dhote, P.R., Chauhan, P., 2020. Assessment of Early Season Agricultural Drought using Remote Sensing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B3-2020, 1691-1695. XXIV ISPRS Congress (2020 edition).
  16. Wang, P., Tang, J., Ma, Y., Wu, D., Yang, J., Jin, Z., Huo, Z., 2021. Mapping Threats of Spring Frost Damage to Tea Plants using Satellite-Based Minimum Temperature Estimation in China, *Remote Sens.* 13, 2713. <https://doi.org/10.3390/rs13142713>.
  17. Sabuncu, A., Özener, H., 2019. Uzaktan Algılama Teknikleri ile Yanmış Alanların Tespiti: İzmir Seferihisar Orman Yangını Örneği, *Doğ Afet Çev Derg*, 5(2), 317-326, DOI: 10.21324/dacd.511688.
  18. Gobbo, S., Ghiraldini, A., Dramis, A., Dal Ferro, N., Morari, F., 2021. Estimation of Hail Damage Using Crop Models and Remote Sensing. *Remote Sens.* 13, 2655. <https://doi.org/10.3390/rs13142655>.
  19. Nunes, L.H., De Bona, L., Candido, D.H., 2011. Tornado and Waterspout Climatology in Brazil, 6<sup>th</sup> European Conference on Severe Storms (ECSS 2011), 3-7 October 2011, Palma de Mallorca, Balearic Islands, Spain.
  20. Gobato, R., Gobato, A., Fedrigo, D.F.G., 2016. Study of Tornadoes That have Reached the State of Paraná. *Parana Journal of Science and Education*, 2(1), 1-27.
  21. Kahraman, A., 2016. Türkiye’de Hortumlar, Şiddetli Dolu Hadiseleri ve Oluştukları Çevre Koşulları. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 82.
  22. Ki-Hong, M., Seonhee, C., Gyuwon, L., Kyung-Eak, K., 2017. Synoptic Characteristics of the Japan Tsukuba Tornado, The 2<sup>nd</sup> International Electronic Conference on Atmospheric Sciences (ECAS 2017), 16–31 July 2017; Sciforum Electronic Conference Series, 1, 4139. [10.3390/ecas2017-04139](https://doi.org/10.3390/ecas2017-04139).
  23. Sioutas, M.V., 2003. Tornadoes and Waterspouts in Greece, *Atmospheric Research*, 67-68, 645-656.
  24. Burow, D., Herrero, H.V., Ellis, K.N., 2020. Damage Analysis of Three Long-Track Tornadoes Using High-Resolution Satellite Imagery, *Atmosphere*, 11, 613, [doi:10.3390/atmos11060613](https://doi.org/10.3390/atmos11060613).
  25. Glanville, M.J., Rohr, C.J., Holmes, J.D., 2016. Tornadoic Waterspout Impacts on Coastal Australia, 18<sup>th</sup> Australasian Wind Engineering Society Workshop, McLaren Vale, South Australia, 6-8 July 2016.
  26. Chan, P.W., Tse, S.M., Lee, J.C.W., Li, Q.S., 2020. Analysis of a Waterspout at Zhuhai, China, on June 12, 2019. *Meteorol Appl.* 2020; 27:e1904. <https://doi.org/10.1002/met.1904>.
  27. Mihajlović, J., Ducić, V., Burić, D., 2016. Tornadoic Waterspout Event in Split (Croatia)-Analysis of Meteorological Environment, *J. Geogr. Inst. Cvijic.* 66(2), 185–202, DOI:10.2298/IJGI1602185M.
  28. Lambropoulou, S., Antoniou, S., 2016. Topological Surgery, Dynamics and Applications to Natural Processes, *Journal of Knot Theory and its Ramifications*, April 14, 2016.
  29. Güler, H.G., Baykal, C., Tarakcıoğlu, G.Ö., Ergin, A., Güler, I., Yalçın, A.C., 2014. Sarıyerme Bölgesinde 17 Ekim 2013 Tarihinde Oluşan Hortum ve Bölgeye Etkileri, 8. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, 7-9 Kasım 2014.

30. Çabuk, Ö., Güler, H.G., Tarakcıoğlu, G.Ö., Güler, I., Yalçın, A.C., 2018. Adana Karataş Bölgesinde 28 Ekim 2017 Tarihinde Oluşan Hortum ve Etkileri, 9. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, 1-3 Kasım 2018.
31. Coşkun, M., Aksoy, B., 2011. 19 Haziran 2004 Çubuk-Sünlü (Ankara) Hortum Olayı. Doğu Coğrafya Dergisi, 12(17), 203-222 .
32. Kolay, O., Özdemir, E.T., Yetemen, Ö., 2020. Bodrum Sel ve Hortum Felaketi: 29 Kasım 2018 Olay Araştırması, Anadolu Çev. ve Hay. Bilimleri Dergisi, 5(4), 491-497.
33. Türkeş, M., 2021. Türkiye’de Hortumlar Artıyor mu?, EKOIQ, Mart-Nisan 2021
34. Aksu, H., 2021. Nonstationary Analysis of the Extreme Temperatures in Turkey. Dyn Atmos Oceans 95, 101238.
35. Eris, E., Cavus, Y., Aksoy, H., Burgan, H.İ., Aksu, H., Boyacıoğlu, H., 2020. Spatiotemporal Analysis of Meteorological Drought Over Kucuk Menderes River Basin in the Aegean Region of Turkey. Theor Appl Climatol 142, 1515–1530. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03384-0>.
36. Aksu, H., Cetin, M., Aksoy, H., Yaldiz, S.G., Yıldırım, I., Keklik, G., 2022. Spatial and Temporal Characterization of Standard Duration-Maximum Precipitation Over Black Sea Region in Turkey. Nat Hazards, 111(1):1-27. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05141-6>.
37. MGM, 2018a. Meteorolojik Karakterli Doğal Afetler 2017 Yılı Değerlendirmesi, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara, 2018.
38. Kahraman, A., Markowski, P., 2014. Tornado Climatology of Turkey. Mon. Weather Rev. 142, 2345–2352.
39. Sirdas, S.A., Ozmen, I., Aydın, M., Yavuz, V.Y., Kaya, S., 2021. Evaluation of Szilagyi Waterspout Nomogram and Triangle Diagram by Era-Interim, 5th International Conference on Reanalysis, [https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/repository/Events/ICR5/Posters/14\\_S5\\_Sirdas.pdf](https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/repository/Events/ICR5/Posters/14_S5_Sirdas.pdf); Erişim Tarihi: 15.10.2021.
40. MGM, 2018b. 2017 Yılı İklim Değerlendirmesi, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara, Şubat 2018.
41. AFAD, 2018. Türkiye 2010- 2017 Doğa Kaynaklı Afet Olayları Haritası.
42. ESA, 2015. European Space Agency, SENTINEL-2 User Handbook
43. L3HARRIS, 2022. <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/aboutatmosphericcorrectionmodule.html>, Erişim Tarihi: 08.09.2022.
44. L3HARRIS, 2022. <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/ImageChange.html>, Erişim Tarihi: 09.09.2022.
45. Otsu, N., 1979. A Threshold Selection Algorithm from Gray-Level Histograms, IEEE Trans. Syst. Man Cybern., SMC-9(1), 62–66.
46. European Space Imaging, 2021. Satellite Images of Turkey Show Whirlwind Damage, 21 November 2017. <https://www.euspaceimaging.com/satellite-images-of-turkey-show-whirlwind-damage/>; Erişim Tarihi: 15.10.2021.



## Adana-Karaisalı Kayrak Taşlarının Dış Cephe ve Çatı Kaplamada Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi

Esmâ KAHRAMAN\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-4326-7202  
Nil YAPICI<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-9761-9122

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

Geliş tarihi: 12.01.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: KAHRAMAN, E., YAPICI, N., (2023). Adana-Karaisalı Kayrak Taşlarının Dış Cephe ve Çatı Kaplamada Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 105-113.

### Öz

Kayrak taşı, belirgin anizotropisi nedeniyle diğer yapı taşlarından ayrılır. Bir kayrak taşının genel karakterini hem mineralojisi hem de fiziko-mekanik özellikleri belirlemektedir. Bu çalışmanın amacı Karaisalı bölgesinde bulunan kayrak taşının yapı taşı olarak kullanılabilirliğini araştırmaktır. Bu amaçla bölgede jeolojik etütler yapılmış, Tümenli ve Maraşlı bölgelerinden temsili numuneler toplanmıştır. Numuneler üzerinde TSE ve uluslararası standartlara göre petrografik, mineralojik (XRD), kimyasal (XRF) analizler ve fiziko-mekanik analizler (tek eksenli basınç dayanımı, Shore ve Mohs sertliği, ağırlıkça su emme, porozite) yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları Karaisalı'da Tümenli ve Maraşlı yöresinde bulunan kayrak taşlarının, hem iç, hem dış, hem de çatı kaplamasında yapı taşı olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kayrak taşı, Karaisalı, Çatı kaplama, Dış cephe kaplama, Fiziko-mekanik özellikler

### Evaluation of the Usability of Slate Stones from Adana-Karaisalı in Exterior and Roofing Covarege

#### Abstract

Slate stone is separated from other building stones due to its pronounced anisotropy. The general character of a slate stone is determined by both its mineralogy and physico-mechanical properties. The aim of this study is to investigate the usability of slate stone as building stone in the Karaisalı region. For this purpose, geological studies were carried out in the region and representative samples were collected from Tümenli and Maraşlı regions. On the samples, petrographical, mineralogical (XRD), chemical (XRF) analysis and physico-mechanics analysis (uniaxial compressive strength, Shore and Mohs hardness, water absorption by weight, porosity) were applied according to TSE and international standards. The results of the analysis showed that the slate stones found in Tümenli and Maraşlı regions in Karaisalı can be used as building blocks in both interior, exterior and roof coverings.

**Keywords:** Slate stone, Karaisalı, Roofing, Exterior cladding, Physico-mechanical properties

\*Sorumlu (Corresponding author) yazar: Esmâ KAHRAMAN, ekahraman@cu.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Kompakt bir metamorfik taş olan kayraklar, yüksek sıcaklık ve basınç altında ince taneli tortul oluşumların çökmesi ile oluşur [1]. Sıcaklığa dayanıklı, mukavemeti yüksek, suya karşı dirençli, su emme oranı düşük ve sert olmasından dolayı iç, dış ve çatı kaplamada yapı ve dekorasyon çalışmalarında mimari açıdan tercih edilmektedir. Geçmişten günümüze özellikle yalıtım özelliğinden dolayı kullanıldığı tarihi yapılardaki varlığı ile gözlenmektedir. Günümüzde halen oldukça sık tercih edilmekte olup İspanya, İtalya, İngiltere gibi ülkelerde daha çok çatı kaplamada, ülkemizde ise genellikle dış cephe kaplamaları ve dış mekan zemin döşemede kullanılmaktadır (Şekil 1).

Çin, Brezilya, Hindistan, İngiltere, İtalya, İspanya, ABD ve Türkiye önemli doğal taş üreticisi ülkelerdir. Özellikle dünya çatı kaplama levhası üretiminin %87'sini sağlayan İspanya en büyük üreticidir [2]. Çeşitleri sırasıyla kloritin bileşimine ve yoğunluğuna, tane boyutuna, eğilme mukavemetine, su emme katsayısına vb. bağlı olan kayrak rengine göre sınıflandırılır [3]. Kayrak taşlarının mineralojik bileşimi genellikle kuvars, fillosilikatlar (klorürler ve muskovit olarak) ve illit (kil mikali bir mineral), daha az miktarda demir oksitler, sülfidler ve karbonatlar içerir [4].

Türkiye'de Muğla ilinin çeşitli bölgelerinden çıkarılan kayrak taşları literatürdeki örneklerin aksine daha yüksek oranda kalsit içerirken, kuvars oranı çok daha düşüktür. Kalsit çoğu kayrak örneğinde bulunur, bazen çok boldur ve tabakalar veya yumrular halinde konsantre olur [5].

Literatürde; önemli kullanım alanları bulan kayrak taşlarının genel mühendislik özelliklerini bölgesel olarak inceleyen pek çok çalışma mevcuttur. Yağız [6] yaptığı çalışmada Denizli civarındaki kayrak taşlarının özelliklerini araştırmış, yapı taşları için önemli olan parametreleri belirlemiş, iç ve dış cephe kaplamalarında yapı ve kaplama taşı olarak kullanılabileceğini belirtmiştir.

Barros ve arkadaşları [7] Portekiz'in beş farklı bölgesindeki kayrakların mühendislik özelliklerini

incelemiştir. Bu yapı malzemesinin gözeneklilik, yoğunluk ve mekanik dayanım açısından karakterize etmek için bir seri deneyler yapmıştır. Sonuçlar; kayrakların fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin uygun halde olduğunda yüksek bir güvenle inşaat malzemesi olarak uygulanmasının mümkün olduğunu göstermiştir.

Xingcan ve arkadaşları [8] yaptıkları çalışmada Batı Sichuan Platosu'ndaki kayrak taşlarının mühendislik özelliklerini incelemiştir. Çalışmalarında bölgeden elde ettikleri numunelerin mineralojik bileşimini ve mikroyapı özelliklerini incelemiştir. Düzensiz kaya blokları üzerinde noktasal yükleme testleri gerçekleştirmişlerdir. Son olarak, kayrak taşlarının tek eksenli basınç dayanımını tahmin etmek üzere farklı ampirik formüller elde ederek bölgedeki kayrak taşlarının yapılarda uygulanabilirliğine değinmişlerdir.

Adana-Karaisalı bölgesi kayrak taşlarının dış cephe ve çatı kaplamada kullanımı önceki çalışmalarda değerlendirilmemiştir. Bu nedenle, bu çalışma Adana-Karaisalı bölgesinde Maraşlı ve Tümenli mahallelerinden elde edilen numunelerin petrografik, kimyasal, mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında bölgedeki kayrak oluşumlarının dış cephe ve çatı kaplama taşı olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Ayrıca TS 2513 [9] "Doğal yapı taşları" standardına göre Çizelge 1'de belirtilen sınır değerleri karşılayıp karşılamadığı değerlendirilecektir. Böylece bölgeye yakın olan yapı inşalarında ulaşım giderleri azalarak daha az maliyetle hammadde temini sağlanacaktır.

**Çizelge 1.** TS 2513 [13] standardında belirtilen bazı fiziksel ve mekanik özelliklere ait sınır değerler

Fiziksel ve mekanik özellikler	Sınır değerler
Birim hacim ağırlık ( $g/cm^3$ )	>2,55
Ağırlıkça su emme (%)	<1,80
Tek eksenli basınç dayanımı ( $kgf/cm^2$ ); (MPa)	>500; 49,03
Eğilme dayanımı ( $kgf/cm^2$ ); (MPa)	>50; 4,903
Don sonrası kütlece kayıp (%)	$\leq 5$



**Şekil 1.** Kayrak taşlarının yapı uygulamalarında kullanımına ait örnekler [10, 11]

## **2. ÇALIŞMA SAHASI HAKKINDA BİLGİLER**

Çalışma bölgesi Adana İli, Karaisalı İlçesi Tümenli ve Maraşlı mahallelerindedir. Çalışma sahasına ait yer buldu haritası Şekil 2’de verilmiştir.



**Şekil 2.** Çalışma bölgesi yer buldu haritası

Adana’ya Maraşlı Mahallesi 68 km ve Tümenli Mahallesi 84 km mesafededir. İki bölge arasındaki mesafe 46 km’dir.

Çalışma bölgesindeki kayrak taşı oluşumlarının genel görüntüleri Şekil 3’de verilmiştir.



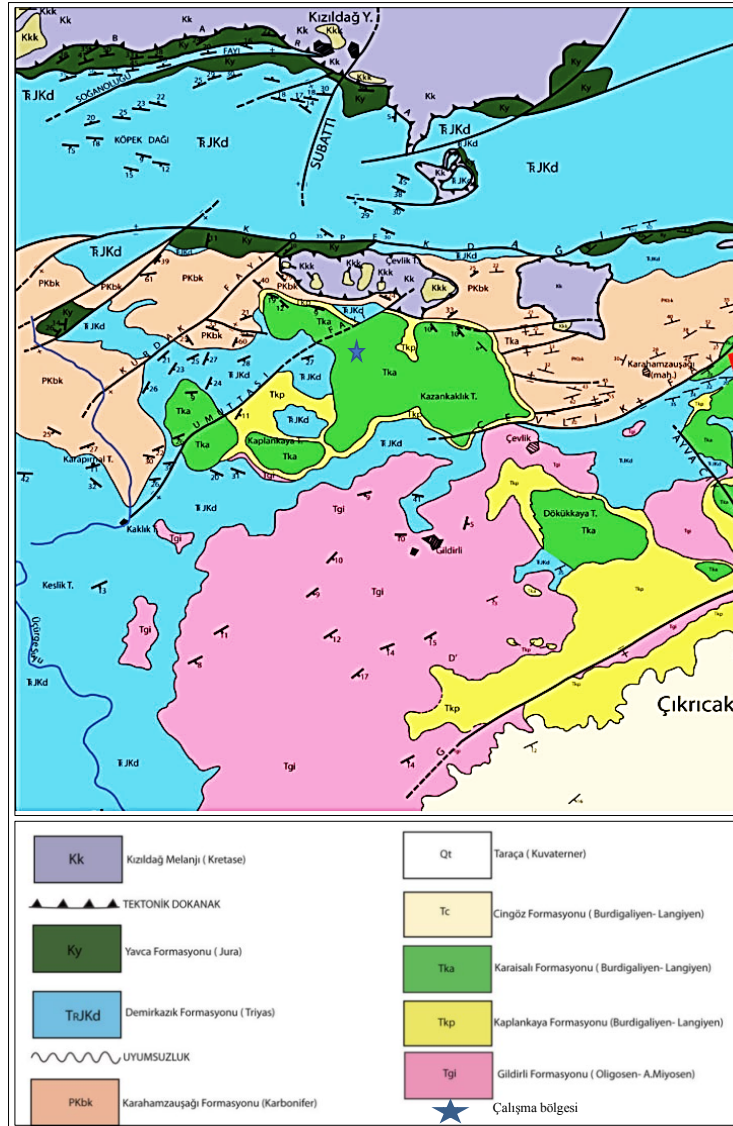
**Şekil 3.** Çalışma bölgesi kayrak taşı oluşumları



## 2.1. Çalışma Sahası Jeolojisi

Çalışma sahası doğuda Amonos dağları, batıda Ecemiş fay kuşağı, kuzeyde ise Toros dağ kuşağı ile çevrilmiş Adana Baseni'nin kuzey-kuzeybatı kısmında bulunmaktadır. Havzada Tersiyer,

Oligosen-Pliyosen zaman aralığında çökelen sedimanter kayaçlarla bulunmakta ve Toros orojenik kuşağını oluşturan Paleozoyik-Mezozoyik yaşlı temel kayaçların oluşturduğu engebeli bir topografya üzerine uyumsuz olarak yerleşmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Bölgesel jeoloji haritası (Yetiş ve Demirkol'dan [12] değiştirilmiştir)

Karbonat, kuvars, çört ve ofiyolit orjinli çakıllar, kötü boylanmalı çakıl taşları ardalanmalı olarak gözlenmektedir. Üst zonlarda ise soluk-sarımsı

yeşil renkli kumtaşı-silttaşı ardalanması, bol lamellibrans, ekinid ve gastropodlu seviyelerde görülmektedir. Daha üst zonlarda ise, karbonat



miktarı yüksek olan sarımsı gri renkli, ekinid, lamellibrans ve gastropodlu, küresel ayrışmalı marnlar ile ayrışmış ve yüzeyi koyu gri-kahverengi, taze kırık yüzeyi soluk sarı renkli, belirgin tabakalı, bol fosilli, tabakalanma düzlemi boyunca kısmen erimeli, killi-kumlu kireçtaşı oluşumları bulunmaktadır [13].

Ünlügenç [14] ile Yetiş ve Demirkol'un [12] Kaplankaya Formasyonu için stratigrafik kesit Maden Tetkik Arama paleontologları tarafından incelenmiş ve araştırmada Pitadia (Callista) cf. erycynoides Lamarck, Anadara (Anadara) cf. diluvii Lamarck, Borelis melo Fichtel ve Moll, *Operculina* sp., *Elphidium* sp., *Gypsina* sp., *Miogypsinoides* sp., *Globorotalia* sp., *Globigerina* sp., Soritidae, Rotalidae fosilleri gözlenmiştir. Ardından birime Alt-Orta Miyosen yaşı verilmiştir.

### 3. YÖNTEM

Çalışma sahasından elde edilen bloklar öncelikle numune hazırlama işlemine tabi tutulmuştur. Blok numunelerden standartlara uygun boyutlandırılarak numuneler hazırlanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Hazırlanmış bazı numune örneklerine ait görüntüler

Numunelerin petrografik, mineralojik, kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Bu özellikler temel olarak TS 699/T1 [15], "Doğal Yapı Taşları İnceleme ve Laboratuvar Deney Yöntemleri" standardında belirtilen talimatlar esas alınarak belirlenmiştir.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Kimyasal İçerik

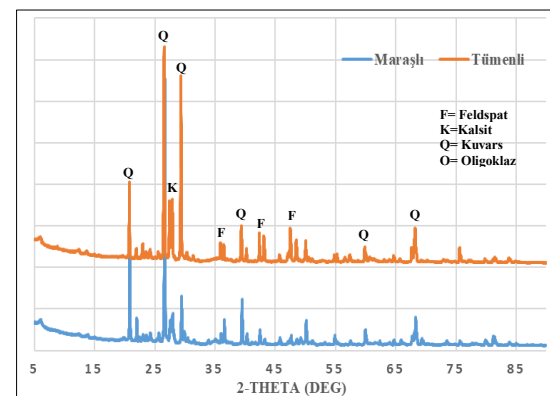
Numunelerin kimyasal içeriği Panalytical marka X-Ray Fluorescence (XRF) cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Kimyasal içerik ve kızdırma kaybı (KK) sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Numunelerin XRF sonuçları

Oksit (%)	Tümenli	Maraşlı
SiO <sub>2</sub>	49,56	56,15
CaO	18,35	10,67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,73	11,95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,09	6,42
MgO	1,97	2,01
K <sub>2</sub> O	0,87	3,07
CuO	0,05	0,05
TiO <sub>2</sub>	0,53	0,98
MnO	0,31	0,14
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,09
SO <sub>3</sub>	0,12	0,10
Kızdırma kaybı	14,37	8,37

### 4.2. Mineralojik ve Petrografik Analiz

Numunelerin X-ışını Difraktometre (XRD) analizi, çalışma voltajı 20–50 kV olan ve Cu-Ka radyasyonu ile donatılmış PANalytical EMPRYAN X-ışını difraktometresi kullanılarak yapılmıştır. İncelenen numunelerin XRD verileri 5–85° kırınım açılarında (2θ) kaydedilmiştir. Elde edilen XRD paterni Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Numunelerin XRD paterni

Elde edilen XRD paterni incelendiğinde; numuneler temel olarak kalsit (K), kuvars (Q), feldspat (F) ve oligoklaz (O) minerallerinden oluşmaktadır.

Petrografik incelemeler makroskobik olarak ana numune üzerinde ve polarizan mikroskop ile hazırlanmış ince kesitler üzerinde (TS EN 12407 [16] ve TS EN 932-3 [17] standartlarında belirtildiği şekilde yapılmıştır. Ayrıca kayaçları oluşturan mineraller, kayaçların yapı-doku ilişkisi, minerallerin petrografik özellikleri ve kayaçların mikroskobik olarak alterasyona uğrayıp uğramadığı incelenmiştir.

Lup ile yapılan incelemede; Tümenli'den elde edilen numunelerin açık gri renkli, Maraşlı'dan elde edilen numunelerin ise koyu sarı renkte olduğu gözlenmiştir. Her iki numune grubunun da yüzeyi pürüzlü, farklı mineral içerikli, sert, sıkışmış, tane boyu küçük ve matriksle çimentolanmış düşük sıcaklık metamorfizma şartlarında oluşmuş kumtaşı bileşiminde olduğu gözlenmiştir. HCl (%10) asite tepki vermiş dolayısıyla kalsit minerali oluşum miktarı yüksektir. Kayaçlarda klivaj ve foliasyon özelliği bulunmaktadır.

Tümenli ve Maraşlı numunesinin ince kesitleri incelendiğinde; ana hakim mineralleri kuvars, feldspat, kalsit, ortoz, mika, mafik mineraller oluşturmaktadır. Litik kaya kırıntıları yer yer gözlenmiştir (Şekil 7-8).

Her iki bölgedeki numunenin de petrografik özellikleri birbirine oldukça yakındır. Temel olarak incelendiğinde;

**Kuvars** ana hakim mineraldir. Polikristalen ve kristalen olarak bulunmaktadır. Metamorfizma izleri olan dalgalı sönme göstermektedir.

**Feldspat** büyük çoğunluğu plajiyoklazlardan oluşmaktadır. Polisentetik ve kalsbad ikizlenme özelliği gözlenmektedir. Şistozite fazla gözlenmemiştir.

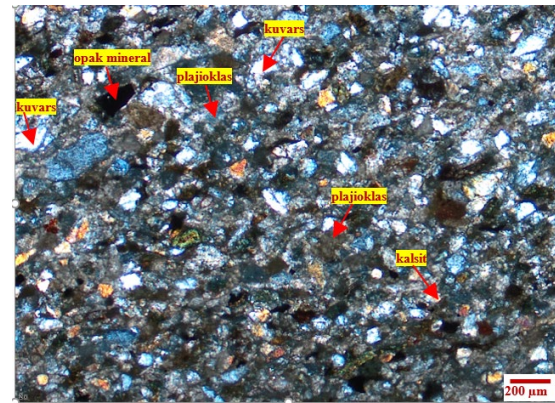
**Kalsit** genellikle matriks içerisinde ve daha iri boyutları yarı özşekilli olarak gözlenmektedir. Basınç ikizlenmeleri belirgindir.

**Mika** altere olmuş ve daha çok klorite dönüşmüştür.

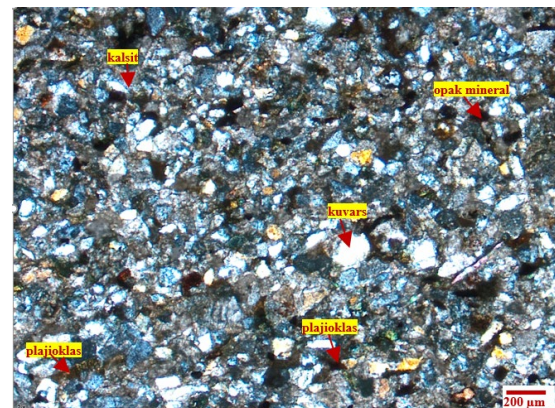
**Plajiyoklas (Oligoklas)** daha az oranda pertitleşme şeklindedir.

**Opak mineral** olarak demir mineralleri gözlenmektedir.

İncelenen kayaç kumtaşlarının Folk Sınıflaması kayaç mineral bileşimine göre "Kuvarsça Zengin Litarenit (Kayrak)" olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 7. Tümenli numunesine ait mikroskop görüntüsü/Nikol



Şekil 8. Maraşlı numunesine ait mikroskop görüntüsü/Nikol

### 4.3. Fiziksel Özellikler

Tümenli ve Maraşlı bölgesinden elde edilen numunelerin birim hacim ağırlıkları (BHA), ağırlıkça su emme oranları ( $A_w$ ), görünür poroziteleri ( $n$ ) ve gerçek yoğunlukları ( $\gamma$ ) TS EN 1936 [18] standardında belirtilen esaslara göre belirlenmiştir. Her iki grup içinde deneyler karot numuneleri üzerinde ve en az beş deney numunesi ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kayrak taşı numunelerinin Shore ve Mohs sertliği ISRM-1979 [19] ve ISRM-2007 [20] standartlarına göre tespit edilmiştir. Numunelerin don sonrası kütle kaybı TS 699 [15]'de belirtilen prosedürlere göre gerçekleştirilmiştir. Suya doygun hale getirilen numuneler donma-çözülme test cihazına yerleştirilmiş ve sıcaklığın 4 saat içerisinde  $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düşürülmesi sağlanmıştır.  $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 2 saat bekletilen deney numuneleri  $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki su içine tamamen su altında kalacak şekilde daldırılır ve en az 2 saat bekletilerek buzların tamamen erimesi sağlanmış ve böylece bir çevrim tamamlanmıştır. Numuneler toplamda 25 çevrim donma-çözülme işlemine tabi tutulmuş ve don sonrası kütle kaybı belirlenmiştir. Ayrıca numunelere TS 699 [15]'de belirtilen pas tehlikesi tayini, açık hava tesirlerine dayanıklılık ve asitlere karşı dayanım testleri uygulanmıştır. Numunelerin fiziksel özellikleri için gerçekleştirilen deney sonuçlarının ortalaması Çizelge 3'de verilmiştir.

**Çizelge 3.** Numunelerin fiziksel özellikleri

Deney	Tümenli	Maraşlı
BHA ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,653±0,011	2,619±0,010
$A_w$ (%)	0,431±0,007	0,460±0,003
$n$ (%)	0,844±0,015	0,902±0,007
Özgül ağırlık	2,697±0,003	2,675±0,002
Shore sertliği	50,50±1,05	48,40±0,90
Mohs sertliği	4	3,5
Kütlece don kaybı (%)	0,015	0,022
Pas tehlikesi	Renk bozulmaları ve boyanmalar gözlenmemiştir.	
Açık hava tesirlerine dayanıklılık	Açık hava tesirlerine karşı dayanıklıdır ve değişim gözlenmemiştir.	
Asitlere karşı dayanıklılık	Bozulma ve renk değişikliği olmamıştır.	

### 4.4. Mekanik Özellikler

Numunelerin tek eksenli basınç dayanımları TS EN 1926 [21], eğilme dayanımı TS EN 13161 [22], don sonrası tek eksenli basınç dayanımı TS EN 12371 [23] belirtilen standartlara uygun olarak yapılmıştır. Mekanik özellikler için gerçekleştirilen deney sonuçlarının ortalaması Çizelge 4'de verilmiştir.

**Çizelge 4.** Numunelerin mekanik özellikleri

Deney	Tümenli	Maraşlı
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	87,68±3,20	74,05±2,81
Eğilme dayanımı (MPa)	9,93±1,08	8,44±0,99
Don sonrası tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	79,68±3,20	69,03±1,78

## 5. SONUÇLAR

Çalışma sahasından elde edilen kimyasal analiz sonuçları numunelerin yaklaşık %50  $\text{SiO}_2$ 'den oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca XRD, mineralojik ve petrografik analizler sonucunda, kayrak "Kuvarşça Zengin Litarenit (Kayrak)" olarak isimlendirilmiştir. Diğer analizlerden elde edilen sonuçlar TS 2513 [9] doğal yapı taşları standardına göre değerlendirilmiş ve aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Birim hacim ağırlık değerleri Tümenli numunesinin  $2,653\text{ g}/\text{cm}^3$  ve Maraşlı numunesinin  $2,619\text{ g}/\text{cm}^3$  olup standartta belirtilen  $>2,55\text{ g}/\text{cm}^3$  değerinin üzerindedir.
- Ağırlıkça su emme oranları Tümenli numunesi için %0,431 ve Maraşlı numunesi için %0,460'dir. Bu değerler standartta verilen en yüksek sınır değer olan  $<1,80$  değerinin altındadır.
- Tümenli numunesinin tek eksenli basınç dayanımı  $87,68\text{ MPa}$  ve Maraşlı bölgesinin ise  $74,05\text{ MPa}$ 'dır ve standartta belirtilen  $>500\text{ kgf}/\text{cm}^2$  ( $49,03\text{ MPa}$ ) sınır değerini karşılamaktadır.
- Tümenli numunesinin eğilme dayanımı  $9,93\text{ MPa}$  ve Maraşlı numunesinin ise  $8,44$

MPa'dır ve standartta belirtilen  $>50 \text{ kgf/cm}^2$  (4,903 MPa) sınır değeri karşılamaktadır.

- Don sonrası kütle kaybı Tümenli numunesi için %0,015 ve Maraşlı numunesi için %0,022 olup standartta belirtilen  $\leq 5$  değerinin altındadır.
- Pas tehlikesi, açık hava tesirlerine dayanıklılık ve asitlere karşı dayanıklılık testlerine tabi tutulan numunelerin yüzeylerinde bozulmalar, renk değişimleri ve deformasyonlar gözlenmemiştir.
- Ayrıca numuneler sertlik, porozite, eğilme dayanımı ve don sonrası tek eksenli basınç dayanımı deneylerine de tabi tutulmuştur. Bu deney sonuçlarına göre de numunelerin kullanılabilir nitelikte olduğu açıkça görülmektedir.

Sonuç olarak incelenen parametreler açısından Adana-Karaisalı ilçesi, Tümenli ve Maraşlı Mahallelerinden elde edilen kayrak taşlarının dış cephe ve çatı kaplamada kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

## 6. KAYNAKLAR

1. Bates, R.L., Jackson, J.A., 1987. Glossary of Geology: American Geological Institute, Alexandria, Virginia, 788.
2. Garcia-Guinea, M., Lombardero, B., Roberts, J., 1997. Taboada Spanish Roofing Slate Deposits, Trans. Inst. Min. Metall. B: Appl. Earth Sci., 106, 205-214.
3. Aguirre, G.N., 1997. Natural Stones Directory. Roc Máquina, SA, Bilbao, Spain, 599-623.
4. Campos, M., Velasco, F., Martinez, M.A., Torralba, J.M., 2004. Recovered Slate Waste as Raw Material for Manufacturing Sintered Structural Tiles, J. Eur. Ceram., 24, 811-819.
5. Wichert, J., 2020. Slate as Dimension Stone: Origin, Standards, Properties. Mining and Deposits Freiberg, Germany.
6. Yağız, S., 2011. Yapı Malzemesi Olarak Denizli Civarında Çıkarılan Kayraktaşlarının Özellikleri, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17(3), 157-163.
7. Barros, R.S., Oliveira, D.V., Varum, H., Alves, C.A., Camões, A., 2014. Experimental Characterization of Physical and Mechanical Properties of Schist from Portugal, Const. and Buil. Mat., 50, 617-630.
8. Xingcan, W., Shaoli, Q., Baowen, Y., Wenpo, W., Zhibin, Z., 2023. Study on the Strength Characteristics of Metamorphic Slate Based on Point Load Tests. In International Conference on Civil Engineering, 172-189, Springer, Singapore.
9. TS 2513, 1993. Doğal Yapı Taşları, Türk Standartları, TSE, Ankara.
10. Hadigez Gezi ve Seyahat Kaynakları Rehberi, <https://hadigez.com/mostar-gezi-rehberi/>, Erişim Tarihi: 25.09.2022
11. Bodrum Doğal Kayrak Taş Ev Uygulamaları, <https://www.bodrumdogalkayraktasi.com/tas-ev>, Erişim Tarihi: 25.09.2022
12. Yetiş, C., Demirkol, C., 1986. Adana Baseni Batı kesiminin detay etüdü. MTA Rapor No: 8037, 187. (yayımlanmamış).
13. Ünlügenç, U.C., 1993. Controls on Cenozoic Sedimentation, Adana Basin, Southern Turkey. Ph.D. Thesis, University of Keele, 228.
14. Ünlügenç, U.C., 1986. Kızıldağ Yayla (Adana) Dolayının Jeolojisi. Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, MSc. Thesis, Adana, 77.
15. TS 699/T1, 2016. Doğal Yapı Taşları-İnceleme ve Laboratuvar Deney Yöntemleri, TSE, Ankara.
16. TS EN 12407, 2013. Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Petrografik İnceleme. TSE, Ankara.
17. TS EN 932-3, 2022. Agregaların Genel Özellikleri için Deneyler - Bölüm 3: Basitleştirilmiş Petrografik Tanımlama için İşlem ve Terminoloji, TSE, Ankara.
18. TS EN 1936, 2007. Doğal Taşlar- Deney Metotları- Gerçek Yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Gözeneklilik Tayini, TSE, Ankara.
19. ISRM, 1978. Suggested Methods for Determining Hardness and Abrasiveness of Rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15(3), 89-97.
20. ISRM, 2007. International Society for Rock Mechanics. The Complete ISRM Suggested

- Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. Editors: Ulusay R and Hudson JA. Ankara, Turkey.
21. TS EN 1926, 2007. Doğal Taşlar- Deneysel Metotları- Basınç Dayanımı Tayini, TSE, Ankara.
  22. TS EN 13161, 2003. Doğal Taşlar-Deneysel Metotları-Sabit Moment Altında Eğilme Dayanımı Tayini, TSE, Ankara.
  23. TS EN 12371, 2011. Doğal Taşlar-Deneysel Metotları-Dona Dayanım Tayini, TSE, Ankara.



## Ni-B/TiC Nanokompozit Kaplamaların Korozyon Dayanımlarının Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EES) Yöntemi ile Analizi

Ersin ÜNAL<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-3183-9592

Abdulkadir YAŞAR<sup>\*2</sup> ORCID 0000-0002-1548-2386

İsmail Hakkı KARAHAN<sup>3</sup> ORCID 0000-0002-8297-3521

<sup>1</sup>Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Osmaniye

<sup>2</sup>Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana

<sup>3</sup>Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Hatay

Geliş tarihi: 06.02.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: ÜNAL, E., YAŞAR, A., KARAHAN, İ.H., (2023). Ni-B/TiC Nanokompozit Kaplamaların Korozyon Dayanımlarının Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EES) Yöntemi ile Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 115-129.

### Öz

Makine parçaları korozyon ve aşınma gibi malzeme yüzeylerinde hasara neden olan çeşitli etkilere maruz kalmaktadır. Malzeme yüzeylerinin bu zararlı etkilerden korunması için çeşitli ve etkili yöntemler bulunmaktadır. Elektrokimyasal kaplama bu yöntemlerden en çok tercih edilenlerden bir tanesidir. Bu çalışmada, Ni-B alaşımı ana yapısı titanyum karbür (TiC) takviye parçacıkları ile desteklenerek, sanayide kullanımı çok tercih edilen AISI 304 kalite paslanmaz çelik üzerine elektrokimyasal depolama metodu ile kaplanmıştır. Elde edilen bu kaplamaların korozyon dayanımları elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EES) yöntemi ile analiz edilmiştir. Mukayese yapmak amacıyla paslanmaz çelik altlığın korozyon direncinin yanı sıra, saf nikel ve Ni-B alaşım kaplamalarda üretilmiş ve korozyon direnci incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, Ni-B/TiC nanokompozit kaplamaların Nyquist eğrilerinin, paslanmaz çelik, saf nikel ve Ni-B alaşımına göre çok daha kapsayıcı ve geniş görünümlü olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda Bode grafiğindeki nanokompozit kaplamalara ait faz açısı değerleri de yine çok daha yüksek elde edilmiştir. Nyquist eğrilerinin eş değer devre uydurma işlemiyle hesaplanan korozyon direnç değerlerine göre, en iyi korozyon dayanımını 12 g/l TiC banyo parçacık içerikli nano kompozit numune sergilemiştir. Bu numunenin direnç değeri paslanmaz çeliğe göre ~%280, saf nikelde göre ~%235, Ni-B alaşımına göre ise ~%307 civarlarında daha yüksek elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre, Ni-B alaşımını TiC ile takviye etmenin korozyondan korunma açısından son derece etkili olduğu anlaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Ni-B/TiC, Nanokompozit kaplama, Elektrodepolama, EES, Korozyon

\*Sorumlu (Corresponding author) yazar: Abdulkadir YAŞAR, [ayasar@cu.edu.tr](mailto:ayasar@cu.edu.tr)



## **Analysis of Corrosion Resistance of Ni-B/TiC Nanocomposite Coatings by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Method**

### **Abstract**

Machine parts are exposed to various effects that cause damage to material surfaces such as corrosion and wear. There are various and effective methods to protect material surfaces from these harmful effects. Electrochemical coating is one of the most preferred methods. In this study, the main structure of the Ni-B alloy was supported by titanium carbide (TiC) reinforcement particles and coated with electrochemical deposition method on AISI 304 quality stainless steel, which is highly preferred in the industry. The corrosion resistance of these obtained coatings was analyzed by electrochemical impedance spectroscopy (EIS) method. In addition to the corrosion resistance of the stainless steel substrate, pure nickel and Ni-B alloy coatings were produced and the corrosion resistance was investigated for comparison purposes. According to the results obtained, it has been determined that the Nyquist curves of Ni-B/TiC nanocomposite coatings are much more inclusive and broader than stainless steel, pure nickel and Ni-B alloys. At the same time, the phase angle values of the nanocomposite coatings in the Bode plot were also obtained much higher. According to the corrosion resistance values calculated by the equivalent circuit fitting process of the Nyquist curves, the nano-composite sample with 12 g/l TiC bath particle content exhibited the best corrosion resistance. The resistance value of this sample was ~280%, ~235% and ~307% higher than stainless steel, pure nickel, and Ni-B alloy, respectively. According to these results, it was understood that reinforcing the Ni-B alloy with TiC is extremely effective in terms of corrosion protection.

**Keywords:** Ni-B/TiC, Nanocomposite coating, Electrodeposition, EIS, Corrosion

### **1. GİRİŞ**

Endüstriyel alanda kullanılan metal makine parçaları, farklı çalışma koşullarından dolayı sıklıkla zarar görmekte ve dolayısıyla kullanım ömürleri kısalmaktadır. Metalik malzemelerle ilgili temel sorunlardan olan aşınma ve korozyonun sebep olduğu sıkıntılar ciddi ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Örneğin toz metalurjisi vb. yöntemlerle tüm malzemenin özelliklerinin iyileştirilmesi yerine, çoğu problem yüzeyde veya yüzey yakın bölgelerde meydana geldiğinden, metal malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirerek bu sorunu çözmek hem daha ekonomik, hem de daha pratik bir yaklaşımdır. Metalik malzeme yüzeylerinin mukavemetini arttırmak, korozyon ve aşınmaya karşı korumak için elektrikli veya elektriksiz kaplama, fiziksel veya kimyasal buhar biriktirme, yüzey sertleştirme, karbürleme,

nitürleme gibi farklı yüzey iyileştirme işlemleri uygulanabilmektedir. Bu yöntemler arasında kolay işletilmesi, geniş uygulama alanı, düşük maliyeti gibi özelliklerinden dolayı metal parçaların yüzeyinin kaplanmasında ve hasarlı parçaların tamirinde elektro kaplama tercih edilmektedir [1-4].

Elektrodepolama ile hazırlanan spesifik yapı ve özelliklere sahip nanokompozit kaplamalar son zamanlarda büyük ilgi görmektedir. Bunun nedeni, elektrodepolama yönteminin basitlik, esneklik, kolay kontrol edilebilirlik ve yüksek verimlilik gibi birçok benzersiz avantaja sahip olmasıdır. Ayrıca, elektrodepolama tekniğinin pürüzsüz bir yüzey ve üniform yapı elde edilmesi, nanoyapılı yüzey kaplama ile altlık arasında daha iyi bağ oluşması hususları açısından dikkate değer bir üstünlüğü bulunmaktadır [5-7].



Son yıllarda nikel bazlı kaplamalar endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar arasında Ni-B alaşım kaplama yaklaşık 900 HV gibi yüksek bir sertliğe sahip olduğundan sıklıkla tercih edilmektedir [8]. Ni-B kaplamalar kâğıt, gıda, otomotiv, uzay, petrokimya, nükleer, bilgisayar, elektronik, plastik, tekstil gibi birçok endüstride mekanik bileşenlerin kaplanmasında kullanılmaktadır [9,10]. Ni-B alaşımlı kaplamaları hazırlamak için kullanılan elektrikli ve elektriksiz her iki yöntemde de bor kaynağı olarak dimetilamin boran (DMAB) veya trimetilamin boran (TMAB) kullanılabilir, fakat dimetilamin boran daha yüksek sıcaklıkta ayrışmakta ( $>75^{\circ}\text{C}$ ) ve bu sıcaklıkta elektrikli kaplama çözeltisinin kontrol edilmesi kolay olamamaktadır. TMAB içeren elektrokaplama çözeltisi ise nispeten daha stabil olup elektrikli kaplama yöntemi açısından daha kullanışlı bir bor kaynağıdır [8]. Bununla birlikte, Ni-B alaşım kaplama, elektrikli kaplama işlemi sırasında aşırı iç stres biriktirecek kaplamada çatlaklara neden olmakta ve bu durum korozyon direncini azaltmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için Ni-B alaşım kaplamalar takviye parçacıklarla desteklenerek kompozit kaplama elde edilebilmekte ve bu çözüm alaşım kaplamaların iç gerilimini etkili bir şekilde azaltabilmekte ve aynı zamanda kaplamanın mekanik özelliklerini iyileştirebilmekte, korozyon ve aşınma direncini artırabilmektedir. Aynı zamanda teknolojiye yeni gelişmelere paralel olarak daha zorlu gereksinimler için parçalardan daha üst düzey başarımlar beklenmektedir [11]. Metal veya alaşımların başarımlarını sınırlı bir düzeyde kalabilmektedir ve bu özellikler ikinci faz parçacıklarda takviye edilerek daha ileri seviyelere taşınabilmektedir [12,13].

Üstün özellikleri ile tercih edilen bir seramik malzeme olarak TiC, yüksek erime sıcaklığı ( $3150^{\circ}\text{C}$ ), yüksek sertlik ( $3000\text{ kg/mm}^2$ ), üstün ısı ve kimyasal kararlılık, iyi korozyon ve aşınma direnci gibi mükemmel fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Daha çok yapısal uygulamalarda,

otomobil endüstrilerinde, havacılıkta ve özel kesme aletlerinde vb. kullanılan ikinci faz takviye parçacık malzemesidir. Siyah renkli ve kübik kristal fazlı olup,  $4,93\text{ g/cm}^3$  yoğunluğa sahiptir. Son yıllarda, birçok alanda korozyon ve aşınma direncini geliştirmek için kompozit kaplamalarda takviye parçacık olarak TiC kullanımı tercih edilmektedir [14-17]. Raja ve arkadaşları [18], Ni-TiC nanokompozit kaplamaları Watts tipi nikel banyosunda yumuşak çelik altlık üzerine elektrokimyasal olarak depolamışlar ve elektrokimyasal üretim parametrelerinin etkileri açısından nanokompozit kaplamaların özelliklerini incelemişlerdir. Yazarlar artan TiC içeriği ile birlikte korozyon dayanımının da geliştiğini raporlamışlardır. Choi ve arkadaşları [14], Ni-W/TiC kompozit kaplamalarını elektrodopolama metodu ile üretmişler ve banyodaki farklı miktarlardaki TiC parçacık içeriğinin kaplamalar üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Yazarlar TiC içerik artışının mikrosertlikte artışa neden olduğunu, bunun yanında aşınma dayanımında da iyileşmeye sebep olduğunu raporlamışlardır. Parçacık takviyesinin yüzey yapısını daha kaba hale getirdiği ve kristal tane boyutunda artışa neden olduğu yazarlar tarafından bildirilmiştir. Li ve Zhang [19], Ni-B alaşımını TiC parçacıkları ile güçlendirdikleri çalışmalarında ultrasonik destekli depolama yapmışlar ve bakır altlık kullanmışlardır. Akım yoğunluğu ve biriktirme süresinin etkilerini araştırmışlar ve takviye ile birlikte ultrasonik destekli depolamanın da katkısıyla korozyon direncinde önemli gelişme olduğunu raporlamışlardır. Dilek ve arkadaşları [20], TiC parçacıkları ile takviye ettikleri Ni-W alaşım anayapılı nanokompozit kaplamaları yumuşak çelik altlık üzerine darbeli elektrodopolama yöntemi ile üretmişlerdir. Ni-W/TiC kompozit kaplamaların yüzey yapısı, yapısal, mekanik, tribolojik ve korozyon özelliklerine parçacık miktarının etkilerini irdelemişlerdir. TiC takviyesinin korozyon dayanımında gelişme sağladığını ve bu duruma parçacıkların engelleme etkisinin sebep olduğunu raporlamışlardır.

Bu çalışmada, Ni-B alaşımı nano boyutlu TiC parçacıkları ile takviye edilerek paslanmaz çelik üzerine elektrokimyasal depolama yöntemi ile kaplanmıştır. Elde edilen kaplamaların korozyon direnci farklı TiC banyo parçacık miktarı etkisi üzerinden elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EES) yöntemi ile incelenmiştir. Bu üstün özelliklere sahip yeni tür nanokompozit kaplamaların zorlu çalışma koşullarında kullanılmak amacıyla hem literatüre hem de ilgili sektörlere önemli katkılar getireceği öngörülmektedir.

## **2. MATERYAL VE METOT**

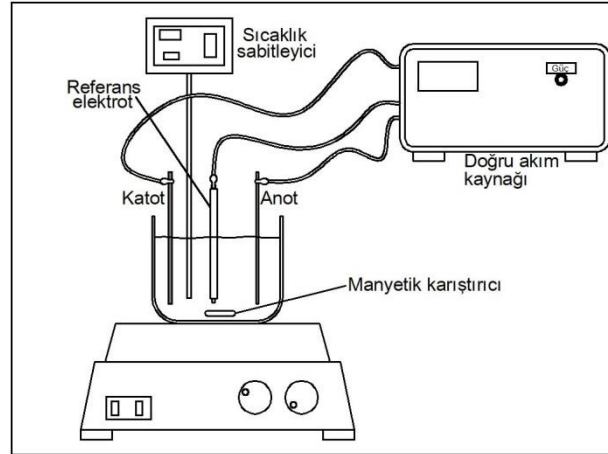
AISI 304 kalite paslanmaz çelik altlık üzerine Ni-B alaşım matrisli ve TiC parçacık takviyeli nanokompozit kaplamalar geleneksel elektrodepolama yöntemiyle biriktirilmiştir. Temel olarak Watts tipi nikel elektroliti kullanılmıştır. Nanokompozit ve alaşım kaplamalar elde edebilmek amacıyla Watts tipi nikel banyosuna gerekli kimyasallar eklenmiştir. Alaşım ana yapı elde edebilmek maksadıyla banyoya bor kaynağı olarak trimetilamin boran kompleksi (TMAB) ilave edilmiştir. Numunelerin hazırlanması esnasında belirli işlemler titiz bir şekilde uygulanmıştır. Önce 0,5 mm kalınlığındaki levha paslanmaz çelik altlıkların depolama yapılacak yüzeyi kalından inceye doğru zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra altlık üzerinde 4 cm<sup>2</sup> alan açıkta kalacak şekilde geriye kalan alan izole edilerek boyanmıştır. Bu işlemden sonra altlık malzemesi önce aseton ile yıkayıp saf su ile durulanmış ve sonra %20 hidroklorik asit (HCl) çözeltisi içinde 1-2 dk dağlama işlemine maruz bırakılmıştır. Dağlama işleminden sonra saf su ile durulanıp kurumaya bırakılmıştır. Depolama esnasında elektrolit ortam havasına açıktır ve depolanmaya hazır durumdaki nanokompozit numunelerin üretildiği banyonun rengi tamamiyle siyah görünümündedir. Banyo içerik bilgileri ve depolama işlemi değişkenleri Çizelge 1'de verilmiştir. Bütün depolama işlemlerinde CH Instruments 608E marka ve model elektrokimyasal

analiz cihazı kullanılmıştır. Yüzey aktifleyici madde olarak sodyum dodesil sülfat (SDS) kullanılmış ve depolama esnasında banyo manyetik karıştırıcı ile sürekli karıştırılmıştır. Ayrıca depolama işleminden önce hazır durumdaki elektrolit 30 dk süreyle ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılmış, bu sayede olası TiC parçacık topaklanmaları engellenmiştir. Ultrasonik karıştırma işlemi elektrolit sıcaklığında yükselmeye neden olduğundan dolayı, depolama sıcaklığı olan 43 °C civarlarına soğuması için kısa bir süre dinlendirilmiştir. Ultrasonik karıştırma cihazı olarak Hielscher marka UP 200S model cihaz kullanılmıştır. Bu işlem esnasında çevrim değeri 1, genlik değeri ise %70 olarak ayarlanmıştır (~22 kHz) Takviye olarak kullanılan TiC parçacıklarının toz boyutu 500 nm'den daha düşük ölçülerdedir ve farklı miktarlarda elektrolite eklenmiştir. Elektrodepolama işleminde geleneksel üç elektrodlu sistem kullanılmıştır. Katot olarak paslanmaz çelik altlık, anot olarak ise platin tel çubuk kullanılmıştır. Referans elektrot olarak ise doygun kalomel elektrot kullanılmıştır. Depolama işlemi esnasında elektrotlar arasında yaklaşık üçer cm boşluk bırakılmış ve banyoda dikey olarak konumlandırılmışlardır. Elektrodepolama sisteminin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. Tüm depolama işlemlerinde 50 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğu değeri kullanılmış ve pH değeri 4 olarak ayarlanmıştır. Banyonun pH değeri ayarlanırken ihtiyaca göre HCl asit veya sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Depolama süresi 60 dk ile sınırlandırılmıştır.

Kaplamaların korozyon dayanımları elektrokimyasal empedans spektroskopisi yöntemi ile incelenmiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi çalışmaları 10 mV genlikli AC akımla 100 kHz-10 mHz (10<sup>5</sup>-10<sup>-2</sup> Hz) aralığında gerçekleştirilmiştir. Bütün korozyon deneyleri %3,5 sodyum klorür (NaCl) sulu çözeltisinde gerçekleştirilmiştir. Korozyon analizleri için CH Instruments 608E elektrokimyasal analiz cihazı kullanılmıştır. Nyquist eğrilerinin eşdeğer devre uydurma işlemi Zview (versiyon 2.9c) programı ile gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 1.** Depolama değişkenleri ve banyo içerikleri [21].

<b>Depolama değişkenleri / banyo içerikleri</b>	
Akım yoğunluğu	50 mA/cm <sup>2</sup>
pH değeri	4±0,1
Sıcaklık değeri	43±1 °C
Süre	60 dk
Depolama sırasında manyetik olarak banyo karıştırma hızı	200-300 dev/dk
Depolama öncesi ultrasonik karıştırma	30 dk
Nikel kaynağı: NiSO <sub>4</sub> .6H <sub>2</sub> O (Nikel sülfat)	240 g/l
Nikel kaynağı: NiCl <sub>2</sub> . 6H <sub>2</sub> O (Nikel klorit)	45 g/l
pH düzenleyici: H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (Borik asit)	30 g/l
<u>Bor kaynağı: Trimetilamin boran bileşiği (TMAB)</u>	<u>3 g/l</u>
<u>Takviye parçacık: Titantum karbür tozu (TiC)</u>	<u>0-12 g/l (nano boyutta)</u>
Yüzey aktifleyici: Sodyum dodesil sülfat (SDS)	0,5 g/l (kompozit kaplama için)
Tane küçültücü: Sakarin	2 g/l (kompozit kaplama için)

**Şekil 1.** Elektrokimyasal kaplama sisteminin şematik gösterimi

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

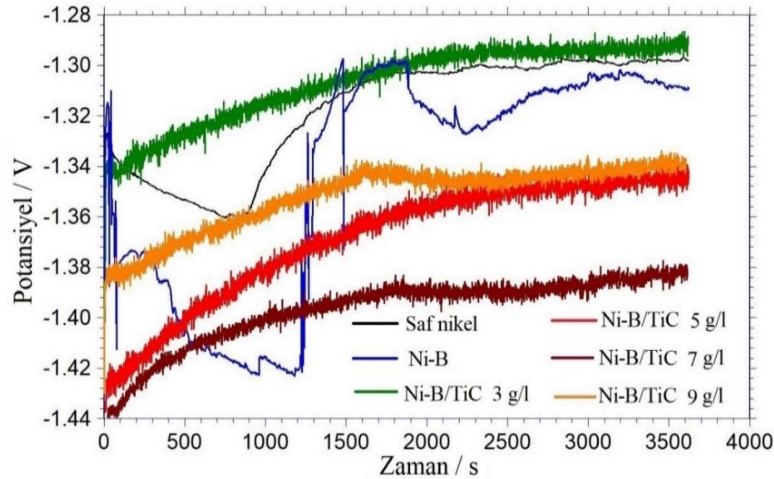
#### 3.1. Kronopotansiyometri Analizi

Kronopotansiyometri tekniği temel olarak elektroda sabit bir akım tatbik edilmesiyle birlikte potansiyel değişiminin zamanın bir fonksiyonu olarak kaydedilebildiği bir yöntemdir. Kaydedilen potansiyel-zaman eğrilerinden, elektrokimyasal sistemin incelenmesi ve yorumlanması mümkün olabilmektedir. Örneğin potansiyel değişiminin zamanla sabit kalması ya da çok fazla salınım yapmaması elde edilen birikimin kararlı olduğunu gösterebilmektedir [22]. Elde ettiğimiz kaplamalarda sabit akım uygulandığından dolayı,

depolama esnasında potansiyel sürekli değişmektedir. Depolama yapmamıza imkân veren elektrokimyasal cihaz, sabit akımı hassas bir şekilde sağlayabilmek için anlık olarak potansiyel değerini düzenlemektedir. Kaplamanın yapıldığı elektrolitin cinsine ve içerdiği bileşenlere göre bu eğriler farklı seyirler izleyebilmektedirler. Depolama zamanı 3600 saniyedir. Şekil 2’de 50 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda farklı TiC banyo miktarlarına sahip banyoların kronopotansiyometri eğrileri verilmiştir. Şekilde karşılaştırma amacıyla saf nikel ve Ni-B alaşımı banyolarının da kronopotansiyometri eğrileri bulunmaktadır. Şekilden görüleceği üzere nanokompozit kaplamaların depolanma potansiyeli saf nikel ve

Ni-B alaşım kaplamalarınınkine göre daha yüksek potansiyel değerlerinde seyretmektedir. Ayrıca saf nikel ve özellikle de Ni-B alaşım banyosunda potansiyel değerlerinde daha yüksek salınım şeklinde voltaj değişimleri görülürken, nanokompozit kaplama banyolarının nispeten daha kararlı ve yatay bir seyir izlediği anlaşılmaktadır. TiC parçacık banyo miktarı artışıyla birlikte, depolanma potansiyelinin artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Nanokompozit kaplamaların üretildiği banyolara ikinci faz parçacıkların eklenmesi neticesinde elektrolitin iletkenliğinin ve elektrik akımına gösterdiği direncin değişmesi muhtemeldir. Bu değişim depolanma potansiyelinin değişmesine neden olmaktadır.

Ayrıca nanokompozit kaplamalarda elektrolit manyetik karıştırıcı ile sürekli olarak karıştırıldığı için, karıştırma işleminin yapılmadığı saf nikel ve Ni-B alaşım kaplamaların üretildiği elektrolitlerin kronopotansiyometri eğrilerinden oldukça farklı bir seyir izlediği, genliği küçük fakat sık salınım hareketleri yaparak ilerlediği görülmektedir. Şekil 2 daha yakından incelendiğinde depolanma potansiyelinin yaklaşık -1,29 V ile -1,39 V arasında değiştiği görülmektedir. Şekilde zamanın ilerlemesi ile birlikte potansiyelin azalmasının sebebinin ise nikel iyonlarının indirgenerek altlık üzerine depolanması sonucu olduğu söylenebilir.



Şekil 2. 50 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda depolanma potansiyeli farklı TiC banyo içeriklerine sahip elektrolitlerin kronopotansiyometri eğrileri

### 3.2. EES Yöntemi ile Korozyon Analizi

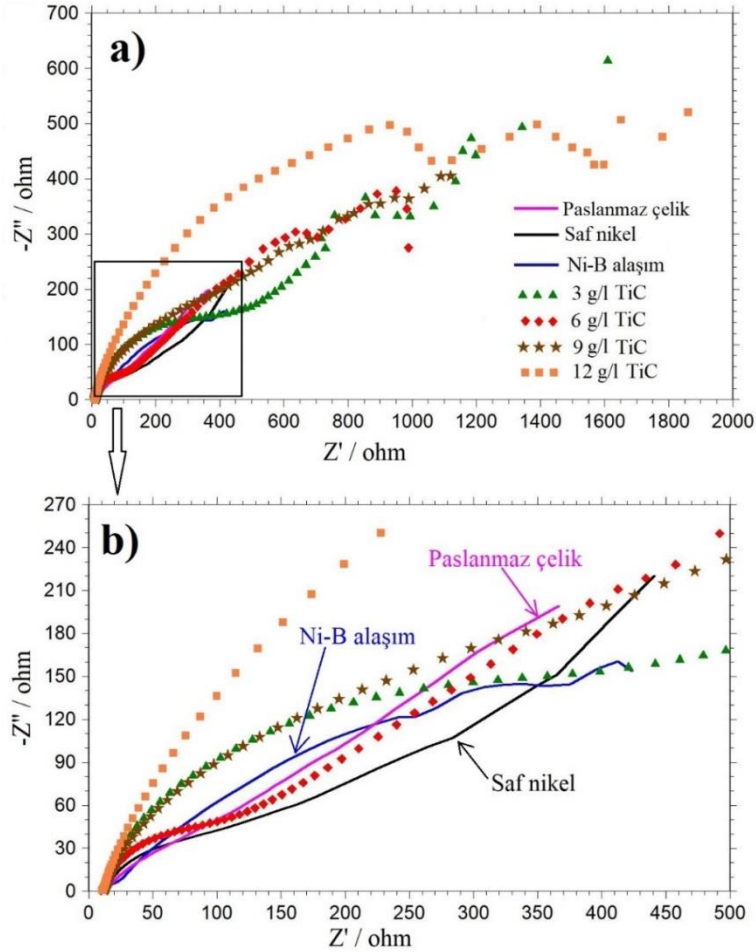
Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EES), korozyon davranışlarının analiz edilmesinin yanı sıra, biyoalgılayıcılar, pil ve yakıt hücresi uygulamaları, boya karakterizasyon çalışmaları, algılayıcı imalatı ve fiziksel elektrokimya uygulamaları gibi çok geniş bir yelpazede etkin bir şekilde kullanılan elektrokimyasal bir tekniktir [22]. EES tekniğini diğer korozyon analizi yöntemlerine göre öne çıkan üstünlüğü geniş frekans aralığında çalışması sayesinde elektrotta meydana gelen tepkimeleri analiz edebilmemizi ve bu tepkimeler hakkında daha fazla ve sağlıklı veri

elde edebilmemize olanak vermesidir. EES tekniğinde elde edilen verilerin yorumlanmasında henüz standart bir model geliştirilememiştir [22, 23]. Bu yöntemde alternatif potansiyel uygulanarak alternatif akım geçişi sağlanmakta ve sürekli yön değiştiren akım sayesinde yüzeyde belirli bir yönde kutuplaşmanın olması engellenmektedir. Doğru akımın geçtiği bir devrede direnç “ohmik direnç (R)” olarak adlandırılmakta, bunun yanında alternatif akımın geçtiği bir devrede ise direnç “empedans (Z)” olarak isimlendirilmektedir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için kaplama/çözelti arayüzeyini

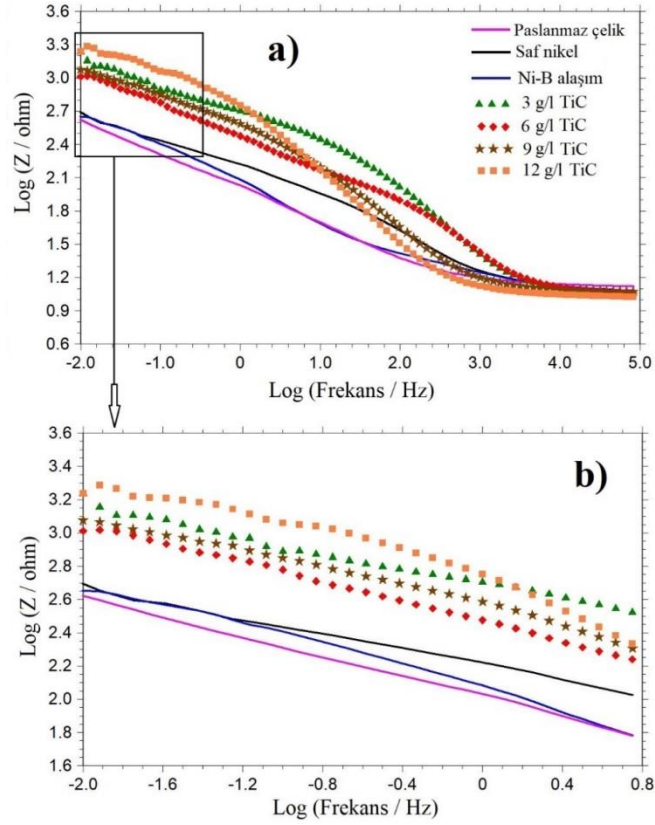
temsilen elektronik bir eşdeğer devrenin tasarlanması gerekmektedir [24].

Şekil 3'de EES yöntemi ile elde edilen Ni-B/TiC nanokompozit kaplamalara ait Nyquist eğrileri TiC parçacık banyo miktarı değişimine göre verilmiştir. Ayrıca, mukayese amacıyla aynı şekile saf nikel, Ni-B alaşım kaplamalar ile paslanmaz çelik altlığa ait eğrilerde birlikte sunulmuştur. Şekil 3'de verilen Nyquist eğrilerinde görüleceği üzere bütün Ni-B/TiC nanokompozit kaplamalar saf nikel ve Ni-B kaplamalar ile paslanmaz çelik altlığa göre oldukça geniş ve daha kapsayıcı bir eğriye sahip olmakla birlikte, sanal eksene daha yakın görünmektedir, yani kapasitif döngünün

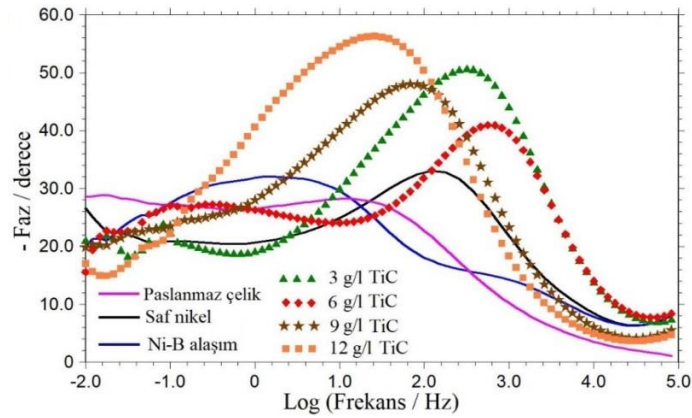
(capacitive loop) daha geniş olduğunu söylemek mümkündür. Bu durumda nanokompozit kaplamaların korozyon dayanımlarının saf nikel ve Ni-B kaplamalar ile paslanmaz çelik altlığa göre çok daha iyi olduklarını ifade edebiliriz. Genel olarak kaplamaların korozyondan koruma mekanizmasının bariyerleme (kapasitif) olduğu ifade edilebilir, yani kaplama sayesinde korozyona neden olan iyonlar altlığa ulaşmamaktadır. Kapasitans karakter, kaplama boyunca korozyona neden olan maddelerin taşınmasını engel olarak kaplamanın koruyucu kabiliyetini geliştirebileceği bilinmektedir. Kapasitif özellik koruyucu kaplamaların kimyasal kararlılığını arttırmaktadır [10, 25].



Şekil 3. Ni-B/TiC nanokompozit, Ni-B alaşım, saf nikel kaplamaların ve paslanmaz çelik altlığın Nyquist eğrileri a) genel, b) yakınlaştırılmış görüntü



Şekil 4. Ni-B/TiC nanokompozit, Ni-B alaşım, saf nikel kaplamaların ve paslanmaz çelik altlığın empedans modülü eğrileri a) genel, b) yakınlaştırılmış görüntü



Şekil 5. Ni-B/TiC nanokompozit, Ni-B alaşım, saf nikel kaplamaların ve paslanmaz çelik altlığın Bode eğrileri

Ni-B/TiC nanokompozit kaplamaların EES işlemlerinde mukayese ettiğimizde bütün çizgelerde sonuçlarına göre korozyon dayanımlarını kendi 12 g/l TiC parçacık banyo miktarına sahip

numunenin en iyi korozyon dayanımına sahip olduğu görülmektedir. 12 g/l TiC parçacık banyo miktarına sahip numune Nyquist eğrilerinde diğer numunelere göre çok daha geniş ve diğerlerini kapsayıcı olarak görünmektedir. Şekil 4'deki empedans modülü eğrileri incelendiğinde düşük frekans bölgesinde en yüksek empedans modülüne sahip 12 g/l TiC parçacık banyo miktarlı numuneyi sırasıyla 3, 9 ve 6 g/l TiC parçacık içerikli numuneler takip etmiştir. Yine şekil 4'de düşük frekans bölgelerinde bütün kompozit kaplamaların saf nikel ve Ni-B kaplamalar ile paslanmaz çelik altlıktan daha yüksek empedans modülü değeriyle korozyon dayanımı açısından çok daha iyi oldukları net bir şekilde görülmektedir. Düşük frekans bölgesinde nanokompozit kaplamaların artan empedans modülü değerleri, kaplamanın iyi bariyerleme (kapasitif) özellikleri sergilediğinin bir göstergesidir. Korozyon aktivitesi açısından daha dirençli karakterin baskın olduğu yüksek frekans bölgelerinde tüm empedans modülü eğrilerinin birbirlerine çok yaklaştıkları görülmektedir [26]. Şekil 5'deki Bode eğrileri incelendiğinde yine en yüksek faz açısı değerinin 12 g/l TiC parçacık banyo miktarlı numuneye ait olduğu görülmektedir. Bütün nanokompozit numuneler saf nikel ve Ni-B kaplamalar ile paslanmaz çelik altığa göre çok daha yüksek faz açısı değerleri sergilemişlerdir.

Şekil 3 b'de verilen yakınlaştırılmış grafikte saf nikel, Ni-B alaşım ve paslanmaz çelik numunelerin Nyquist eğrileri birbirleri ile mukayese edildiğinde net bir çıkarımda bulunmak pek mümkün görünmemektedir. Fakat şekil 4 b'de verilen yakınlaştırılmış empedans modülü grafiğine paslanmaz çelik numunenin biraz daha düşük direnç değerine sahip olduğu ve benzer durumun şekil 5'deki Bode grafiklerinde de görüldüğünü ifade edebiliriz. Her iki şekilde de Ni-B ve saf nikel kaplamaların korozyon dayanımları benzer görünmektedir.

Çizelge 2'de, Şekil 3'de verilen Nyquist eğrilerinin eşdeğer elektrik devresi uydurma eğrilerinden elde

edilmiş veriler sunulmuştur. Nyquist eğrilerinin eşdeğer devre uydurma işlemi Zview (versiyon 2.9c) programı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da eğri uydurma işleminde kullanılan elektrik eşdeğer devreler sunulmuştur. Orijinal eğriler ve uydurulmuş eğriler ise şekil 8'de bir arada verilmiştir. Ni-B alaşım hariç diğer eğrilerde b ile gösterilen Warburg empedanslı devre kullanılmıştır, benzer bir eğriye ulaşabilmek için elektrik devresine Warburg empedansı ekleme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Warburg empedans elemanı, kaplamanın çözelti ile ara yüzeyindeki elektrokimyasal süreçlerin kinetik kontrollü olmasının yanı sıra yayılım kontrolü altında da olduğunu göstermektedir [27]. Warburg elementi, bir elektrokimyasal tepkimede çözeltideki iyonların yayılımını temsil etmektedir. Örneğin, yüksek frekanslarda Warburg empedansı gözlemlenmez, çünkü göç, çalışma frekansından çok daha uzun zaman aralıklarında gerçekleşir ve bu nedenle çözeltideki moleküllerin nispeten yavaş hareketi empedans katkılarında zaman farkına neden olur. Bu nedenle, Warburg katkıları genellikle düşük frekans bölgesinde görülür [28]. Elektrik eşdeğer devresinde "Rs" çözelti direncini, "Rp" ve "W" kaplamanın toplam direncini, CPE ise kaplamaya ait sabit faz elemanını temsil etmektedir. CPE korozyonun meydana geldiği arayüzey veya elektrot geometrisindeki pürüzlülük, gözeneklilik, tepkinirlik, potansiyel ve akım dağılımı gibi etmenlerden dolayı sistemlerin düzgün olmama durumunu telafi etmek için kullanılmaktadır [29]. Çizelge 2'de "Yo" ve "n" CPE kapasitansının büyüklüğünü ve faz üssünü temsil etmektedir ve faz üssü 1 olan kapasitör ideal bir CPE'dir. W-P ise Warburg kısmının eğimini temsil etmektedir. Çizelge 2'deki veriler analiz edildiğinde Rs ile gösterilen çözeltiye ait direncin bütün kaplama numunelerinde benzer değerlerde olduğu göze çarpmaktadır, bu durum korozyon deneylerinin yapıldığı çözeltilerin benzer standartlarda olduğunu göstermektedir [30]. Şekil 7'de aynı zamanda Çizelge 2'de de verilen paslanmaz çelik altlık, saf nikel, Ni-B alaşım ve nanokompozit kaplamaların EES yöntemiyle elde



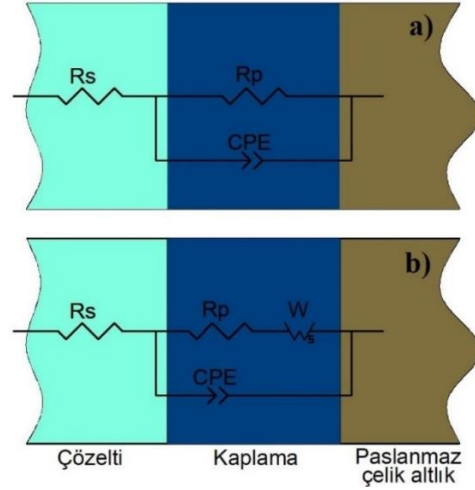
edilen korozyon dirençleri daha kolay mukayese edebilmek amacıyla çubuk grafik şeklinde de sunulmuştur. Çizelge 2 ve Şekil 7 incelendiğinde  $R_p$  ve  $W$  ile gösterilen kaplamaya ait toplam direnç değerlerinde en yüksek değer 12 g/l TiC banyo miktarlı nanokompozit numunede elde edildiği görülmektedir. Daha sonra direnç değerleri bakımında sıralama 3 g/l TiC, 9 g/l TiC ve 6 g/l TiC banyo miktarlı numunelerle devam etmektedir. 3 g/l TiC banyo içerikli nanokompozit numuneyi gözardı edersek, TiC banyo içeriği artışıyla birlikte korozyon dayanımında artış eğiliminde olduğunu ifade etmek mümkün görünmektedir. Ayrıca saf nikel ve Ni-B kaplama ile paslanmaz çelik altlıkla mukayese edildiğinde, tüm nanokompozit kaplamaların çok daha yüksek direnç değerleri ile korozyon dayanımı açısından daha iyi korozyon dayanımı gösterdiği görülmektedir. En iyi korozyon direnci sergileyen nanokompozit kaplama saf nikel, Ni-B alaşım ve paslanmaz çelik altlık ile karşılaştırıldığında, saf nikel göre % 235, Ni-B alaşıma göre %307, paslanmaz çelik altlığa göre ise %280 oranında daha iyi olduğu görülmektedir. Çizelge 2'deki değerlerin, Şekil 3'de verilen Nyquit eğrileriyle birebir uyumlu olduğu görülmektedir. Saf nikel, Ni-B alaşım ve paslanmaz çelik numunelerin korozyon dayanımlarını kendi içlerinde mukayese ettiğimizde, Ni-B alaşımın Çizelge 2'de en düşük direnç değerleri elde edilmesine karşın Şekil 4 ve 5'de gösterilen çizgelerde paslanmaz çeliğin en düşük faz açısı ve empedans modülü değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Aslında üç numunenin de korozyon dayanım değerleri birbirine yakın olmakla birlikte saf nikelin

korozyon dayanımının diğer iki numuneden daha yüksek olduğu söylenebilir. Ayrıca Ni-B alaşımın normalde korozyon dayanımının daha yüksek olması beklenmekle birlikte, bu duruma Ni-B alaşımının iç gerilimlerden dolayı kırık ve çatlaklardan oluşan yüzey yapısı nedeniyle korozyon aktivitelerinin sürekli artış göstermesinin sebep olduğu söylenebilir. Bekish ve arkadaşları [31], Ni-B alaşım kaplamalarda bor içeriği artışıyla birlikte korozyon direncinin azaldığını ve bu tür heterojen kaplamalarda kristal ve amorf fazlar arasında çok küçük galvanik çiftlerin oluşumu nedeniyle korozyon süreçlerinde hızlanma olabileceğini bildirmişlerdir. Yazarlar ayrıca bor içeriğindeki artışla birlikte kusurların ve gevşekliliğin artması nedeniyle korozyona karşı koruyuculuğun azaldığını bildirmişlerdir [31]. Shahzad ve arkadaşları [32], Ni-P alaşım anayapısını TiC nanoparçacıkları ile takviye ederek çelik altlık üzerine elektrokimyasal nanokompozit kaplama depolamışlardır. Elde ettikleri kaplamaların özelliklerine TiC parçacık banyo miktarının etkilerini incelemişlerdir. Yazarlar, TiC ile takviyenin korozyon direncini geliştirdiğini ve banyodaki TiC içeriği artışının ise korozyon dayanımında artışa neden olduğunu ifade etmişlerdir. Doğan ve arkadaşları [12], Ni-B alaşımını TiN parçacıkları ile takviye ederek korozyon dayanımlarını akım yoğunluğu değişimi üzerinden incelemişlerdir. Yazarların EES analiz sonuçlarına göre TiN takviyesinin Ni-B alaşım anayapısını ve çelik altlığı korozyona karşı daha dirençli hale getirdiğini ve en yüksek korozyon direncinin 45 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğu değerinde elde edildiğini bildirmişlerdir.

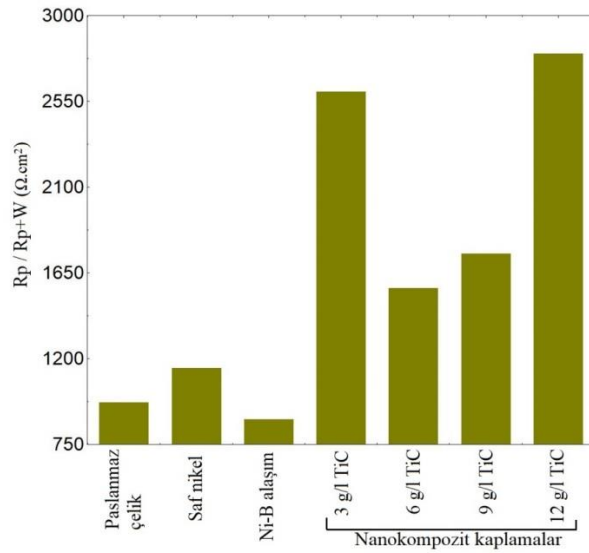
**Çizelge 2.** Ni-B/TiC nanokompozit, Ni-B, saf nikel kaplamalar ile paslanmaz çelik altlığa ait empedans eşdeğer devre analizi verileri

Numune	$R_s$ ( $\Omega.cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega.cm^2$ )	$W$ ( $\Omega.cm^2$ )	$Y_o$ ( $\Omega^{-1}.s^n.cm^{-2}$ )	$n$	$W-P$
Paslanmaz çelik	13	70	900	0,0054	0,59	0,36
Saf nikel	11	150	1000	0,0027	0,53	0,36
Ni-B alaşım	11	880	-	0,011279	0,43	-
3 g/l TiC	11	400	2200	0,00028	0,67	0,34
6 g/l TiC	11	70	1500	0,00024	0,75	0,33
9 g/l TiC	11	600	1150	0,0022	0,57	0,39
12 g/l TiC	11	1700	1100	0,0018	0,62	0,47





Şekil 6. Empedans eşdeğer elektrik devreleri



Şekil 7. Paslanmaz çelik altlık, saf nikel, Ni-B alaşım ve nanokompozit kaplamaların EES yöntemiyle elde edilen korozyon dirençleri (Rp veya Rp+W)

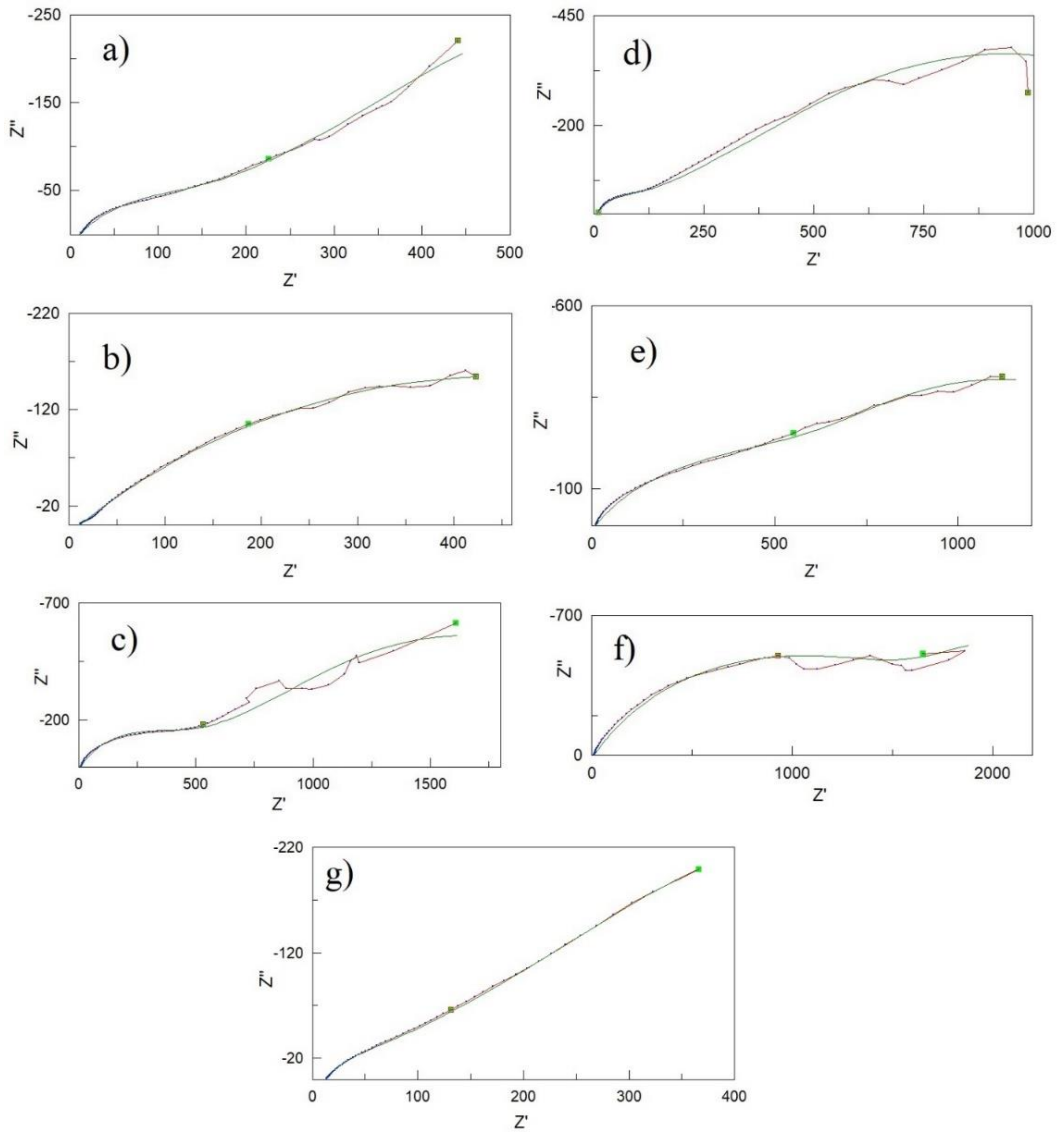
Korozyon genel olarak yüzeyden başlamakta ve yüzeydeki çeşitli gözenek, çukur veya çatlaklar gibi kusurlardan kaplamanın iç kısımlarına doğru ilerlemektedir. Metal veya alaşım şeklindeki ana yapıya ilave edilen mikro veya nano boyuttaki takviye parçacıklar, düzgün, ince taneli, yoğun ve sıkı bir yapı oluşmasını sağlamaktadırlar. Genelde seramik olan bu takviye ikinci faz parçacıklar, kimyasal olarak kararlı ve elektriksel olarak yalıtkan olduklarından dolayı korunması gereken

altlık malzeme ile korozif ortamlar arasında engel görevi görmektedirler [19].

TiC parçacık takviyesiyle meydana gelen korozyon dayanımındaki gelişme literatürde çeşitli şekillerde ifade edilmektedir. Kompozit kaplamanın yüzeyi üzerindeki çatlakların, boşlukların ve mikron boyutunda deliklerin TiC parçacıkları tarafından doldurularak fiziksel bir engel görevi görmesinden dolayı korozyon

dayanımında gelişme olmaktadır. Takviye TiC parçacıkların Ni-B anayapı içindeki varlığı hem katodik hem de anodik elektrokimyasal tepkimelerin kinetiklerini etkilemektedir, yani katodik ve anodik tepkime süreçlerini baskılamaktadır. Bu durumdan katodik hidrojen oluşum tepkimeleriyle birlikte anodik çözünme tepkimeleri de ciddi miktarda etkilenmektedir [33].

Korozyon direnci gelişimini açıklayan diğer bir açıklama ise elektrokimyasal kaplama işlemi esnasında tanecik sınırlarında iyi bir şekilde dağılım gösteren takviye parçacıklar kaplamadaki kusurları azaltmaktadırlar ve kaplamayı daha sıkı ve daha az geçirgen hale getirmektedirler. Bu durum ise korozyon direncinde artışa sebep olmaktadır [34].



**Şekil 8.** Nyquist eğrilerinin eşdeğer devre uydurma eğrileri a) saf nikel, b) Ni-B alaşım, c) 3 g/l TiC, d) 6 g/l TiC, e) 9 g/l TiC, f) 12 g/l TiC banyo miktarlı Ni-B/TiC nano kompozit kaplamalar, g) paslanmaz çelik

#### 4. SONUÇLAR

Paslanmaz çelik altlık malzeme elektrodopolama yoluyla Ni-B alaşımı anayapılı ve TiC nano parçacık takviyeli kompozit kaplama ile kaplanmıştır. Üretilen Ni-B/TiC nanokompozit kaplamaların korozyon davranışları elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EES) yöntemi ile analiz edilmiştir. Ayrıca daha etkili yorumlar yapabilmek amacıyla saf nikel, Ni-B alaşım ve paslanmaz çelik altlık malzemelerinde korozyon dayanımları analiz edilerek, nano kompozit kaplamalar ile mukayese edilmiştir. Kronopotansiyometri analizlerine göre elektrolite TiC ilavesinin depolanma potansiyelini artırdığı gözlenmiştir. EES korozyon analizi sonuçlarına göre Ni-B alaşımının TiC ile takviye edilmesinin korozyondan korumada son derece faydalı olduğu anlaşılmıştır. Nanokompozit kaplamaların saf nikel, Ni-B alaşım ve paslanmaz çeliğe göre çok daha üst düzeyde korozyona karşı daha dirençli olduğu yapılan analizlerle belirlenmiştir. Ni-B/TiC nanokompozit kaplamaların içinde ise en iyi korozyon dayanımını 12 g/l TiC parçacık banyo miktarlı numune sergilemiştir. Korozyon direnci değerleri üzerinden karşılaştırıldığında, en iyi nanokompozit kaplamanın Ni-B alaşıma göre %307, paslanmaz çelik altlığa göre ise %280 oranında başarı sergilediği tespit edilmiştir.

#### 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından desteklenmiştir (Proje ID: 12868).

#### 6. KAYNAKLAR

- Doğan, F., Duru, E., Uysal, M., Akbulut, H., Aslan, S., 2022. Tribology Study of Pulse Electrodeposited Ni-B-SWCNT Composite Coating. JOM, 74, 574-583.
- Desen, C., Lan Zhang, L., Zhu, Y., Xia, H., Li, N., Song, W., Bai, H., Ma, H., 2022. Preparation and Properties of Electrodeposited Ni-B-Graphene Oxide Composite Coatings. Materials, 15(6), 2287.
- Qiu, C., Liu, D., Jin, K., Fang, L., Sha, T., 2017. Corrosion Resistance and Micro-Tribological Properties of Nickel Hydroxide-Graphene Oxide Composite Coating. Diamond and Related Materials, 76, 150-156.
- Zhang, D., Cui, X., Jin, G., Cai, Z., Lu, B., 2018. Microstructure and Mechanical Properties of Electro-Brush Plated Fe/MWCNTs Composite Coatings. Surface and Coatings Technology, 348, 97-103.
- Li, B., Mei, T., Li, D., Du, S., 2019. Ultrasonic-assisted Electrodeposition of Ni-Cu/TiN Composite Coating from Sulphate-citrate Bath: Structural and Electrochemical Properties. Ultrasonics Sonochemistry, 58, 104680.
- Kumaraguru, S., Kumar, G.G., Raghu, S., Gnanamuthu, R.M., 2018. Fabrication of Ternary Ni-TiO<sub>2</sub>-TiC Composite Coatings and Their Enhanced Microhardness for Metal Finishing Application. Applied Surface Science, 447, 463-470.
- Li, H., He, Y., He, T., Fan, Y., Yang, Q., Zhan, Y., 2016. The Influence of Pulse Plating Parameters on Microstructure and Properties of Ni-W-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Nanocomposite Coatings. Ceramics International, 42, 18380-18392.
- Sheu, H.H., Tzeng, Y.C., Syu, J.H., 2019. Study of the Strengthening Mechanism of Electrodeposited Ni-B Thin Films with Ultra-Low Boron Content. Materials Letters, 238, 275-277.
- Shakoor, R.A., Kahraman, R., Waware, U.S., Wang, Y., Gao, W., 2014. Synthesis and Properties of Electrodeposited Ni-B-Zn Ternary Alloy Coatings. International Journal of Electrochemical Science, 9, 5520.
- Tozar, A., 2020. Investigating The Hexadecylamine as A New Nonionic Surfactant Candidate for Electrodeposition of Wear-Resistant Metal-matrix Composites. Surface Engineering, 36(9), 990-999.
- Shakoor, R.A., Kahraman, R., Waware, U.S., Wang, Y., Gao, W., 2014. Synthesis and Properties of Electrodeposited Ni-B-CeO<sub>2</sub> Composite Coatings. Materials and Design, 59, 421-429.
- Doğan, F., Uysal, M., Duru, E., Akbulut, H., Aslan, S., 2020. Pulsed Electrodeposition of

- Ni-B/TiN Composites: Effect of Current Density on The Structure, Mechanical, Tribological, and Corrosion Properties. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 8(4), 1271-1284.
13. Sheu, H.H., Wang, Q.Y., Huang, P.C., Cheng, A.Y., Liu, Y.M., Hou, K.H., Ger, M.D., 2021. Effect of Trimethylamine Borane (TMAB) on the Corrosion Resistance and Mechanical Properties of Nickel-Based Composite Coatings. *International Journal of Electrochemical Science*, 16, 21049.
  14. Choi, J.H., Gyawali, G., Dhakal, D. R., Joshi, B., Lee, S. W., 2020. Electrodeposited Ni-W-TiC Composite Coatings: Effect of TiC Reinforcement on Microstructural and Tribological Properties. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 33, 573-582.
  15. Karbasi, M., Yazdian, N., Vahidian, A., 2012. Development of Electro-Co-Deposited Ni-TiC Nano-Particle Reinforced Nanocomposite Coatings. *Surface & Coatings Technology*, 207, 587-593.
  16. Pandey, U., Purohit, R., Agarwal, P., Dhakad, S.K., Rana, R.S., 2017. Effect of TiC Particles on the Mechanical Properties of Aluminium Alloy Metal Matrix Composites (MMCs). *Materials Today: Proceedings*, 4, 5452-5460.
  17. Zhang, D., Li, J., Zheng, J., 2013. Synthesis and Electrochemical Properties of PANI-TiC Nanocomposite and its Electrocatalytic Behavior. *Materials Letters*, 93, 99-102.
  18. Raja, M., Bapu, G.N.K.R., Maharaja, J., Sekar, R., 2014. Electrodeposition and Characterisation of Ni-TiC Nanocomposite Using Watts Bath. *Surface Engineering*, 30(10), 697-701.
  19. Li, B., Zhang, W., 2020. Facile Synthesis and Electrochemical Properties of a Novel Ni-B/TiC Composite Coating via Ultrasonic-Assisted Electrodeposition. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 61, 104837.
  20. Dilek, S., Algül, H., Akyol, A., Alp, A., Akbulut, H., Uysal, M., 2021. Pulse Electro Co-deposition of Submicron-Sized TiC Reinforced Ni-W Coatings: Tribological and Corrosion Properties. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 9(2), 673-685.
  21. Ünal, E., Yaşar, A., Karahan, İ.H., 2019. A Review of Electrodeposited Composite Coatings with Ni-B Alloy Matrix. *Materials Research Express*, 6, 092004.
  22. Tozar, A., 2012. Düşük Karbonlu Çeliğin Çevreci ZnNi/Polianilin İletken Polimer ile Kaplanması ve Kaplanan Çeliğin Korozyon Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 151.
  23. Dobbelaar, J.A.L., Dewit, J.H.W., 1990. Impedance Measurements and Analysis of the Corrosion of Chromium. *Journal of the Electrochemical Society*, 137 (7): 2038-2046.
  24. Erbil, M., 2012. Korozyon: İlkeler-Önlemler. Korozyon derneği yayını, Ankara, 373.
  25. Li, B., Zhang, W., Huan, Y., Dong, J., 2018. Synthesis and Characterization of Ni-B/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposite Coating by Electrodeposition Using Trimethylamine Borane as Boron Precursor. *Surface & Coatings Technology*, 337, 186-197.
  26. Tozar, A., Karahan, İ.H., 2019. Effect of Octylphenyl Ether Group Nonionic Surfactant on the Electrodeposition of the Hexagonal Boron Nitride Reinforced Ni-B Matrix Composite Coatings. *Surface & Coatings Technology*, 381, 125131.
  27. Nezhad, A.H.N., Zahrani, E.M., Alfantazi, A.M., 2022. Erosion-corrosion of Electrodeposited Superhydrophobic Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposite Coatings Under Jet Saline-Sand Slurry Impingement. *Corrosion Science*, 197, 110095.
  28. Randviir, E.P., Banks, C.E., 2013. Electrochemical Impedance Spectroscopy - an Overview of Bioanalytical Applications. *Analytical Methods*, 5(5), 1098-1115.
  29. Mousavi, S.M.A., Pitchumani, R., 2021. A Study of Corrosion on Electrodeposited Superhydrophobic Copper Surfaces. *Corrosion Science*, 186, 109420.
  30. Güney, F., Kam, M., Gerengi, H., Kaya, E., Yıldız M., 2022. Farklı Bekletme Süreli Derin Kriyojenik İşlemin Sementasyon Çeliğinin Korozyon Davranışına Etkisinin Araştırılması. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9 (2), 703-712.
  31. Bekish, Y.N., Poznyak, S.K., Tsybulskaya, L.S., Gaevskaya, T.V., 2010. Electrodeposited Ni-B Alloy Coatings; Structure, Corrosion

- Resistance and Mechanical Properties. *Electrochimica Acta*, 55, 2223-2231.
32. Shahzad, K., Radwan, A.B., Fayyaz, O., Shakoor, R.A., Uzma, M., Umer, M.A., Baig, M.N., Raza, A., 2021. Effect of Concentration of TiC on the Properties of Pulse Electrodeposited Ni-P-TiC Nanocomposite Coatings. *Ceramics International*, 47(13), 19123-19133.
  33. Kasturibai, S., Kalaignan, G.P., 2014. Characterizations of Electrodeposited Ni-CeO<sub>2</sub> Nanocomposite Coatings. *Materials Chemistry and Physics*, 147, 1042-1048.
  34. Wang, Y., Wang, S., Shu, X., Gao, W., Lu, W., Yan, B., 2014. Preparation and Property of Sol-enhanced Ni-B-TiO<sub>2</sub> Nano-Composite Coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 617, 472-478.



## Seçilmiş İpliklerde Zweigle İplik Tüylülüğü Sonuçlarına Farklı Test Hızlarının Etkisi

Abdurrahman TELLİ\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-6720-9410

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

Geliş tarihi: 04.01.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atf şekli/ How to cite: TELLİ, A., (2023). Seçilmiş İpliklerde Zweigle İplik Tüylülüğü Sonuçlarına Farklı Test Hızlarının Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 131-141.

### Öz

Bu çalışmada, Zweigle G657 cihazında iplik tüylülüğü sonuçlarına farklı test hızlarının etkisi araştırılmıştır. Ölçümler, cihazda seçenek olarak sunulan 25 m/dk, 50 m/dk, 100 m/dk ve 400 m/dk olmak üzere dört farklı test hızında gerçekleştirilmiştir. Test hızının etkisi SPSS programı kullanılarak istatistiki olarak incelenmiştir. İplik tüylülüğü sonuçları üzerinde, test hızındaki değişimin direkt olarak etkili olduğu görülmüştür. Tüylerin sınıflandırılmasında 10 mm'ye kadar, test hızları arasındaki farkın önemli seviyede olduğu görülmüştür. Aralarındaki bu farklılıklar 10 mm'den sonra önemsiz düzeye gelmiştir. Test hızı arttıkça ipliğin S3 tüylülük değerlerinde genel olarak bir artış eğilimi gözlenmiştir. Ancak bu çalışmada literatürden farklı olarak, çalışma için seçilen farklı yapıdaki ipliklerde farklı sonuçlarda elde edilmiştir. Farklı hızlarda elde edilen sonuçların karşılaştırma amaçlı kullanılmasının doğru olmayacağı net olarak görülmektedir. Yeni versiyon cihazlarda daha yüksek test hızlarına çıkma eğilimi bulunmaktadır. Bu nedenle, S3 tüylülüğü bilgisi verilirken, hangi cihazda ve hangi test hızında ölçüldüğü bilgisinin verilmesi gerektiği çıkarımı yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** İplik, Tüylülük, İplik kalite kontrol, İplik tüylülüğü, Zweigle S3 tüylülüğü

### The Effect of Different Test Speed on Zweigle Yarn Hairiness Results in Selected Yarns

#### Abstract

In this study, the effect of different test speeds on yarn hairiness results in the Zweigle G657 device was investigated. Measurements were carried out at four different test speeds of 25 m/min, 50 m/min, 100 m/min and 400 m/min, which are available as options on the device. The effect of test speed was analyzed statistically using the SPSS program. It has been seen that the change in test speed has a direct effect on the yarn hairiness results. It has been observed that the difference between test speeds up to hairs in 10 mm in the classification of hair numbers is significant. These differences between them became insignificant after hairs in 10 mm. It can be generally said that an increasing trend was observed in the yarn S3 hairiness values as the test speed increased. However, different results were obtained in the yarns of different structures selected for the study different from the literature. It is clearly seen that it would not be appropriate to use the obtained results from different speeds for various comparisons. There is a tendency for higher test speeds on newer version devices. For this reason, it has been deduced that it is

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Abdurrahman TELLİ, [atelli@cu.edu.tr](mailto:atelli@cu.edu.tr)

necessary to give the information on which device and at which test speed it was measured while giving the S3 hairiness information.

**Keywords:** Yarn, hairiness, Yarn quality control, Yarn hairiness, Zweigle S3 hairiness

## 1. GİRİŞ

İplik gövdesinden çıkan lif uçları ve çeşitli ilmek yapıları iplik tüylülüğünü oluşturmaktadır [1]. İplik tüylülüğünü etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bu faktörler temel olarak lif özellikleri, iplik yapısı ve işlem parametreleri olarak üç grupta incelenmektedir. Lif uzunluğu, lif uzunluk uniformitesi ve kısa lif içeriği iplik tüylülüğünü etkileyen başlıca lif özellikleridir. Daha uzun liflerin daha düşük iplik tüylülüğüne, daha kısa liflerin daha yüksek tüylülüğe neden olduğu söylenebilmektedir. İplikte enine kesitte bulunan lif sayısı, tüylülüğü direkt olarak etkileyecek faktörlerdendir. Daha kalın ipliklerde, ince ipliklere göre daha yüksek tüylülük değerleri gözlenmektedir. İplik bükümü, tüylülük üzerindeki diğer önemli bir iplik parametresidir. Yüksek bükümlü ipliklerde daha düşük tüylülük elde edilmektedir. Örme için kullanılacak ipliklerde dokumaya göre daha düşük büküm katsayıları kullanıldığı için tüylülükleri de daha fazla olmaktadır. Farklı eğirme sistemleri ve penye işlemi de tüylülük üzerinde önemli etkileri olan işlem parametreleridir. Fitol bükümü, kopça tipi, bilezik çapı, makine hızları, makine ayarları, iplik gerilimleri, iplik temas açısı, açık uç iplik eğirmede düze tipi gibi birçok işlem parametresi tüylülük sonuçlarını etkileyebilmektedir [2-7]. İplik tüylülüğü ise iplik üretiminden sonraki işlemlerin verimliliğini ve nihai kumaş kalitesini etkilemektedir. Yüksek tüylülük dokuma ve örme imalatında verim kaybına neden olabilmektedir. Nihai kumaş görüntüsünü bozup, boncuklanmaya sebebiyet vermektedir. İplik mukavemeti-uzaması,

iplik düzgünsüzlüğü, sık karşılaşılan hatalar gibi iplik tüylülüğü de önemli bir kalite kontrol parametresidir. Endüstriyel açıdan önemli bir iplik kalite parametresi olan tüylülüğün, artan iplik üretim hızları nedeniyle doğru ve kıyaslanabilir şekilde ölçülmesi önemini korumaktadır. Bu parametrenin belirlenebilmesi için farklı yaklaşımlar mevcuttur. Zweigle iplik tüylülüğü, iplik yüzeyinden çıkan tüylerin detaylı bir sınıflandırmasını sunmaktadır. Kullanımları devam eden eski versiyonlar ve yeni versiyonlar olmak üzere Zweigle iplik tüylülüğünü ölçen farklı cihazlar sektörde kullanılmaktadır. Farklı versiyonlarda önerilen test hızları farklı olmakta ve yeni versiyonlarda giderek hızlarda artış kaydedilmektedir. Günümüzde tüylülük uzunluğu sınıflandırması için, Uster Tester 6'da opsiyonel olarak sunulan HL (hairiness length) modülünde 800 m/dk 'ya kadar test hızı imkânı bulunmaktadır. Bu çalışmada, test hızındaki değişimlerin, ölçüm alanında oluşturacağı farklı hava akışları ve sürtünme nedeniyle tüylerin konumlarını değiştirerek sonuçları etkileyebileceğinden yola çıkılmıştır. Zweigle G657 cihazında iplik tüylülüğü sonuçlarına farklı test hızlarının etkisi araştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada pamuk, viskon ve polyester içerikli farklı iplik numaralarındaki beş adet iplik kullanılmıştır. Kullanılan ipliklerin özellikleri Çizelge 1'de gösterilmektedir.

**Çizelge 1.** İplik özellikleri

İplik kodu	İplik numarası	İplikteki lif içerikleri	Eğirme sistemi
01	Ne6	%100CO	OE-Rotor
02	Ne13/2	%50CO%50PES	Ring
03	Ne24	%50CO%50CV	Ring
04	Ne30	%100CO	Ring
05	Ne30	%50CO%50PES	OE-Rotor



Seçilen ipliklerin tüylülük özellikleri, Zweigle G567 cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Akademik çalışmalarda ve işletmelerde genellikle 50 m/dk test hızı tercih edilmektedir. Bu çalışmadaki ölçümler, cihazda seçenek olarak sunulan 25 m/dk, 50 m/dk, 100 m/dk ve 400 m/dk olmak üzere dört farklı test hızında gerçekleştirilmiştir. Her bir iplikten her bir test hızı için beş ölçüm alınmış ve ortalamaları değerlendirmelerde kullanılmıştır. Cihazdan 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm ve 15 mm uzunluğundaki tüy sayıları alınmıştır. Burada 1 ve 2 mm uzunluğundaki tüy sayılarının toplamı S12 ve 3mm ve üzeri uzunluğundaki tüy sayılarının toplamı olan S3 temel değerlendirme ölçütleri olmuştur. Her bir mm'de test hızının etkisi istatistiki olarak incelenmiştir. İstatistiki incelemelerde SPSS 15 paket programı

kullanılmıştır. Değişkenler tek yönlü varyans analizi ile incelenmiştir. Çoklu karşılaştırma testlerinden önce Levene homojenlik testi kullanılmıştır. Homojen dağılımlar için "Tukey HSD", homojen dağılmayanlar için "Dunnett's T3" karşılaştırma testleri uygulanmıştır. Varyans analiz sonuçlarının karşılaştırılmasında %95 güven aralığı kullanılmış ve  $p=0,05$ 'in altında olduğu durumlarda fark anlamlı kabul edilmiştir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Beş farklı iplikten dört farklı test hızında elde edilen ortalama sonuçlar Çizelge 2'de sunulmaktadır. Gruplar arasında varyansların eşit olup olmadığını gösteren Levene homojenlik testi sonuçları Çizelge 3'de sunulmaktadır.

**Çizelge 2.** Farklı test hızlarında elde edilen tüylülük sonuçları

İplik Kodu	Test Hızı	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm	12 mm	15 mm	S12	S3
01	25	15419	3774	1568	838	316	122	40	5	1	19193	2890
	50	16143	5732	1870	989	328	71	15	2	1	21875	3276
	100	272	73494	8628	2711	703	143	25	8	1	73766	12218
	400	244	35501	59177	2913	249	36	21	10	3	35745	62409
02	25	24308	38701	8805	3081	324	54	6	1	0	63009	12271
	50	1658	54766	9882	3369	394	70	13	0	0	56424	13727
	100	53	71067	10287	3440	587	101	7	0	0	71120	14422
	400	27	2765	137619	7129	671	6	1	0	0	2792	145426
03	25	22354	5485	1740	919	208	38	3	1	3	27839	2913
	50	20205	6791	2079	1158	215	18	3	0	0	26997	3472
	100	13107	12941	2960	1506	91	7	2	0	0	26048	4566
	400	140	111909	23489	643	15	0	0	0	0	112050	24148
04	25	50178	13778	1522	364	45	9	2	0	0	63956	1941
	50	4803	876	252	98	20	5	3	0	0	5680	377
	100	4028	1292	317	124	17	2	0	0	0	5320	460
	400	18	24306	2199	180	3	0	1	0	0	24324	2383
05	25	53925	13113	1563	549	122	36	6	0	0	67037	2276
	50	45184	14891	1547	569	179	68	4	0	0	60075	2367
	100	33190	15068	1530	720	265	30	0	0	0	48257	2545
	400	94	169123	8960	1084	21	1	1	0	0	169217	10068

**Çizelge 3.** Levene homojenlik testi sonuçları anlamlılık (p) değerleri

İplik Kodu	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm	12 mm	15 mm	S3	S12
01	0,064	0,082	0,062	0,106	0,085	0,091	0,147	0,343	0,330	0,063	0,121
02	0,070	0,011	0,007	0,534	0,037	0,086	0,191	0,001	1,000	0,013	0,005
03	0,012	0,011	0,008	0,165	0,052	0,082	0,171	0,002	0,005	0,007	0,023
04	0,068	0,010	0,011	0,012	0,488	0,008	0,006	1,000	1,000	0,006	0,018
05	0,114	0,023	0,111	0,049	0,116	0,158	0,013	0,001	1,000	0,161	0,486

**Çizelge 4.** ANOVA sonuçları anlamlılık (p) değerleri

İplik Kodu	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm	12 mm	15 mm	S3	S12
01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,199	0,020	0,135	0,000	0,000
02	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,052	1,000	0,000	0,000
03	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,357	0,528	0,229	0,000	0,000
04	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,616	1,000	1,000	0,000	0,000
05	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,158	0,441	1,000	0,000	0,000

Test hızı açısından gruplar arasındaki farkların istatistiksel analizlerinin (ANOVA) sonucunda elde edilen anlamlılık (p) değerleri Çizelge 4’de yer almaktadır.

Çizelge 4 incelendiğinde beş farklı ipliğin tümünde 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, S3 ve S12’de test hızları arasındaki farkların istatistiki olarak önemli seviyede olduğu görülmektedir. Tespit edilen tüy sayıları, Çizelge 2’den görülebileceği üzere 10 mm, 12 mm ve 15 mm’de 0 veya çok düşük olduğu için aralarındaki

fark genel olarak önemsiz seviyede bulunmuştur. Sadece 10 mm’de 02 kodlu iplikte (p=0,021) ve 12 mm’de 01 kodlu iplikte (p=0,020) istatistiki olarak önemli seviyede farklılık tespit edilmiştir. Çizelge 4’deki sonuçlar çalışmada seçilen ipliklerin farklı tüylülük özelliklerine sahip olduğunu açık bir şekilde göstermektedir.

Çizelge 5-10 ‘da ise her bir tüylülük için test hızlarının çoklu karşılaştırma sonuçları anlamlılık (p) değerleri sunulmaktadır.

**Çizelge 5.** 1 ve 2 mm tüylülük için test hızlarının çoklu karşılaştırma sonuçları anlamlılık (p) değerleri

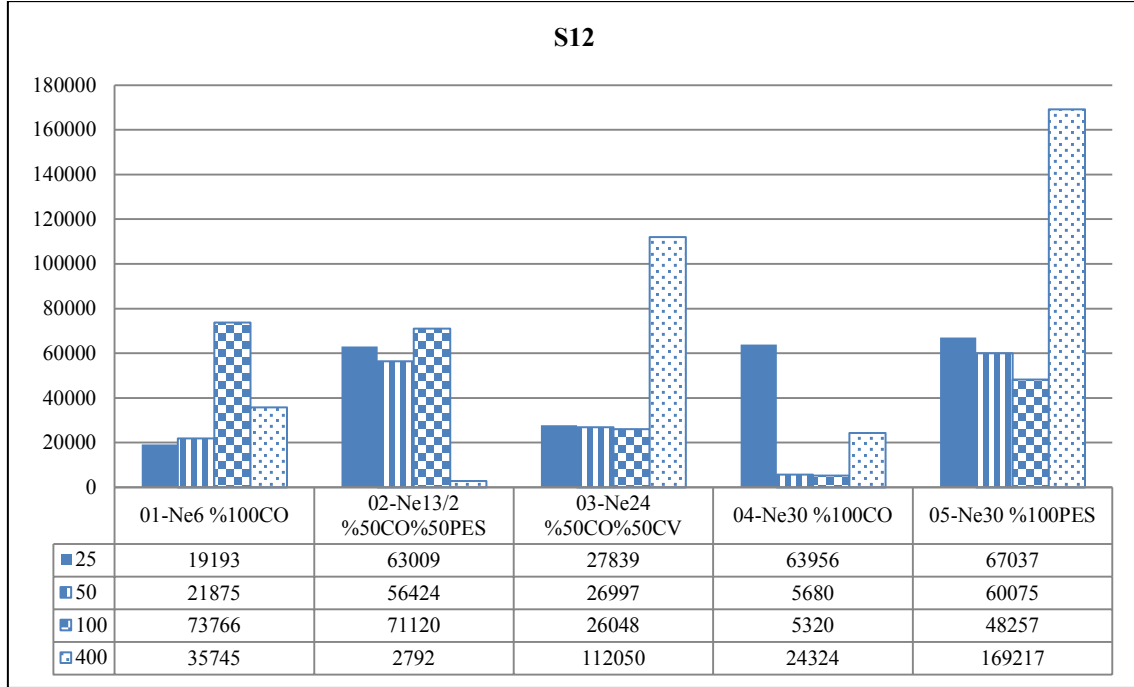
1 mm	01	02	03	04	05	2 mm	01	02	03	04	05
25-50	0,025	0,000	0,349	0,000	0,000	25-50	0,777	0,000	0,142	0,006	0,099
25-100	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000	25-100	0,000	0,006	0,002	0,006	0,073
25-400	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	25-400	0,000	0,000	0,006	0,001	0,000
50-100	0,000	0,037	0,014	0,240	0,000	50-100	0,000	0,025	0,001	0,053	0,914
50-400	0,000	0,034	0,005	0,000	0,000	50-400	0,000	0,000	0,006	0,002	0,000
100-400	0,999	1,000	0,006	0,000	0,000	100-400	0,000	0,002	0,007	0,002	0,000

Çizelge 2’deki farklı test hızlarında elde edilen 1 mm’deki tüylülük sonuçları ve Çizelge 5’deki çoklu karşılaştırma sonuçları birlikte incelendiğinde, 50 m/dk hızdan sonra tüm ipliklerde test hızı arttıkça tüy sayısında azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma 50-100 m/dk hızları arasında sadece 04 kodlu iplikte istatistiksel olarak önemsiz seviyededir (p=0,240). 50-400 m/dk hızları arasındaki fark tüm ipliklerde istatistiksel olarak önemli seviyededir. En düşük tüy sayıları tüm ipliklerde 400 m/dk hızda ölçülmüştür. Ancak 100-400 m/dk hızları arasındaki fark 01 ve 02 kodlu ipliklerde istatistiki olarak önemsiz seviyede bulunmuştur.

2 mm’deki tüy sayıları incelendiğinde; 25-400, 50-400 ve 100-400 m/dk hızları arasında tüm

ipliklerde istatistiki olarak önemli düzeyde farklılık tespit edilmiştir. Ancak bu farklılıklarda herhangi bir eğilimin bulunmadığı gözlenmektedir. En yüksek tüy sayısı 01 ve 02 kodlu ipliklerde 100 m/dk’da, 03-04-05 kodlu ipliklerde 400 m/dk’da ölçülmüştür. En düşük tüylülük değerleri 01-03-05 kodlu ipliklerde 25 m/dk’da, 02 kodlu iplikte 400 m/dk’da ve 04 kodlu iplikte 50 m/dk’da tespit edilmiştir.

1 mm ve 2 mm tüy sayılarının toplamı olan S12 tüylülüğü ortalama sonuçları Şekil 1’de gösterilmektedir. Çizelge 6’da ise S12 tüylülüğü için test hızlarının çoklu karşılaştırma sonuçları anlamlılık (p) değerleri sunulmaktadır.



Şekil 1. S12 tüylülük sonuçları

Çizelge 2, Çizelge 4, Şekil 1 ve Çizelge 6'daki S12 tüylülüğü sonuçları, test hızının ölçüm sonuçlarını net bir şekilde etkilediğini göstermektedir. Ancak deneysel sonuçlara göre S12 tüylülüğü için test hızı ile tüy sayısı arasında iplik yapısından bağımsız bir ilişki görülmemektedir. 01 kodlu iplikte en yüksek tüy sayısı 100 m/dk hızda elde edilirken, 03 ve 05 kodlu ipliklerde 400 m/dk hızda en yüksek tüy sayısı ölçülmüştür. 04 kodlu iplikteki en yüksek tüy sayısı ise 25 m/dk hızda gerçekleşmiştir. 02 kodlu iplikte en yüksek tüy sayısı 100 m/dk hızda olmasına rağmen, Çizelge 6'da 25 ile 100 m/dk hızlar arasındaki fark istatistiki olarak önemsiz seviyede bulunmuştur ( $p=0,133$ ). En düşük tüy sayısı 01 kodlu iplikte 25 ve 50 m/dk hızlarda ( $p=0,580$ ), 02 kodlu iplikte 400 m/dk hızda, 04 kodlu iplikte 50 ve 100 m/dk hızlarda ( $p=0,659$ ) ve 05 kodlu iplikte 400 m/dk hızda ölçülmüştür. 03 kodlu iplikte en düşük tüy sayısı 100m/dk hızda bulunmuştur. Ancak Çizelge 6'dan görülebileceği üzere, 100 m/dk ile 25 m/dk ( $p=0,393$ ) ve 100 m/dk ile 50 m/dk ( $p=0,968$ ) hızları arasındaki fark istatistiki olarak önemsiz seviyede bulunmuştur.

Çizelge 6. S12 tüylülük için test hızlarının çoklu karşılaştırma sonuçları anlamlılık (p) değerleri

S12	01	02	03	04	05
25-50	0,580	0,009	0,950	0,000	0,000
25-100	0,000	0,133	0,393	0,000	0,000
25-400	0,000	0,000	0,009	0,000	0,000
50-100	0,000	0,034	0,968	0,452	0,000
50-400	0,001	0,000	0,006	0,001	0,000
100-400	0,000	0,002	0,008	0,003	0,000

3 mm ve üzerindeki tüy sayıları rahatsız edici tüylülük olarak sınıflandırılmaktadır. 3mm ve üzeri uzunluğundaki tüy sayılarının toplamı olan Zweigle S3 iplik tüylülüğü sonuçlarına test hızının etkisi ilk olarak Wang [8] tarafından incelenmiştir. 25, 50 ve 100m/dk hızlarda ölçümün gerçekleştirildiği çalışmada, farklı uzunluk gruplarındaki tüy sayıları ve toplam tüylülük değerleri üzerinde test hızının etkisinin önemli olduğu bulunmuştur. Test hızındaki artış, S3 değerlerinde artışa sebep olmuştur. Sadece 10 mm'den daha uzun tüylerde test hızındaki artış, tüy sayısında artışa neden olmamıştır. 15 mm'den sonra ise trend tersi yönde gerçekleşmiştir. İplik

gövdesinden çıkan liflerin test sırasında oluşan havanın etkisi ile dikleştiği ve test sonrası eski haline geldiği belirtilmektedir. Test hızı arttıkça tüy uzunluklarının belirli bir noktada maksimuma ulaşacağı ve daha sonra aşırı bükülüp tüy sayısında azalmaya sebebiyet vereceği vurgulanmıştır. Ayrıca uzun tüylerin kısa tüylerden daha kolay bükülebileceği ve bu nedenle daha yüksek hızda daha az uzun tüy ölçümü yapılabileceği

belirtilmiştir. Test hızının etkisinin 8, 25, 50 ve 100m/dk hızlar kullanılarak araştırıldığı başka bir çalışmada ise, benzer şekilde test hızı arttıkça iplik S3 tüylülüğü değerleri artış göstermiştir [9].

Çizelge 7’de 3 mm ve 4 mm uzunluğundaki tüy sayıları için test hızlarının çoklu karşılaştırma sonuçları anlamlılık (p) değerleri verilmektedir.

**Çizelge 7.** 3 ve 4 mm tüylülük için test hızlarının çoklu karşılaştırma sonuçları anlamlılık (p) değerleri

3 mm	01	02	03	04	05	4 mm	01	02	03	04	05
25-50	0,994	0,029	0,106	0,023	0,999	25-50	0,005	0,050	0,101	0,014	0,871
25-100	0,001	0,024	0,000	0,028	0,994	25-100	0,000	0,017	0,001	0,021	0,041
25-400	0,000	0,000	0,042	0,071	0,000	25-400	0,000	0,000	0,054	0,046	0,007
50-100	0,002	0,538	0,005	0,383	0,999	50-100	0,000	0,854	0,018	0,228	0,089
50-400	0,000	0,001	0,043	0,000	0,000	50-400	0,000	0,000	0,002	0,016	0,018
100-400	0,000	0,000	0,046	0,000	0,000	100-400	0,001	0,000	0,000	0,019	0,013

3 mm’deki tüy sayıları için test hızları incelendiğinde tüm ipliklerde önemli seviyede farklılık bulunmuştur (Çizelge 4). Tüm ipliklerde en yüksek tüy sayısı 400 m/dk hızda ölçülmüştür (Çizelge 2). Tüm ipliklerde 50-400 ve 100-400 m/dk hızlar arasında önemli seviyede farklılık bulunmuştur (Çizelge 7). 25 ile 400 m/dk arasında ise 04 kodlu iplik ( $p=0,071$ ) dışındaki tüm ipliklerde istatistiki olarak önemli seviyede farklılık tespit edilmiştir. En düşük tüy sayısı 01 ve 03 kodlu ipliklerde 25-50 m/dk ( $p=0,994$ ;  $p=0,106$ ) hızlarda, 02 kodlu iplikte 25 m/dk hızda, 04 kodlu iplikte 50-100 m/dk ( $p=0,383$ ) hızlarda ölçülmüştür. 05 kodlu iplikte ise en düşük tüy sayısı 25 m/dk hızda bulunmuştur ve 25-50-100 m/dk hızlar arasındaki fark istatistiksel olarak önemsiz seviyededir.

Çizelge 4’deki 4 mm’deki tüy sayıları için test hızları incelendiğinde tüm ipliklerde istatistiksel

olarak önemli seviyede farklılık olduğu görülmektedir. Çizelge 2’deki 4 mm sonuçları incelendiğinde ise 01-02-05 kodlu ipliklerde test hızı arttıkça tüy sayılarının arttığı görülmektedir. Ancak 02 ve 05 kodlu ipliklerde 25 ile 50 m/dk ve 50 ile 100 m/dk hızları arasındaki farklar istatistiksel olarak önemsiz seviyede bulunmuştur (Çizelge 7). 03 ve 04 kodlu ipliklerde ise farklı sonuçlar elde edilmiştir. 03 kodlu iplikte en yüksek tüy sayısı 100m/dk hızda ölçülmüş (Çizelge 2) ve diğer hızlar ile arasındaki fark istatistiki olarak önemli seviyede bulunmuştur (Çizelge 7). 04 kodlu iplikte ise en yüksek tüy sayısı 25 m/dk hızda ölçülmüş ve diğer hızlar ile arasındaki fark istatistiki olarak önemli seviyede tespit edilmiştir. En düşük tüy sayısı 01 kodlu iplikte 25 m/dk hızda ölçülmüştür. 02, 03 ve 05 kodlu ipliklerde 25-50 m/dk ( $p=0,050$ ;  $p=0,101$ ;  $p=0,871$ ) hızlarda gözlenmiştir. 04 kodlu iplikte ise 50-100 m/dk ( $p=0,228$ ) hızlarda tespit edilmiştir.

**Çizelge 8.** 6 ve 8 mm tüylülük için test hızlarının çoklu karşılaştırma sonuçları anlamlılık (p) değerleri

6 mm	01	02	03	04	05	8 mm	01	02	03	04	05
25-50	0,951	0,024	0,986	0,003	0,004	25-50	0,071	0,100	0,003	0,718	0,002
25-100	0,000	0,014	0,002	0,002	0,000	25-100	0,631	0,000	0,000	0,267	0,686
25-400	0,071	0,013	0,000	0,000	0,000	25-400	0,005	0,000	0,000	0,198	0,001
50-100	0,000	0,015	0,001	0,941	0,000	50-100	0,013	0,003	0,050	0,132	0,001
50-400	0,034	0,013	0,000	0,029	0,000	50-400	0,252	0,000	0,004	0,066	0,000
100-400	0,000	0,205	0,021	0,065	0,000	100-400	0,001	0,000	0,305	0,183	0,004

6 mm sonuçlarında test hızları arasındaki farkların istatistiki olarak önemli seviyede olduğu görülmektedir (Çizelge 4). Çizelge 2 incelendiğinde, en yüksek değer 01 ve 05 kodlu ipliklerde 100 m/dk hızda elde edilmiştir. Diğer hızlar ile karşılaştırıldıklarında aralarındaki farkın istatistiki olarak önemli seviyede olduğu görülmektedir (Çizelge 8). 02 kodlu iplikte 400 m/dk hızda en yüksek tüy sayısı ölçülmüştür. 400 ile 100 m/dk hızları arasındaki fark istatistiki olarak önemsiz seviyede bulunmuştur ( $p=0,205$ ). 03 kodlu iplikte 50 m/dk hızda en yüksek tüy sayısı ölçülmüştür. 50 ile 25 m/dk hızları arasındaki fark istatistiki olarak önemsiz seviyede bulunmuştur ( $p=0,986$ ). 04 kodlu iplikte 25 m/dk hızda en yüksek tüy sayısı ölçülmüştür. Diğer hızlar ile karşılaştırıldıklarında aralarındaki fark istatistiki olarak önemli seviyededir (Çizelge 8). 6mm'deki en düşük tüy sayıları 01, 03, 04 ve 05 kodlu ipliklerde 400 m/dk hızda ölçülmüştür. Ancak 01 kodlu iplikte 400 ile 25 m/dk ( $p=0,071$ ) hızlar arasında ve 04 kodlu iplikte 400 ile 100

m/dk ( $p=0,065$ ) hızlar arasında fark istatistiki olarak önemsiz seviyededir (Çizelge 8). 02 kodlu iplikte ise 25 m/dk hızda en düşük tüy sayısı bulunmuştur.

Test hızları arasındaki farklar, 8 mm sonuçlarında da istatistiki olarak önemli seviyededir (Çizelge 4). Çizelge 2'deki 8 mm sonuçlarında, en yüksek değerlerin farklı ipliklerde farklı test hızlarında gerçekleştiği görülmektedir. En düşük değerler ise tüm ipliklerde 400 m/dk hızda gerçekleşmiştir. 01 kodlu iplikte 50 m/dk ( $p=0,252$ ) ve 03 kodlu iplikte 100 m/dk ( $p=0,305$ ) hızlar ile arasında istatistiki olarak önemsiz düzeyde farklar bulunmuştur. 04 kodlu iplikte ise tüm test hızları arasında istatistiksel açıdan önemsiz seviyede farklar tespit edilmiştir.

Çizelge 9'da 10 mm ve 12 mm ve Çizelge 10'da 15 mm uzunluğundaki tüy sayıları için test hızlarının çoklu karşılaştırma sonuçları anlamlılık ( $p$ ) değerleri verilmektedir.

**Çizelge 9.** 10 ve 12 mm tüylülük için test hızlarının çoklu karşılaştırma sonuçları anlamlılık ( $p$ ) değerleri

10 mm	01	02	03	04	05	12 mm	01	02	03	04	05
25-50	0,173	0,151	0,976	1,000	0,957	25-50	0,384	0,482	0,862	1,000	0,862
25-100	0,531	0,985	0,845	0,213	0,517	25-100	0,624	0,482	0,862	1,000	0,862
25-400	0,353	0,371	0,325	0,978	0,652	25-400	0,174	0,482	0,974	1,000	0,862
50-100	0,798	0,241	0,976	0,862	0,298	50-100	0,073	1,000	1,000	1,000	1,000
50-400	0,944	0,014	0,517	0,993	0,597	50-400	0,016	1,000	0,862	1,000	1,000
100-400	0,982	0,241	0,743	0,652	0,841	100-400	0,710	1,000	0,862	1,000	1,000

Varyans analizi sonucunda Çizelge 4'deki sonuçlara göre, düşük tüy sayılarının görüldüğü 10 mm, 12 mm ve 15 mm'de genel olarak test hızları aralarındaki farkların önemsiz seviyede olduğu bulunmuştur. Sadece 10 mm'de 02 kodlu iplikte ( $p=0,021$ ) ve 12 mm'de 01 kodlu iplikte ( $p=0,020$ ) istatistiki olarak önemli seviyede farklılık tespit edilmiştir (Çizelge 4). Çizelge 9 ve 10'daki çoklu

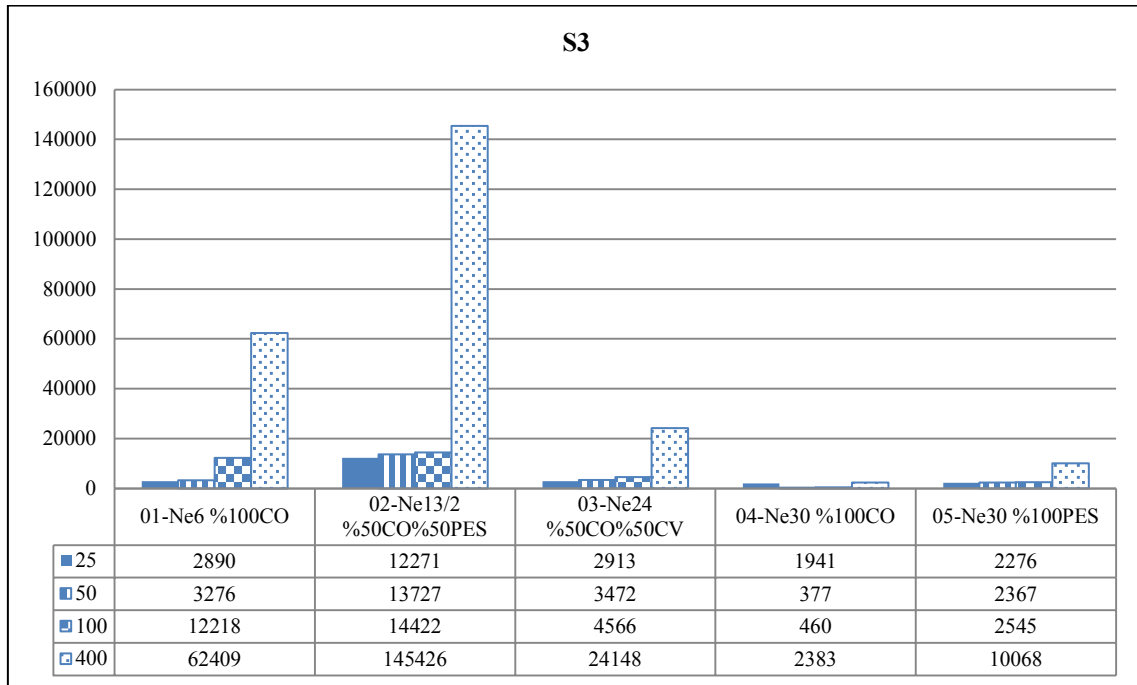
karşılaştırmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sadece 10 mm'de 02 kodlu iplikte ve 12 mm'de 01 kodlu iplikte 50-400 m/dk hızları arasında ( $p=0,014$ ;  $p=0,016$ ) istatistiki açıdan önemli seviyede farklılık tespit edilmiştir. Diğer sonuçlar arasında farklılıklar istatistiki olarak önemsiz düzeydedir.

**Çizelge 10.** 15 mm ve S3 tüylülük için test hızlarının çoklu karşılaştırma sonuçları anlamlılık ( $p$ ) değerleri

15 mm	01	02	03	04	05	S3	01	02	03	04	05
25-50	1,000	1,000	0,703	1,000	1,000	25-50	0,988	0,028	0,142	0,026	0,941
25-100	0,991	1,000	0,703	1,000	1,000	25-100	0,000	0,015	0,005	0,027	0,401
25-400	0,175	1,000	0,765	1,000	1,000	25-400	0,000	0,000	0,046	0,272	0,000
50-100	0,991	1,000	1,000	1,000	1,000	50-100	0,000	0,375	0,019	0,251	0,699
50-400	0,175	1,000	0,862	1,000	1,000	50-400	0,000	0,000	0,048	0,000	0,000
100-400	0,257	1,000	0,862	1,000	1,000	100-400	0,000	0,000	0,054	0,000	0,000

İstenmeyen tüylülük olarak belirtilebilecek 3 mm ve üzeri tüy sayısını ifade eden S3 tüylülüğü ortalama sonuçları Şekil 2’de gösterilmektedir. Çizelge 10’da S3 tüylülüğü için test hızlarının çoklu karşılaştırma sonuçları anlamlılık (p) değerleri sunulmaktadır. Çizelge 4’deki varyans analizi sonuçları incelendiğinde, S3 tüylülüğünde test hızları arasında farklılıkların istatistiki olarak önemli seviyede olduğu görülmektedir. Şekil 2 ve Çizelge 10 birlikte incelendiğinde, test hızları arasındaki belirgin farklılıklar görülmektedir. En yüksek tüylülük değeri, tüm ipliklerde 400 m/dk hızda ölçülmüştür. Ancak 03 kodlu iplikte 400 ile

100 m/dk hızlar arasında ( $p=0,054$ ) ve 04 kodlu iplikte 400 ile 25m/dk hızlar arasında ( $p=0,272$ ) istatistiki açıdan önemsiz seviyede farklılık görülmüştür. En düşük S3 değeri 01, 02, 03 ve 05 kodlu ipliklerde 25 m/dk hızda ölçülmüştür. 01, 03 ve 05 kodlu ipliklerde 25 ile 50 m/dk hızlar arasındaki farklılık ( $p=0,988$ ;  $p=0,142$ ;  $p=0,941$ ) istatistiki açıdan önemsiz seviyededir. 04 kodlu iplikte 25 ile 400 m/dk hızlar arasındaki ( $p=0,272$ ) ve 05 kodlu iplikte 25 ile 100 m/dk hızlar arasındaki ( $p=0,401$ ) farklılıklar istatistiksel olarak önemsiz seviyededir (Çizelge 10).



Şekil 2. S3 tüylülük sonuçları

İplik üzerindeki tüy dağılımının, tüy uzunluğu arttıkça daha az tüy sayısı içerecek şekilde olacağı ideal olarak kabul edilirse, Çizelge 2’den 400 m/dk hızdaki ölçümlerin beş iplikte de bu varsayıma uymadığı görülmektedir. 100 m/dk hızdaki ölçümlerin ise 01 ve 02 kodlu ipliklerde bu varsayımı sağlamadığı görülmektedir. 25 m/dk ve 50 m/dk hızlardaki ölçümlerin ise 02 kodlu iplik dışındaki tüm ipliklerde bu varsayımı sağladığı görülmektedir. 02 kodlu ipliğin diğer ipliklerden

farklı olarak çift katlı iplik yapısında olduğu göze çarpmaktadır. Ayrıca S3 tüylülüğü açısından 01, 03 ve 05 kodlu ipliklerde 25 ile 50 m/dk hızlar arasındaki farklılık istatistiksel olarak önemsiz seviyedir. Buradan yola çıkarak Zweigle G567 cihazı için 400 m/dk hızdaki ölçüm almanın doğru olmayacağı ve 25 m/dk veya 50 m/dk hızlarda ölçüm almanın daha doğru olabileceği söylenebilir. Katlı iplik yapılarını içerecek daha kapsamlı

deneysel tasarımlar ile ilerleyen çalışmalarda bu nokta açığa kavuşturulabilir.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, literatüre benzer şekilde [8-9], tüylerin sınıflandırılmasında 10 mm'ye kadar, test hızları arasındaki farkın istatistiksel olarak önemli seviyede olduğu görülmüştür. Aralarındaki bu farklılıklar 10 mm'den sonra istatistiki açıdan önemsiz düzeye gelmiştir. Test hızı arttıkça iplik S3 tüylülük değerlerinde genel olarak bir artış eğilimi görülmüştür. Ancak bu çalışmada literatürden farklı olarak, çalışma için seçilen farklı yapıdaki ipliklerde farklı sonuçlarda gözlenmiştir. Örneğin 04 kodlu iplikte, S3 değeri en düşükten yükseğe 50-100-25-400 m/dk test hızları şeklinde sıralanmıştır. Ayrıca tüm ipliklerde test hızları arasındaki farklılarda, istatistiki açıdan önemsiz seviyede olan tespitler de söz konusudur. Zweigle iplik tüylülüğü sonuçlarını, test hızındaki değişimin direkt olarak etkilediği görülmektedir. Ancak ölçüm cihazının prensibi gereği olarak, ölçüm alanında oluşan hava akımı, farklı iplik yapılarında farklı hızlarda bambaşka sonuçlar elde edilmesine neden olmaktadır.

İplik tüylülüğü karmaşık bir kalite parametresidir. Daha önceki çalışmalarda tüylülük ölçüm cihazlarının problemleri tartışılmıştır [10]. Haleem et. al. [11] tarafından yapılan çalışmada, iplik tüylülüğü için kullanılan test cihazlarının doğru ölçüm sunmadıklarını belirlenmiştir. Hem toplam tüy sayısı hem de tüy dağılımında manuel ölçüm ile cihaz arasında tamamen farklı sonuçlar elde etmişlerdir. Tüylülüğün belirlenmesinde kullanılan cihazların geliştirilmesi gerektiği araştırmacılar tarafından vurgulanmıştır. Literatürde farklı eğirme sistemleri ile yapılan çalışmalarda [12] ve farklı ve aynı prensip ile çalışan test cihazlarının karşılaştırmalarında tespit edilen tutarsız sonuçlar bildirilmiştir [13]. Bu tutarsızlıkların çözümü ve tüylülüğün farklı prensiplerle belirlenmesi üzerine geliştirme çalışmalarının devam ettiği görülmektedir. Wang et. al. [14], ölçüm bölgesinde aynalar kullanılarak ipliğin daha fazla görüntüsünün alınmasını önermişlerdir. Xia et. al. [15] ölçüm alanının dışına bir üfleme borusu yerleştirildiği yeni bir yöntem sunmuşlardır. Daha önceki çalışmalar

incelendiğinde, tüylülük cihazlarının gerçek iplik tüylülüğünü sunmada eksik kaldıkları gözlenmektedir ve yeni tekniklerin kullanılması önerilmektedir. Bu kapsamda yapılan görüntü işleme çalışmalarında ise, Zweigle G567 cihazı S3 sonuçları ile görüntü işleme sonuçları arasında önemli seviyede korelasyon tespit edilirken [16-17], aynı tüylülük uzunluğu sınıflandırması prensibi kullanan üst versiyon Uster Zweigle HL400 cihazı S3 sonuçları ile görüntü işleme sonuçları arasında benzer görüntü işleme adımları kullanılmasına rağmen önemli seviyede korelasyon bulunmadığı bildirilmektedir [18]. Zweigle G567 ve Uster Zweigle HL400 cihazlarının karşılaştırıldığı başka bir çalışmada ise, HL400'de ölçülen ipliklerin büyük çoğunluğunda tüy sayısında azalma olduğu bulunmuştur. Bu nedenle farklı hızlarda çalışan cihazların aynı test parametreleri üzerinden karşılaştırılmasının doğru olmadığı vurgulanmıştır [19]. Aynı cihazda farklı test hızlarının kullanıldığı bu çalışmada da, farklı hızlarda elde edilen sonuçların karşılaştırma amaçlı kullanılmasının doğru olmayacağı net olarak görülmektedir. Mevcut durumda, S3 tüylülüğü bilgisi verilirken, hangi test hızında ölçüldüğü bilgisinin de paylaşılması gerektiği görülmektedir.

#### 4. SONUÇ

Endüstriyel açıdan önemli bir iplik kalite parametresi olan tüylülük, artan iplik üretim hızları ile halen gündemdeki yerini korumaktadır. Tüylülüğün doğru ve kıyaslanabilir şekilde ölçülmesi büyük önem teşkil etmektedir. Bu çalışmada cihazların sorunlarının tamamen giderileceği veya farklı yöntemlerin devreye alınacağı zamana kadar kullanılan mevcut yöntemlerin lif ve iplik yapısına da bağlı olarak test hızındaki değişimlerden etkilenebileceğine dikkat çekilmek istenmiştir.

Bu çalışmada, farklı tüylülük özelliklerine sahip olabilecek seçilmiş ipliklerin Zweigle G 567 cihazında farklı hızlarda elde edilen iplik tüylülük test sonuçları istatistiksel olarak analiz edilmiş ve ölçüm hızının test sonuçlarına etkisi değerlendirilmiştir. Aynı tip ipliklerin tüylülük özelliklerinin belirlenmesi için Zweigle G567

cihazında 25 m/dk veya 50 m/dk ölçüm hızlarının kullanılmalarının uygun olabileceği görülmektedir. S3 tüylülüğü bilgisi verilirken, hangi test hızında ölçüldüğü bilgisinin de paylaşılması gerekmektedir. Farklı hızlarda elde edilen sonuçların karşılaştırma amaçlı kullanılmasının doğru olmayacağı tespit edilmiştir.

Literatür bilgisi ve çalışmada elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, farklı versiyon cihazdan elde edilen sonuçların karşılaştırma amaçlı kullanılmasının da doğru olmayacağı söylenebilmektedir. Ayrıca yeni versiyon cihazlarda daha yüksek test hızlarına çıkma eğilimi bulunmaktadır. Bu nedenle tüylülük uzunluğu sınıflandırmasını kullanan bu cihazlarda S3 yerine farklı birimler tercih edilmesinin daha uygun olacağı düşünülmektedir.

Eksikliklerine rağmen, sektörde kullanılan cihazlar hızlı sonuç vermeleri ve büyük oranda tüylülükteki genel eğilimi doğru yansıtmaları nedeniyle tercih edilmeye devam etmektedir. Bu nedenle iplik tüylülüğü değerlendirmelerinde, sonuçlarının hangi cihazdan ve hangi test hızında alındığına dikkat edilmesi gerekmektedir.

## 5. KAYNAKLAR

1. Fabijańska, A., Jackowska-Strumiłło, L., 2012. Image Processing and Analysis Algorithms for Yarn Hairiness Determination. *Machine Vision and Applications*, 23(3), 527-540.
2. Uster, 2011. Uster Zweigle HL400 Application Handbook- Hairiness Length Classification. 24.
3. Yılönü, S., Zervent Ünal, B., 2018. Farklı Hammaddeler Kullanılarak Üretilmiş Olan Konvansiyonel ve Polyester Özlü İpliklerin Performans Özelliklerinin Karşılaştırılması. *Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(7), 1249-1256.
4. Uyanık, S., Duru Baykal, P., 2018. Effects of Fiber Types and Blend Ratios on Murata Vortex Yarn Properties. *The Journal of the Textile Institute*, 109(8), 1099-1109.
5. Liu, X., Su, X., Song, J., 2020. Research on Yarn Qualities Modified By Mechanical False-Twisting Device. *The Journal of the Textile Institute*, 111(4), 529-539.
6. Kumaş, Z., Duru Baykal, P., 2021. Eğirme Türünün Haşıl Sonrası İplik Özelliklerine Etkisi. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(2), 389-399.
7. Gordon, S., 2021. New Insert Reduces Yarn Hairiness of Fine Count Ring Spun Yarns. In *35<sup>th</sup> International Cotton Conference Bremen*, 2021.
8. Wang, X., 1997. The Effect of Testing Speed on the Hairiness of Ring-Spun and Siro-Spun Yarns. *Journal of the Textile Institute*, 88(2), 99-106.
9. Wang, X., 1998. Testing the Hairiness of a Rotor-Spun Yarn on the Zweigle G565 Hairiness Meter at Different Speeds. *Journal of the Textile Institute*, 89(1), 167-169.
10. Haleem, N., Wang, X., 2015. Recent Research and Developments on Yarn Hairiness. *Textile Research Journal*, 85(2), 211-224.
11. Haleem, N., Wang, X., 2013. A Comparative Study on Yarn Hairiness Results from Manual Test and Two Commercial Hairiness Meters. *Journal of the Textile Institute*, 104(5), 494-501.
12. Kilic, M., Okur, A., 2014. Comparison of the Results of Different Hairiness Testers for Cotton-Tencel Blended Ring, Compact and Vortex Yarns. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 39, 49-54.
13. Alay Aksoy, S., Göktepe, F. 2008. Farklı İplik Tüylülüğü Parametreleri Arasındaki Korelasyonun Araştırılması. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 18(1), 28-34.
14. Wang, L., Xu, B., Gao, W., 2018. Multi-Perspective Measurement of Yarn Hairiness Using Mirrored Images. *Textile Research Journal*, 88(6), 621-629.
15. Xia, Z., Liu, X., Wang, K., Deng, B., Xu, W., 2019. A Novel Analysis of Spun Yarn Hairiness Inside Limited Two-Dimensional Space. *Textile Research Journal*, 89(21-22), 4710-4716.
16. Telli, A., 2021a. The Comparison of the Edge Detection Methods in the Determination of Yarn Hairiness Through Image Processing. *Textile and Apparel*, 31(2), 91-98.
17. Telli, A., 2021b. İplik Tüylülüğünün Belirlenmesi için bir Görüntü Analizi Yaklaşımı ve Zweigle Tüylülüğü ile



- Karşılaştırılması. 9<sup>th</sup> International Fiber and Polymer Research Symposium, 19-20 November 2021, 207-210.
- 18.** Telli, A., 2022a. Uster Zweigle HL400 Cihazında Ölçümü Yapılan İpliklerin Tüylülük Sonuçlarının Mikroskop Altında Alınan Görüntülerin İşlenmesi ile Değerlendirilmesi. UÇTEK 2022, Ulusal Çukurova Tekstil Kongresi, 29-30 Eylül 2022, 217-224.
- 19.** Telli, A., 2022b. The Comparison of the Yarn Hairiness Test Devices Using the Hairiness Length Classification System. Tekstil ve Mühendis, 29(128), 219-228.



## Yaya Üst Geçitlerinin 2018 Deprem Yönetmeliğine Göre Analiz ve Tasarımları

Mohammad Yatim SAMİM<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-1673-280X  
Beytullah TEMEL<sup>\*1</sup> ORCID 0000-0002-1673-280X

<sup>1</sup>Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Geliş tarihi: 20.01.2023 Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: SAMİM, M.Y., TEMEL, B., (2023). Yaya Üst Geçitlerinin 2018 Deprem Yönetmeliğine Göre Analiz ve Tasarımları. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 143-156.

### Öz

Bu çalışmada, biri kafes sistemli diğeri kemer askılı olmak üzere iki adet yaya üst geçidinin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY-2018)'e göre analiz ve tasarımları yapılmıştır. Yaya üst geçitlerinin boyutlandırılmasında, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik 2016 (2016-ÇYTHYE) kullanılmıştır. Üst geçitlerin deprem analizleri Mod Birleştirme Yöntemine göre yapılmıştır. Her iki yapının modellenmesi ve yapısal analizlerinde SAP2000 paket programından faydalanılmıştır. Yapı tasarımları için Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) ve Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT) ilkelerine göre yük birleşimleri oluşturulmuş ve boyutlandırmaları yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yaya üst geçitleri, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018, Yük ve dayanım katsayıları ile tasarım, Güvenlik katsayıları ile tasarım

### Analysis and Design of Pedestrian Bridges According to Relevant Earthquake Regulations

#### Abstract

This study includes the analysis and design of half-through arch and truss pedestrian bridges according to the Turkish Building Earthquake Code 2018. For designing of the footbridges the Steel Structures Calculation, Design and Building Principles Codes 2016 are used. In the earthquake analysis of the pedestrian bridges, the model superposition method is utilized. The modeling and structural analysis of two structures is done by using the SAP2000 package program. The structures' sizing is accomplished according to the load combinations based on Design with Load and Capacity Coefficients and Design with Safety Coefficients Principles.

**Keywords:** Pedestrian bridge, Turkish Building Earthquake Code 2018, Design with load and capacity coefficients, Design with safety coefficients

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Beytullah TEMEL, [btemel@cu.edu.tr](mailto:btemel@cu.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Literatür araştırması yapıldığında, çoğunlukla çok katlı çelik bina modellerinin deprem analizlerinde Eşdeğer Deprem Yüğü ve Mod Birleştirme Yöntemlerinin uygulamaları görülmektedir.

Çakmalı [1] yüksek lisans tez çalışmasında, 42 katlı çelik bir binanın Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY-2018) ve Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik 2016 (2016-ÇYTHYE) yönetmeliklerine göre tasarımı ve gerekli kontrollerini araştırmıştır.

Asfuroğlu [2] yüksek lisans tez çalışmasında, yapı sistemlerinin 2018 yılında güncellenen 2016-ÇYTHYE, TBDY-2018 ve Eurocode yönetmeliklerine göre doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarını araştırmıştır.

Danish [3] yüksek lisans tez çalışmasında, TBDY-2018 esasları göz önüne alınarak; çok katlı çelik yapılarda doğrusal analiz yöntemlerinden Mod Birleştirme Yöntemi ve Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi kullanarak merkezi çelik çaprazlı yapının dinamik karakteristiklerine etkisini araştırmıştır.

Ünal [4] tez çalışmasında, çelik yapı tasarımında 2016-ÇYTHYE yönetmeliği ile TS-648 standardında belirtilen hesap esasları dikkate alınarak 2018 yılından önce yapılmış üst geçitlerin uygunluğunu araştırmıştır

Tütüncü [5] yüksek lisans tez çalışmasında, çok katlı bir çelik binanın TBDY-2018'e göre tasarımını ele almıştır. Ele alınan örnek 10 katlı olup, boyuna yönde süneklik düzeyi yüksek dışmerkez çaprazlı çerçevelerden, enine yönde ise süneklik düzeyi yüksek merkezi çaprazlı çerçeve sistemlerden oluşturulmuştur. 10 katlı bina, Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemine göre SAP2000 sonlu elemanlar programı ile analiz edilmiş, YDKT'ye göre tasarımı yapılmıştır.

Öz [6] yüksek lisans tez çalışmasında, süneklik düzeyi sınırlı moment aktaran çelik çerçevelerden

oluşan 5 katlı bina ile süneklik düzeyi yüksek merkezi çaprazlı çerçevelerden oluşan 5 katlı bir bina ele alınmış olup, bu binaların YDKT ve GKT ilkelerine göre tasarımları yapılmıştır. Bina analizleri SAP2000 programı yardımıyla yapılmıştır.

Uz [7] yüksek lisans tez çalışmasında, çok katlı bir çelik yapının TBDY-2018 ve 2016-ÇYTHYE yönetmelikleri kullanılarak analiz ve tasarımları yapılmıştır. Çalışmada, 5 katlı ve 13 katlı moment aktaran, X çapraz sistemli ve V çapraz sistemli binalar ele alınmış olup, binaların performansları incelenmiştir. Bu sistemlerin analizleri ETABS programı yardımıyla yapılmıştır.

Yıldızhan Sağer [8] yüksek lisans tez çalışmasında, moment aktaran ve merkezi çaprazlı çok katlı çelik binaların TBDY-2018'e göre analiz ve tasarımlarını araştırmıştır.

Gündüz [9] yüksek lisans tez çalışmasında, esas yapısı ön germeli prefabrik kirişlere oturan çift hatlı bir hızlı demiryolu köprüsü düşey yükler, trafik yükleri ve deprem yükleri altında analiz edilerek boyutlandırılmış ve gerekli kesit hesapları ve projelendirilmesini yapmıştır.

Güncel yönetmelikler çerçevesinde hazırlanan mevcut literatürde çoğunlukla, çok katlı çelik bina modellerinin deprem analizlerinde genel olarak Eşdeğer Deprem Yüğü ve Mod Birleştirme Yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Yazarların bilgisine göre, yaya üst geçit köprülerinin deprem analiz ve tasarımı ile ilgili Türkiye'de yapılmış herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, biri kafes sistem, diğeri kemer askılı olmak üzere iki adet yaya üst geçidi 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY-2018)'e göre analiz ve tasarımları yapılmıştır. Yaya üst geçitlerinin Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik 2016 (2016-ÇYTHYE) ve TBDY-2018 kullanılarak taşıyıcı sistem elemanları boyutlandırılmıştır. Deprem spektrumunun

belirlenmesinde TBDY-2018 yönetmeliği kullanılmıştır.

Ele alınan yapıların, Konya ili 37.500437° enlem ve 34.044326° boylamında inşa edildiği varsayılmış; yerel zemin sınıfı ise ZD olarak seçilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Sistem Malzemeleri

Bu çalışmada ele alınan uygulamalarda; yaya üst geçitlerinin kiriş ve kolonları için HEA kesitli profiller, çaprazlar için boru kesitli profiller kullanılmıştır. Kolon ve kirişlerin malzemesi için S275 çelik sınıfının akma gerilmesi  $F_y = 275$  Mpa ve çekme mukavemeti  $F_u = 430$  Mpa değerindedir. Çaprazların malzemesi ise, S235 çelik sınıfında olup, bunun karakteristik akma gerilmesi  $F_y=235$  Mpa ve çekme mukavemeti  $F_u = 360$  Mpa'dır. Birleşimlerde 8,8D kalitesinde yüksek dayanımlı bulon sınıfı seçilmiştir. Kaynak malzemesi için E550 Mpa mukavemetinde kaynak sınıfı seçilmiştir.

Kiriş, kolon, diyagonal, dikme ve çapraz elemanlarından oluşan üst geçit ana taşıyıcıları için kesitleri HEA olan, uzunlukları doğrultusunda düzlem çerçeve sistemler oluşturulmuştur. Kolonlar, temele ankastre olarak mesnetlenmiştir.

### 2.2. Yükler ve Kullanılan Standartlar

Yapı elemanlarının tasarımında karakteristik yük değerleri olarak TS-498 standardından yararlanılmıştır. Kar yükü hesabı TS EN 1991-1-3 ve rüzgâr yükü hesabı TS EN 1991-1-4 yönetmeliklerine göre yapılmıştır. Deprem yüklerinin hesabı ve karakteristik değerlerin belirlenmesi TBDY-2018 yönetmeliğinin ilgili maddelerine göre yapılmıştır.

### 2.3. Yük Birleşimleri

Hareketli ve sabit yükler ile deprem ve rüzgâr yüklerinin belirlenmesi ve bu yükler için yük

birleşimleri, 2016-ÇYTHYE yönetmeliği 5.3.1 maddesine göre ve TBDY-2018 yönetmeliği 4.4 ve 9.2.5 maddelerine gerçekleştirilmiştir. Yaya üst geçitlerinin tasarımları, her iki yönetmelikte de belirtilen, YDKT ve GKT ilkelerine göre yapılmıştır.

### YDKT'ye göre Yük Birleşimleri

- (1)  $1.4G$
- (2)  $1.2G+1.6Q + 0.5(Q_r \text{ veya } S \text{ veya } R)$
- (3)  $1.2G+ 1.6(Q_r \text{ veya } S \text{ veya } R) + (Q \text{ veya } 0.8 W)$
- (4)  $1.2G+ 1.0Q + 0.5(Q_r \text{ veya } S \text{ veya } R) + 1.6W$
- (5)  $1.2G+1.0Q + 0.2S+1.0E$
- (6)  $0.9G+1.6W$
- (7)  $0.9G+1.0E$

### GKT'ye Göre Yük Birleşimleri

- (1)  $G$
  - (2)  $G + Q$
  - (3)  $G + (Q_r \text{ veya } S \text{ veya } R)$
  - (4)  $G + 0.75Q + 0.75(Q_r \text{ veya } S \text{ veya } R)$
  - (5)  $G + 1.0W$
  - (6)  $G + 0.7E$
  - (7)  $G + 0.75Q + 0.75(Q_r \text{ veya } S \text{ veya } R) + 0.75W$
  - (8)  $G + 0.75Q + 0.75S + 0.75(0.7E)$
  - (9)  $0.6G + W$
  - (10)  $0.6G + 0.7E$
- şeklindedir.

### 2.4. Yapısal Analiz ve Tasarım

Bu çalışmada ele alınan yaya üst geçitlerinin analiz ve tasarımında TBDY-2018 yönetmeliği, boyutlandırılmasında 2016- ÇYTHYE yönetmelik esasları dikkate alınmıştır. Yaya üst geçitlerin tasarımları, her iki yönetmelikte de belirtilen YDKT ve GKT ilkeleri için yük birleşimlerine göre yapılmıştır. Yapı analiz ve tasarımları, SAP2000 sonlu elemanlar programı ile yapılmıştır.

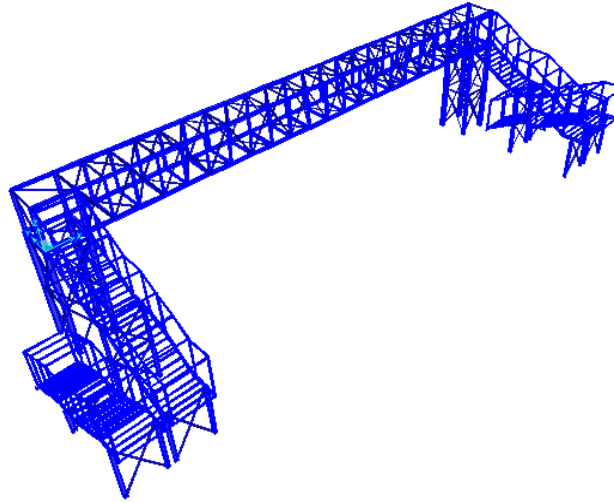
### 3. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu bölümde, iki örnek uygulamanın analiz ve tasarımları yapılmıştır.

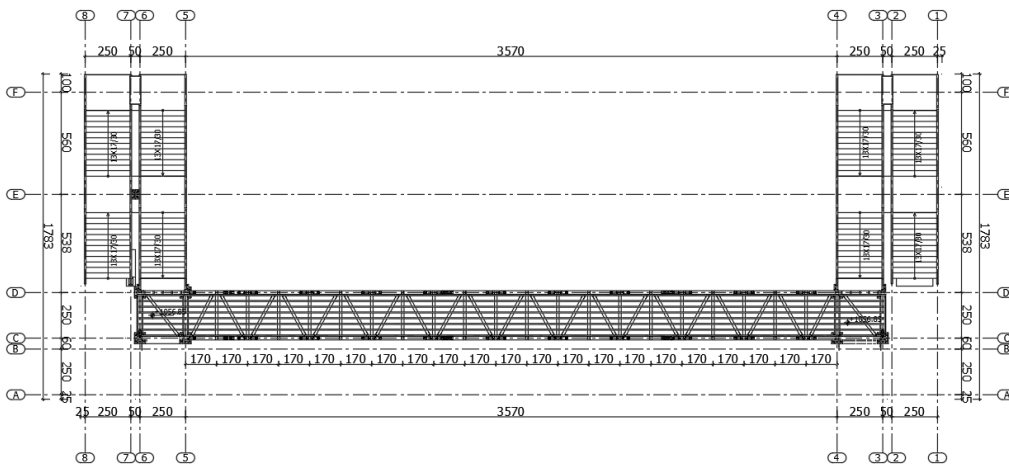
#### Uygulama 1: Kafes Kiriş Taşıyıcı Sistemli Yaya Üst Geçit Örneği

Yaya üst geçidi, iki hatlı demiryolu üzerinde bir kafes kiriş sistemi şeklinde tasarlanmış olup, üst geçidin demiryolu rayın üstünden kiriş alt başlığına kadar olan yüksekliği 7,4 m'dir. Kafes kirişin açıklığı 35 m, genişliği 2,5 m ve yüksekliği

ise 3 m'dir. Kirişin alt ve üst başlıklarında HEA20, kolonlarda HEA300, dikmelerde HEA140 kesitli elemanlar, diyagonal ve çaprazlarda ise,  $\phi 139,7 \times 5$  çapında borular kullanılmıştır. Diyagonal ve çaprazlar üst geçitte uçlardan mafsalsı olarak bağlanmıştır. Kiriş ve kolonların bağlantı noktaları bir tarafta sabit ve diğer tarafta kayıcı olarak mesnetlenmiştir. Şekil 1'de üst geçide ait üç boyutlu SAP2000 modeli, Şekil 2'de üst geçit planı yer almaktadır. Kolon, kiriş ve dikmeler için S275; çapraz ve diyagonal profilleri için S235 çelik malzemesi seçilmiştir.



Şekil 1. Üst geçidin üç boyutlu Sap2000 modeli



Şekil 2. Üst geçit planı

### Sabit ve hareketli yükler

Konya ilinde bulunan kafes kirişli yaya üst geçidin rüzgâr yükü hesabında TS EN 1991-1-4 standardı ve kar yükü hesabında ise, TS EN-1991-1-3 kullanılmıştır (Çizelge 1). TS EN 1991-1-4 yönetmeliğine göre yaya üst geçit olarak modellenen yapıya etkiyen rüzgâr kuvveti Çizelge 2’de verilmiştir.

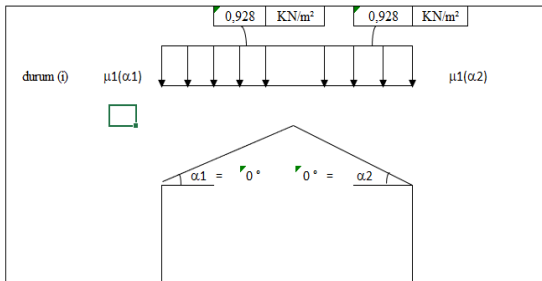
**Çizelge 1.** Sabit ve hareketli yük değerleri

Üstgeçit zati yükü	Program tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır.
Kaplama birim hacim ağırlığı	2,400 ton/m <sup>3</sup>
G <sub>2</sub> -Korkuluk yükü	0,05 ton /m
G <sub>3</sub> -Çatı kaplama (Polikarbonat yükü)	0,005 ton in-
G <sub>4</sub> -Kaplama (3/4 baklavalı saç) yükü	0,027 ton in <sup>2</sup>
Q <sub>1</sub> -Üstgeçit hareketli yükü	0,500 ton/m <sup>2</sup>
S-Çatı kar yükü	Yeni kar yönetmeliğine göre hesaplanmıştır.
W-Rüzgar yükü	Yeni rüzgar yönetmeliğine göre hesaplanmıştır.

**Çizelge 2.** Rüzgâr yükü  $w(z)$  {kN/m<sup>2</sup>}

Bölge	A	B	C	D	E
$w(z)=C_{pnet}.q_p(z)$	-1,22	-0,87	-0,61	0,52	-0,76

TS EN 1991-1-3 yönetmeliğine göre yaya üst geçit olarak modellenen yapıya ait üst geçide etkiyen toplam kar yükü değerleri Şekil 3’de gösterilmiştir.



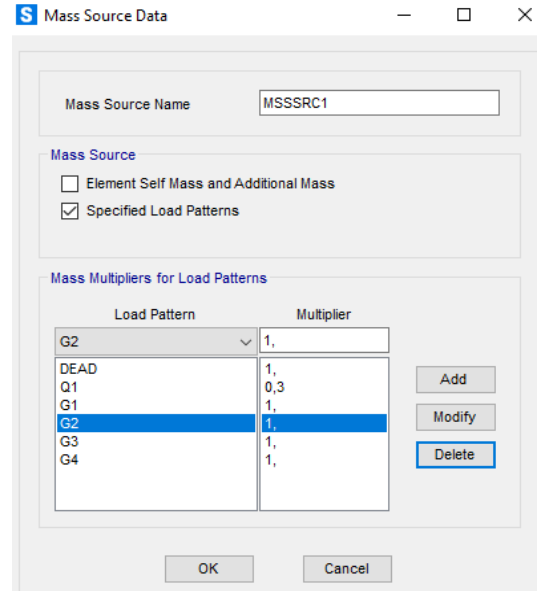
**Şekil 3.** Üst geçit kar yüklemesi

### Deprem yükleri

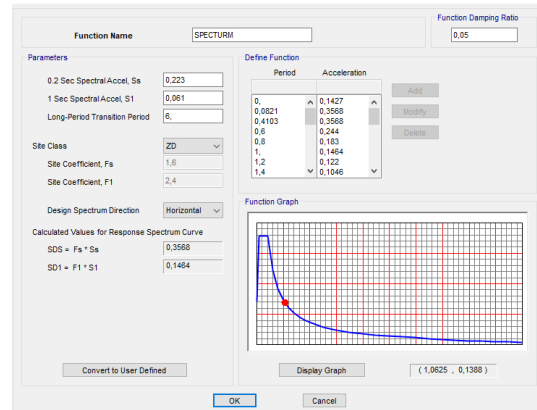
Deprem spektrumu parametreleri (Şekil 4-7) SAP2000 programında TBDY-2018’e göre belirlenmiştir. Yapının bulunduğu yerdeki zemin sınıfı için ZD, Bina önem katsayısı için 1, taşıyıcı sistem davranış katsayısı R= 4 seçilmiştir.

$$\text{Çarpan değeri} = A_0 * I * g / R = 1 * 9,81 / 4 = 2,4525$$

Burada A<sub>0</sub> değeri SAP2000 programı tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır.

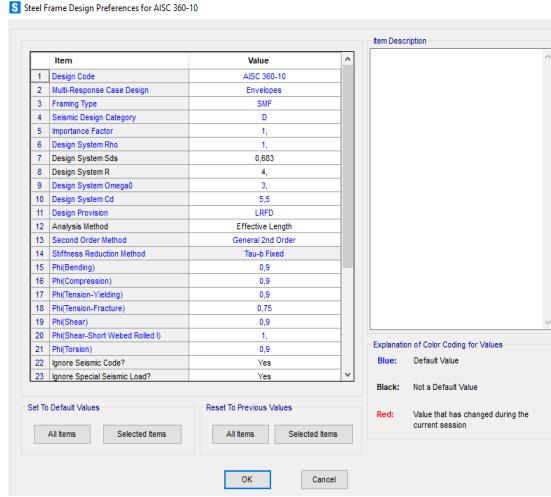


**Şekil 4.** Kütle kaynağı

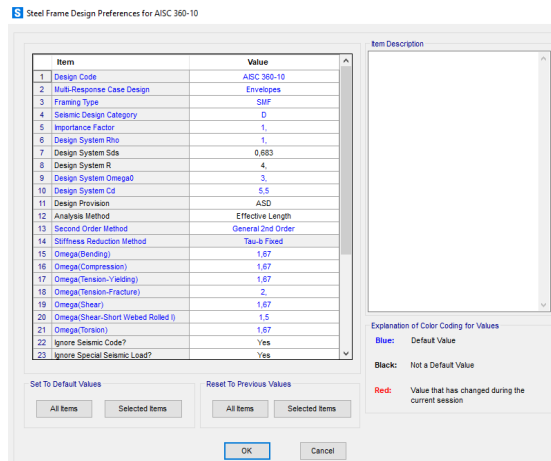


**Şekil 5.** Tepki spektrumu

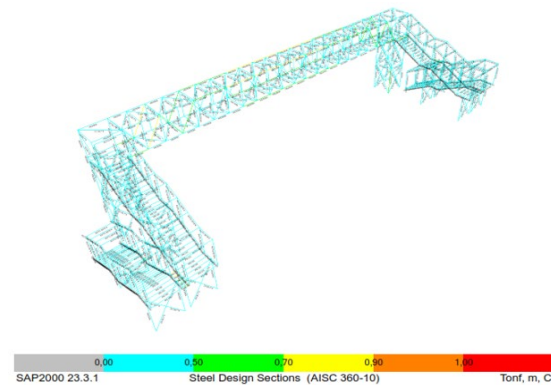
## Yaya Üst Geçitlerinin 2018 Deprem Yönetmeliğine Göre Analiz ve Tasarımları



Şekil 6. YDKT için tasarım kodu parametreleri

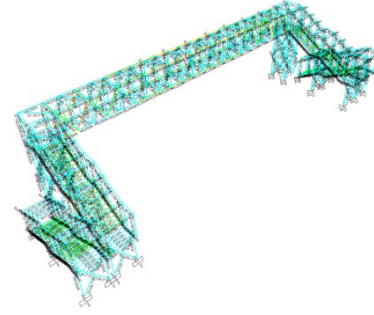


Şekil 7. GKT için tasarım kodu parametreleri



Şekil 8. YDKT'ye göre analiz sonuçları

Bu örnekte YDKT'ye göre açıklık ve mesnet bölgesindeki elemanlar maksimum yüklere maruz kalmış olup, bu elemanların taşıma kapasiteleri (0,70 -0,90) aralığındadır (Şekil 8).

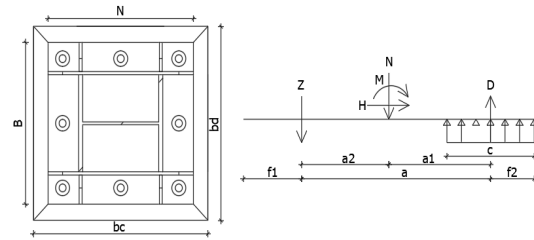


Şekil 9. GKT'ye göre analiz sonuçları

Bu örnekte GKT'ye göre açıklık ve mesnet bölgesindeki elemanlar maksimum yüklere maruz kalmış olup, bu elemanların taşıma kapasiteleri (0,70 -0,90) aralığındadır (Şekil 9).

### YDKT için taban birleşim hesabı (Şekil 10)

$$P_u=545,18 \text{ kN}, M_u=112,49 \text{ kNm}, V_x=13,19 \text{ kN}, V_y=3,04 \text{ kN}$$



Şekil 10. Taban birleşim plan ve kesiti

Yönetmelik madde 13.7 uyarınca maksimum basınç ve çekme kuvvetleri ile beton ezilme dayanımları aşağıda verilmiştir.

Taban levhası alanı ve beton yüzeyi alanı:

$$A_1 = 500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} = 250000 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} = 360000 \text{ mm}^2$$



$\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 2,00$  olmak üzere, beton ezilme dayanımı

$$P_p = 0,85 \cdot f_{ck} \cdot A_1 \cdot \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 1,7 \cdot f_{ck} \cdot A_1$$

$$\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} = \sqrt{\frac{360000 \text{ mm}^2}{250000 \text{ mm}^2}} = 1,2 < 2 \text{ ise } \checkmark$$

$$P_p = 0,85 \cdot F_{ck} \cdot A_1 \cdot \sqrt{\frac{A_2}{A_1}}$$

$$P_p = 0,85 \times 30 \text{ N/mm}^2 \times 250000 \text{ mm}^2 \times 1,2 = 7650,00 \text{ kN}$$

$$P_p = 1,7 \cdot f_{ck} \cdot A_1 = 1,7 \times 30 \text{ N/mm}^2 \times 250000 \text{ mm}^2 = 12750,00 \text{ kN}$$

Eğer,  $7650,00 \text{ kN} < 12750,00 \text{ kN}$  ise  $\checkmark$

Küçük olan kullanılacak  $P_p = 7650,00 \text{ kN}$

$c = 125,00 \text{ mm}$  (Basınç bölgesi derinliği: %25 N)

$$a = 387,50 \text{ mm} \quad (a_1 + a_2)$$

$$a_1 = 187,50 \text{ mm} \quad (N/2 - c/2)$$

$$a_2 = 200,00 \text{ mm} \quad (N/2 - f_1)$$

$$\text{MaxD} = (112,49 \text{ kNm} + 545 \text{ kN} \times 0,20 \text{ m}) / 0,388 \text{ m} = 571,67 \text{ kN}$$

$$\text{MaxZ} = (112,49 \text{ kNm} - 545 \text{ kN} \times 0,188 \text{ m}) / 0,388 \text{ m} = 26,49 \text{ kN}$$

Tasarım ezilme dayanımı:

$c = 0,65$  (Yönetmelik Bölüm 12.7.2.1)

$$P_p = 0,65 \times 7650 \text{ kN} = 4972,50 \text{ kN}$$

$$\text{MaxD}/P_p = 571,67 / 4972,50 = 0,115 < 1 \text{ ise } \checkmark$$

#### Taban levhası kontrolü

$$N = 500,00 \text{ mm} \quad (\text{Taban levhası genişliği})$$

$$B = 500,00 \text{ mm} \quad (\text{Taban levhası uzunluğu})$$

$$F_y = 275 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Levha akma gerilmesi})$$

$$F_u = 430 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Levha çekme gerilmesi})$$

$$t = 25 \text{ mm} \quad (\text{Levha kalınlığı})$$

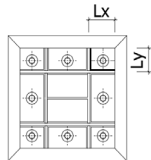
#### YDKT için taban gerilmesi (P)

$$P = (M_u + P_u \cdot a) / (c \cdot B \cdot a)$$

$$P = (112,49 \text{ kNm} + 545 \text{ kN} \times 0,18 \text{ m}) / (0,125 \text{ m} \times 0,50 \text{ m} \times 0,388 \text{ m}) = 8865,40 \text{ kN/m}^2$$

$$L_x = 140,00 \text{ mm} \quad L_y = 125,00 \text{ mm} \quad (\text{Şekil 11.})$$

$$\varepsilon = 140,00 \text{ mm} / 125,00 \text{ mm} = 1,12$$



Şekil 11. L<sub>x</sub> ve L<sub>y</sub> plan boyutları

$$K = P \cdot L_x \cdot L_y$$

$$K = 8865,40 \text{ kN/m}^2 \times 0,140 \text{ m} \times 0,125 \text{ m}$$

$$= 155,14 \text{ kN}$$

$$M_{mxr} = 155,14 \text{ kN} / 13,70 = 11,32 \text{ kNmm}$$

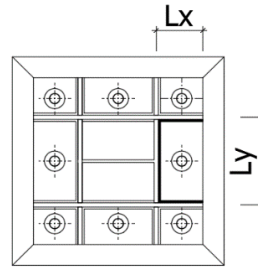
$$M_{mxm} = 155,14 \text{ kN} / 37,00 = 4,19 \text{ kNmm}$$

$$M_{myer} = 155,14 \text{ kN} / 15,00 = 10,34 \text{ kNmm}$$

$$M_{mymax} = 155,14 \text{ kN} / 48,00 = 3,23 \text{ kNmm}$$

$$L_y = 250,00 \text{ mm} \quad L_x = 140,00 \text{ mm} \quad (\text{Şekil 12})$$

$$\varepsilon = 250,00 \text{ mm} / 125,00 \text{ mm} = 1,786$$



Şekil 12. L<sub>x</sub> ve L<sub>y</sub> plan boyutları

$$K = P \cdot L_x \cdot L_y$$

$$K = 8865,39 \text{ kN/m}^2 \times 0,140 \text{ m} \times 0,250 \text{ m} = 310,29 \text{ kN}$$

$$M_{mxr} = 310,29 \text{ kN} / 15,50 = 20,02 \text{ kNmm}$$

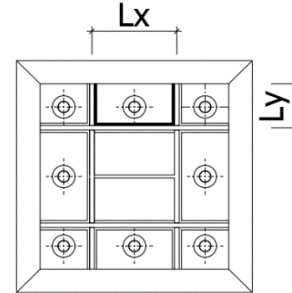
$$M_{mxm} = 310,29 \text{ kN} / 34,20 = 9,07 \text{ kNmm}$$

$$M_{myer} = 310,29 \text{ kN} / 21,50 = 14,43 \text{ kNmm}$$

$$M_{mymax} = 310,29 \text{ kN} / 102,00 = 3,04 \text{ kNmm}$$

$$L_y = 125,00 \text{ mm} \quad L_x = 218,00 \text{ mm} \quad (\text{Şekil 13})$$

$$\varepsilon = 218,00 \text{ mm} / 125,00 \text{ mm} = 1,744$$



Şekil 13. L<sub>x</sub> ve L<sub>y</sub> plan boyutları

$$K = P \cdot L_x \cdot L_y$$

$$K = 8865,40 \text{ kN/m}^2 \times 0,218 \text{ m} \times 0,125 \text{ m}$$

$$= 241,58 \text{ kN}$$

$$M_{mxr} = 241,58 \text{ kN} / 15,2 = 15,89 \text{ kNmm}$$

$$M_{mxm} = 241,58 \text{ kN} / 33,70 = 7,17 \text{ kNmm}$$

$$M_{myer} = 241,58 \text{ kN} / 20,90 = 11,56 \text{ kNmm}$$

$$M_{mymax} = 241,58 \text{ kN} / 97,50 = 2,48 \text{ kNmm}$$

$$\begin{aligned} M_u(\max) &= 20,01 \text{ kNm} \\ \theta &= 0,90 \text{ (Yönetmelik Bölüm 8.1.2)} \\ M_d &= 0,90 \times 0,0286 \text{ kNm} = 0,0257 \text{ kNm} \\ M_{u\max}/M_d &= 0,020 / 0,0257 = 0,77 < 1 \text{ ise } \checkmark \end{aligned}$$

#### Ankraj bulonlarının tahkiki

$$\begin{aligned} \text{Cıvata: } &8.8D \text{ Kalitesinde} \\ \text{Ø} &= 24 \text{ mm (Ankraj çapı)} \\ L &= 600 \text{ mm (Ankraj boyu)} \\ n &= 3 \text{ (Bir sıradaki ankraj sayısı)} \\ F_{ub} &= 800 \text{ N/mm}^2 \text{ (Bulon malzemesinin} \\ &\text{ karakterisitik çekme dayanımı)} \\ F_{nv} &= 0,450 F_{ub} = 360 \text{ N/mm}^2 \text{ (Bulonun karakteristik} \\ &\text{ kayma dayanımı)} \\ F_{nv} &= 0,750 F_{ub} = 600 \text{ N/mm}^2 \text{ (Bulonun} \\ &\text{ karakteristik kayma dayanımı)} \end{aligned}$$

#### Başlık bulon karakteristik çekme dayanımı

$$\begin{aligned} A_b &= \pi \cdot d^2 / 4 = \pi \times 24^2 / 4 = 452,4 \text{ mm}^2 \text{ (Bulon kesit} \\ &\text{ alanı)} \\ R_{nt} &= n \cdot F_{nv} \cdot A_b = 3 \times 600 \times 452,4 = 814,30 \text{ kN} \\ \text{YDKT için Tasarım ezilme dayanımı} \\ \phi &= 0,75 \text{ (Yönetmelik Bölüm 7.2.2)} \\ R_d &= \phi R_n = 0,75 \times 814,30 \text{ kN} = 611,73 \text{ kN} \\ \max Z / R_d &= 26,49 / 611,73 = 0,04 < 1 \text{ ise } \checkmark \end{aligned}$$

#### HEA-300 için kolon kesit özellikleri

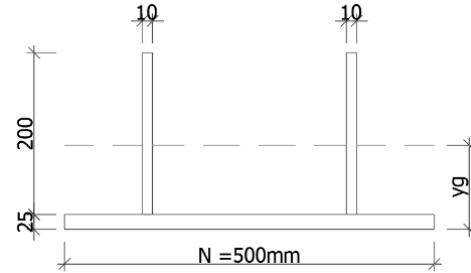
$$\begin{aligned} d &= 290 \text{ mm (Profil yüksekliği)} \quad t_f = 14 \text{ mm} \\ b_f &= 300 \text{ mm (Profil genişliği)} \quad t_w = 8,5 \text{ mm} \\ h-2d &= 208 \text{ mm (Profil gövde yüksekliği)} \\ F_y &= 275 \text{ N/mm}^2 \text{ (Profile akma gerilmesi)} \\ F_u &= 430 \text{ N/mm}^2 \text{ (Profile çekme gerilmesi)} \end{aligned}$$

#### Guse levhası yüksekliğinin hesabı (Şekil 14.)

$$\begin{aligned} F_E &= 550 \text{ N/mm}^2 \text{ (Kaynak metali karakteristik} \\ &\text{ çekme dayanımı)} \\ \text{Köşe kaynağın etkin kalınlığı (a) (Yönetmelik} \\ &13.2.2.2 \text{ uyarınca)} \\ a_{\min} &= 3,5 \text{ mm} \\ a &= 4 \text{ mm seçildi } > 3,5 \text{ mm uygun.} \\ t \leq 6 \text{ mm ise } a_{\max} &= 0,7 t \text{ olmalı} \\ t > 6 \text{ mm ise } a_{\max} &= 0,7 (t-2) \text{ olmalı} \\ t &= 10 \text{ mm seçildi (Guse levhası kalınlığı)} \\ L &= 200 \text{ mm seçildi (Guse levhası yüksekliği)} \\ t &= 10 \text{ mm } > 6 \text{ mm} \\ a_{\max} &= 5,6 \text{ mm (} a_{\max} = 0,7 (t-2)) \\ a &= 4 \text{ mm } < 5,6 \text{ mm uygun.} \\ \text{Köşe kaynağın etkin uzunluğu,} \end{aligned}$$

#### Le (Yönetmelik 13.2.2 Uyarınca)

$$\begin{aligned} L_e &= 200 \text{ mm} - 2 \times 4 \text{ mm} = 192 \text{ mm} \\ L_{e\min} &= 40 \text{ mm (} L_{e\min} = \max(6 a; 40)) \\ L_{e\min} &= 40 \text{ mm } < 192 \text{ mm uygun} \\ L \leq 150 a \text{ için } L_e &= L \\ 150 a < L \leq 400 a \text{ için } L_e &= b \cdot L \\ 400 a < L \text{ için } L_e &= 250 a \\ \beta &= 1,2 - 0,0014 \times L / a \leq 1 \text{ olmalı} \\ \beta &= 1,2 - 0,0014 \times 192 / 4 = 1,13 \\ \text{Seçilen } \beta &= 1 \\ 150 a &= 150 \times 4 \text{ mm} = 600 \text{ mm} \\ 400 a &= 400 \times 4 \text{ mm} = 1600 \text{ mm} \\ L_e &= L = 192 \text{ mm } L \leq 150 a \\ \text{Köşe kaynak etkin alanı } A_{we} \\ A_{we} &= \sum a \cdot L_e = 2 \times 4 \times 192 = 1536 \text{ mm}^2 \\ \text{Kaynak metali karakteristik dayanımı} \\ F_E &= 550 \text{ N/mm}^2 \\ F_{nw} &= 0,6 \times 550 \text{ N/mm}^2 = 330 \text{ N/mm}^2 \\ R_{nw} &= 1536 \text{ mm}^2 \times 330 \text{ N/mm}^2 = 506,88 \text{ kN} \\ \text{YDKT için bir başlığa gelen kuvvet} \\ P_u &= (545 \text{ kN} / 4) + 112,49 \text{ kNm} / (2 \times 0,290 \text{ m}) \\ &= 330,24 \text{ kN} \\ \text{Tasarım Ezilme Dayanımı} \\ \phi &= 0,75 \text{ (Yönetmelik Bölüm 7.2.2)} \\ R_d &= \phi R_n = 0,75 \times 506,88 \text{ kN} = 380,16 \text{ kN} \\ P_u / R_d &= 330,24 \text{ kN} / 380,16 \text{ kN} = 0,87 < 1 \text{ ise } \checkmark \end{aligned}$$



Şekil 14. A-A kesiti

$$\begin{aligned} y_g &= \text{A-A Kesitin ağırlık merkezi,} \\ I_x &= \text{A-A Kesitin atalet momenti,} \\ W_x &= \text{A-A Kesitin mukavemet momenti olmak} \\ &\text{ üzere} \\ \text{Sırasıyla,} \\ y_g &= (500 \times 25 \times 12,5 + 2 \times 200 \times 10 \times 125) / (500 \times \\ &25 + 2 \times 200 \times 10) = 39,77 \text{ mm} \\ I_x &= (2 \times 10 \times 200^3 / 12 + 2 \times 200 \times 10 \times 85,2^2 + 500 \times \\ &25^3 / 12 + 500 \times 25 \times 27,3^2) \\ I_x &= 52336647,73 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$W_x = 52336647,73 \text{ mm}^4 / (200 \text{ mm} + 25 \text{ mm} - 39,77 \text{ mm}) = 282553,7 \text{ mm}^3$$

$$M_n = (1,6 \times 275 \text{ N/mm}^2 \times 282553,7 \text{ mm}^3) = 124,32 \text{ Nmm}$$

#### YDKT için kontroller

$$M_u = D_{\max} (N/2 - d/2 - c/2)$$

$$M_u = 571,67 \text{ kN} \times (500 \text{ mm}/2 - 290 \text{ mm}/2 - 125 \text{ mm}/2) = 24,30 \text{ kNm}$$

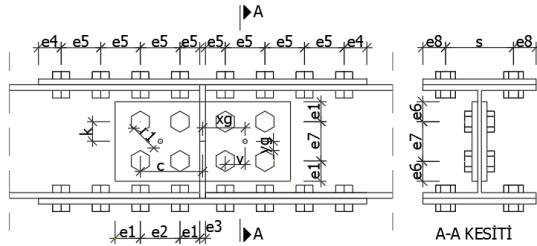
$$M_u = 26,49 \text{ kN} \times (500 \text{ mm}/2 - 290 \text{ mm}/2 - 125 \text{ mm}/2) = 1,46 \text{ kNm}$$

Kullanılacak  $M_u = 24,30 \text{ kNm}$

$$M_g = 0,90 \times 124,32 \text{ kNm} = 111,89 \text{ kNm}$$

$$M_u / M_g = 24,30 / 111,89 = 0,21 < 1 \text{ ise } \checkmark$$

#### Kiriş-kiriş birleşim hesabı



Şekil 15. Kiriş-kiriş birleşim detayı

#### Gövde bulonları aralık ve kenara mesafeleri

$$e_1 = 35 \text{ mm}, e_2 = 70 \text{ mm}, e_3 = 0 \text{ mm}, e_6 = 35 \text{ mm}, e_7 = 60 \text{ mm}$$

$$n_1 = 2 \quad (\text{Gövde bulon sırası yatay yönde})$$

$$n_2 = 2 \quad (\text{Gövde bulon sırası düşey yönde})$$

$$h = 130 \text{ mm} \quad (\text{Gövde levhası yüksekliği})$$

$$B_1 = 280 \text{ mm} \quad (\text{Gövde levhası uzunluğu})$$

$$t_1 = 10 \text{ mm} \quad (\text{Gövde levhası kalınlığı})$$

Cıvata: 8.8D Kalitesinde

$$\varnothing = 16 \text{ mm} \quad (\text{Bulon çapı})$$

$$e_2 \geq 3 \varnothing \quad (\text{bulon aralığı})$$

$$e_2 = 70 \text{ mm} \geq 3 \times 16 = 48 \text{ mm} \text{ Bulon aralığı uygun}$$

$$e_1 = 35 \text{ mm} \geq 22 = \text{Bulon kenara aralık uygun}$$

Başlık Bulonları Aralık ve Kenara Mesafeleri

$$e_5 = 70 \text{ mm}, e_4 = 35 \text{ mm}, e_8 = 45 \text{ mm}, s = 110 \text{ mm}$$

$$n_3 = 2 \quad (\text{Başlık bulon sırası})$$

$$B = 200 \text{ mm} \quad (\text{Başlık levhası genişliği})$$

$$t = 12 \text{ mm} \quad (\text{Başlık levhası kalınlığı})$$

$$B_2 = 420 \text{ mm} \quad (\text{Başlık levhası uzunluğu})$$

Cıvata: 8.8D Kalitesinde

$$\varnothing = 16 \text{ mm} \quad (\text{Bulon çapı})$$

$$e_5 \geq 3 \varnothing \quad (\text{Bulon aralığı})$$

$$e_5 = 70 \text{ mm} \geq 3 \times 16 = 48 \text{ mm} \text{ Bulon aralığı uygun}$$

$$e_4 = 35 \text{ mm} \geq 22 = \text{Bulon kenara aralık uygun}$$

$$e_8 = 45 \text{ mm} \geq 22 = \text{Bulon kenara aralık uygun}$$

#### HEA-200 için kiriş kesit özellikleri

$$d = 190 \text{ mm} \quad (\text{Profil yüksekliği})$$

$$t_f = 10 \text{ mm} \quad (\text{Profil başlık kalınlığı})$$

$$b_f = 200 \text{ mm} \quad (\text{Profil genişliği})$$

$$t_w = 6,5 \text{ mm} \quad (\text{Profil gövde kalınlığı})$$

$$A_p = 5380 \text{ mm}^2 \quad (\text{Profil en kesit alanı})$$

$$F_y = 275 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Profile akma gerilmesi})$$

$$F_u = 430 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Profile çekme gerilmesi})$$

#### Başlık ve gövde levhası kesit tahkiki

Ezilme dayanımı için bulon delik çapı

$$d_h = 18 \text{ mm} \quad (\text{Yönetmelik Tablo 13.8 Uyarınca})$$

$$A_{\text{başlık ek}} = (B \cdot t \cdot 2 \cdot d_h \cdot t)$$

$$A_{\text{başlık ek}} = 200 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \cdot 2 \times 18 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} = 1968 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{başlık profil}} = (B \cdot t \cdot 2 \cdot d_h \cdot t)$$

$$A_{\text{başlık profil}} = 200 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \cdot 2 \times 18 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} = 1640 \text{ mm}^2$$

$$1968 \text{ mm}^2 > 1640 \text{ mm}^2 \text{ uygun}$$

$$A_{\text{gövde ek}} = (B \cdot t_1 \cdot 2)$$

$$A_{\text{gövde ek}} = 130 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 2 = 2600 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{gövde profil}} = 200 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 2 = 4000 \text{ mm}^2$$

$$(A_{\text{gövde}} = A_{\text{profil}} - A_{\text{başlık}})$$

$$A_{\text{gövde}} = 5300 \text{ mm}^2 - 4000 \text{ mm}^2 = 1380 \text{ mm}^2$$

$$2600 \text{ mm}^2 > 1380 \text{ mm}^2 \text{ ise uygun}$$

$$I_{ek} = 2 \left( B \cdot t \left( d + \frac{t}{2} \right)^2 + \left( t_1 \cdot \frac{B_1^3}{12} \right) \right)$$

$$I_{ek} = 2 \left( 200 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} (101 \text{ mm})^2 + \left( 10 \text{ mm} \times \frac{130 \text{ mm}^3}{12} \right) \right) = 52626466,67 \text{ mm}^4$$

$$I_{\text{başlık ek}} = 2 \cdot (B \cdot t \left( d + \frac{t}{2} \right)^2)$$

$$I_{\text{başlık ek}} = 2 \cdot (200 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} (101 \text{ mm})^2)$$

$$I_{\text{başlık ek}} = 48964800 \text{ mm}^4$$

$$I_{\text{gövde ek}} = 2 \left( t_1 \cdot \frac{B_1^3}{12} \right)$$

$$I_{\text{gövde ek}} = \left( 10 \text{ mm} \times \frac{130 \text{ mm}^3}{12} \right) = 3661666 \text{ mm}^4$$

#### Başlık bulonlarının tahkiki

Bulon: (8.8D Kalitesinde)

$\varnothing = 16 \text{ mm}$  (Bulon çapı)

$n_{sp} = 1$  (kayma düzlemi sayısı)

$n = 8$  (Bulon sayısı)

$F_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$  (Bulon malzemesinin karakteristik çekme dayanımı)

$F_{nv} = 0,450 F_{ub} = 360 \text{ N/mm}^2$  (Bulonun karakteristik kayma gerilmesi dayanımı)  
 $F_{nv} = 0,750 \times F_{ub} = 600 \text{ N/mm}^2$  (Bulonun karakteristik kayma gerilmesi dayanımı)  
 $A_b = \pi \cdot d^2/4 = \pi \times 16^2/4 = 201,06 \text{ mm}^2$  (Bulon kesit alanı)

$R_{nt} = n \cdot n_{sp} \cdot F_{nv} \cdot A_b = 8 \times 360 \text{ N/mm}^2 \times 201,06 \text{ mm}^2 = 579,06 \text{ kN}$

#### YDKT için kesit tesirleri

$P_u = 654,00 \text{ kN}$   $M_u = 4,26 \text{ kNm}$   $V = 2,55 \text{ kN}$

$(M_{başlık} = M_u \cdot I_{başlık} / I_{ek})$

$M_{başlık} = 4,26 \text{ kNm} \times 48964800 \text{ mm}^4 / 52626466,67 \text{ mm}^4 = 3,96 \text{ kNm}$

$(Z_{başlık} = M_{başlık} / d)$

$Z_{başlık} = 3,96 \text{ kNm} / 0,19 \text{ m} = 20,86 \text{ Kn}$

$Z_{başlık} = 20,86 \text{ kN} + 654,00 \text{ kN} / 2 = 347,90 \text{ kN}$

#### Birleşimin tasarım dayanımı

$\phi = 0,75$  (Yönetmelik Bölüm 7.2.2)

$R_d = \phi R_n = 0,75 \times 579,06 \text{ kN} = 434,29 \text{ kN}$

$P_b / R_d = 347,90 \text{ kN} / 434,29 \text{ kN} = 0,81 < 1$  ise  $\checkmark$

#### Gövde bulonlarının tahkiki

$(M_{gövde} = M_u \cdot I_{gövde} / I_{ek})$

$M_{gövde} = 4,26 \text{ kNm} \times 3661667 \text{ mm}^4 / 52626466,67 \text{ mm}^4 = 0,30 \text{ kNm}$

Bulon (8.8D Kalitesinde)

$\phi = 16 \text{ mm}$  (Bulon çapı)

$n_{sp} = 2$  (Kayma düzlemi sayısı)

$n = 4$  (Bulon sayısı)

$F_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$

(Bulon malzemesinin karakteristik çekme dayanımı)

$F_{nv} = 0,450 F_{ub} = 360 \text{ N/mm}^2$  (Bulonun karakteristik kayma gerilmesi dayanımı)

$F_{nv} = 0,750 F_{ub} = 600 \text{ N/mm}^2$  (Bulonun karakteristik kayma gerilmesi dayanımı)

$A_b = \pi \cdot d^2/4 = \pi \times 16^2/4 = 201,06 \text{ mm}^2$  (Bulon kesit alanı)

#### Gövde bulonları polar atalet momentleri

$x_g = (\frac{e_2}{2} + e_1 + \frac{e_3}{2}) = (\frac{70 \text{ mm}}{2} + 35 \text{ mm} + \frac{0}{2})$

$x_g = 70 \text{ mm}$

$y_g = \frac{e_7}{2} = \frac{60 \text{ mm}}{2} = 30 \text{ mm}$

$r_1 = \sqrt{(\frac{e_2}{2})^2 + (\frac{e_7}{2})^2} = \sqrt{(\frac{70 \text{ mm}}{2})^2 + (\frac{60 \text{ mm}}{2})^2}$

$r_1 = 46,098 \text{ mm}$

$J_p = 4 \times (46,098)^2 = 8500 \text{ mm}^2$

$c = (e_1 + e_2 + \frac{e_3}{2}) = (35 \text{ mm} + 70 \text{ mm} + \frac{0}{2})$

$c = 105 \text{ mm}$

#### YDKT için kontroller

$K = 30 \text{ mm}$

$(M_{gövde} = M_{gövde} + v_3 \cdot c)$

$M_{gövde} = 0,30 \text{ kNm} + 2,55 \text{ kN} \times 0,105 \text{ m}$

$M_{gövde} = 0,56 \text{ kNm}$

$(P_{1x} = M_g \cdot K / J_p)$

$P_{1x} = 0,56 \text{ kNm} \times 0,3 \text{ m} / 8500 \text{ mm}^2 = 1,99 \text{ kN}$

$M = 4$  Gövdede Bulon Sayısı

$P_{1y} = (M_g \cdot v / J_p + V / m)$

$P_{1y} = 0,56 \text{ kNm} \times 0,35 \text{ m} / 8500 \text{ mm}^2 + 2,55 \text{ kN} / 4$

$P_{1y} = 2,96 \text{ kN}$

$P_1 = \sqrt{(P_x)^2 + (P_y)^2}$

$P_1 = \sqrt{(1,99 \text{ kN})^2 + (2,96 \text{ kN})^2} = 3,57 \text{ kN}$

#### En dış gövde bulon karakteristik kesme kuvveti dayanımı

$R_{nt} = 1 \times 2 \times 360 \text{ N/mm}^2 \times 201,06 \text{ mm}^2$

$R_{nt} = 144,76 \text{ kN}$  ( $R_{nt} = n \cdot n_{sp} \cdot F_{nv} \cdot A_b$ )

Birleşimin Tasarım Dayanımı

$\phi = 0,75$  (Yönetmelik Bölüm 7.2.2)

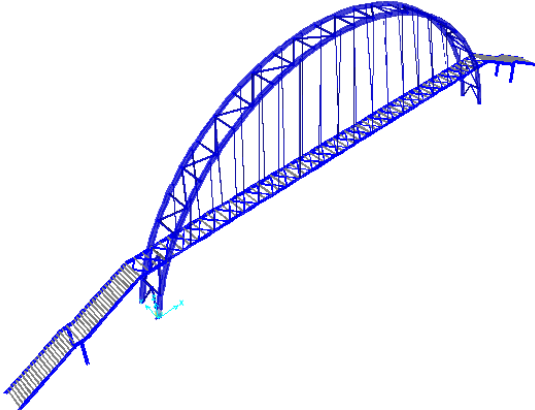
$R_d = \phi R_n = 0,75 \times 144,76 \text{ kN} = 108,57 \text{ kN}$

$P_u / R_d = 3,75 \text{ kN} / 108,57 \text{ kN} = 0,033 < 1$  ise  $\checkmark$

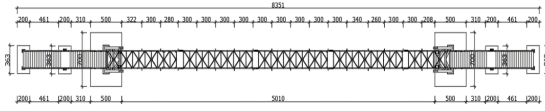
#### Uygulama 2: Kemer Askılı Yaya Üst Geçit Örneği

Kemer askılı yaya üst geçit örneği, Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü Toprakkale-İskenderun Otoyolu 239 + 400. Km mevkiinde mevcut ve yapılmış olan köprü projesinin güncel yönetmeliklere göre bu çalışma yeniden analiz ve tasarımı yapılmıştır. Karayolu üzerinde tasarlanmış olan köprünün üst geçidin asfalt kotu üstünden kirişi alt başlığına kadar yüksekliği 6,4 m, açıklığı 55 m ve genişliği 3m'dir. Kirişin alt başlığı UPN300, enleme kirişleri UPN140, platformun çaprazları L70x7, kemer kirişi PL550, kemer kirişin çaprazları  $\phi 219.1 \times 10$  çapında borular ve platform kirişine birbirine bağlayan boruların ise çapı  $\phi 114,3 \times 7,1$ 'dir. Çaprazlar üst geçide mafsalı olarak bağlanmıştır. Şekil 16'de üst geçit ait 3 boyutlu SAP2000 modeli, Şekil 17'de üst geçit planı, yer almaktadır. Kolon, kiriş ve dikmeler için

S275; çapraz profilleri için S235 çelik malzemesi seçilmiştir.



Şekil 16. Üst geçidin üç boyutlu Sap2000 modeli



Şekil 17. üst geçit planı

### Sabit ve hareketli yükler

Çizelge 3. Sabit ve hareketli yük değerleri

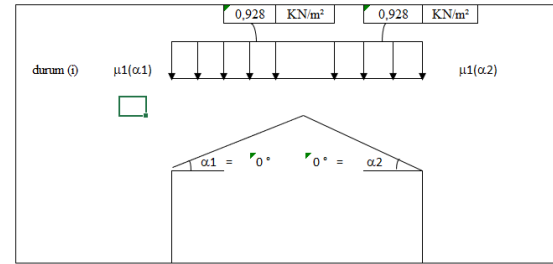
Üstgeçit zati yükü	Program tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır.
Kaplama birim hacim ağırlığı	2,400 ton/m <sup>3</sup>
G <sub>2</sub> -Korkuluk yükü	0,05 ton /m
G <sub>3</sub> -Çatı kaplama (Polikarbonat yükü)	0,005 ton in-
G <sub>4</sub> -Kaplama (3/4 baklavalı saç) yükü	0,027 ton in <sup>2</sup>
Q <sub>1</sub> -Üstgeçit hareketli yükü	0,500 ton/m <sup>2</sup>
S-Çatı kar yükü	Yeni kar yönetmeliğine göre hesaplanmıştır.
W-Rüzgar yükü	Yeni rüzgar yönetmeliğine göre hesaplanmıştır.

Konya ilinde bulunan kemer askılı yaya üst geçit tasarımı için rüzgar yüklerinin belirlenmesinde TS EN 1991-1-4 ve kar yükünde ise TS EN 1991-1-3 standartları kullanılmıştır (Çizelge 3). TS EN 1991-1-4 standardına göre kemer askılı yaya üst geçit olarak kullanılan yapıya etkiyen toplam rüzgâr kuvveti değerleri Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4. Rüzgar yükü  $w(z)$  {kN/m<sup>2</sup>}

Bölge	A	B	C	D	E
$w(z)=C_{pnet}.q_p(z)$	-1,02	-0,73	-0,51	0,44	-0,56

TS EN 1991-1-3 standardına göre kemer askılı yaya üst geçit olarak kullanılan yapıya ait üst geçide etkiyen toplam kar kuvveti değerleri Şekil 18'de verilmiştir.



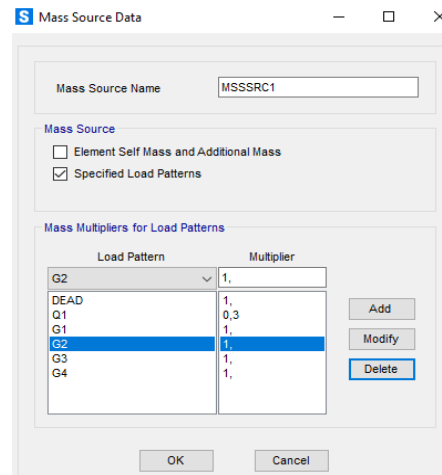
Şekil 18. Üst geçit kar yüklemesi

### Deprem yükleri

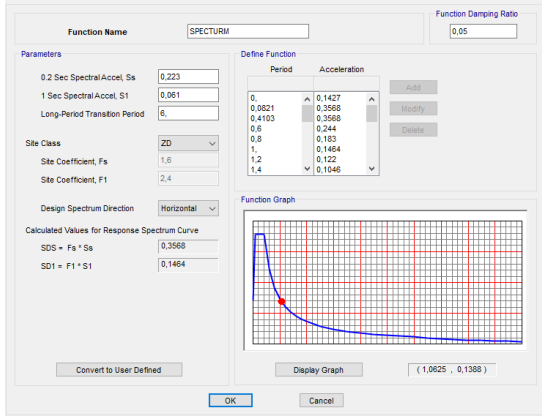
Deprem spektrumu parametreleri (Şekil 19.-22.) SAP2000 programında TBDY-2018'e göre belirlenmiştir. Yapının bulunduğu yerdeki zemin sınıfı için ZD, Bina önem katsayısı için 1, taşıyıcı sistem davranış katsayısı R= 4 seçilmiştir.

$$\text{Çarpan değeri} = A_0 * I * g / R = 1 \times 9,81 / 4 = 2,4525$$

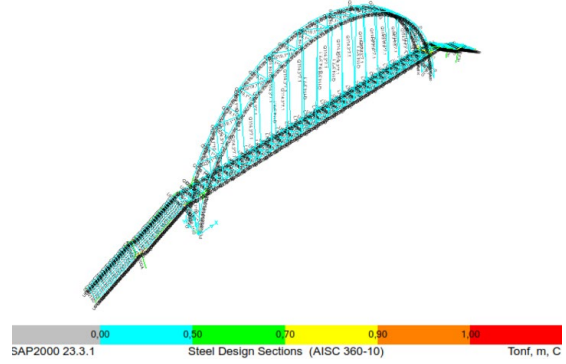
Burada A<sub>0</sub> değeri SAP2000 programı tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 19. Kütle kaynağı

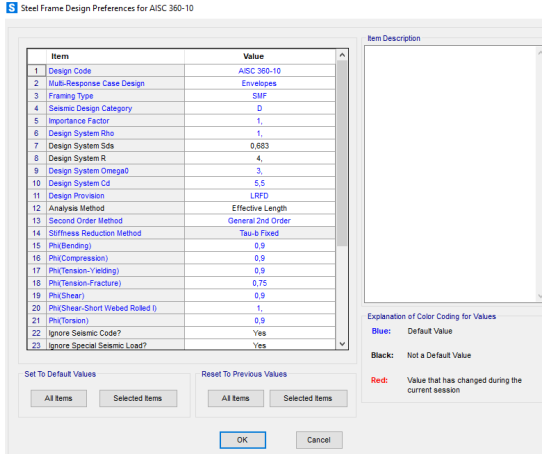


Şekil 20. Tepki spektrumu

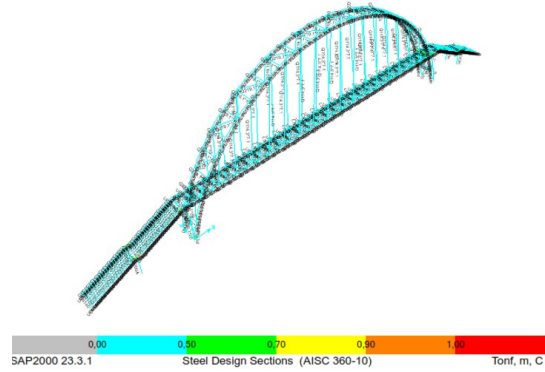


Şekil 23. YDKT'ye göre analiz sonuçları

Bu örnekte YDKT'ye göre açıklık ve mesnet bölgesindeki elemanlar maksimum yüklere maruz kalmış olup, bu elemanların taşıma kapasiteleri (0,70 -0,90) aralığındadır (Şekil 23).

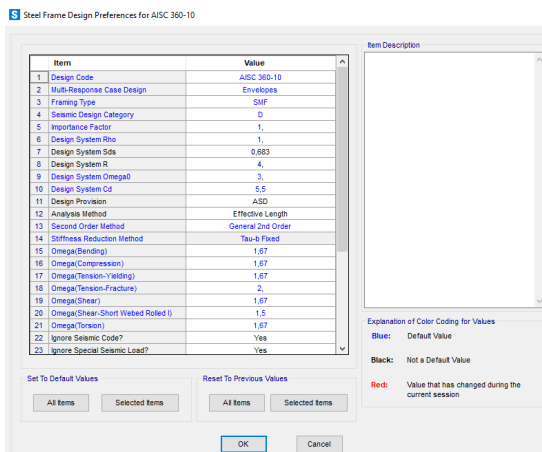


Şekil 21. YDKT için tasarım kodu parametreleri



Şekil 24. GKT'ye göre analiz sonuçları

Bu örnekte GKT'ye göre açıklık ve mesnet bölgesindeki elemanlar maksimum yüklere maruz kalmış olup, bu elemanların taşıma kapasiteleri (0,70-0,90) aralığındadır (Şekil 24.).



Şekil 22. GKT için tasarım kodu parametreleri

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada; biri kafes sistem, diğeri kemer askılı olmak üzere iki adet yaya üst geçidi projesinin 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine göre analiz ve tasarımları yapılmıştır. Ele alınan yapılar, Konya ili 37.500437° enlem ve 34.044326° boylamında inşa edildiği varsayılmış; yerel zemin sınıfı ise ZD olarak seçilmiştir.

Sonuçların karşılaştırılabilmesi açısından, zemin parametrelerinin tüm örneklerde aynı olduğu düşünülmüştür.

Kafes kiriş modelinin 40 metre boyunda 2,5 metre eninde olup, x yönünde kolonlar üstünde 2,5 metre aralıklarla ve açıklık dikmeler arasındaki mesafe 1,7 m'dir. y yönünde iki boylama kiriş arasındaki mesafe 2,5 metredir. 1,7 metre aralıklarla dikmeler diyagonaller enleme kirişler ve yatay çaprazlar ana boylama kirişlere mafsallı olarak bağlanmıştır. Kafes kiriş örneğinde deprem analizi için Mod Birleştirme Yöntemi seçilmiştir. Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında, çelik yapıların hesap ve boyutlandırılmasına dair yönetmelikte belirtilen Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) ve Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT) ilkeleri kullanılmıştır. Ve her iki tasarım ilkesine göre üst geçitte kullanılan profil boyutlarının yeterli olduğu görülmüştür.

Kemer askılı yaya üst geçit modelinin 55 metre boyunda 3 metre eninde olup, x yönünde platform 3 metre aralıklarla boru profillerle kemer kirişe bağlanmıştır. y yönünde iki boylama kiriş arasındaki mesafe 3 metredir. 1 metre aralıklarla çapraz ve enleme kirişler ve yatay çaprazlar ana boylama kirişlere mafsallı olarak bağlanmıştır. Kemer askılı yaya üst geçit örneğinde de sistemin dinamik analizi Mod Birleştirme Yöntemine göre yapılmıştır. Ve yapı elemanlarının boyutlandırılmasında ise, YDKT ve GKT ilkeleri kullanılmıştır. Ve her iki tasarım ilkesine göre üst geçitte seçilen profillerin yeterli olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada yapılan karşılaştırmalı analiz ve tasarımlardan görülmektedir ki, GKT ve YDKT ilkelerinden herhangi birinin seçilmesi yeterli olmaktadır.

## 5. TEŞEKKÜR

Askılı kemer üst geçit uygulama paftalarını Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü'nden temin eden İnş. Yük. Müh. Murat BOZKURT'a ve Karayolları Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

## 6. KAYNAKLAR

1. Aktaş, A.Y., 2019. Çelik Yapılarda Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) ve Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT) Yaklaşımlarının Değerlendirilip Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Maltepe Üniversitesi, Yapı Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 105.
2. Asfuroğlu, S., 2018. Çok Katlı Çelik Binaların İtme Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 142.
3. Aydınöğlu, M.N., Özer, E., Celep, Z., Özyayın, K., 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. 143.
4. Celep, Z., Kumbasar, N., 2004. Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı. İstanbul Teknik Üniversitesi Profesörleri, İstanbul, xvi+700.
5. Çakmalı, C., 2019. Çelik Yüksek Bir Bina'nın TBDY-2018'e Göre Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 121.
6. Danish, A., 2021. Çok Katlı Yapılarda Merkezi Çelik Çapraz Sisteminin 2018 Deprem Yönetmeliğine Göre İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 122.
7. Kulak, M., 2019. Çelik Yapıların Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analizi ve Spektrum Eşleştirme Parametrelerinin Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı, Eskişehir, 140.
8. Nowbahari, F.A., 2021. Burulma Düzensizliği Bulunan Çok Katlı Çelik Yapıların 2018 Deprem Yönetmeliğine Göre Analiz ve Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı, Sakarya, 99.
9. Öz, D., 2018. Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Kuralları Doğrultusunda Çelik Yapıların Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen

- Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 171.
10. SAP2000 V22, 2021. Structural Analysis Program, Computers and Structures Inc., Berkeley, California.
  11. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017. Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik Hakkında Uygulama Kılavuzu, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü, Ankara, 448.
  12. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) Eğitim El Kitabı, Ankara, Z-I-3/24.
  13. TS 498, 1997. Yapı Elemanlarının Boyutlandırmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
  14. TS EN 1991-1-3, 2007. Yapılar Üzerindeki Etkiler- Bölüm 1-3: Genel Etkiler-Kar Yükleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
  15. TS EN 1991-1-4, 2007. Yapılar Üzerindeki Etkiler- Bölüm 1-4: Genel Etkiler Rüzgar Etkileri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
  16. Tütüncü, B., 2019. Çok Katlı Bir Çelik Yapının Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018'e Göre Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 179.
  17. Uz, A., 2020. Çok Katlı Bir Çelik Yapının TBDY-2019 ve Çelik Yapılar Yönetmeliği-2016 Kullanılarak Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı, Eskişehir, 61.
  18. Ünal, A., 2021. Farklı Yöntemlerle Üretilmiş Çelik Yaya Üst Geçitlerinin ÇYTHYE-2018'e Göre Uygunluğunun Araştırılması; Ankara İli Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 169.
  19. Üstün, Ç., 2019. Çelik Çerçeve Taşıyıcı Sistemli Mevcut Bir Binanın Güncellenen Yönetmelikler Altında Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 83.
  20. Yılmaz, M., 2018. Türkiye'deki Çelik Demiryolu Köprülerinin Deprem Etkisi Altında Olasılıksal Yöntemler Yardımı ile İncelenmesi. Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 190.
  21. Yıldızhan Sağer, B., 2021. Moment Aktaran ve Merkezi Çaprazlı Çok Katlı Çelik Yapıların 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 190.
  22. Yorgun, C., Topkaya, C., Vatansver, C., 2017. Çelik Yapıların Tasarım, Hesap Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik Hakkında Eğitim Ders Notları, T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü, Ankara, 472.



## Akışkan Hatlarında Maliyet Düşürme ve Verimlilik Arttırma Amacıyla Tasarlanan Demontaj Sistemlerinin Prototip Üretimi ve Fizibilite Analizi

Erhan ÖZKAN<sup>\*1</sup>, ORCID 0000-0002-3849-6713

<sup>1</sup>Dikkan Vana Ar-Ge Merkezi, İzmir

Geliş tarihi: 27.01.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

*Atıf şekli/ How to cite: ÖZKAN, E., (2023). Akışkan Hatlarında Maliyet Düşürme ve Verimlilik Arttırma Amacıyla Tasarlanan Demontaj Sistemlerinin Prototip Üretimi ve Fizibilite Anali. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 157-168.*

### Öz

Günümüzde enerji ve su nakil hatlarından sorumlu olan kurum ve kuruluşların üzerinde durduğu en önemli konu enerji ve doğal kaynak kayıplarının minimuma indirilmesidir. Bu durumun bilgisini kayıt altına alan ve ikaz veren yazılımlarla ilgili Ar-Ge çalışmaları oldukça ilerlemiş olmasına rağmen, saha uygulamalarındaki donanımlar konusundaki çalışmalar gerek maliyet gerekse bu teknoloji ile ilgili faaliyetlere verilen düşük önem sebebiyle sınırlı sayıda kalmıştır. Bu çalışma sahadaki gelişmiş yazılımlara destek verecek donanımlara ait özgün tasarımın geliştirilmesi, uygulamaya alınması ve sürdürülebilirliğin sağlanması konularına destek vermek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada simülasyon destekli tasarımlar neticesinde döküm malzeme seçimi ve parametreleri optimize edilmiş olup flanşlı bir iç boru ve flanşlı bir dış boru arasındaki sızdırmazlık elemanları ile geleneksel yaklaşıma alternatif yenilikçi bir çözüm bulunmuştur. Simülasyon destekli tasarımlar ile uygulamaların birebir örtüştüğü bu makale kapsamında özgün tasarım ürünle demontaj süresinin %40 azaltılarak enerji ve işçilik tasarrufu sağlanmış, %27 oranında boy kısalması sağlanarak lojistik ve depolama avantajı elde edilmiş ve %40 mertebesinde hafifleme sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Demontaj, Montaj tasarım, Maliyet düşürme, Kalite yükseltme, Simülasyon

### Prototype Production and Feasibility Analysis of Disassembly Systems Designed to Reduce Costs and Increase Efficiency in Fluid Lines

#### Abstract

Today, the most important issue that institutions and organizations responsible for energy and water transmission lines focus on is minimizing energy and natural resource losses. Although R&D studies on software that records the information of this situation and gives warnings have progressed considerably, studies on hardware in field applications have been limited due to both cost and low importance given to activities related to this technology. This study was carried out in order to support the development,

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Erhan ÖZKAN, [erhanozkan81@icoud.com](mailto:erhanozkan81@icoud.com)

implementation and sustainability of the original design of the hardware that will support the advanced software in the field. In the study, casting material selection and parameters were optimized as a result of simulation supported designs, and an innovative solution was found as an alternative to the traditional approach with sealing elements between the flanged inner pipe and flanged outer pipe. Within the scope of this article, in which simulation supported designs and applications overlap, energy and labor savings were achieved by reducing the disassembly time by 40% with the original design product, logistics and storage advantage was achieved by shortening the length by 27%, and a lightening of the order of 40% was achieved.

**Keywords:** Disassembly, Assembly design, Cost reducing, Quality enhancement, Simulation

## 1. GİRİŞ

Günümüzde rekabetçilik ve teknolojik yenilikler sayesinde daha gelişmiş ve daha yeni ürünler tüketiciler tarafından mevcut ürünlere göre daha uygun fiyatlara satın alınabilir hale gelmiştir [1]. Nüfus artışıyla doğru orantılı olarak artan tüketim, doğal kaynakların bu kadar kısıtlı olduğu dünyamızda büyük bir çevresel tehlike olan atık problemine sebebiyet vermektedir [2]. Kitlesel bireyselleştirmenin yol açtığı ürün yaşam döngülerindeki kısalma atık probleminin en büyük nedenlerinden biridir [3]. Çevresel atıkların minimuma indirilmesi ve israf kalemlerinin azaltılması son yıllarda önem kazanan sürdürülebilirlik kavramı açısından da ele alınmaktadır. Sürdürülebilirlik; ekonomik, çevresel ve sosyal bileşenlerden oluşmaktadır [4]. Kullanım süresinin sonuna gelen ürünlerin çevresel etkisinin en aza indirilmesi imalatta sürdürülebilirlik için oldukça önemlidir [5]. Akışkan sistemlerde ömrünü tamamlayan ürünlerin yenilenmesi konusunda destek ekipmanı olarak yer alan demontaj parçaları bu konuda gerek zaman gerek enerji gerekse de doğal kaynak tasarrufu açısından büyük bir öneme sahiptir.

Kullanım süresinin sonuna gelen ürünler; çevreyi korumak adına çıkarılan katı yasalar ve kamu bilincindeki artış nedeniyle üreticiden tüketiciye tüm toplum için büyük önem arz etmektedir. Ürün yelpazelerindeki artış alt ürün gruplarının ve bu ürünlerin geri dönüşümünün sağladığı ekonomik katkı nedeniyle daha çekici hale gelmiş ve üreticiye ait sorumlulukların artmasını sağlamıştır. Bu nedenle üreticiler, tüketim sonrası ürünlerin geri dönüştürülmesi ve yeniden üretilmesi konusunda daha fazla ilgilenmeye başlamışlardır

[6]. 90'lı yıllardan bu yana çevre dostu üretim ve ürün geri dönüşümünde gelişim sağlanmaya devam edilmektedir [7]. Geri dönüşümün yararları marka prestijini artırma, müşteri talep ve beklentilerini sağlayabilme, yedek parça taleplerini karşılama ve ürünlerin hammadde maliyetlerinde azalma şeklinde sıralanabilir. Yeniden kullanım, yeniden imalat, geri dönüşüm, depolama ve uygun şekilde imha etme ürün geri kazanımında kullanılan yöntemlerdir. Bu seçeneklerin herhangi birini kullanmadan önce kullanım ömrünün sonuna gelen ürünün demontajı yapılmalıdır [8]. Bir ürünün bu ürünü oluşturan bileşen, alt montaj ve parçalarına ayrılması "demontaj" olarak tanımlanmaktadır.

Demontaj hatlarındaki ekonomik etkinlik ürün geri kazanımındaki başarıyı kısmen artırmaktadır. [9]. Demontaj sistemlerinin otomatikleştirilmesi iş yükünün ve maliyetinin azaltılması bakımından önemlidir. [10]. Geri dönüşüm sürecindeki ilk ve en önemli aşama olan demontaj aynı zamanda geri kazanım sürecine ait en fazla zaman harcanan işlemdir. Demontaj aşamasına ait işlemler bir demontaj hücresinde, demontaj hattında veya tek bir iş istasyonunda gerçekleştirilebilmektedir. Bunun yanı sıra demontaj hücreleri ve tek iş istasyonu daha kullanışlı olduğu halde maksimum verimliliğe demontaj hatlarında yapılan çalışmalar ile ulaşılabilmektedir. Otomatik demontaj için de tek istasyonu ve demontaj hücrelerine kıyasla demontaj hatları daha uygun bulunmaktadır [11].

Enerji ihtiyacındaki artış ve bu durumun sebep olduğu problemler ekolojik dengenin bozulmasına, enerji maliyetlerinin artmasına, gelir dağılımının zarara uğramasına ve enerji sağladığımız fosil kaynakların tükenmesine yol açmaktadır [12].

Enerjiyle ilişkili her türlü olumlu ve olumsuz gelişme sürdürülebilir kalkınmanın temelini oluşturan çevre ve insan faktörünü direkt olarak etkilemektedir. Sürdürülebilir kalkınma için enerji verimliliği olmazsa olmazdır ve bu yüzden üretim ve tüketim verimliliğini artırmak başta ekonomik olmak üzere çevresel ve sosyal alanda da fayda sağlayacaktır [13].

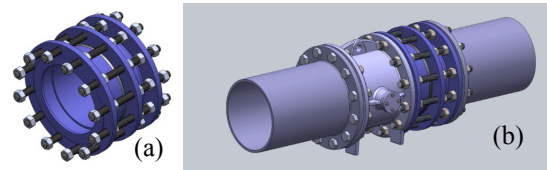
Günümüzde artan enerji ihtiyacına bağlı olarak, enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve tüketilmesi aşamalarında çevreyi olumsuz yönde etkilemekte, aynı zamanda enerji ihtiyacını karşılamada dışa bağımlılık nedeniyle enerjide verimlilik ve enerji tasarrufu konularını daha önemli ve zorunlu hale getirmektedir. Tüketim artışına bağlı olarak aile ve ülke bütçesinde önemli bir yer tutmakta olan enerji faturalarının, rekabet ortamında ülkelerin birbirine üstünlük sağlamak için kullandığı bir araç haline gelmesi nedeniyle de enerji verimliliği ve tasarrufu ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır [14].

Bu çalışmada; içme suyu, dağıtım hatları, endüstriyel uygulamalar, su arıtma tesisleri, pompa istasyonları, deniz suyu uygulamaları ve sanayi atık sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılan demontaj sistemlerinin EN GJS 400-18 LT standardına uygun hammadde verileri kullanılarak EN 1092-2 ISO 7005-2 gerekliliklerini yerine getirmek amaçlı proses ve operasyon tasarım simülasyonu ile ürün imali sağlanmıştır. Çalışma ile ilgili standartlar değerlendirildiğinde boru hatlarında meydana gelebilecek olan yüksek gerilmelere karşı dayanıklı olan GGG 40.3 malzeme kullanılarak simülasyon destekli analiz çalışmaları ve prototip imalat çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada prototip imalatı gerçekleştirilen ürün ile malzeme, işçilik, enerji ve verimlilik tasarrufunun sağlanması bu çalışmanın ana hedefi olarak karşımıza çıkmaktadır.

## 2. YÖNTEM

Demontaj parçası rijit olarak monte edilmiş akışkan hatlarında, bakım ve benzeri sebeplerle vana, çek valf ve benzeri komponentlerin hattan çıkarılabilmesi için gerekli demontaj boşluğunu oluşturmak amacıyla tasarlanmış; birbiri içine

geçen bir uzun flanşlı boru, bu borunun üzerinde çalışan üçgen kesitli kauçuk sızdırmazlık ringi, bu ringi destekleyen bir ara flanş, bir kısa flanşlı boru, somun ve saplamalardan oluşur. Şekil 1'de geleneksel bir demontaj parçasının resmi ve sistemdeki yerleşimi gösterilmiştir.



Şekil 1. (a) Geleneksel demontaj parçası, (b) Demontaj parçasının sistemdeki yerleşimi

Sistemdeki gerilmeler ele alınıp sanal-simüle ortamda ürün ve proses tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ürün prosesinde, prototip üretim için ergime sıcaklığı düşük, optimum döküm parametrelerinde, işlenebilirliği iyi, aşınma direnci, mukavemeti ve sünekliliği yüksek olan hammadde seçiminin yapılmış olması süreci hızlandırmıştır. Yapılan ön proses tasarım çalışmalarında araştırma konusu demontaj parçası üretimi için GGG 40.3 malzeme kullanımının gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Sayısal simülasyon uygulamaları, fiziksel ürün üretimi öncesi malzeme şekil değişimlerini, malzemeye etki eden yük ve gerilme dağılımları ile iki operasyon arası boyutsal değişimleri ve bunlar gibi mekanik-metalurjik özelliklere ilişkin farklı parametrelere bağlı olarak değişimlerini ortaya koyabilmektedir. Çalışmada malzeme verileri oluşturulurken EN 1092-2 ISO 7005-2 kapsam gerekliliklerini sağlayan, şartname ile kimyasal kompozisyonu tanımlanmış olan ve detayları Tablo 1'de verilen EN GJS 400-18 LT kalite hammadde kullanılmıştır.

Çizelge 1. Hammaddenin kimyasal kompozisyonu (%ağ.)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cu
%	3,75-3,85	1,40-1,50	Max 0,10	Max 0,04	0,009-0,015	Max 0,10

Otomotiv ve makine endüstrileri başta sayılmak üzere GJS 400-18 LT kalite malzemeler endüstride büyük bir kullanım alanına sahip olan demir içerikli malzemelerdir. Demontaj parçalarında boru hatlarındaki yüksek gerilmelere karşı koyabilmesi mekanik avantajı sağlamaktadır. Tasarım simülasyonları hazırlanırken ürüne ait maksimum gerilme analiz değerleri ele alınarak tasarım doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Çizelge 2’de GJS 400-18 LT kalite malzemenin mekanik değerleri yer almaktadır.

**Çizelge 2.** Hammaddenin mekanik analizi

Malzeme	Çekme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Akma sınırı (N/mm <sup>2</sup> )	Uzama %	Sertlik HB
EN-GJS 400-18 LT GGG 40.3	400	250	18	155

EN-GJS 400-18 LT (GGG 40.3) malzemesi için uygun mekanik özelliklerin gerçekleşmesinin temel sebebi ferritik yapıda bir mikroyapıya sahip olmasıdır. Yapı içerisinde %100’e yakın bir ferritik yapı oluşturabilmek bu uygulamanın temel amacıdır. Ferritik yapı oluşturulabilmesi için ostenit içinde çözülen tüm karbonun küresel grafitte dönüşebilmek için zamana sahip olması gerekmektedir. Bu dönüşüm sonucunda oluşacak olan malzemeye ait mikro yapı ferritik bir matris olup ve bu matris içerisinde bulunan küresel grafit rastgele dağılmış durumdadır. Bu veriler ele alınarak gerçekleştirilen simülasyon analizlerinde akma sınırı 250 N/mm<sup>2</sup>, çekme sınırı 400 N/mm<sup>2</sup> değerleri ele alınmış, oda sıcaklığında 9 Joule darbe dayanımına göre prototip tasarımına ait bilgisayar destekli çizim ve mühendislik çalışmaları aşamasına geçilmiştir.

### **2.1. Prototip Tasarımı-Bilgisayar Destekli Çizim ve Mühendislik**

Belirli konulara ilişkin geliştirilmekte olan bilgisayar destekli mühendislik çözümlerinde, döküm ve ısıl işlem uygulamalarının beraberinde kaynaklı üretim yapılarak üretilen yeni kesitlere ait mekanik ve fiziksel özelliklerin tahmin edilmesinde kullanılan yazılımlar bulunmaktadır.

Döküm prosesi neticesinde imal edilmesi planlanmış olan son ürüne ait geometrinin, kalıp tasarımına göre doğruluğunun prototip üretim ile sağlanması yerine simülasyon ortamında yapılarak ihtiyaç halinde revizyon yapılması kalıp maliyetleri ve iş yükü bakımından büyük avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında ürüne ait gerilme ve akış analizlerinin yapılması da uygulamalarda zaman ve malzeme tasarrufu sağlamaktadır.

Kalıptan ve üretim prosesi tasarımından kaynaklı olası muhtemel hatalara engel olunması, daha verimli ve daha ekonomik proses tasarımı, özgün ürün tasarımı ve yeni ürün geliştirme çalışmaları için CAD (Bilgisayar destekli tasarım) yazılımlarına ek olarak CAE (bilgisayar destekli mühendislik)’lere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada Anycast, Solidworks, Ansys simülasyon ve tasarım programları kullanılarak döküm ve montaj ile üretim proseslerinin tasarım ve doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Gövde malzemelerinin döküm simülasyonu ile 1470 °C’de kum kalıba dökümü ile verileri sistemde tanımlanarak döküm parametreleri tespit edilmiştir.

Yine döküm sonucunda elde edilecek ürünlerin minimum akma değeri 250 N/mm<sup>2</sup> ve çekme değeri de 400 N/mm<sup>2</sup> olarak tespit edilmekle birlikte gövde dayanımı maksimum uygulama basıncının bir buçuk katı olan 15 Bar’a göre gerekli tasarımlar gerçekleştirilmiştir.

### **2.2. Döküm Yöntemi ile Gövde Üretimi ve Montaj İşlemleri**

Küresel grafitli dökme demirin kullanımı yüksek yüzde uzama özelliği nedeniyle çelik malzemeye göre daha tercih edilir hale gelmiştir. Küresel grafitli dökme demir ailesinde çelik ve alaşımlarına yakın yüzde uzama değerine sahip olan GGG 40.3 malzemesi gerek çeliğe kıyasla düşük maliyeti ve üretim kolaylığı sebebiyle daha cazip yaygın olarak çelik yerine tercih edilmektedir. Bu çalışmada, ergime prosesi hammaddeleri dkp kalite çelik, kendi malzeme

yollukları ve sfero pikidir. %30 dkp çelik, %30 sfero piki ve %40 yolluk oranında ergime şarjları belirlenmiştir. Buradaki en önemli husus hammadde olarak kullanılacak yollukların daha önce gerçekleştirilen dökümlerden arta kalan yolluk malzemeleri ile aynı kalitede olmasıdır. Olası bir perlit fazının mikro yapıda oluşması riskini engellemek adına farklı sfero malzemelere ait yolluklar kullanılmamıştır.

### 2.3. Mekanik ve Metalurjik Karakterizasyon

Tasarımı, model üretimler ile doğrulanan prototip ürünlerin, gerçek üretiminin başlangıcını hammadde kimyasal kompozisyonu ve mikroyapı analizi oluşturmaktadır. Kimyasal kompozisyon için spektral analiz yöntemi uygulaması ve yüzde element oranları belirlenmesinin ardından standart sınırları içinde olup olmadığı kontrol edilmiştir. Mikroyapı değişimleri, akış çizgileri, faz dağılımı gibi özellikler metalografik inceleme ile belirlenmektedir. Prototip ürünlerin geometrileri ve sertlikleri kontrol edilerek boyutsal ölçümlerde yapılarak ürün ticarileşmesi konusundaki tüm testler gerçekleştirilmiştir.

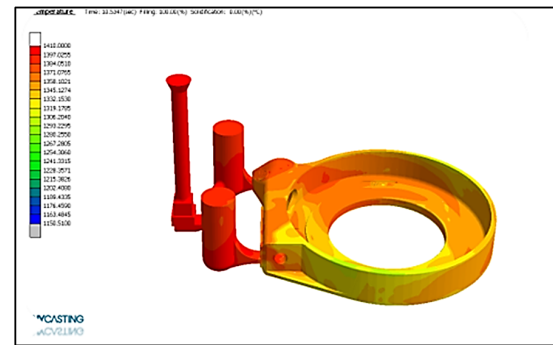
Parçalara uygulanan kimyasal dağlama işleminde mikroyapı analizi için %25 HNO<sub>3</sub> ve %75 HCl kullanılarak hazırlanmış olan dağlama reaktifi kullanılmıştır. Prototip parçaya ait numuneler bakalite alındıktan sonra metalografik yüzey hazırlama işlemlerini takiben gövde ile bağlantı bölgeleri üzerinde Vickers Sertlik (HV10) ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Akma ve çekme mukavemet bilgilerinin elde edilebilmesi için çekme testi gerçekleştirilmektedir. Bu sebeple prototip ürünün üretimi gerçekleştirildikten sonra mekanik özelliklerin doğrulanabilmesi için çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyi sırasında dikkat edilmesi gereken bazı değişkenler bulunmaktadır. Bunlardan biri dişli parçaların farklı anma çaplarına bağlı olarak kullanılmakta olan kesit alanı (So) değeri bir diğeri ise çekme hızıdır. DIN 3506-1 ve EN ISO 898-1 standartlarına bağlı olarak demontaj parçasının ilgili parametreleri tespit edilmiştir.

## 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

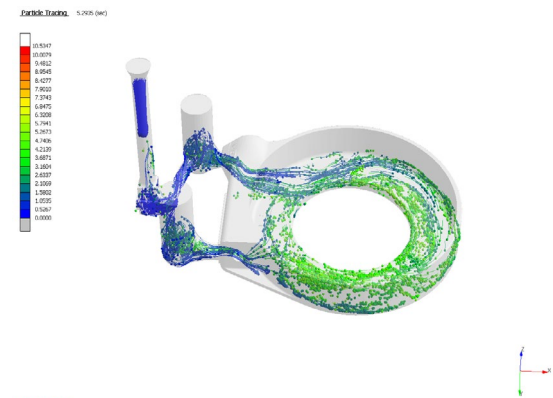
### 3.1. Döküm Simülasyonu

Döküm simülasyonu ile gövde malzemelerin 1400 C'nin üzerinde brüt 420 kg ve 80 saniyede dökümünün gerçekleşeceği tespit edilmiştir. Şekil 2'de döküm simülasyonuna ait görsel yer almaktadır.



Şekil 2. Döküm simülasyonu sıcaklık dağılımı

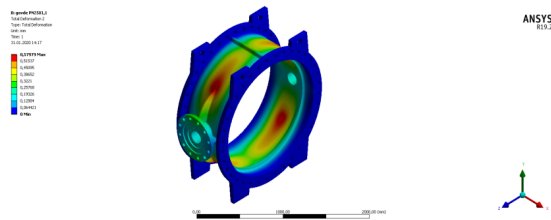
Döküm esnasında önemli parametrelerden bir tanesi türbülans oluşumunun engellenmesidir. Döküm esnasında oluşan türbülanslar malzeme iç yapısında hatalara sebep olmakta ve demontaj parçalarının darbe dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Şekil 3'te simülasyon programının tanecik dağılımı modülü ile türbülans analizi gerçekleştirilmiş ve belirlenen döküm şartlarında herhangi bir türbülansa rastlanılmamıştır.



Şekil 3. Demontaj parçası döküm simülasyonu parçacık modül türbülans analizi

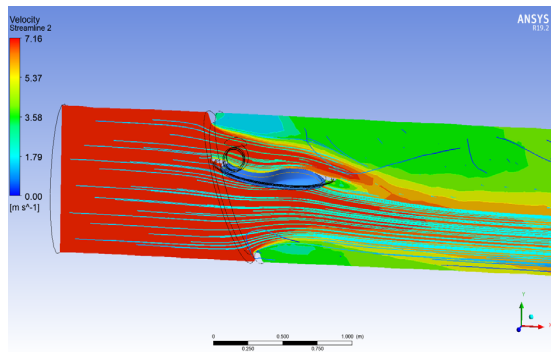
### 3.2. Mekanik Simülasyon

Demontaj parçasının prototip ve seri üretimi öncesinde döküm simülasyonundan sonra uygulama alanına göre tasarımın sağlanması gerekmektedir. Sinoptik içinde öncelikle parça çizimi ve analizi (mekanik, metalurjik, ölçüsel) olarak iki ölçüt söz konusudur. Şekil 4'te İlk ölçüte ait olan tasarım aşaması gösterilmektedir. Bu değerleri sağlayan kelebek vanaların öncesinde kullanılacak demontaj parçalarının mekanik özellikleri 15 Bar basınca uygun olarak tasarlanmıştır.



Şekil 4. Demontaj Parçası ile çalışacak sistemin hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri

Demontaj parçasının çalışacağı sistemdeki klapelerin hesaplamalı akışkanlar yöntemi ile akış hızları simülasyonu Şekil 5'te yer almaktadır. Buna göre sistem 7,16 m/s maksimum akış hızlarında dahil herhangi bir deformasyona ve akış çizgilerinin bozulmasına maruz kalmayacak şekilde tasarım doğrulanmıştır.



Şekil 5. Demontaj sisteminin maruz kalacağı akışkan hesaplamalı akışkanlar mekaniği simülasyonu

### 3.3. Demontaj Parçalarının Operasyon Simülasyonu ve Mevcut Sistemler ile Mukayesesi

Mevcut teknikte boru hatlarında kullanılan demontaj parçaları, birbiri içerisinde teleskopik olarak hareket edecek şekilde çalışan flanşlı bir iç boru ile flanşlı bir dış boru parçasından oluşmaktadır. İki boru arasındaki sızdırmazlığın sağlanması amacıyla üçgen kesite sahip kauçuk sızdırmazlık elemanı ve bir ara flanş, saplamalar ve somunlar ilave malzemeler olarak tanımlanmaktadır.

Flanşlı iç boru ve flanşlı dış boru parçalarının flanşlarının ve ara flanşın flanş deliklerinden geçen saplamalar ve bu saplamaların üzerinde çalışan somunlar vasıtasıyla bir araya getirilen demontaj parçası, bağlı olduğu boru hattı üzerindeki bir komponenti hattan çıkarabilmek için gerekli olan demontaj boşluğunu oluşturmak amacıyla kullanılır. Boru hattından vana ya da benzeri bir komponenti çıkartmak için öncelikle ara flanşı iten somunlar gevşetilerek ara flanşın üçgen kesitli kauçuk sızdırmazlık elemanına yaptığı baskının ortadan kaldırılması gerekmektedir. Sonra saplamalardaki diğer somunlar gevşetilerek flanşlı iç ve dış boruların birbiri içinde hareket etmesi sağlanarak demontaj parçasının boyu kısaltılır. Bu boy kısalması boru hattı üzerinde hattan çıkarılacak parçanın demontajına izin verecek bir demontaj boşluğu oluşmasını sağlar. Komponentin hatta tekrar monte edilmesi için komponentin mevcut demontaj boşluğunu kullanarak hatta yerleştirilmesinden sonra, somunlar saplamalar üzerinde hareket ettirilerek flanşlı iç boru ve flanşlı dış boru arasındaki hareket sağlanır ve demontaj parçasının boyu uzatılarak demontaj işlemi için oluşturulmuş olan demontaj boşluğu ortadan kaldırılır. Komponentin montajını sağlayan somunlar sıkıldıktan sonra ara flanşa baskı yapan somunlar sıkılarak üçgen kesitli kauçuk sızdırmazlık elemanının yuvasına girmesi ve sızdırmazlık sağlanması için gerekli baskının oluşması sağlanır.

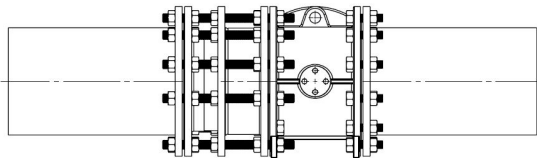
Tekniğin bilinen durumundaki uygulamada en büyük handikap komponenti hattan çıkarmak için saplamaların hattan çıkartılacak komponentin



flanşının deliklerinden çıkmasını sağlamak için kısıtlı mesafeden dolayı somunları döndürmek ve saplamaları geriye çekmek ve tekrar somunları döndürmek gerekliliğidir ki bu işlem demontaj parçasının büyüklüğüne göre artan saplama ve somun sayısı sebebiyle defalarca tekrarlanabilir. Montaj için de tekrar tüm saplamaların karşı flanştan geçmeleri için somunları kısıtlı mesafede döndürüp saplamaların ileri itilmesi işlemi tekrarlanır. Bu oldukça zaman alan ve uygulamayı zorlaştıran bir yöntemdir. İşletme şartlarında boru hattının içinde bulunan basınçlı akışkanın dışarı sızması için üçgen kesitli kauçuk sızdırmazlık elemanının sürekli baskı altında olması gereklidir. Somunlar bir şekilde gevşeyip baskı azaldığında sızdırma görülür. Ayrıca üçgen kesitli kauçuk sızdırmazlık elemanı sürekli olarak baskı altında çalıştığı için plastik şekil değişikliği ve sürtünme kuvvetlerinden doğan yüzey deformasyonları oluşabilmekte bu da sızdırma problemlerine sebep olabilmektedir.

Ayrıca güneş ışığına açık ortamlarda kullanılan demontaj parçasında üçgen kesitli kauçuk sızdırmazlık parçasının kısmi olarak güneş ışığına maruz kalması kimyasal bozulma ve yüzeysel çatlaklara sebep olur. Bu durum demontaj parçasının sızıntı yaratması riskini doğurur.

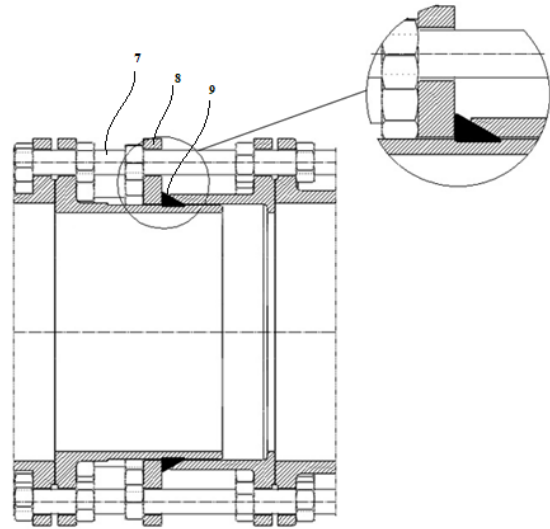
Yine mevcut teknikte demontaj parçası üzerinde ara flanş ve çok fazla somun olduğu için demontaj parçası kısa bir demontaj boşluğu oluşturabilmesine rağmen oldukça uzun ve ağır bir yapıya sahiptir. Şekil 6'da mevcut teknikteki demontaj parçasının boru hattı üzerindeki görünümüne ait çizim yer almaktadır.



**Şekil 6.** Mevcut teknikteki geleneksel demontaj parçasının akış hattındaki yerleşimi

Mevcut teknikteki sorunları çözmek adına öncelikle sızdırmazlık elemanları üzerinde bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Mevcut sistemdeki

sızdırmazlık elemanlarının kesit resimleri Şekil 7'de yer almaktadır. Buradaki temas yüzeyinin etkisi, sızdırmazlık elemanının ömrü ve demontaj kolaylığı ile zaman tasarrufu konusundaki zayıf noktalar ele alınarak yeni bir sızdırmazlık yapısına gidilmesinin kaçınılmaz olduğu tespit edilmiştir.

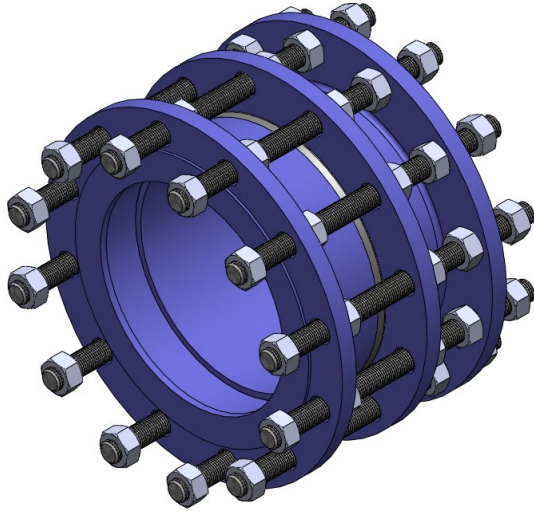


**Şekil 7.** Mevcut teknikteki geleneksel demontaj parçasının sızdırmazlık elemanları



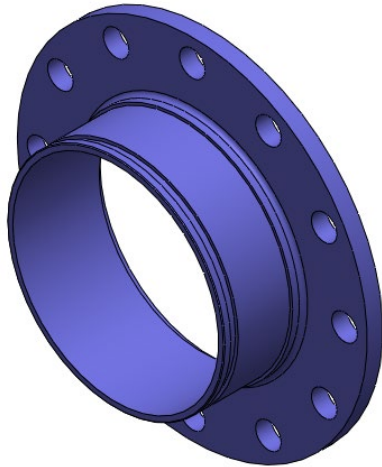
**Şekil 8.** Mevcut demontaj sistemlerinin hat içerisinde yerleşimi

Demontaj parçası birbiri içerisine geçen bir uzun flanşlı boru, bu borunun üzerinde çalışan üçgen kesitli kauçuk sızdırmazlık ringi, bu ringi destekleyen bir ara flanş, bir kısa flanşlı boru, somun ve saplamalardan oluşur. Şekil 9'da bu detaylar gösterilmiştir.



**Şekil 9.** Geleneksel demontaj parçası montaj simülasyonu

Geleneksel sistemdeki handikapların önüne geçmek, enerji ve su tasarrufunu sağlamak, montaj maliyetlerini ile işçilik giderlerini düşürmek amacıyla geleneksel demontaj parçalarındaki birleşme noktalarında yeni bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Bunun için önce flanş borusu tasarlanmıştır (Şekil 10).



**Şekil 10.** Demontaj flanşlı boru tasarım resmi

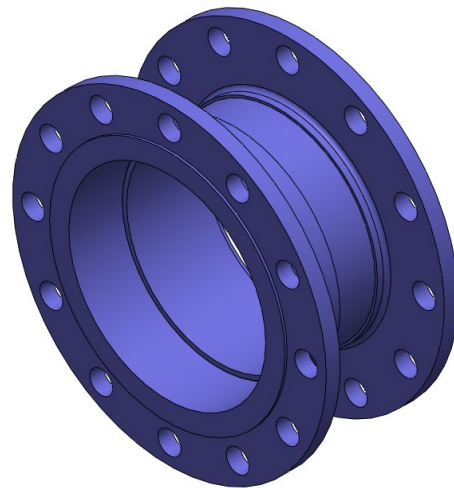
Bu borulardaki geçmelerin daha sıkı bir şekilde yapılmasını sağlamak amacıyla bağlantı elemanları yapısı değiştirilmiş ve X-Ring yapıdaki bağlantı

elemanı tasarlanmıştır. Şekil 11’de gösterilen X-ringlerin tasarıma monte edilmesi ile sızdırmazlık riski ortadan kaldırılmakla birlikte plastik hammaddeden üretilen sızdırmazlık ürünlerinin güneş ışığı ile teması engellenerek ürünlerin elastik özelliklerini yitirmeleri önlenmiştir.



**Şekil 11.** Yeni tasarım X-Ring bağlantı elemanı

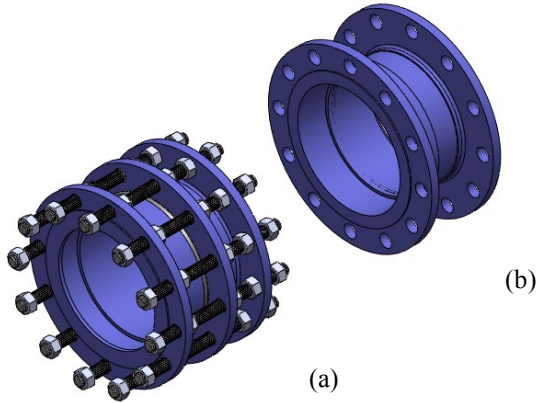
Ürünün mevcut tasarımlarından birkaç adım ileriye gitmesini sağlayan ve yapılan inovatif revizyonların sisteme aktarılması; birbiri içerisine geçebilen bir uzun flanşlı boru, bu borudaki bir o-ring kanalına yerleştirilmiş bir x-ring ve daha kısa bir adet flanşlı borudan oluşmasıdır. Şekil 12’de bu tasarıma ait detaylar yer almaktadır.



**Şekil 12.** Yeni tasarım demontaj simülasyonu



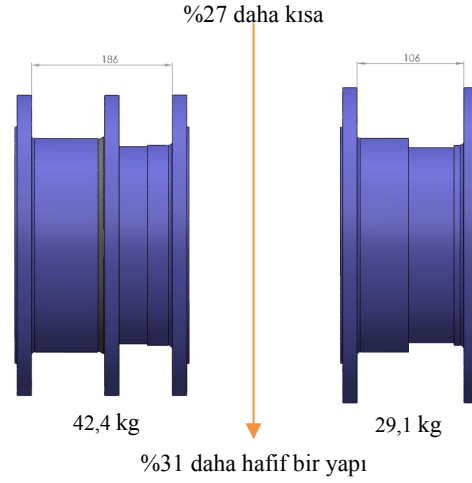
Buna göre Şekil 13'te de görüleceği gibi daha kısa, daha az bağlantı elemanına sahip, sızdırmazlık elemanlarının dış temasta bulunmadığı bir tasarım elde edilmiştir.



Şekil 13. (a) Geleneksel ve (b) Yeni tasarım demontaj ürünlerin karşılaştırmalı resmi

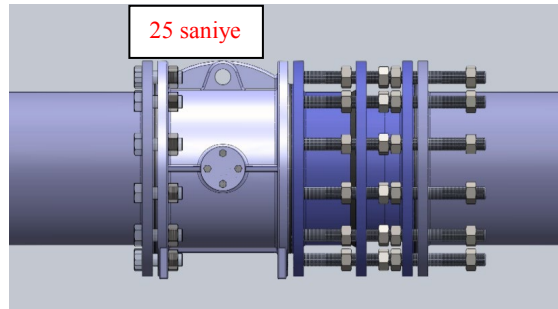
Ürünlerin dökümü kusursuz bir şekilde gerçekleşmesi durumunda 186 mm olan flanş mesafesi 106 mm'ye inmiş, 42,4 kg olan gövde ağırlığı 29,1 kg'a düşmüş olacaktır. Bu da %27 daha kısa ve %31 daha hafif bir yapı olarak avantaj

sağlayacaktır. Şekil 14'te bu değerlerin karşılaştırmalı olan görseli yer almaktadır.

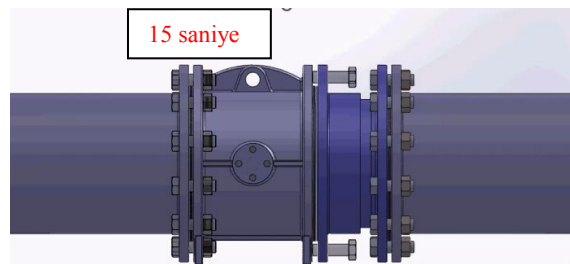


Şekil 14. Geleneksel (sol) ve yeni tasarım (sağ) demontaj ürünlerin karşılaştırmalı resmi

Mevcut ürünün montaj simülasyonu Şekil 12'de gösterilmiştir. Tasarımların montajının gerçekleştirilmesi 25 saniye olarak tespit edilmiştir.



Şekil 15. Mevcut demontaj parçasının montaj simülasyonu

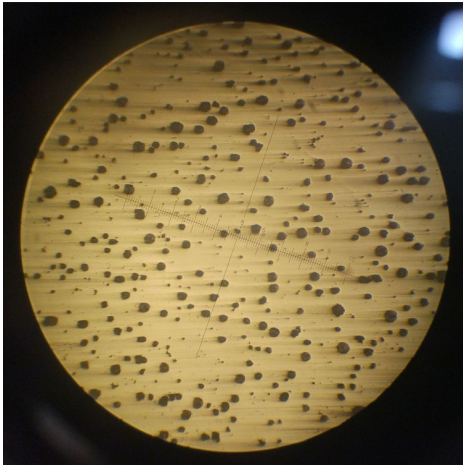


Şekil 16. Yeni tasarım demontaj parçasının montaj simülasyonu

Şekil 16’da yeni tasarım demontaj parçasının simülasyonu ile montajı yer almaktadır. Bu süre ideal koşullar altında 15 saniye olarak tespit edilmiştir.

### 3.4. Prototip Üretimi

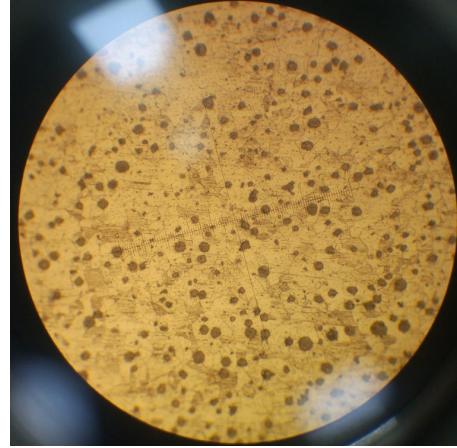
Döküm simülasyonu verilerine göre tespit edilen parametrelerde prototip imalatı gerçekleştirilmiştir. Prototip ürüne ait parlatılmış %90 üzeri küreselliğe sahip grafit taneciklerinin mikro yapısı Şekil 17’de yer almaktadır.



Şekil 17. Dökümü gerçekleştirilmiş prototip ürünün parlatılmış mikro yapı görüntüsü

Dağlanmış ve yapıda maksimum %5 mertebesinde perlit fazı içeren yapı görüntüsü Şekil 18’de gösterilmiştir. Ferritleme ısıl işlemi uygulanan parçanın mikroyapı görüntüsünde neredeyse hiç perlit fazı bulunmamaktadır bu sebeple ferrit tanelerinin sınırları belirgin şekilde görülmektedir.

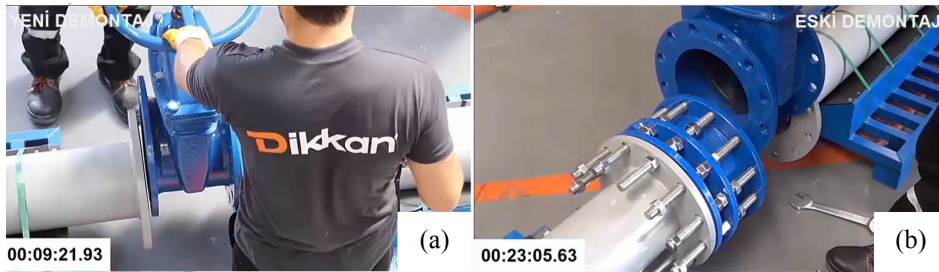
Ürüne ait gerçekleştirilen mekanik testler neticesinde 400 N/mm<sup>2</sup> çekme, %18 uzama ve -20 °C’de 12 joule darbe dayanımı elde edilmiştir.



Şekil 18. Dökümü gerçekleştirilmiş prototip ürünün dağlanmış mikro yapı görüntüsü

### 3.5. Simülasyon ve Prototip Üretim Verilerinin Mevcut Sistem ile Karşılaştırılması

Montaj sahasında yerleştirilen geleneksel demontaj ile yeni tasarım demontaj ürünlerinin operasyon süreleri aynı operatörler ve aynı ekipmanlar ile tamamen aynı şartlar altında test edilmiştir. Yeni tasarım demontaj 9 dakika 21 saniye 93 salisede tamamlanırken, geleneksel tasarımın montaj işlemi 23 dakika 5 saniye 63 salisede sonlandırılmıştır. Simülasyonda bu işlem %40 daha hızlı olarak tespit edilmişken gerçek uygulamada %60 daha hızlı montaj tespit edilmiştir.



Şekil 19. Yeni tasarım demontaj parçası (a) ile geleneksel demontaj parçasının (b) operasyon sürelerine ait karşılaştırma çalışması

Yeni tasarım demontaj ile mevcut demontaj tasarımının tespit edilen olumsuzlukları Çizelge 3’te özetlenmiştir.

**Çizelge 3.** Mevcut sistemin handikapları

1	Sızdırmazlık elemanının baskı ile monte edilmesi zorunluluğu ile deformasyona uğraması
2	Daha fazla baskı sağlamak amacıyla malzeme ağırlığının artırılması
3	Sızdırmazlık elemanlarının ömürlerinin düşük olması
4	Sızdırmazlık elemanlarının güneş ışığına maruz kalması sebebiyle elastik fonksiyonlarını yitirmesi ve sertleşmesi
5	Daha fazla civata ve somun kullanılması ve bunların montajı sebebiyle enerji ve işçilik maliyetlerinin yüksek olması
6	Büyük hacmi sebebiyle nakliye ve stoklama maliyetlerinin yüksekliği

#### 4. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışma ile montaj sürelerinin ve maliyetlerin azaltılmasını sağlayan demontaj parçası tasarımına ilişkin Ar-ge çalışmaları özetlenmiştir. Proje çıktısı ürün, vanalarda montaj-demontaj işlemlerinde kolaylık sağlamak için geliştirilen yeni tasarım demontaj parçasıdır. Geliştirilmiş olan yeni tasarım demontaj parçası, flanşlı iç boru ve flanşlı dış boru arasına konumlandırılan sızdırmazlık elemanı ile ilgilidir, sızdırmazlık kısmı doğal kaynakların israfının engellenmesi konusu için de önem arz etmektedir. Bu makalede gerçekleştirilen çalışmalar ile tasarlanan özgün demontaj parçalarının işlem sürelerinin mevcut ürünlere kıyasla %40 oranında azaldığı, %27 oranında boyunun kısaldığı ve %40 oranında hafiflediği tespit edilmiştir. Ar-Ge merkezimizde geliştirilen bir projemizin çıktısı olan ve başarıyla tamamlanması sağlanan bu ürün sonucunda patent başvurusu gerçekleştirilerek fikri sınai mülkiyet haklarının da koruma altına alınması sağlanmıştır.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Ding, L.P., Feng, Y-X., Tan, J.R., 2010. A New Multi-Objective Ant Colony Algorithm for Solving the Disassembly Line Balancing

- Problem: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 48(5-8), 761-771.
2. Özceylan, E., Paksoy, T., 2013. Reverse Supply Chain Optimization with Disassembly Line Balancing: International Journal of Production Research, 51(20), 5985-6001.
3. Agrawal, S., Tiwari, M.K., 2008. A Collaborative Ant Colony Algorithm to Stochastic Mixed Model U-Shaped Disassembly Line Balancing and Sequencing Problem: Int. J. Prod. Res., 46 (6), 1405- 1429.
4. Deniz, N., Özçelik, F., 2019. A Solution Approach Proposal for Disassembly Line Balancing Based on ELECTRE: Alphanumeric Journal,7(2), 399-416.
5. Bentaha, M.L., Battaia, O., Dolgui, A., 2014. A Sample Average Approximation Method for Disassembly Line Balancing Problem Under Uncertainty. Comput. Oper. Res. 51, 111-122.
6. McGovern, S.M., Gupta, S.M., 2007. A Balancing Method and Genetic Algorithm for Disassembly Line Balancing: European Journal of Operational Research, 179(3), 692-708.
7. Güngör, A., Gupta, S.M., 2001. A Solution Approach to the Disassembly Line Balancing Problem in the Presence of Task Failures: International Journal of Production Research, 39(7), 1427-1467.
8. McGovern, S.M. Gupta S.M., 2003. 2-Opt Heuristic for the Disassembly Line Balancing Problem: In Proceedings of the SPIE International Conference on Environmentally Conscious Manufacturing III, 71-84.
9. Bentaha, M.L., Battaia, O., Dolgui, A., 2014. A Sample Average Approximation Method for Disassembly Line Balancing Problem Under Uncertainty: Comput. Oper. Res. 51, 111-122.
10. Prakash P., Twari, M.K., 2006. Solving a Disassembly Line Balancing Problem with Task Failure Using a Psycho-Clonal Algorithm. ASME International Design Engineering Technical Conference/Computers and Information in Engineering Conference, Long Beach, CA.
11. Ilgin, M.A., 2010. Kanban-Controlled Disassembly Line with Sensor Embedded Products. Doctor of Philosophy, Northeastern University, Boston, Massachusetts.

12. Bolay, S., 2014. Faktenpapier Energieeffizienz, Stand/Trends/Forderung: Deutscher Industrie- und Handelskammertag-DIHK-, 5.
13. Büchner, F., 2014, Udo Niehage und Maria Reinisch, Zukunft gemeinsam gestalten Erfolgsfaktor Energieeffizienz der Schlüssel zu Wettbewerbsfähigkeit und Innovation (Herausgeber), Management Summary, (Berlin und München: Siemens AG), 3.
14. Kavak, K., 2005. Dünyada ve Türkiye’de Enerji Verimliliği ve Türk Sanayiinde Enerji Verimliliğinin İncelenmesi. Devlet Planlama Teşkilatı (DPT), İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, DPT Yayın No: 2689, (Uzmanlık Tezi, ISBN 975-19-3782-5-Basılı Nüsha-, 5.

## Energy Recovery Analysis of A Biomass Type of Installed Waste Water Treatment Plant

Akın İLHAN<sup>\*1</sup> ORCID 0000-0003-3590-5291

<sup>1</sup>Department of Energy Systems Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences,  
Ankara Yıldırım Beyazıt University, Keçiören, Ankara, Türkiye

Geliş tarihi: 09.01.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: İLHAN, A., (2023). Energy Recovery Analysis of A Biomass Type of Installed Waste Water Treatment Plant. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(1), 169-183.

### Abstract

Energy production can also be obtained from plant, animal or sometimes human material, referred to be the biomass technology. The biomass raw material can be obtained from purposely grown energy crops, waste from food crops, wood or forest residues, horticulture, animal farming, food processing, or human waste from sewage plants. In this study, energy recovery analysis of an installed waste water treatment plant was conducted. The physical and chemical analyses of energy recovery that can be obtained from waste water treatment plant were clarified. In this regards, parameters including daily wastewater inlet water flow rate, wastewater inlet water 24 hourly average temperature, wastewater inlet water 24 hourly pH average, wastewater inlet water 24 hourly conductivity average, gas generator daily gas consumption, diesel generator daily energy generation, daily energy consumption from the city line, gas generator energy generation, total energy consumption of the water treatment plant, and daily gas generation of the treatment plant were identified. The plant has the duty of providing water treatment, so it is certain that noteworthy energy consumption in the plant can occur is an expected situation. However, the point that how much of the energy can be regained by the biomass technology provided by the burning processes conducted on the human waste is important. Namely, it is reported in this study that 78.29% of the total energy consumed by the plant was regained by these processes occurred in the treatment facility. On the other hand, this amount of recovered energy was reported to correspond a total of 14.200 GWh in this installed plant of Turkey. Apart from the amount of the recovered energy, the discharge of the amount of the methane gas which is responsible of the biomass energy generation was also analyzed according to the considered physical and chemical parameters. For instance, the analyses have shown that the increase of the waste water temperature causes decrease on the amount of the methane gas generation. On the other hand, the conductivity and the degree of acidity increase resulted the increase of the amount of the methane gas production.

**Keywords:** Biomass, Energy recovery, Gas generator, Waste water treatment

---

\*Corresponding Author (Sorumlu yazar): Akın İLHAN, [ailhan@ybu.edu.tr](mailto:ailhan@ybu.edu.tr)

## **Biokütle Tipi Kurulu Atık Su Arıtma Tesisinin Enerji Geri Kazanım Analizi**

### **Öz**

Enerji üretimi, biyokütle teknolojisi olarak adlandırılan bitki, hayvan veya bazen insan materyalinden elde edilebilir. Biyokütle hammaddesi, bilinçli olarak yetiştirilen enerji bitkilerinden, gıda mahsullerinin atıklarından, ağaç veya orman artıklarından, bahçecilikten, hayvancılıktan, gıda işlemeden veya kanalizasyon tesislerinden kaynaklanan insan atıklarından elde edilebilir. Bu çalışmada, kurulu bir atık su arıtma tesisinin enerji geri kazanım analizi yapılmıştır. Yani, çalışmada, atık su arıtma tesisinden elde edilebilecek enerji geri kazanımının fiziksel ve kimyasal analizleri netleştirilmiştir. Bu kapsamda, günlük atık su giriş suyu debisi, atık su giriş suyu 24 saatlik ortalama sıcaklığı, atık su giriş suyu 24 saatlik pH ortalaması, atık su giriş suyu 24 saatlik iletkenlik ortalaması, gaz jeneratörü günlük gaz tüketimi, dizel jeneratörü günlük enerji üretimi, şehir hattından gerçekleştirilen günlük enerji tüketimi, gaz jeneratörü enerji üretimi, su arıtma tesisinin toplam enerji tüketimi ve arıtma tesisinin günlük gaz üretimi gibi parametreler tespit edilmiştir. Tesisin su arıtımını sağlama görevi vardır, bu nedenle tesiste, kayda değer bir enerji tüketiminin oluşabileceği beklenen bir durumdur. Ancak, insan atığı üzerinde gerçekleştirilen yakma işlemlerinin sağladığı biyokütle teknolojisi ile enerjinin ne kadarının geri kazanılabileceği hususu önemlidir. Yani, bu çalışmada tesisin tükettiği toplam enerjinin %78,29'unun arıtma tesisinde meydana gelen bu işlemlerle geri kazanıldığı rapor edilmiştir. Öte yandan, Türkiye'nin bu kurulu santralinde geri kazanılan bu enerji miktarının toplam 14.200 GWh'ye karşılık geldiği bildirildi. Geri kazanılan enerji miktarının yanı sıra, biyokütle enerji üretiminden sorumlu olan metan gazı miktarının dışarıya da dikkate alınan fiziksel ve kimyasal parametrelere göre analiz edilmiştir. Örneğin, yapılan analizler, atık su sıcaklığının artmasının metan gazı oluşum miktarının azalmasına neden olduğunu göstermiştir. Öte yandan, iletkenlik ve asitlik derecesinin artması ise metan gazı üretim miktarının artmasına neden olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Biyokütle, Enerji geri kazanımı, Gaz jeneratörü, Atık su arıtma

### **1. INTRODUCTION**

Energy is the main driving force in developments of technology and the economy. However, energy choices of the countries certainly have influences on the climate change, politics, growth of the economy, and even on the determination of international alliances and commitments [1-5]. Energy generation using the fossil fuels is still the most preferred global way of power obtaining method. Accordingly, the energy generation using fossil fuels increases day by day in parallel to the energy consumption increase [6]. Besides, the greenhouse gas emissions occurred as the product of fossil fuels unfortunately drive the climate change [7-8]. Although biomass technology is similar to fossil fuel energy production methods and causes some pollution in nature; the main thing here is that the organic wastes that are

produced naturally and will be wasted without utilization, are evaluated as fuel and contribute to the worldwide total energy production.

It is certain that traditional fossil fuel energy sources have unfortunately the decreasing availability trend. This situation as well as the climate concerns have created enhanced attention in the emerging of the renewable energy sources [9]. In this context, the biomass technology which can be regarded as one form of renewable technologies has the tendency of improvement. Turkey's biomass technology is expected to reach 2 GW of installations by 2023 year, based on the renewable vision plans of the country [10]. Additionally, energy recovery obtained from biogas utilization is a renewable and economically valid substitute for energy generation. Since, the energy obtained from the recovery procedure substitute the fossil fuel usage. In this regards,

Figure 1 exhibits the capacity of the installed biomass energy facilities, including the waste heat, of Turkey, considering the year range between 2011 and 2022.

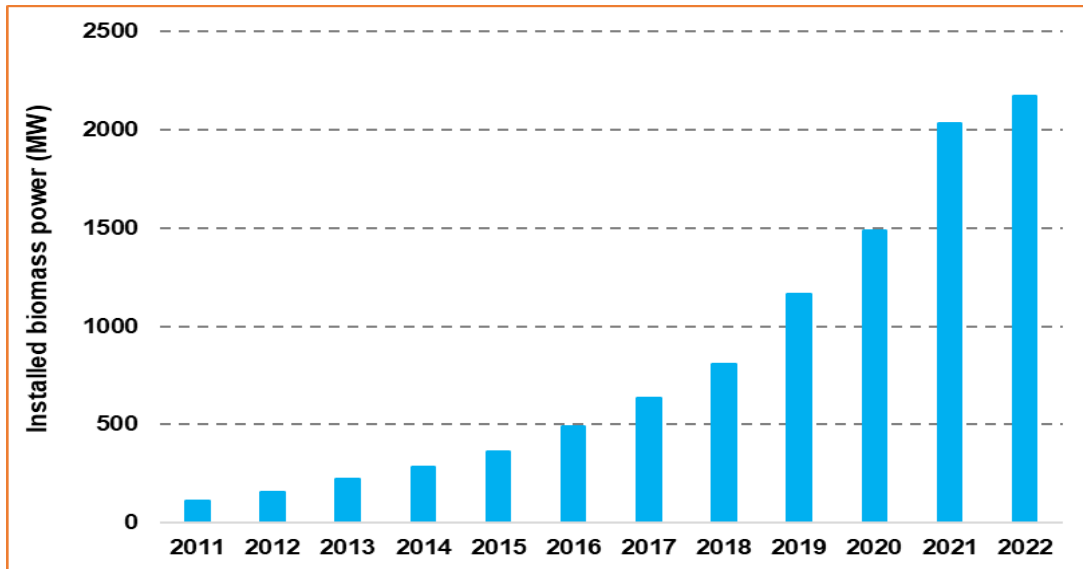


Figure 1. Installed biomass power of Turkey [11]

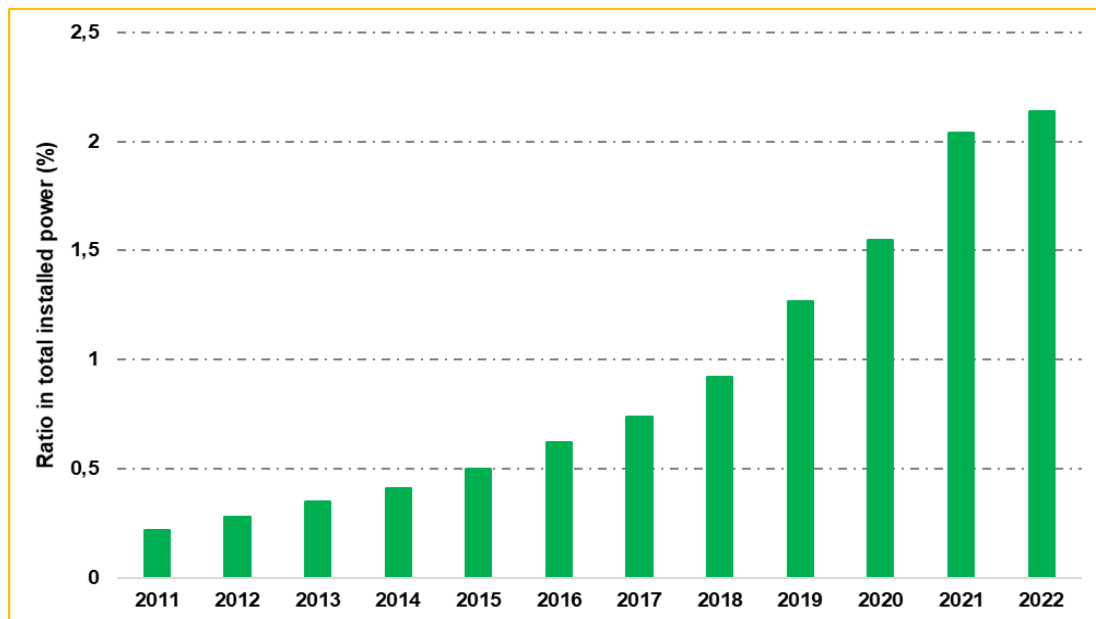


Figure 2. Ratio of biomass power installations to total installed power of Turkey [11]

As clear from Figure 1 that the total installed biomass power of Turkey has increased from 115 MW to 2,172 MW, considering the year range

from 2011 to 2022. Besides, the percentage of this increase measured with respect to the total installed power of Turkey, has been reported to be



increased from 0.22% to 2.14% in the same year range, as demonstrated in Figure 2. In this context, it is seen that Turkey attaches great importance to biomass energy production, especially in recent years. Moreover, it is seen that the importance given to this technology by Turkey will accelerate considerably in the near future.



**Figure 3.** View of a sample wastewater treatment plant

One of the methods of obtaining biomass energy is running gas turbines in the waste water treatment plants. In fact, the major purpose of treatment of the waste water is to remove as much of the suspended solids as possible before the remaining water, which is called as effluent, is discharged back to the environment. Methane gas generation occurs from those suspended solids. In Figure 3, a view of a sample waste water treatment plant is demonstrated.

While determining the characterization of the wastewater, its physical, chemical and biological compositions are used. Parameters such as color, odor, temperature, and electrical conductivity can be given as examples of the physical properties. Besides, the volatile organic compounds, oil-grease, pesticides, the degree of acidity are the examples of chemical parameters. In this regards, the influence of the discharged waste water to the soil in terms of the degree of the acidity has been inspected in the literature [12]. Besides, electrical conductivity measurements are performed in literature to observe the quality of the processes in waste water treatment [13].

The waste water treatment is so significant today. For instance, the seas, oceans, and rivers turning into garbage because of the release of micro plastics and other wastes to the water sources, pollution of the environment, newborn and children deaths arising from lack of clean and safe water, increasing climate migrations arising from drinking water shortage and drought are modern problems of our World. On the other hand, clean water is so important especially in our lives as well as production facilities. Accordingly, some of these troublesome problems can be solved by qualified treatment of wastewater. In other words, a powerful tool exists to bypass the water crisis, i.e., the treatment of the waste water [14].

The question is; what is waste water and its treatment? The logic of treatment of the waste water is identical to the treatment of the normal waste. Waste water is initially the clean water that has been utilized especially by humans and then it is turned to waste. However, later it becomes to contain many substances including food waste, bacteria, chemicals, and even much more than these. E.g., waste water is formed everywhere in the houses, from the dishwashers to the sinks, or to the washing machines. Accordingly, the main goal in wastewater treatment is to remove unwanted chemical or biological dissolved substances from water as much as possible [14].

Furthermore, the content of all wastes released to the nature is not limited with the disposals of the waste water of the houses, but also includes production wastes coming from the industries as well as the businesses. And, these business and industrial wastes are always meet with clean water and unfortunately pollute it. Because of these reasons, treatment of the waste water becomes more important and evident. Consequently, the scope of waste water treatment should be analyzed in terms of the composition to include biological waste water treatment, chemical waste water treatment, medical waste water treatment, industrial waste water treatment, and most importantly hazardous waste water treatment [14].

Mainly, three different types of waste water are available. Those include sewage waste water that



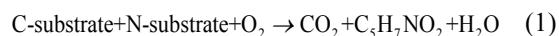
originates from sinks, showers, and toilets; industrial waste water which is resulted from commercial, production and overall industrial activities; and finally, municipal waste water created by the municipalities composed of different ratios of rain water, sewage water and industrial water. Accordingly, a proper treatment of the waste water should prevent pollution of the water as well as should maintain a safe and clean water. The nature is sufficiently successful to balance small number of water pollutants. But, it needs a good technology to meet the dangerous and big impurities that especially increase by activities of the humans. And, the process of the treatment of the waste water accomplishes this, and it reduces pollutants as much as possible and it discharges remaining water back to the nature which would probably be useful. In the case of it not to be useful, the nature, in its own balance can take care of the rest [14].

Laboratory experiments were performed in the literature to investigate the most substantial ions concentration behavior in a sequencing batch reactor (SBR) as well as the electrical conductivity and pH profiles were studied and developed. It is mentioned in the study that those are the main requirements to be considered as parameters of water treatment plants [15]. Besides, the influence of temperature on waste water treatment is also analyzed in literature studies. Accordingly, it was aimed in the study of Alisawi to configure the optimal temperature for waste water treatment [16].

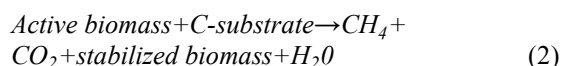
Although in the literature as shown above, a variety of studies are found mentioning the physical and chemical parameters of the solutions, as well as studies that are found related with the waste water treatment; this study as a novelty presents the influence of the physical and chemical parameters on the methane gas generation. On account of this, in the present study, the analysis of the recovered power generated in the waste water treatment facility, as a result of the combustion of the obtained methane gas in the gas turbine, was also taken into account.

## 2. MATERIALS AND METHODS

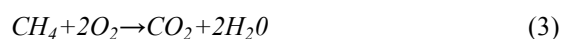
The equivalent calculation of carbon dioxide emissions based on the substrate oxidation of the carbon and nitrogen is defined by the chemical reaction, shown in Equation (1):



On the other hand, Equation (1) demonstrates that C-substrate elimination yielding in the production of  $\text{CO}_2$  and the partial segregation of biomass on carbon ( $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2$ ) [17]. Thus, initial global warming mitigation benefit presented by the treatment of the wastewater is obtained in this way. Thus, free carbon, which can be harmful to nature if found in abundant amounts, is converted into other forms. Besides, the methane ( $\text{CH}_4$ ) and stabilized biomass are produced by the digestion of the biomass, under the reaction:



Here the product obtained as the cumulative of  $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$  is the beneficial component used in power generation from treatment plant. Namely, the generated biogas ( $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ) is either flared or refined to be used in power production units. Following this operation, the stabilized biomass may be sent to landfills in the available situation or it may also be already in the incinerated form. Equation (2) indicates the second global warming mitigation benefit based on the wastewater treatment, i.e., the burning of the biogas causes the recovery of the energy. But, the benefit of the global warming mitigation is over the energy recovery phenomenon, because direct release of  $\text{CH}_4$  to the nature has much worse influence compared to the global warming caused by the  $\text{CO}_2$  [18]. Before final release of  $\text{CO}_2$  to the air, theoretically, production of methane is only an intermediate step. The chemical reaction exhibited on Equation (2) later continues with the chemical reaction shown in Equation (3);



In Table 1, the data analysis of the installed waste water treatment plant has been provided. A total of 445 days were used in the energy recovery analysis of the waste water treatment plant. The determined parameters including daily total waste water inlet water volume flow rate ( $Q_{ww}$ ), waste water inlet water daily average temperature ( $T$ ), waste water inlet water daily average degree of acidity ( $pH$ ), waste water inlet water daily average electrical conductivity ( $\sigma$ ), the daily total volume of the consumed gas in the gas generator ( $Q_{gc}$ ), diesel generator daily total energy generation ( $E_d$ ), daily total energy consumption from the city line ( $E_{cl}$ ), gas generator daily total energy generation ( $E_g$ ), daily total energy consumption ( $E_c$ ), and daily total volume of the generated gas by the waste water treatment plant ( $Q_{gg}$ ) were used in terms of the daily averages.

**Table 1.** Data analysis of the installed waste water treatment plant, located in Turkey

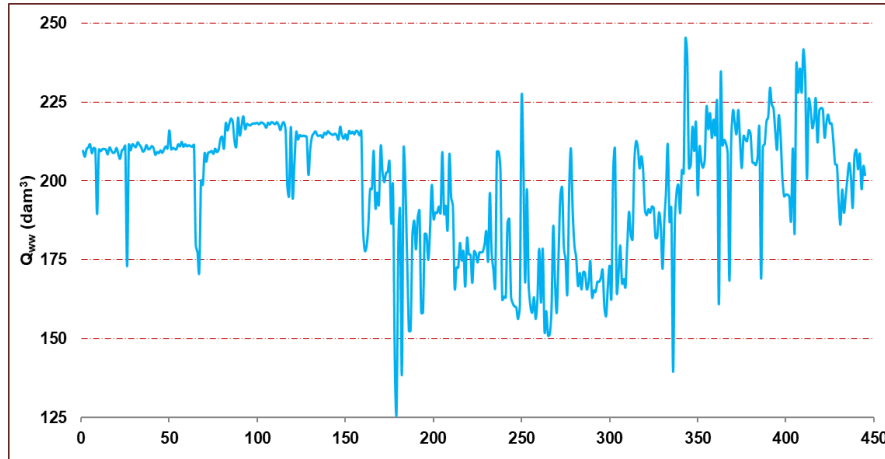
Examined data	Corresponding value
Minimum ( $Q_{ww}$ - dam <sup>3</sup> )	126.476
Maximum ( $Q_{ww}$ - dam <sup>3</sup> )	244.876
Average ( $Q_{ww}$ - dam <sup>3</sup> )	198.811
Total ( $Q_{ww}$ - hm <sup>3</sup> )	88.471
Minimum ( $Q_{gg}$ - dam <sup>3</sup> )	6.711
Maximum ( $Q_{gg}$ - dam <sup>3</sup> )	19.284
Average ( $Q_{gg}$ - dam <sup>3</sup> )	13.683
Total ( $Q_{gg}$ - hm <sup>3</sup> )	6.089
Minimum ( $Q_{gc}$ - dam <sup>3</sup> )	0
Maximum ( $Q_{gc}$ - dam <sup>3</sup> )	18.832
Average ( $Q_{gc}$ - dam <sup>3</sup> )	11.767
Total ( $Q_{gc}$ - hm <sup>3</sup> )	5.236
Minimum ( $T$ - °C)	12.400
Maximum ( $T$ - °C)	26.820
Average ( $T$ - °C)	21.061
Minimum ( $\sigma$ - μS/cm)	540.000
Maximum ( $\sigma$ - μS/cm)	1,741.000
Average ( $\sigma$ - μS/cm)	1,315.250
Minimum (pH)	6.410
Maximum (pH)	8.570
Average (pH)	7.493
Minimum ( $E_c$ - MWh)	28.440
Maximum ( $E_c$ - MWh)	50.620
Average ( $E_c$ - MWh)	40.758

Total ( $E_c$ - GWh)	18.137
Minimum ( $E_g$ - MWh)	0.000
Maximum ( $E_g$ - MWh)	48.780
Average ( $E_g$ - MWh)	31.911
Total ( $E_g$ - GWh)	14.200
Minimum ( $E_d$ - MWh)	0.000
Maximum ( $E_d$ - MWh)	3.850
Average ( $E_d$ - MWh)	0.066
Total ( $E_d$ - GWh)	0.029
Minimum ( $E_{cl}$ - MWh)	0.030
Maximum ( $E_{cl}$ - MWh)	37.391
Average ( $E_{cl}$ - MWh)	8.782
Total ( $E_{cl}$ - GWh)	3.908

In this table, considering the analyzed 445 days of water treatment data; minimum, maximum, and average values of  $Q_{ww}$ ,  $Q_{gg}$ ,  $Q_{gc}$ ,  $T$ ,  $\sigma$ ,  $pH$ ,  $E_c$ ,  $E_g$ ,  $E_d$ , and  $E_{cl}$  parameters have been shown. Besides, the analysis of 445-day data on parameters such as temperature ( $T$ ), electrical conductivity ( $\sigma$ ) and degree of acidity ( $pH$ ), which takes into account the physical and chemical properties of the treatment water, is shown in the table with only these three statistical parameters. On the other hand, for the other parameters, in addition to these three statistical results, total values of the related parameter considering 445 days have been shown. Namely, the total values in these parameters give us information about the performance and capacity of the water treatment plant in this date range.

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

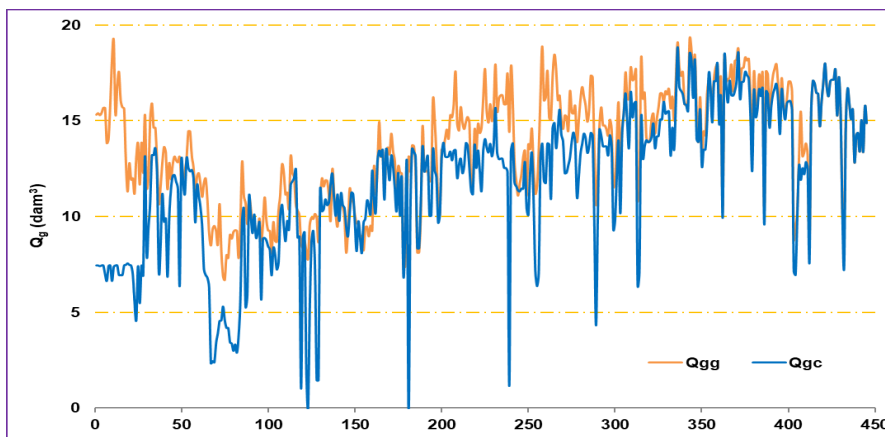
Figure 4 provides the analysis of the daily wastewater inlet water flow rate distribution of the water treatment plant ( $Q_{ww}$ ), regarding these 445 days. So, the analysis has revealed that a total of 88.5 hm<sup>3</sup> of waste water entered the treatment plant of the city considering this period of time. Based on the principle of methane generation from the waste water, some portion of the waste water had been utilized to form gas generation inside the plant. The formed gas inside the plant is known as the energy potential that is recovered; so the recovered energy was later used to run the gas turbines, namely, in order to generate electricity.



**Figure 4.** Daily wastewater inlet water flow rate ( $Q_{ww}$ ) distribution analysis

It is certain that the plant unfortunately consumes electricity in order to obtain waste water. However, of course waste water treatment is an important issue in order to protect the environment from considerable pollutions. And, the main point of the treatment plant is to recover some of the consumed energy inside the plant from the utilization of the burning of the generated methane gas, that is obtained as a product of waste water treatment process. In this regards, Figure 5 demonstrates the volume of generated methane gas ( $Q_{gg}$ ) as well as the total consumption in the gas generator ( $Q_{gc}$ ), during the utilization of the waste water inlet. The magnitudes of both parameters are presented in terms of distribution functions depending on the considered days. Namely,

considering this period of time, a total of  $6.09 \text{ hm}^3$  of gas generation ( $Q_{gg}$ ) has occurred. The gas generation distribution function has been exhibited with orange color in the figure. On the other hand, the corresponding consumption of the gas inside the gas generator ( $Q_{gc}$ ) was reported to be  $5.24 \text{ hm}^3$ . The gas consumption distribution function has been demonstrated in the figure, with dark blue color. In this context, it is concluded that the situation of burning all gas in the waste water treatment plant has not been successful. However, it is still comprehended that the efficiency of the burning process in the gas generator was still high. Namely, about 86% of the total generated methane gas was used in the gas generator for the re-gaining energy process.



**Figure 5.** Gas generation ( $Q_{gg}$ ) and consumption ( $Q_{gc}$ ) status of the treatment plant

On the other hand, the physical and chemical properties of the waste water inlet are shown in Figures 6, 7, and 8. These properties were obtained by calculating the daily averages of the hourly measured data. That is, each numerical value on the x-axis points to a daily average value of the relevant parameter, demonstrated on y-axis, corresponding to that day among 445 days. In this context, while Figure 6 and Figure 7 show the average temperature ( $T$ ) distribution of the studied period and conductivity ( $\sigma$ ) as the physical properties, whereas Figure 8 presents the chemical situation, i.e., the acidity ( $pH$ ) of the wastewater

with respect to the days. The temperature distribution in this interval of period, namely considering 445 days, was reported to be in the range of  $12.40\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 26.82\text{ }^{\circ}\text{C}$ , as provided in Figure 6. Besides, the average temperature in this analyzed period is also conducted to be  $21.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The meaning of this average value of temperature can be summarized as; the temperature of  $21.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which can be the answer to the question of what is the temperature of the waste water during the considered and analyzed 445 days.

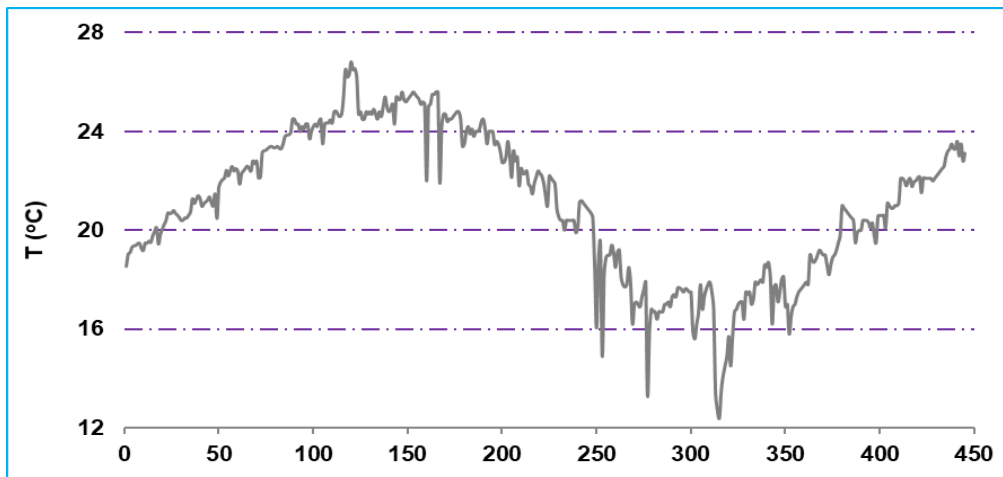


Figure 6. Daily wastewater inlet water 24 hourly average temperatures ( $T$ )

Electrical conductivity deals with the measurements performed on finding the amount of the dissolved chemical, minerals, or other substances found in the water. The facilities of waste water treatment trust the measurements of electrical conductivity in controlling which treatment process would be the most accomplished in removing impurities and the contaminants. To remove the contaminants in an accomplished way from the waste water, the measurements on the electrical conductivity of the waste water are performed. Electrical conductivity is indispensable for industries as well as the applications in order to improve water quality. For the measurements of the waste water electrical conductivity, an electrical conductivity sensor is utilized [19].

Electrical conductivity on the other hand refers to the capability of waste water in conducting the electrical current in a solution over a certain distance. It is generally measured in Siemens (S) per distance. As the ion concentrations inside the water increases, the water becomes more powerful in conducting the electricity. The ion concentration mainly occurs from inorganic materials including carbonate compounds, sulfides, and chlorides as well as the dissolved solids. The level of the conductance is also related with the potential of the ion to bind with the water. The conductivity of pure water is less. This is the case, since pure water doesn't include any impurities. If some ions are presented inside the water, water becomes conductive. Namely, if contaminants or pollutants are found inside the water, the electrical

conductivity of the water will be altered. For instance, if the water contains ions such as chloride, sodium, magnesium, calcium, the water's electrical conductivity will be high. This is due to the increase of the dissolved ionic compounds in the water resulting also the increase of the electrical conductivity. Shortly, those dissolved substances, i.e., the ions result the transportation of the electrical current inside the solution [19]. Besides, the presence of the amount of ions inside the water solution is also a measure of the degree of the acidity in the positive or negative direction. I.e., the concentrations of  $H^+$  and  $OH^-$  ions determine whether the solution is acidic or alkaline. The scale of the acidity between 0 and 14 determines the degree of the acidity of a solution. In this scale, as the number approaches to 0 indicates the increase of the acidity, whereas, as the number approaches to 14 indicates the increase of the alkalinity [20].

A similar calculation method as in the case of temperature was implemented for the conductivity of wastewater in this time period. Namely, the wastewater conductivity analysis shown in Figure 7 reveals that the conductivity ( $\sigma$ ) of the waste water during this period of days was observed to be in the range of  $540.00 \mu S/cm \leq \sigma \leq 1,741.00 \mu S/cm$ . On the other hand, the average of the conductivity ( $\sigma$ ) value during this period was calculated to be  $\sigma = 1,315.25 \mu S/cm$ . This conductivity value corresponds to an electric resistance of 760 ohms per each centimeter. In other words, under a certain voltage difference, when some amount of voltage is applied to this wastewater, it is seen that the current will meet with a certain amount of resistance. This resistance is due to the bio wastes dissolved in the wastewater.

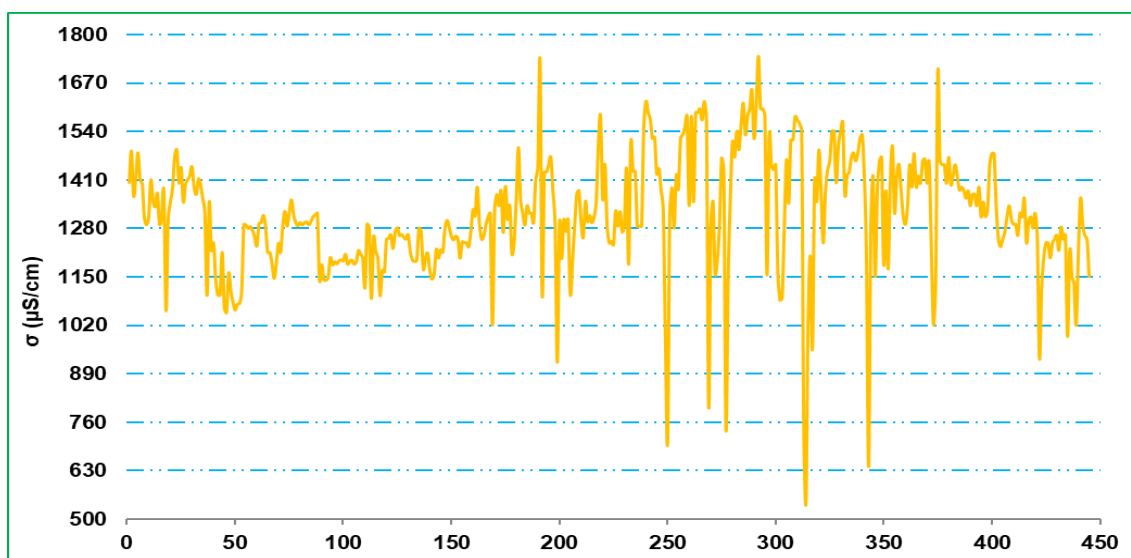


Figure 7. Daily wastewater inlet water 24 hourly conductivity ( $\sigma$ ) averages

Apart from the physical analysis of the waste water including the average temperature ( $T$ ) and the average conductivity ( $\sigma$ ), the chemical analysis of the water has been also presented including the acidity amount of the waste water. Accordingly, the ionic analysis of the waste water, shown in Figure 8 reveals that the pH values of the waste water during this period was observed to be in the

range of  $6.41 \leq pH \leq 8.57$ . On the other hand, the average of the acidity value, during this period was calculated to correspond,  $pH = 7.49$ . Although in some days, the waste water was observed to be acidic, however in general, it was determined that the wastewater was in the form of alkaline. This is also observed from the figure involving the pH to be generally over 7.00.

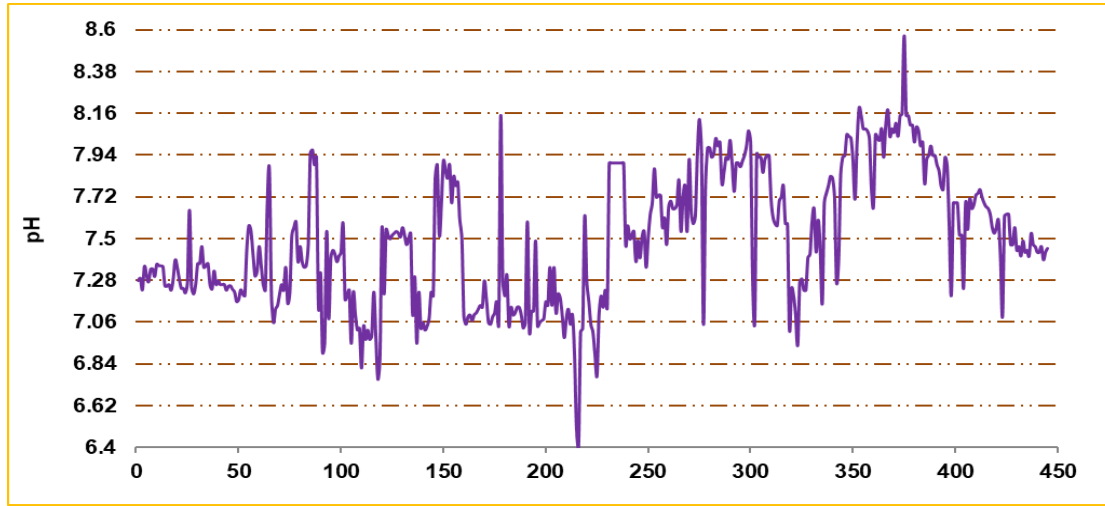
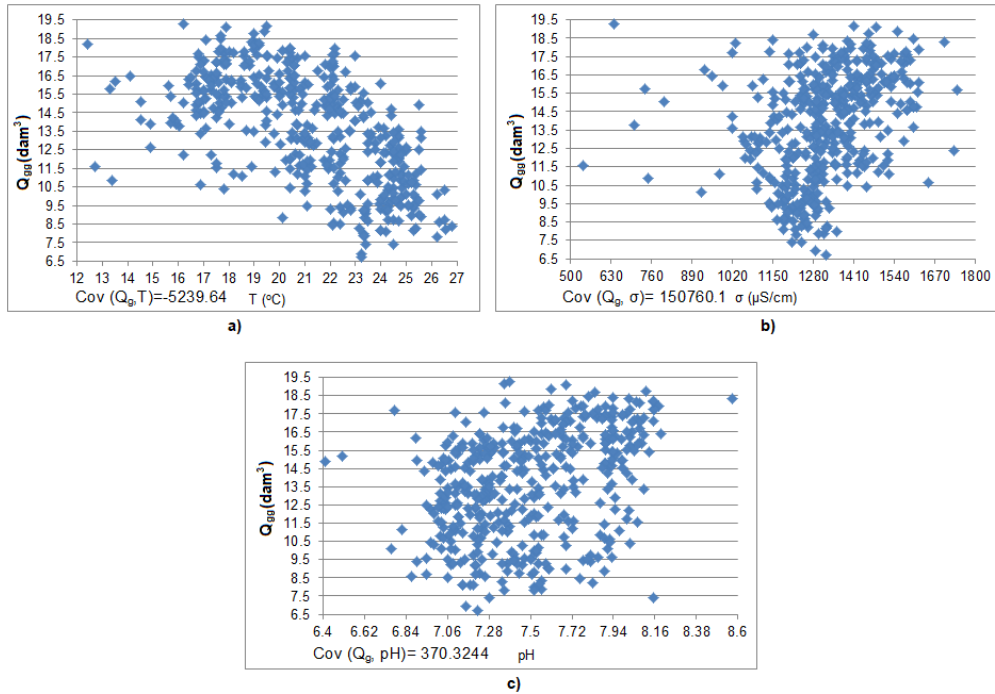


Figure 8. Daily wastewater inlet water 24 hourly pH averages

Besides, in Figure 9, the covariance analyses of three physical and chemical properties of the treatment plant have been performed. In this context, in Figure 9a, the covariance analysis of the daily total volume of the generated gas ( $Q_{gg}$ ) with respect to the temperature ( $T$ ) has been shown. The negative value result of the covariance has indicated that the generated biogas volume ( $Q_{gg}$ ) is negatively influenced by the increase of the waste temperature ( $T$ ). Namely, the increase of the waste temperature ( $T$ ) has resulted the decrease of the daily total volume of the generated gas ( $Q_{gg}$ ). In other words, it is certain that the volume will be adversely affected by the increase in air temperature ( $T$ ). Because the increase in air temperature means an increase in the treatment water and the solid solution in it, finally causing the decrease of the volume of the generated gas ( $Q_{gg}$ ). This situation can already be understood from the figure, as the trend in the y-axis values ( $Q_{gg}$ ) goes down in the -y direction with the increase in temperature ( $T$ ). Besides, unlike temperature ( $T$ ), the daily total volume of the generated gas ( $Q_{gg}$ ) is positively influenced by the increases of waste water daily average electrical conductivity ( $\sigma$ ) as well as the daily average degree of acidity ( $pH$ ). The positive results of the covariance values for both parameters have given such information. In this regards, the covariance

outputs of the daily total volume of the generated gas ( $Q_{gg}$ ) obtained with respect to the  $\sigma$  and  $pH$ , have been respectively indicated in Figures 9b and 9c, for this purpose. This situation can already be interpreted from these figures, as the trends in the y-axis values ( $Q_{gg}$ ) go up in the +y direction with the increase in electrical conductivity ( $\sigma$ ) and the degree of acidity ( $pH$ ). From a physical point of view, the situation can be interpreted as follows: When the solution deviates from the neutrality; i.e., when the pH value deviates from 7.0; in the solution, more ions are formed, which leads to an increase in the conductivity ( $\sigma$ ). Because more ions mean actually more conductivity ( $\sigma$ ). On the other hand, when the amount of the ions increases; the solution will become more energetic, and this means that more potential energy in the solution can be converted into other forms in greater amounts, according to the 1<sup>st</sup> law of thermodynamics. But, this is inversely proportional to the temperature ( $T$ ). As a matter of fact, an increase in temperature ( $T$ ) causes solid expansion and less resistance occurs in the expanding material due to the cross-sectional expansion. Decreased resistance manifests itself as the increased conductivity ( $\sigma$ ), because resistance and conductivity ( $\sigma$ ) are inversely proportional, and this situation is already summarized in Figure 9b.



**Figure 9.** The covariance analysis of the physical and chemical properties of the wastewater, **a)** the covariance of daily gas generation ( $Q_{gg}$ ) of the treatment plant shown according to the temperature ( $T$ ), **b)** the covariance of daily gas generation ( $Q_{gg}$ ) of the treatment plant shown according to the conductivity ( $\sigma$ ), **c)** the covariance of daily gas generation ( $Q_{gg}$ ) of the treatment plant shown according to the pH

Figure 10 presents that the bio-gas production obtained in the waste water treatment plant, helps the recovery of some portion of the energy consumed in the treatment plant. This is due to the burning of the methane gas that is generated using the waste water of the water treatment plant. Biogas can be regarded as a renewable energy source, since it is formed naturally due to the waste water. In this treatment plant, the bio gas will already be produced in all circumstances and will be released freely to the nature without producing any energy; but, in this case, it makes a high contribution to the energy production by being burned. The obtained biogas from the waste water treatment plant is burned as a fuel in the gas generators. Besides, in case the electrical energy of the facility cannot be fully met from biogas or from the grid, diesel generators are activated, as can be seen in Figure 10. The figure exhibits the distributions of the daily power generations

obtained from diesel ( $E_d$ ) or gas ( $E_g$ ) turbines as well as the energy consumption from the city line ( $E_{cl}$ ). Since the generated power from either gas ( $E_g$ ) or diesel ( $E_d$ ) turbine manifests itself later as the consumption in the plant, the summation of power generations from diesel and gas turbines as well as the consumption from the city line ( $E_{cl}$ ) constitute the daily total energy consumption ( $E_c$ ) within the plant. Accordingly, the distribution curve belonging to the daily total energy consumption ( $E_c$ ) of the plant is always above the other three curves presented in Figure 10, and it is indicated by blue color in the figure. The analysis of 445 days has indicated that the maximum value of the total daily energy consumption ( $E_c$ ) in this plant reached 50.620 MWh. Besides, when the energy generation and the consumption of the treatment plant is considered, it is analyzed that a value of 40.758 MWh as the average value of the total daily energy consumption ( $E_c$ ) was



determined. On the other hand, during 445 days, the total requirement of electrical energy for this plant was reported to be 18.137 GWh, to obtain the facility operation for the waste water treatment plant. Whole data analysis regarding the energy generation and the consumption in this plant has revealed that 78.29% of the 18.137 GWh energy, corresponding to 14.200 GWh has been recovered by the biogas generation. I.e., this portion of the energy was not consumed from the city line ( $E_{ci}$ ) or it was not consumed from the energy generations obtained from the diesel generators ( $E_d$ ). As similar to the low energy consumption from the city grid ( $E_{ci}$ ), using the diesel generators ( $E_d$ ) as little as possible will reduce the fossil fuel consumption and this will lead to national energy and money gain. By evaluating the bio fuel, which is ready and was going to be wasted; in this way, both the emissions of methane gas to the nature will be prevented and energy would be produced.

When these three physical and chemical parameters influencing the methane gas generation are considered, the absolute values of the covariance results of these parameters according to the gas generation were analyzed in order to speak about or compare the impact degree of them. Accordingly, the order of the absolute magnitudes of the covariance results can be formed as;  $|\text{Cov}(Q_{gg}, \sigma)| > |\text{Cov}(Q_{gg}, T)| > |\text{Cov}(Q_{gg}, \text{pH})|$ . The physical explanation for this situation is; as a result of the analysis, it is understood that the

increase effect of the electrical conductivity of the wastewater on the methane gas output is more than the decrease influence of the temperature of the wastewater on the methane gas output, and the latter is more than the increase effect of the acidity level of the wastewater on the methane gas output. Accordingly, it is concluded that the methane gas generation or the energy output obtained from the gas turbine, using the generated methane gas is at most dependent to the electrical conductivity in direct proportionality, followed by the temperature in indirect proportionality; and, it is concluded that the energy output is least influenced by the degree of the acidity, in direct proportionality.

In the study of Alisawi (2020), it was concluded that a temperature ranges of 15 °C to 25 °C is suitable for the growth and production of the bacteria that is forming the methane gas. This range is consistent with the maximum methane gas production obtained in the current study, considering temperature range of  $15\text{ °C} \leq T \leq 22\text{ °C}$ . As demonstrated in Figure 9a, highest amount of the methane gas is generated by the bacteria, at this interval of temperature. Although the further excess increase of the temperature causes a significant reduction in the obtained methane gas generation, this mentioned range can be regarded as the optimum generation of methane gas resulted by the optimum growth and development of the bacteria.

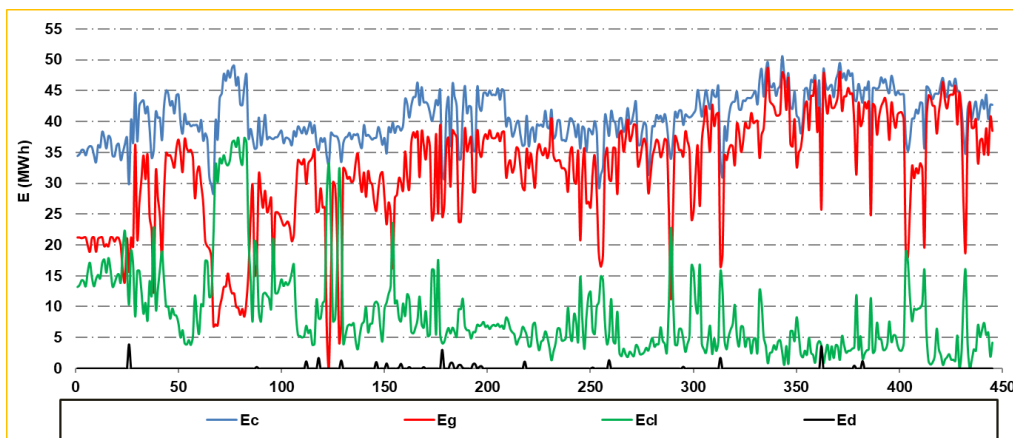


Figure 10. Energy data of wastewater treatment plant ( $E$ )



#### 4. CONCLUSIONS

The transition to renewable energy sources has gained importance due to the increase in the World population and the depletion of energy resources. Biomass energy, which is one of these resources, stands out with both the diversity of production technologies and its high potential. Biomass energy becomes an effective and useful resource when processed with the right methods. Biomass is renewable and non-fossilized organic matter derived from plants and animals. It contains atoms containing oxygen, nitrogen, hydrogen and carbon, as well as low proportions of heavy and alkali metals. In this sense, all plant and animal origin substances containing carbohydrate components in fact constitute some amounts of biomass. Recently, about 10% of the World's energy comes from the biomass energy. Plant-based alternative sources used instead of exhaustible energy sources get their power from solar energy. On the other hand, the biomass becomes an inexhaustible resource as plants will continue to photosynthesize as long as the sun exists. The energy that can be renewed in less than 100 years and can be obtained from all plants and animals, forest products, wastes of cities and food industry is called biomass energy. Besides, energy can be obtained from biomass in solid, liquid, or the gas form. Different fuel types such as biogas, bioethanol, biodiesel can be given as examples of biofuels. Biogas, which is a sub-type of biofuel, is carbon dioxide and methane gas formed by organic wastes as a result of anaerobic fermentation in an oxygen-free environment. Bovine, ovine and poultry manure, municipal solid waste, agricultural waste, beet pulp, peanut shell and tea waste are used in biogas production. This technology helps restore waste to the soil, while also obtaining energy from the waste materials. The electrical energy is obtained by burning biogas in gas engines. Biogas stands out as an environmentally friendly fuel. Methane gas obtained from this source emits less carbon dioxide than petroleum-based fuels, that are used today.

In this study, the physical and chemical properties of the waste water as well as the energy generation and consumption capacity of an installed waste

water treatment plant of Turkey have been performed. Namely, it has been demonstrated that the generation of the bio-gas obtained in an installed waste water treatment plant causes the recovery of some of the energy consumed in the same plant. The recovery of the energy has been obtained by the generated biogas of the plant, which is gained by the waste water and later it is used in the gas generators. In this regards, a total of 88.471 hm<sup>3</sup> water that was required to be water treated has entered the treatment plant, in a total of 445 days. So, from this amount of water quantity, considering 445 days, a cumulative of 6.09 hm<sup>3</sup> of biogas generation ( $Q_{gg}$ ) has actualized. Among the total of 6.09 hm<sup>3</sup> of the gas, 5.24 hm<sup>3</sup> of the cumulative was burned in the gas generator ( $Q_{gc}$ ), for the recovery of some portion of energy, consumed during water treatment processes in the waste water treatment plant. Due to these burning of the generated gas; accordingly, as it is shown in the energy balance of the plant, the maximum value of the total daily energy consumption ( $E_c$ ) in the plant, considering the analyzed 445 days; reaches 50.620 MWh. Besides, the average value of the total daily energy consumption ( $E_c$ ) in the plant during the same period of time is concluded to be 40.758 MWh. In addition, when 445 days of operation time is taken into account; a total of 18.137 GWh of electrical energy was required in order to operate the waste water treatment plant and to obtain refinement of the dirty waste water in this period of time. The analysis of the data has shown that 78.29% of the energy has been recovered by the generated biogas, obtained from burning of the methane, and accordingly, it was not consumed from the city grid line.

On the other hand, the covariance analysis was also carried out in this study to show the influence of the physical and chemical properties of wastewater on the amount of the energy produced. In this regards, the covariance analyses of three physical and chemical properties of the treatment plant demonstrated that the increase of the waste temperature ( $T$ ) has a negative influence on the total volume of the generated gas ( $Q_{gg}$ ). On the other hand, it is demonstrated that the total volume of the generated gas ( $Q_{gg}$ ) is positively influenced

by the increase of the electrical conductivity ( $\sigma$ ) as well as the increase of the degree of acidity ( $pH$ ). Accordingly, in the current study, the influence of the physical and chemical parameters on methane gas generation, thus their impacts on the energy recovery obtained from the waste water treatment plant are also considered. As a result of the performed analyses, it is concluded that while the increase of the waste water temperature causes decrease of methane gas generation, whereas, the increases of electrical conductivity and the degree of acidity of waste water cause increase of the methane gas generation. In this context, while waste water temperature increase reduces the power generation from the facility; increase of the electrical conductivity and the increase of the degree of the acidity of the waste water cause increase of the energy production from the waste water treatment plant. Also, the comparison of the correlations of these parameters on gas formation has been shown. Accordingly, it is come up to a conclusion that the increase effect of the electrical conductivity of the wastewater on the methane gas output is more than the decrease influence of the temperature of the wastewater on the methane gas output. And finally, the decrease influence of the temperature of the wastewater on the methane gas output is more than the increase effect of the acidity level of the wastewater on the methane gas output. It is also come up to a conclusion that this correlation relationship given for methane gas production is also valid for the energy output obtained from the facility.

## 5. ACKNOWLEDGMENTS

Thanks to the waste water treatment plant and its staff who had provided this data.

## 6. REFERENCES

1. Chow, J., Kopp, R.J., Portneym P.R., 2003. Energy Resources and Global Development, Science, 302, 1528-1531.
2. Ramalho, E., Sequeira, T., Santos, M., 2018. The Effect of Income on the Energy Mix: Are Democracies More Sustainable? Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions, 51, 10-21.
3. Sequeira, T.N., Santos, M.S., 2018. Does Country-Risk Influence Electricity Production Worldwide? Journal of Policy Modeling, 40(4), 730-746.
4. Ilhan, A., Bilgili, M., Sahin, B., 2022. Wind Farm and Installed Wind Power Analyses of Turkey, Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering, 37(1), 171-185.
5. Ilhan, A., Bilgili, M., Sari, M., Sahin, B., 2021. Aerodynamic Analysis of Onshore Commercial Large Scale Wind Turbine, Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering, 36(4), 965-977.
6. Li, M., Luo, N., Lu, Y., 2017. Biomass Energy Technological Paradigm (BETP): Trends in This Sector, Sustainability, 9(4), 1-28.
7. Csereklyei, Z., Varas, M., Stern, D., 2016. Energy and Economic Growth: The 524 Stylized Facts, Energy Journal, 37(2), 223-255.
8. Azevedo, S.G., Sequeira, T., Luis Mendes, M.S., 2019. Biomass-Related Sustainability: A Review of the Literature and Interpretive Structural Modeling, Energy, 171, 1107-1125.
9. Sgroi, F., Donia, E., Alesi, D.R., 2018. Renewable Energies, Business Models and Local Growth, Land Use Policy, 72, 110-115.
10. Ilhan, A., 2019. Aerodynamics and Statistical Analyses of Conventional and Diffuser Augmented Wind Turbines. PhD Thesis, Cukurova University, Institute of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering, Adana, 481.
11. MENR, 2022. Republic of Turkey Ministry of Energy and Natural Resources, <https://enerji.gov.tr/>.
12. Baykus, N., Karpuzcu M., 2021. The Effects of Wastewater on the Chemical and Physical Properties of Fine-Grained Soils, European Journal of Science and Technology, 31, 771-775.
13. Levlin, E., 2007. Conductivity Measurements for Controlling Municipal Waste-Water Treatment. Polish-Swedish-Ukrainian Seminar, 23-24 November 2007, Ustron, Poland, 51-62.
14. Waste Dashboard, How to Handle Wastewater Treatment and Disposal?

- <https://evreka.co/blog/how-to-handle-wastewater-treatment-and-disposal/>. Date of Access: 24.02.2023, Ankara.
15. Aguado, D., Montoya, T., Ferrer, J., Seco, A., 2006. Relating Ions Concentration Variations to Conductivity Variations in a Sequencing Batch Reactor Operated for Enhanced Biological Phosphorus Removal, *Environmental Modelling and Software*, 21(6), 845-851.
16. Alisawi, H.A.O., 2020. Performance of Wastewater Treatment During Variable Temperature, *Applied Water Science*, 10(89), 1-6.
17. Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D., 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse - 4<sup>th</sup> ed.* Metcalf & Eddy, Inc., McGraw-Hill, New York, USA.
18. IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
19. Atlas Scientific, The Importance of Electrical Conductivity of Wastewater, <https://atlas-scientific.com/blog/electrical-conductivity-of-wastewater/>. Date of Access: 24.02.2023, New York.
20. Berkem, A.R., Baykut, S., 1977. *Fizikokimya*. Fatih Yayınevi Matbaası, İstanbul, 2345.
- daily average degree of acidity of a solution
- $\sigma$  : Daily average electrical conductivity
- $E$  : Daily total energy abbreviation that includes  $E_c$ ,  $E_g$ ,  $E_d$ , and  $E_{cl}$
- $E_c$  : Daily total energy consumption
- $E_g$  : Gas generator daily total energy generation
- $E_d$  : Diesel generator daily total energy generation
- $E_{cl}$  : Daily total energy consumption from the city line

## NOMENCLATURE:

- $Q_{ww}$  : Daily total volume flow rate of waste water
- $Q_g$  : Volume of the methane gas either generated in the plant or consumed by gas generator
- $Q_{gg}$  : Daily total volume of the generated gas by the waste water treatment plant
- $Q_{gc}$  : Daily total volume of the consumed gas in the gas generator
- $T$  : Waste water daily average temperature given in Celsius degree
- pH : The measurement unit to determine



## Çevrimsel Voltametri Tabanlı Mikroakışkan Sistem Tasarımı ve Analizi

Çetin CANPOLAT<sup>\*1</sup>, ORCID 0000-0001-9700-6828  
Yonca TOGAY<sup>1</sup>, ORCID 0000-0003-0051-5111

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

Geliş tarihi: 02.02.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: CANPOLAT, Ç., TOGAY, Y., (2023). Çevrimsel Voltametri Tabanlı Mikroakışkan Sistem Tasarımı ve Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 185-194.

### Öz

Bu çalışmada bir mikroakışkan sisteme entegre edilmiş biyosensörün üzerinde oluşan redoks tepkimeler çevrimsel voltametri yöntemiyle izlenerek akışkan içerisindeki glukozun tayini yapılmıştır. Mikrokanala entegre biyosensörün tasarımı ve sonlu elemanlar analizi için Comsol Multiphysics v3.5a kullanılmıştır. Bu bağlamda, yüksekliği 300 µm ve uzunluğu 1500 µm olan bir mikrokanal yüzeyine elektrot yerleştirilmiştir. Matematiksel modelleme öncelikli olarak mikrokanal boyunca sıvı akışı olmadan gerçekleştirilmiştir. Analizlere mikrokanal girişine laminar akış koşulları altında bir sıvı girişi tanımlanarak devam edilerek çevrimsel voltametri tabanlı bir mikroakışkan sistem tasarımı yapılmıştır. Biyosensörün etkinliği 0.25mM, 0.5mM, 1mM, 2mM, 4mM ve 8mM gibi farklı glukoz değerlerinde test edilmiştir. Mikrokanalın girişine tanımlanan laminar akışın debisinin biyosensörden alınan yanıt etkisinin belirlenmesi için 25 µl/dk, 50 µl/dk, 100 µl/dk ve 200 µl/dk gibi farklı debi değerlerinde çözümlenmeler yapılmıştır. Elektrot uzunluğunun çevrimsel voltametriden alınan cevaba etkisinin incelemesi için elektrot uzunluğu 100µm, 200µm ve 300µm olarak değiştirilmiştir. Bu çalışmada laminar akış varlığında çevrimsel voltametriden elde edilen maksimum akımın yükseldiği gözlemlenmiştir. Simülasyonlar, sıvı akış debisinin artırılmasının biyosensörün etkinliğini arttırdığını göstermiştir. Sonuç olarak, bu çalışma ile çevrimsel voltametri tabanlı bir mikroakışkan sistem ile glukoz tayininin yapılabilirliği ortaya konulmuştur.

**Keywords:** Glukoz Tayini, Çevrimsel voltametri, Biyosensör, Sonlu elemanlar analizi

### Cyclic Voltammetry Based Microfluidic System Design and Analysis

#### Abstract

In this study, the determination of glucose in the fluid was made by monitoring the redox reactions occurring on the biosensor integrated into a microfluidic system by cyclic voltammetry method. Comsol Multiphysics v3.5a was used for the design and finite element analysis of the microchannel integrated

<sup>\*</sup>Sorumlu yazar (Corresponding Author): Çetin CANPOLAT, [ccanpolat@cu.edu.tr](mailto:ccanpolat@cu.edu.tr)

biosensor. In this context, an electrode was placed on a microchannel surface with a height of 300  $\mu\text{m}$  and a length of 1500  $\mu\text{m}$ . Mathematical modeling was primarily performed without fluid flow through the microchannel. A cyclic voltammetry-based microfluidic system was designed by continuing the analyzes by defining a liquid inlet to the microchannel inlet under laminar flow conditions. The efficiency of the biosensor was tested at different glucose values such as 0.25mM, 0.5mM, 1mM, 2mM, 4mM and 8mM. In order to determine the effect of the flow rate of the laminar flow defined at the entrance of the microchannel on the response from the biosensor, analyzes were made at different flow rates such as 25  $\mu\text{l}/\text{min}$ , 50  $\mu\text{l}/\text{min}$ , 100  $\mu\text{l}/\text{min}$  and 200  $\mu\text{l}/\text{min}$ . In order to examine the effect of electrode length on the response from cyclic voltammetry, the electrode lengths were changed to 100 $\mu\text{m}$ , 200 $\mu\text{m}$  and 300 $\mu\text{m}$ . In this study, it was observed that the maximum current obtained from cyclic voltammetry increased in the presence of laminar flow. Simulations have shown that increasing the fluid flow rate increases the efficiency of the biosensor. As a result, the feasibility of glucose determination with a cyclic voltammetry-based microfluidic system has been demonstrated with this study.

**Keywords:** Glucose determination, Cyclic voltammetry, Biosensor, Finite element analysis

## 1. GİRİŞ

Diyabet hastalarının klinik tanısı açısından önemli bir metabolit olan glukozun hassas tayini oldukça önemlidir. Bunun için enzimatik ve kolorimetrik yöntemler gibi çeşitli analitik yöntemler kullanılmaktadır. Kolorimetrik yöntemler, oksidasyon-redüksiyon metodu ve ortotoluidin metodu olarak ikiye ayrılır. Oksidasyon redüksiyon yöntemi şekerlerin indirgenme niteliğinden faydalanılarak geliştirilmiştir, ortotoluidin metodunda renkli bir karışım elde edilir ve rengin şiddetine endeksli bir biçimde oluşturulmuş bir metottur. Enzimatik yöntemler ise Glukoz Oksidaz Metodu ve Hezkokinaz Metodu olarak iki çeşittir [1].

Kimyasal bileşiklere seçici ve tersinir olarak cevap veren ve konsantrasyona bağlı elektriksel sinyaller oluşturan küçük cihazlara biyosensör denir. Biyosensörlerin geliştirilmesindeki ilk çalışmalar 1962 yılında Lyons ve Clark tarafından oksijene duyarlı elektrotla glukoz oksidaz enzimini immobilize ederek hazırladığı glukoz biyosensörüyle başlamıştır [2]. Glukoz ölçümü için tasarlanan bu tip biyosensörlerde glukoz ve çözünmüş oksijen sıvı içerisinde elektrotun çevresindeki zarı geçerek elektrotun yüzeyine ulaşır ve glukozu  $\text{O}_2$  ile oksitler. Ortamda bulunan glukoz bittiği zaman başlangıçtaki ve tepkime sonundaki çözünmüş oksijen  $\text{O}_2$  elektroduyla ölçülür. Bulunan fark glukozun yükseltgenmesi

için harcanan oksijendir ve böylelikle ortamda bulunan sıvının glukoz derişimi hesaplanmış olur [3]. Sisteme biyosensör eklenmesiyle klasik elektrokimya mantığındaki anyon ve katyon ölçümü dışında birçok madde tayini yapmak biyosensörlerin sistemlerdeki en önemli avantajlarından[4]. Biyosensörler biyoaktif tabaka, sinyal iletici sistem, kaydedici olarak 3 bileşenden oluşur. Biyoaktif tabaka seçici bir mekanizması ile maddeyi tanıır. Sinyal iletici sistemi biyoaktif tabaka ile araştırılan maddenin etkileşmesiyle meydana gelen sinyalleri elektronik sinyallere dönüştürür. Kaydedici ise oluşan sinyalleri kaydeden ölçüm cihazıdır [5].

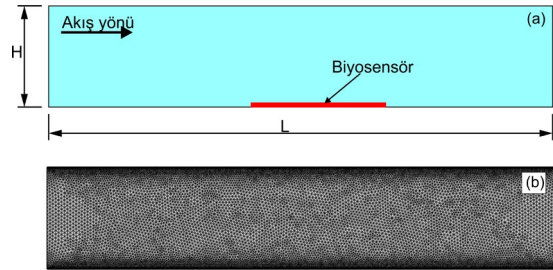
Biyokimyasal algılama cihazları içerisinde Çevrimsel Voltametri (CV) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tip bir ölçüm yönteminde elektrot üzerindeki tepkimeler ölçülürken ortamdaki sıvı hareketsizdir [6]. Fakat biyokimyasal algılama yöntemlerindeki hızlı gelişmeler bu tip biyosensörlerin akışkan olan ortamlara da entegre edilebileceğini göstermiştir [7]. CV'nin ortamda sıvı akışı varlığında çalışabilmesi onun yonga üstü çip (lab-on-chip) sistemlerine uygulanabilmesini ve ayrıca gerçek zamanlı ölçüm yapabilirliği mümkün hale getirmiştir [8]. Ek olarak, bu tip bir ölçüm sisteminin de değişken debi ve analit konsantrasyonu değerlerindeki hızlı değişimlere cevap verebilme yeteneği ile daha hızlı reaksiyonları izleyebilme kolaylığı sunmaktadır [9].

Deneyisel yöntemlere ulaşımın zor olduğu durumlarda sayısal modellemeler sistem tasarımı ve karakterizasyonu için kullanılabilir. Buradan hareketle çevrimsel voltammetriyi de karakterize edebilen matematiksel modeller bulunmaktadır [10]. Bu modellerdeki temel mantık çözünenin akış hızı ile tarama hızının ilişkilendirilmesi üzerine kurulmuştur. CV'nin elektrot kinetiği her zaman doğrusal olmadığından dolayı analitik çözümlerden çok sayısal çözümler tercih edilmektedir [11]. Ayrıca, deneyel yöntemler göstermiştir ki sayısal modellemeler analitik çözümlere göre daha hassas sonuçlar vermektedir [12]. CV sayısal modellemesi elektrik alanı, ohmik düşüş, elektrokimyasal reaksiyon sabitleri, transfer katsayıları gibi parametrelerin akış hızları ve dalga şekli üzerindeki etkilerini de incelemek için kullanılmıştır [13]. Bu durumda kimyasal türlerin adsorpsiyon ve reaksiyon mekanizmaları da anlaşılabilir. Sonuç olarak, deneyel verileri hassas bir şekilde modelleyebilen CV sayısal simülasyonları sensör morfolojisi ve sistem parametreleri arasındaki korelasyonları belirlemek için güçlü bir araç sunmaktadır [14,15].

Bu çalışmada, bir çevrimsel voltammetri biyosensörün mikroakışkan sistem içerisine entegre edilip karakterizasyonu yapılmıştır. Çevrimsel voltammetrinin klasik ölçüm yönteminde ortam sıvısı hareketsizdir. Yani, hedef kimyasal türün hareketi sadece difüzyona bağlıdır. Fakat bu çalışmada ise hedef türün hareketi hem difüzyondan hem de konveksiyondan etkilenmektedir. Böylelikle biyosensör tarama hızı büyük önem kazanmaktadır. Sonlu elemanlar analizi yapılan bu çalışmada sıvı akışı bulunmayan ortamda tipik çevrimsel voltammetri eğrisi eldesi yanında sıvı akışı sırasında da bu eğri elde edilmiştir. Biyosensör tarama hızını etkileyen denklemlerin modifiye edilmesi ile birlikte sıvı akışı varlığında ölçümler yapılabilmektedir. Böylelikle, tasarlanan sensörün labrotuvar-üstü-çip (lab-on-chip) uygulamalarında da kullanılabilir durumu değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, ucuz, tekrarlı kullanılabilir, hafif ve üretimi kolay bir cihazın tasarımı ve analizi yapılmıştır.

## 2. SAYISAL MODELLEME

Bu çalışmada matematiksel modelleme bir sonlu elemanlar çözücüsü olan Comsol Multiphysics v5.3a programında yapılmıştır. Bu yazılımla temel denklemlerin elektriksel yükler, malzeme özellikleri, sınır koşulları gibi nicelikleri tanımlayarak çözümü mümkündür. Şekil 1a'da bu çalışma için tasarlanan mikrokanaal geometrisi ve temel parametreleri görülmektedir. İki boyutlu düzlemde çözüm alanı sonlu elemanlar yönteminin uygulanabilmesi için uygun bir ağ yapısı ile doldurulmuştur. Bu ağ yapısı şekil 1b'de görülmektedir.



Şekil 1. (a) Mikrokanaal geometrisi ve parametreler, (b) Çalışmada kullanılan sonlu elemanlar ağ yapısı

Bu çalışmada glukozun oksidasyon ve redüksiyon tepkimeleri incelenmiş ve tepkimeler kullanılarak bir mikro kanalda akış analizleri yapılmıştır. Öncelikle Comsol arayüzünde hesaplama geometrisi oluşturulmuştur. Mikrokanaal geometrisi dikdörtgen şekle sahip olup uzunluğu 1500  $\mu\text{m}$  ve yüksekliği 300  $\mu\text{m}$  dir. Kanal uzunluğuna göre hesaplanan Reynolds sayısı 0.15'tir. Mikro kanalın tabanına bir elektrot yerleştirilebilmesi için alt taraftaki çizgi iki noktadan bölünmüştür. Böylelikle çözümlenmede duvardan farklı sınır koşullarının verilebilmesi sağlanmıştır. Oluşturulan tasarımın geometrik büyüklükleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Model boyutları

Boyutlar	Değerler
Kanal yüksekliği(H)	300 $\mu\text{m}$
Kanal uzunluğu (L)	1500 $\mu\text{m}$
Elektrot uzunluğu	100 $\mu\text{m}$ , 200 $\mu\text{m}$ , 300 $\mu\text{m}$

Bu çalışmanın birinci bölümünde mikrokanalda herhangi bir akışın olmadığı, yani durgun sıvıda simülasyonlar yapılmıştır. İkinci kısımda ise mikro kanalın solundan sağına doğru laminar akış tanımlanmıştır. Laminar akış Navier-Stokes (1) süreklilik (2) ve Eşitlikleri ile modellenmiştir.

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta \nabla^2 u) + f \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (u) = 0 \quad (2)$$

Burada  $u$  ve  $\rho$  sırasıyla akışkanın hızı ve yoğunluğudur,  $p$  basınç,  $f$  harici kuvvettir. Viskoz kuvvetler ve atalet kuvvetleri, sırasıyla denklemin sağ ve sol tarafının ikinci terimi ile temsil edilir. Kalın karakterler vektörel nicelikleri göstermek için kullanılmıştır. Bu denklemler, sıvının sıkıştırılamazlığı nedeniyle modifiye edilir, yani sıvının yoğunluğu her koşul için mikro kanal üzerindeki her noktada sabit kalır. Kimyasal türlerin taşınımını tanımlamak için Nernst-Planck Eşitliği (3) kullanılmaktadır.

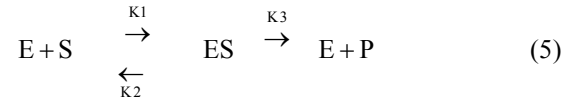
$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (D_i \nabla c_i) + u \nabla c_i = 0 \quad (3)$$

Burada  $D_i$  ve  $c_i$  sırasıyla kimyasal türlerin difüzyon katsayısı ve ortamdaki konsantrasyonudur. Elektroanaliz için Butler-Volmer denkleminde faydalanılmıştır. Butler-Volmer denklemi ile elektrot üzerindeki anodik ve katodik reaksiyonlar meydana geldiğinde elektrik akımının elektrot potansiyeline bağlılığı açıklanmaktadır. Butler-Volmer Eşitliği (4) elektrot reaksiyonu olarak elektrot yüzeyine sonlu elemanlar çözücüsünde tanımlanmıştır.

$$i = A i_0 \left[ c_{red} \exp \left( \frac{(n - \alpha_c) F \eta}{RT} \right) - c_{ox} \exp \left( \frac{-\alpha_c F \eta}{RT} \right) \right] \quad (4)$$

Burada  $i_0$  değişim akım yoğunluğu,  $A$  elektrot alanı  $c_{red}$  redüksiyon konsantrasyonu,  $c_{ox}$  oksidasyon konsantrasyonu,  $\eta$  potansiyel sabiti,  $R$  gaz sabiti,  $T$  sıcaklık,  $n$  değiştirilen elektron sayısı,  $\alpha_c$  katodik yük transfer katsayısı'dır. Enzim

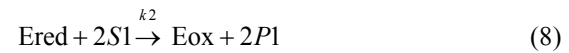
kinetiği enzimler tarafından katalizlenen kimyasal reaksiyon hızlarını inceler. Substratı enzime dönüştürürken öncelikle ara ürün olarak enzim substrat kompleksi oluşur sonrasında oluşan kompleks ürün ve enzime dönüşür. Bu dönüşüm Eşitlik (5)'te görülmektedir.



Burada E, S, ES, P sırasıyla enzim, substrat, enzim-substrat kompleksi ve ürün konsantrasyonudur. Oluşan ES kompleksi E ve S'den  $K_1$  hızıyla oluşmaktadır. ES'in ayrışması  $K_2$  hızıyla geri reaksiyon ile ve  $K_3$  hızıyla ürün ve enzime ayrışmasıyla olur. Michaelis-Menten Eşitliği (6) ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$V = \frac{V_{max} [S]}{K_m + [S]} \quad (6)$$

Burada  $K_m$ , Michaelis-Menten sabitidir ve enzim reaksiyonunun hızının maksimum reaksiyon hızının yarısına eşit olduğu substrat konsantrasyonudur. Michaelis-Menten sabiti enzimin substratına özgü bir sabit değerdir ve enzimin substratına olan afinitesini belirler.  $K_m$  değeri ne kadar düşükse enzimin substrata afinitesi o kadar yüksektir. Enzimatik tepkimeler aşağıda verilen 7 ve 8 nolu Eşitlikler ile ifade edilmiştir.



$E_{ox}$  oksidasyon enzimi,  $G$  glukoz (substrat konsantrasyonu),  $E_{red}$  redüksiyon enzimi,  $P$  ürün (Glukonolakton),  $S_1$  medyatör (Ferrisyanid),  $P_1$  medyatör (Ferrosiyamid),  $E$  glukoz dehidrogenaz. Öncelikle tek bir glukoz konsantrasyonunda mikrokanal içerisinde akışkan akışı olmadan analiz yapılmıştır. Ardından basınç tahrikli laminar akış ile çalışmaya devam edilmiştir. Basınç tahrikli akışın olmadığı simülasyonlarda Nernst-Planck denklemindeki konveksiyon terimi çıkarılmıştır.



Çalışmada kullanılan parametreler Çizelge 2’de ve reaksiyonların değişkenleri Çizelge 3’te görülmektedir.

**Çizelge 2.** Denklemlerde kullanılan parametreler

Değişken ismi	Değer	Açıklama
E0	0.03 mol/m <sup>3</sup>	Başlangıç enzim konsantrasyonu
M0	12 mol/m <sup>3</sup>	Başlangıç mediator konsantrasyonu
G0	1 mol/m <sup>3</sup>	Başlangıç glukoz konsantrasyonu
k1	7,9 m <sup>3</sup> /(s.mol)	Hız sabiti
k2	1,4 m <sup>3</sup> /(s.mol)	Hız sabiti
k0	5,0119*10 <sup>-10</sup> m/s	Hız sabiti
DG	6,51*10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s	Glukozun difüzyon katsayısı
DMOx	7,2*10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s	Oksidasyonun difüzyon katsayısı
DMRed	6,4*10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /s	Redüksiyonun difüzyon katsayısı
DE	3,9*10 <sup>-11</sup> m <sup>2</sup> /s	Redüksiyon enzimin difüzyon katsayısı
Nu	0,001 V/s	Sabit sayı
Beta	0,51	Sabit sayı

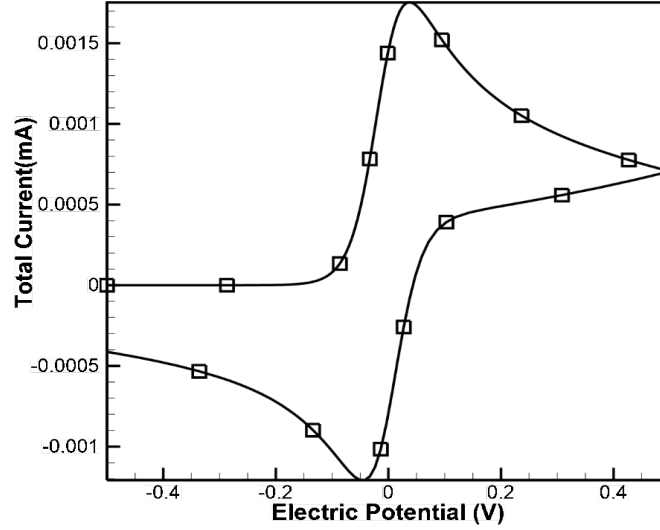
**Çizelge 3.** Reaksiyonların değişkenlerinin tanımlanması

Adı	Açıklama	Birimi
rEOX	-k1*EOX*G+k2*Ered*MOx	mol/(m <sup>3</sup> .s)
rG	-k1*EOX*G	mol/(m <sup>3</sup> .s)
rERED	k1*EOX*G-k2*Ered*MOx	mol/(m <sup>3</sup> .s)
rP	k1*EOX*G	mol/(m <sup>3</sup> .s)
rMOX	-2*k2*Ered*MOx	mol/(m <sup>3</sup> .s)
rMRED	2*k2*Ered*MOx	mol/(m <sup>3</sup> .s)

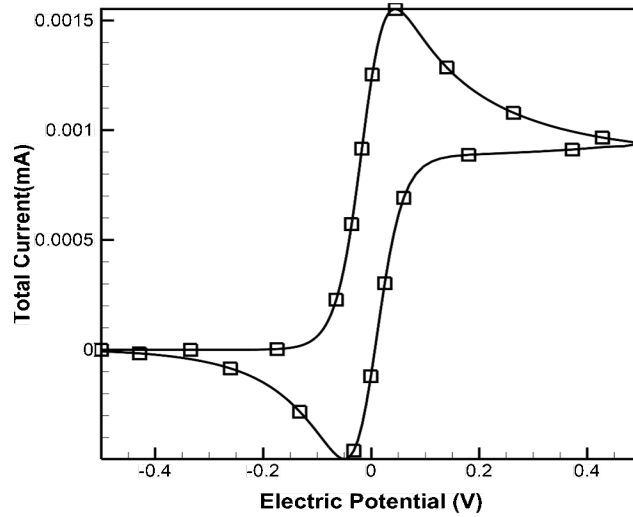
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmanın ilk aşamasında laminer akış yokluğunda çevrimsel voltametriden elde edilen elektrik akımı ve potansiyeli bir grafik üzerinde çizdirilerek tipik CV dalga formunun oluşup oluşmadığı araştırılmıştır. Şekil 2’de görüldüğü gibi laminer akış olmadığı durumda biyosensör tipik çevrimsel voltametri dalga biçimini oluşturmaktadır. Tipik bir çevrimsel voltametri grafiğinde başlangıçta, indirgeme potansiyellerinde oksidasyon reaksiyonu yürütülmez ve ihmal edilebilir bir akım çekilir. Potansiyel, redoks çiftinin indirgeme potansiyeline doğru hareket ettikçe oksidasyon reaksiyonu hızlanır ve böylece akım artar. Oksidasyon reaksiyonu, elektrot yüzeyindeki reaktanı tükettiğinde, akım, çalışma elektroduna doğru taşınma hızı ile sınırlanır. Bu nedenle, bir tepe akımı gözlemlenir ve daha yüksek potansiyelerde voltammetrik akım, potansiyelden bağımsız bir oranda düşer; bu bölge difüzyon kontrollü veya taşıma kontrollü olarak adlandırılmaktadır. Daha fazla indirgeme potansiyeline doğru süpürüldüğünde, ürünün orijinal reaktana yeniden dönüştürülmesi negatif (katodik, indirgeyici) bir akım verir. Reaksiyona giren türün tükenmesi, negatif bir tepe akımına neden olur ve ardından yeniden dönüşüm, difüzyon kontrollü bir hızda ilerler. İleri tepe noktasındaki akımın büyüklüğü, voltammetride yaygın bir teşhis değişkenidir.

Laminer akışın varlığı sırasında biyosensörün okuma yaptığı ve yine tipik bir CV dalga biçimi oluşturduğu Şekil 3’te elde edilen grafikten görülmektedir. Akış olmayan ortama göre laminer akış koşulları altında maksimum akıma daha hızlı ulaştığı görülmektedir. Ayrıca, akım sinyalinin azalma eğilimi gösterdiği bölgelerde ise daha hızlı azalma olduğu şekil 3’te görülebilmektedir. Laminer akış varlığında bu şekilde bir CV grafiğinin elde edilmesinin sebebi ortamda bulunan akışkanın konvektif etkilere de maruz kalmasıdır. Akış olmadığı durumda ortamda bulunan kimyasal türler difüzyon yardımı ile uzun sürelerde sensör yüzeyi ile etkileşime girerken akış bulunan ortamda ise bu etkileşim daha hızlı olmaktadır. Böylelikle sensörden alınan cevabın daha hızlı eldesi sağlanmaktadır.



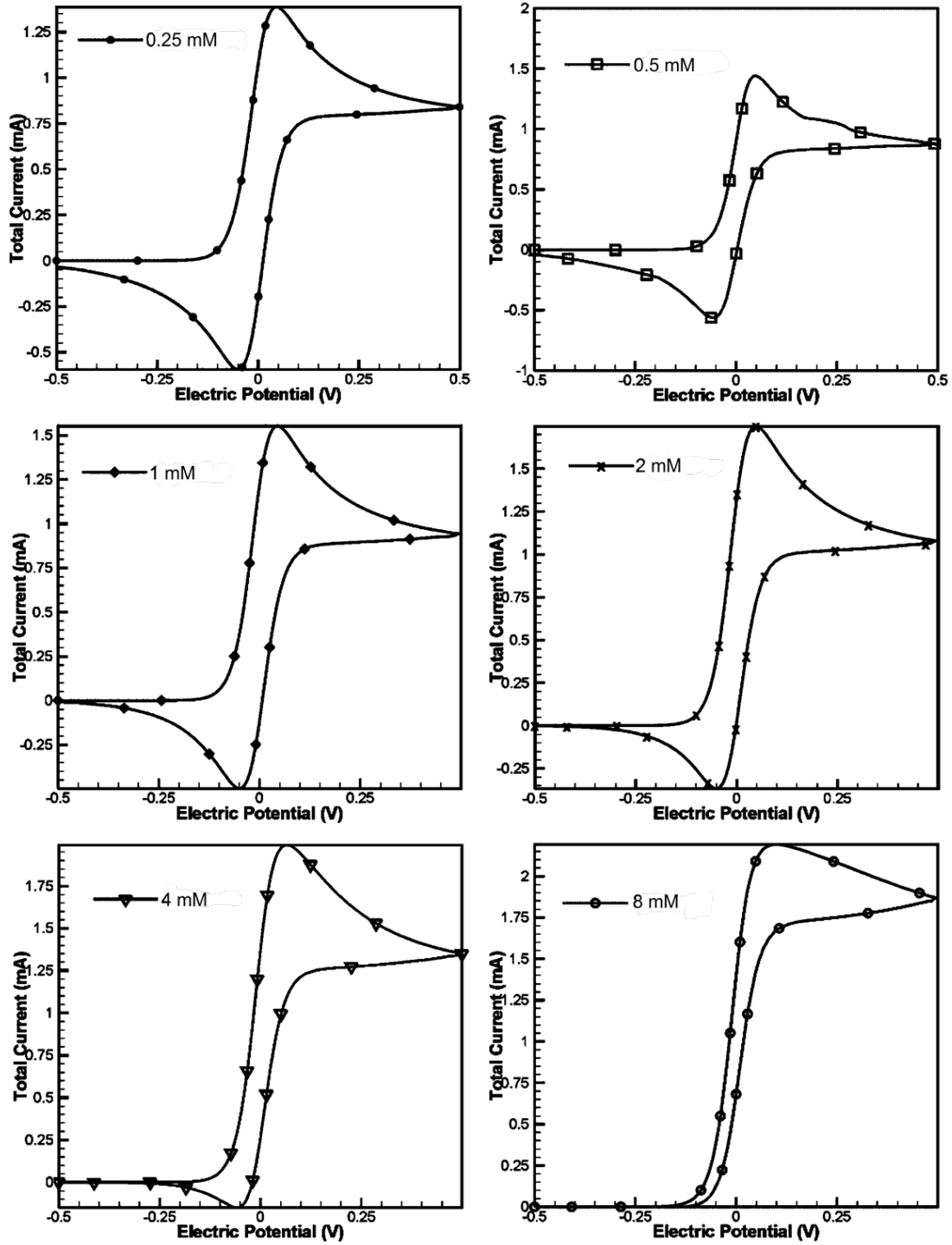
Şekil 2. Laminer akış olmadığı durumda çevrimsel voltametri (CV) grafiği



Şekil 3. Laminer akış koşulları altında çevrimsel voltametri (CV) grafiği

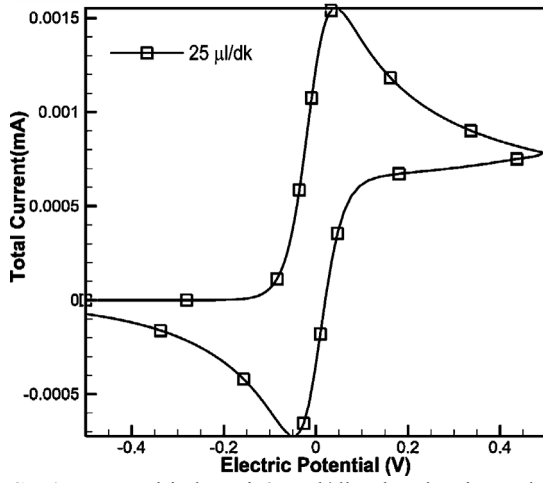
Şekil 4'te mikrokanal içerisinde bulunan çözeltideki glukoz konsantrasyonları artırılarak biyosensörün etkinliği değerlendirilmiştir. Başlangıç glukoz konsantrasyonları sırasıyla 0.25 mM, 0.5 mM, 1 mM, 2 mM, 4 mM ve 8mM olarak belirlenmiş olup glukoz konsantrasyonunun artırılmasıyla elde edilen akımın arttığı gözlemlenmiştir. Glukoz konsantrasyonunun artmasıyla elektrot yüzeyinde oluşan elektrokimyasal tepkime miktarında artış olmuştur ve bu durumda elde edilen akımın artmasını

sağlamıştır. Laminer akışın varlığında glukoz konsantrasyonunun artmasının da pik akım değerine ulaşmayı hızlandırdığı görülmüştür. Hem akışkan üzerinde bulunan konvektif etkiler hem de glukoz konsantrasyonunun artmasının sensörden elde edilen bilgiyi daha da hızlandırdığı görülmektedir. Fakat glukoz konsantrasyonunun 8mM üzerine çıkarılması sensörden elde edilen tipik çevrimsel voltametri grafiğinin bozulmaya başlamasına sebep olmaktadır.

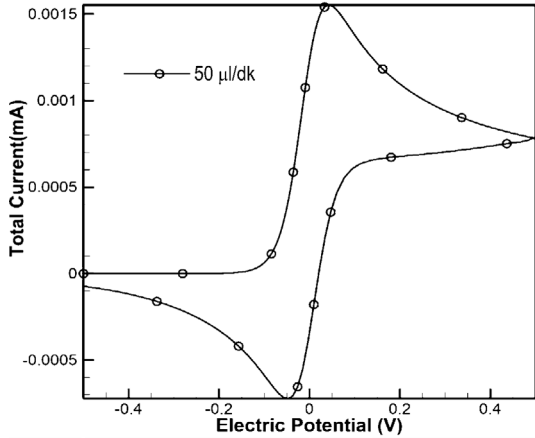


Şekil 4. Farklı glukoz değerlerindeki CV grafikleri

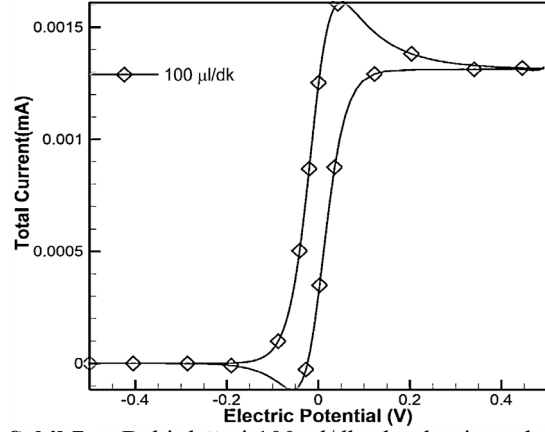
Şekiller 5, 6, 7 ve 8'de görüldüğü gibi laminar akış varlığında debinin sırasıyla 25  $\mu\text{l}/\text{dk}$ , 50  $\mu\text{l}/\text{dk}$ , 100  $\mu\text{l}/\text{dk}$ , 200  $\mu\text{l}/\text{dk}$  olarak artırılmasıyla sensörden elde edilen elektriksel akımda artış gözlemlenmiştir. Akışkanın aktığı geometrideki birim zamanda geçen hacmin artırılması Nerst-Planck denklemindeki konveksiyon terimindeki debi değerinin artmasıyla elektrot ve akışkan arasındaki etkileşimde artış sağlamış ve böylelikle elde edilen elektriksel akımın artmasına neden olmuştur.



Şekil 5. Debi değeri 25  $\mu\text{l}/\text{dk}$  olan laminar akış koşulu altında 1mMol glukoz için CV grafiği

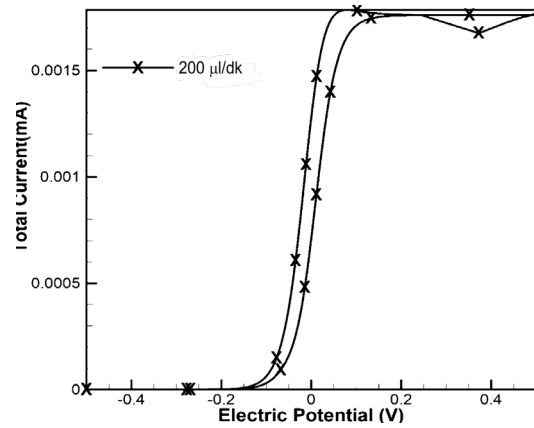


Şekil 6. Debi değeri 50  $\mu\text{l}/\text{dk}$  olan laminar akış koşulu altında 1mMol glukoz için CV grafiği



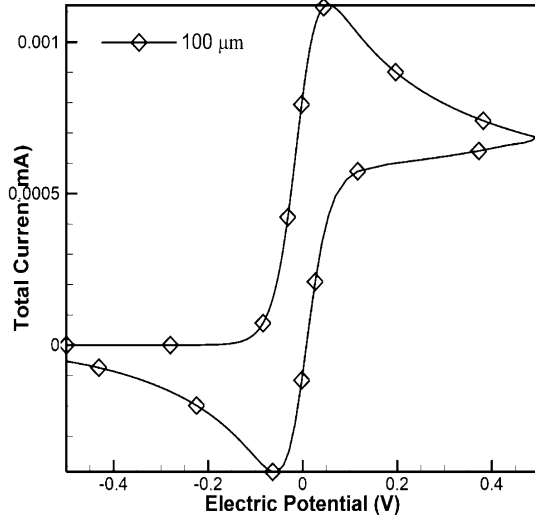
Şekil 7. Debi değeri 100  $\mu\text{l}/\text{dk}$  olan laminar akış koşulu altında 1mMol glukoz için CV grafiği

Çevrimsel voltametri simülasyonunda çalışan elektrot yüzeyine uygulanan potansiyel, zamanın bir fonksiyonu olduğundan doğrusal olarak değişmektedir. Farklı elektrot boyutlarında kaydedilen voltammetriler şekiller 9, 10 ve 11'de verilmiştir. Elektrot boyutu arttıkça, eğrilerin şekli, lineer difüzyonun meydana geldiğini gösteren tepe şeklindeki CV'ye aşamalı olarak hareket eder. Elektrot boyutu büyüdüğünde kimyasal türün etkileşebileceği yüzeyin arttığı ve konveksiyon ile difüzyondan kaynaklı tür bulutlarının üst üste gelerek daha yoğun madde taşınımının oluştuğu düşünülerek açıklanabilir.

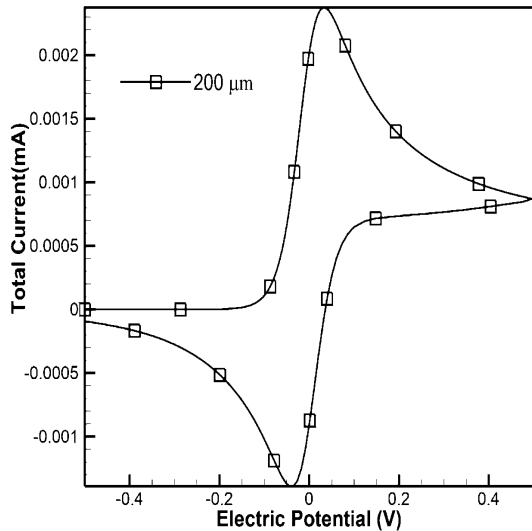


Şekil 8. Debi değeri 200  $\mu\text{l}/\text{dk}$  olan laminar akış koşulu altında 1mMol glukoz için CV grafiği

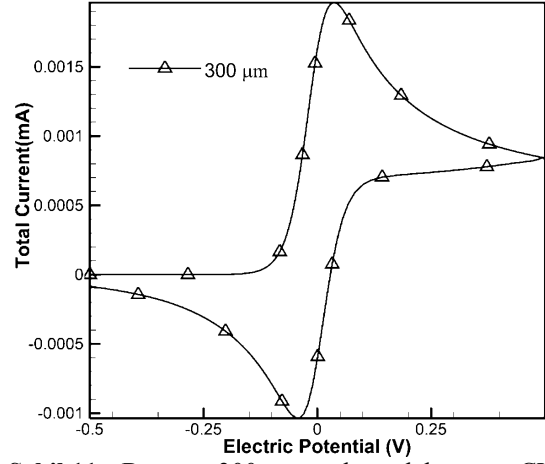
Bu tür bir üst üste bindirme, sonsuz büyük bir düzlemsel elektrodun sınır koşuluna yaklaşan elektrot yüzeyine neredeyse dikey olarak madde taşınımının oluşmasına olanak verir. Madde taşınımının artması doğal olarak sensörden elde edilen akımın artmasına da sebep olmuştur. Ayrıca, pozitif ve negatif tepe noktalarındaki akım değerlerine daha hızlı bir şekilde ulaşılmasına sebep olmuştur.



Şekil 9. Boyutu 100 µm olan elektrotun CV grafiği



Şekil 10. Boyutu 200 µm olan elektrotun CV grafiği



Şekil 11. Boyutu 300 µm olan elektrotun CV grafiği

## 5. SONUÇLAR

Elektrokimyasal biyosensörler birçok hastalığın teşhis, tedavi ve takibinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada mikrokanala entegre bir elektrokimyasal biyosensörden alınan sonuçların hızlı, doğru ve az maliyetli olarak eldesi amaçlanmıştır. Öncelikle tasarlanan mikrokanal içerisinde akışkan akışı olmadan analiz yapılmış ardından basınç tahrikli laminer akış ile çalışmaya devam edilmiştir. Glukoz konsantrasyonu, elektrot boyutu ve debi değiştirilerek çevrimsel voltammetride kullanılan potansiyel-akım değişimleri simülasyonlar aracılığı ile çizdirilmiştir. Elde edilen simülasyonlar, laminer akış debisinin artmasının biyosensörün etkinliğini arttırdığını göstermektedir. Ayrıca, glukoz konsantrasyonunun artmasıyla sensörün etkinliğinin arttığı ve fakat belirli bir konsantrasyon değerinden itibaren tipik çevrimsel voltammetri grafiğinin bozulduğu görülmektedir. Elektrot uzunluğunun artması da laminer akış koşulları altında çalışan biyosensörün algılama etkinliğini arttırmıştır.

## 6. TEŞEKKÜR

Yazarlar çalışmaya verdiği desteklerden dolayı Öğr. Gör. Mehmet Melih TATLISÖZ'e teşekkür ederler.

## 7. KAYNAKLAR

1. Castillo, J., Gáspár, S., Leth, S., Niculescu, M., Mortari, A., Bontidean, I., Soukharev, V., Dorneanu, S.A., Ryabov, A.D., Csöregi, E., 2004. Biosensors for Life Quality: Design, Development and Applications, Sensors and Actuators B: Chemical, 102, 179-194.
2. Asav, E., Akyilmaz, E., 2009. Preparation and Optimization of a Bienzymic Biosensor Based on Self-Assembled Monolayer Modified Gold Electrode for Alcohol and Glucose Detection, Biosensors & Bioelectronics, 25, 1014-1018.
3. Altug, C., Mengulluoglu, U., Kurt, E., Kaya, S., Dinckaya, E., 2011. A Novel Biosensor Based on Glucose Oxidase for Activity Determination of Alpha-Amylase, Artif. Cells Blood Substit Immobil. Biotechnol., 39, 298-303.
4. De Salvo, D.J., Ly, T.T., Wadwa, R.P., Messer, L., Westfall, E., Gopisetty, D., Hanes, S., von Eyben, R., Maahs, D.M., Buckingham, B.A., 2016. Continuous Glucose Sensor Survival and Accuracy Over 14 Consecutive Days, Diabetes Care, 39, 112-113.
5. Meral, B., Öcal, C., Özbek, F., Öney, R.G., 2006. Kimya Mühendisliğine Giriş, Üçüncü Baskı. Ankara: Ankara Üniversitesi, 30-35.
6. Bagio, L., 2018. Finite Element Modeling of Electrochemical Biosensors, Doctoral Dissertation, California State University, Northridge, 50.
7. Chevion, S., Hofmann, M., Ziegler, R., Chevion, M., Nawroth, P.P., 1997. The Antioxidant Properties of Thiocetic Acid: Characterization by Cyclic Voltammetry, Biochem. Mol. Biol. Int., 41, 317-327.
8. Chevion, S., Roberts, M.A., Chevion, M., 2000. The Use of Cyclic Voltammetry for the Evaluation of Antioxidant Capacity, Free Radical Biol. Med., 28, 860-870.
9. Grieshaber, D., MacKenzie, R., Voros, J., Reimhult, E., 2008. Electrochemical Biosensors - Sensor Principles and Architectures, Sensors, 8, 1400-1458.
10. Adesokan, B.J., Quan, X., Evgrafov, A., Heiskanen, A., Boisen, A., Sorensen, M.P., 2016. Experimentation and Numerical Modeling of Cyclic Voltammetry for Electrochemical Micro-Sized Sensors Under the Influence of Electrolyte Flow, Journal of Electroanalytical Chemistry, 763, 141-148.
11. Orlik, M., 2005. An Improved Algorithm for the Numerical Simulation of Cyclic Voltammetric Curves Affected by the Ohmic Potential Drops and its Application to the Kinetics of Bis (Biphenyl) Chromium (I) Electroreduction, J. Electroanal. Chem., 575, 281-286.
12. Deng, Z., Lin, X., 1999. Digital Simulation of Fast Cyclic Voltammogram by Integration of the Double Layer Charging Current, J. Electroanal. Chem., 464, 215-221.
13. Cho, H., Kim, T., Yoon, D., 2011. A Study on the Computational Simulation of Cyclic Voltammetry using Semi-Infinite Diffusion Model, J. Korean Electrochem. Soc., 14, 138-144.
14. Adesokan, B.J., Quan, X., Evgrafov, A., Heiskanen, A., Boisen, A., Sorensen, M.P., 2015. Hydrodynamics Studies of Cyclic Voltammetry for Electrochemical Micro Biosensors, J. Phys. Conf. Ser., 574, 12008.
15. Bidwell, M.J., Alden, J.A., Compton, R.G., 1996. Hydrodynamic Voltammetry with Channel Microband Electrodes: The Simulation of Voltammetric Waveshapes, J. Electroanal. Chem., 417, 119-128.

## Energy Management Practices for Improving Energy Efficiency in Industries: Furnace, Steam Boiler, HVAC, and Cooling Systems

Hacer AKHAN <sup>\*1</sup> ORCID 0000-0002-7896-6441

<sup>1</sup>Trakya University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Edirne, Türkiye

Geliş tarihi: 01.03.2023 Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: AKHAN, H., (2023). Energy Management Practices for Improving Energy Efficiency in Industries: Furnace, Steam Boiler, HVAC, and Cooling Systems. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(1), 195-210.

### Abstract

The aim of this study is to demonstrate and analyse energy management practices to increase energy efficiency in industries. In the study, examples of energy efficiency increasing applications that can be carried out in industrial organizations were discussed and the amount of savings for these applications was calculated. The main energy efficiency applications discussed in the study are the heat recovery in boilers and furnaces, thermal insulation, and heat recovery in HVAC systems. As a result of this study, with energy management and energy efficiency applications, 38.2% of heat recovery and 15.79% of fuel savings were achieved when recuperators were used in the furnace. While the boiler thermal efficiency was 64.46% when the recuperator was not used, the boiler thermal efficiency increased to 76.54% when the recuperator was used. In HVAC systems, heat recovery was achieved with 47% efficiency with the recuperator, heat exchanger with 51% efficiency and 1.09 COP in heat pump. In cooling applications, 30.4 % energy saving was achieved in the insulated room.

**Keywords:** Energy management, Energy efficiency, Energy saving, Energy efficiency improvement project

### Sanayide Enerji Verimliliğini Arttırıcı Enerji Yönetimi Uygulamaları: Fırın, Kazan HVAC ve Soğutma Sistemlerinde

#### Öz

Bu çalışmanın amacı, endüstrilerde enerji verimliliğini arttırmaya yönelik enerji yönetimi uygulamalarını göstermek ve analiz etmektir. Çalışmada, endüstriyel kuruluşlarda gerçekleştirilebilecek enerji verimliliği artırıcı uygulamalarının örnekleri ele alınmış, bu uygulamalar için tasarruf miktarı hesaplanmıştır. Çalışmada ele alınan başlıca enerji verimliliği uygulamaları: kazanlarda ve fırınlarda ısı geri kazanımı, ısı yalıtımı ve HVAC sistemlerinde ısı geri kazanımıdır. Bu çalışmanın sonucunda enerji yönetimi ve enerji verimliliği uygulamaları ile fırınlarda reküperatör kullanıldığında %38,2 oranında ısı geri kazanımı, %15,79 oranında yakıt tasarrufu sağlanmıştır. Reküperatör kullanılmadığında kazan ısı verimi %64,46 iken, reküperatör kullanıldığında kazan ısı verimi %76,54 'e yükselmiştir. HVAC sistemlerinde

---

\*Corresponding author: Hacer AKHAN, [hacera@trakya.edu.tr](mailto:hacera@trakya.edu.tr)

reküperatör ile %47 verimle, ısı değiştiricisi %51 verimle ve ısı pompasında 1,09 COP ile ısı geri kazanımı sağlanmıştır. Soğutma uygulamalarında, yalıtımlı odada %30,4 enerji tasarrufu sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji yönetimi, Enerji verimliliği, Enerji tasarrufu, Enerji verimliliği arttırıcı proje

## 1. INTRODUCTION

With population growth, urban development and industrialization, the world's primary energy consumption is also increasing. Population growth is one of the main factors that cause energy consumption to increase. Projections show that the world population will rise to 9 billion in 2040. This situation demonstrates the need to provide additional energy supplies for 1.9 billion people. While the world's total energy supply in 2035 should be 18.676 Mtoe according to current policies, it is estimated to be 17.197 Mtoe with a decrease of 8%, according to the new policies scenario. The total primary energy supply of the world, which was 8.779 Mtoe in 1990, increased by 45% after the last 20 years and reached 12.730 Mtoe in 2010. According to the Current Policies, world primary energy supply is estimated to increase by 47% to 18.676 Mtoe in 2035 compared to 2010, and according to the New Policies Scenario, the world's total primary energy supply will increase by 35% to 17.197 Mtoe. It is expected that the amount of energy used for electricity generation will increase by 70%, with an annual average of 2%, until 2040, and this increase corresponds to 42% of the global primary energy growth rate [1]. An increase of 81% is expected in the primary energy consumption used in industry, which constitutes 50% of the world primary energy growth rate. At this point, increasing efficiency and energy saving with energy management in the industry are gaining more and more importance day by day.

Energy management is a process of optimizing energy consumption; it is multidisciplinary in nature, combining the skills of architecture, engineering, management, finance, and others to carry out the required management functions [2]. Energy management includes training, energy audit, measurement, monitoring, planning, and

implementation activities carried out to ensure efficient and economical use of energy resources and energy. Energy saving is the reduction of energy consumption using new technologies, without reducing production, quality, and performance, without hindering social welfare. Energy efficiency is the highest efficiency evaluation of energy resources at all stages from generation to transmission-distribution and consumption. Energy efficiency is the reduction of energy consumption per unit service or product amount without causing a decrease in the standard of living and service quality in buildings, and production quality and quantity in industrial enterprises. The aim of energy efficiency is to increase efficiency in the use of energy resources and energy to use energy effectively, to prevent waste, to alleviate the burden of energy costs on the economy and to protect the environment. The main goal is to reduce the energy consumed per unit of national income. Its vision is to be a country that transforms all its energy into benefits, to be among the countries with low per capita energy consumption and energy intensity.

The energy consumed in the world; 40% is spent on buildings, 32% in transportation and 28% in industry [3]. At this point, efficient use of energy and energy saving in industry are gaining more and more importance day by day. In the industrial facilities, it is ensured that the necessary measures are implemented to eliminate energy wastes, losses and inefficiencies, and that electricity generation systems based on renewable energy sources or cogeneration systems with a total cycle efficiency of at least eighty percent or more are established within a maximum distance of ten kilometres to meet some of the energy needs of industrial facilities. Energy efficiency improvement precautions covers the architectural design, thermal insulation, heat recovery, mechanical installation, oven, boiler, steam systems, drying systems, fan, and pump, compressed air systems,



lighting, compensation, heating-cooling-ventilation, automation, lighting, electrical systems, electrical devices, engines, and minimum performance criteria. Main applications that ensure the efficient use of energy with energy management applications in the industry: demand side management, increasing efficiency in production, transmission, distribution facilities and outdoor lighting, rehabilitation of thermal power plants and benefiting from waste heat, encouraging the use of alternative fuels, increasing the use of renewable energy sources, reducing energy intensity, using fuels with low CO<sub>2</sub> emissions, improving fuel quality, diversifying resources in energy production, and improving fuel quality.

The concept of energy management was first used by a British scientist after the Second World War. It was mainly used for buildings. After the 1973 oil crisis, this concept began to be used in industry as well [4]. The gap between the actual level of energy efficiency and what theoretically could be reached is referred to as the energy efficiency gap by Hirst and Brown [5]. Bunse et al. [6] have defined energy management in the production area as activities including control, monitoring, and improvement of energy efficiency. Making a relation between both concepts, the International Energy Agency [7, 8] has defined: "Energy management involves the systematic tracking, analysis and planning of energy use. Energy management systems include energy management activities, practices and processes". Thollander and Palm [9] have stated: "Energy management can be defined as the procedures by which a company works strategically on energy, while an energy management system is a tool for implementing these procedures". In the literature review, Schulze et al. [10] have identified that energy management comprises "strategy/planning, implementation/operation, controlling, organization and culture". Energy management: it is a whole formed by functions that can be ineffective when they are independent of each other, such as planning, coordination, and control, come together. Energy Management in Industry is a structured and organized disciplined work in line with the efficient use of energy without sacrificing product

quality, safety or environmental conditions and reducing production.

Different countries in the world addressed the problem of lack of energy efficiency measures and conducted several types of research in the energy management field [11]. For example, previous studies from China [12], United States of America [13], Ethiopia [14], Thailand [15] and Turkey [16] explored the potential of energy efficiency in cement industry from the different perspective. Hasan et al. investigated two prior research [17] on the prospect of energy efficiency in the industry of Bangladesh. Andersson and Thollander [18] studied the current level of implementation and operationalization of energy-related key performance indicators in the Swedish pulp and paper industry.

The literature presents studies on energy behaviour [19] and on environmental behaviour [20] in organizations. These studies emerge from the behavioural theory in organizations. In an organizational structure, a management team is important to lead the operations of the company [21]. Sola and Mota [22] analysed the influencing factors on energy management in industries from these perspectives. A study developed by Martin et al. [23] shows that better energy efficiency and productivity are strongly associated to management practices. The market also influences the adoption of environment management system (ISO 14001), according to a study developed by Neves et al. [24]. Competitive advantage is an external motive to implement ISO 50001 in organizations Marimon and Casadesús [25]. Energy management activities within an industrial company are comprised of several components, of which one is controlling energy end-use [26]. The controlling elements of energy management include data collection and monitoring, benchmarking energy performance, and performance evaluation.

In this study, energy efficiency analysis in industry was carried out with controlled experiments carried out in the Energy Efficiency Test

Laboratory of the Ministry of Energy and Natural Resources of the Republic of Turkey, Department of Energy Efficiency and Environment. While determining the experimental conditions in the applications, the real working and operating conditions in the industry were considered. What is meant by experimental study is the controlled experiments carried out in the real size and capacity test units in the laboratory where the real working and operating conditions in the industry are met. Energy efficiency-improvement practices have been used in experimental setups designed for training in boilers, furnaces, heat recovery in HVAC systems, and insulation in the cooling process. Efficiency and energy saving values were calculated for each system using the measurement data obtained from the experiments. The aim of this study is to demonstrate energy management applications used to increase energy efficiency in industries and to determine the energy savings of each system by analysing the data of the experimental studies. The contribution of this study to the literature is to emphasize that under which conditions the energy efficiency of boilers, furnaces, HVAC systems, and cooling systems can be maximized, and energy savings can be achieved by minimizing energy consumption, by considering the real working and operating conditions in the industry and applying these conditions in laboratory test units. Since constant working conditions are required in order not to impair the quality of the process in factories, it is inconvenient to conduct experiments in such variable conditions in real practice in an industrial establishment.

## 2. METHODOLOGY

### 2.1. Experimental Test Units

#### *Combustion furnace experimental test unit*

The combustion furnace test unit is shown in Figure 1. The internal volume of the furnace is 3 m<sup>3</sup>. The furnace is insulated with ceramic fiber material. When the oven is operating, the outer

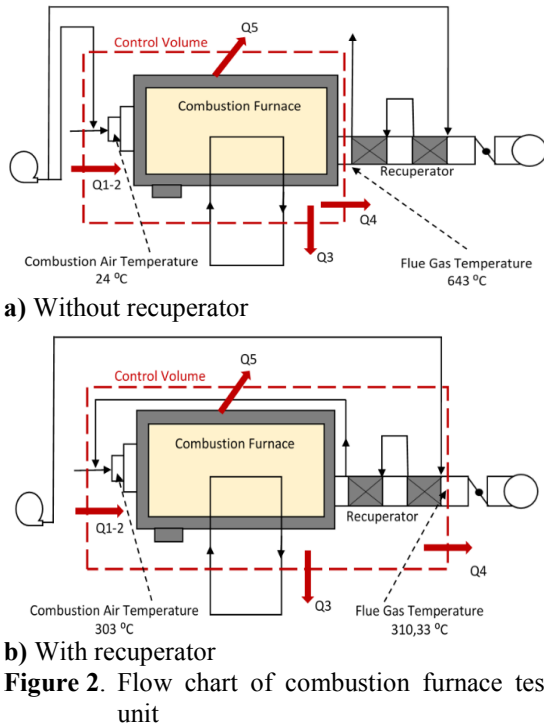
surface temperature is close to the ambient temperature. While the ambient temperature is 23.2 °C, the average temperature of the furnace surface is 31.8 °C. It is possible to increase the furnace operating temperature up to 1000 °C. In the experiments, the furnace indoor temperature was set as 700 °C. Natural gas is used as fuel in the furnace. The most important loss in the furnace is the heat loss with the flue gas. Figure 2 shows the flow chart of combustion furnace test unit.

In order to ensure real ambient conditions in a furnace designed for educational purposes, the energy that should be transferred to the product in normal applications is transferred to the water with 6 m<sup>3</sup>/h fixed flow rate water pipes placed inside the furnace. The reason for using high flow rate water is to prevent the water from evaporating. The amount of useful energy that should be transferred to the product is calculated by using the water mass the inlet and outlet temperature difference of the water. If the pressure inside the furnace is less than the outdoor pressure ( $P_{\text{furnace}} > P_{\text{environment}}$ ), the hot gases inside will come out through various openings and cause energy loss. To prevent this, a damper is placed in the chimney. By adjusting this damper, the appropriate pressure value is adjusted.

The chimney of the furnace is designed as recuperator to make heat recovery. The heat in the flue gas is transferred to the combustion air by means of two intertwined pipes in the recuperator, and efficiency is increased by heat recovery. Savings are achieved by not using as much fuel as the equivalent of this recovered energy.



**Figure 1.** Combustion furnace test unit



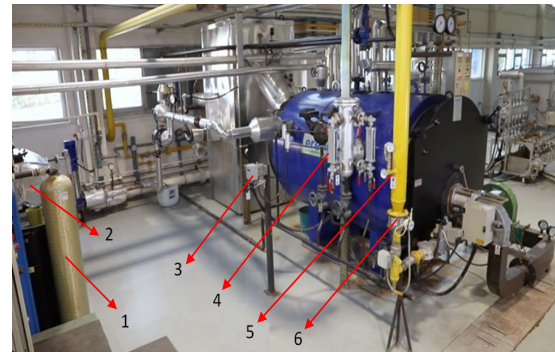
**Figure 2.** Flow chart of combustion furnace test unit

Energy inputs and outputs to the control volume in Figure 7:  $Q_{1-2}$  is the energy entering the furnace.  $Q_3$  is the heat transfer to process water (useful energy).  $Q_4$  is the flue gas heat,  $Q_5$  is the heat loss from the surface.  $Q_6$  is the other heat loss.

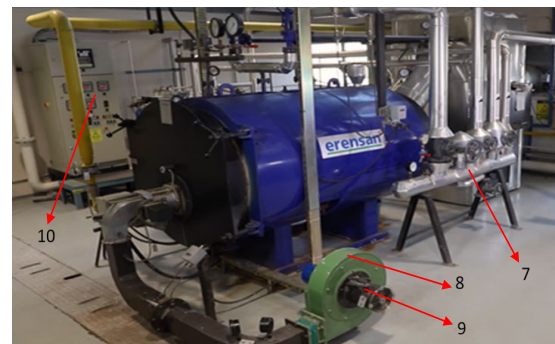
*Steam boiler experimental test unit*

The steam boiler can produce steam at a mass flow rate of 1000 kg/h per hour and at 6 bar pressures. The water taken from the mains in the steam boiler is not given directly to the boiler. In order to get the hardness of the water, it is passed through the water softening system. The water whose hardness is removed is stored in the feed water tank, and when needed in the boiler, it is sent to the boiler by the feed water pump. The water is evaporated until it reaches 6 bar pressures with the heat released by the combustion of natural gas in the boiler. System elements are seen in the Figure 3 and Figure 4. In Figure 3, 1 is the water softening system, 2 is the feed water tank, 3 is the difference pressure transmitter, 4 is the water level indicator, 5 is the natural gas pressure measurement, 6 is the natural

gas meter. In Figure 4, 7 is the economizer, 8 is the combustion air fan, 9 is the combustion air fan flap, 10 is the measuring and control board. Natural gas is used as fuel. The proportional burner regulates the amount of fuel.



**Figure 3.** Steam boiler test unit (left side view)



**Figure 4.** Steam boiler test unit (right side view)

*Heat recovery systems in HVAC experimental test unit*

In HVAC experimental facility, plate heat exchanger (recuperator), water heat exchanger and heat pump heat recovery methods were applied separately. It is provided to transfer the heat from the exhaust air of the HVAC system to another system and to recycle the heat in different ways. Thus, the heat obtained is transferred to another system in a controlled manner. Figure 5 and Figure 6 show HVAC test unit. In Figure 5, 1 is the recuperator, 2 is the heat exchanger, 3 is the heat pump (hot) (Condenser), 4 is the heat pump (cold) (Evaporator) and 5 is the heat wheel (Regenerator), 6 is the fan (Frequency drive

controlled). In Figure 6, 7 is the heater, 8 is the damper, 9 is the compressor, 10 is the valve, 11 is the by-pass valve and 12 is the pump.

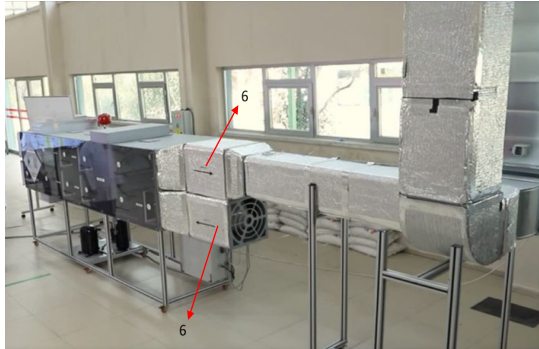


Figure 5.a. HVAC test unit

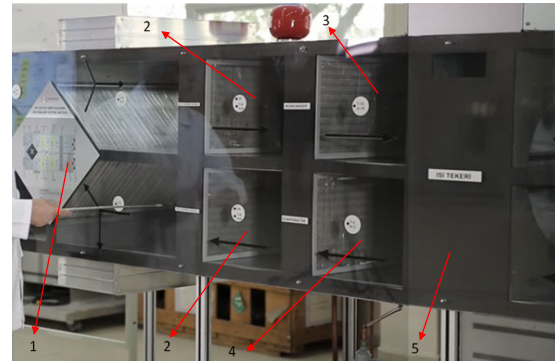


Figure 5.b. HVAC test unit

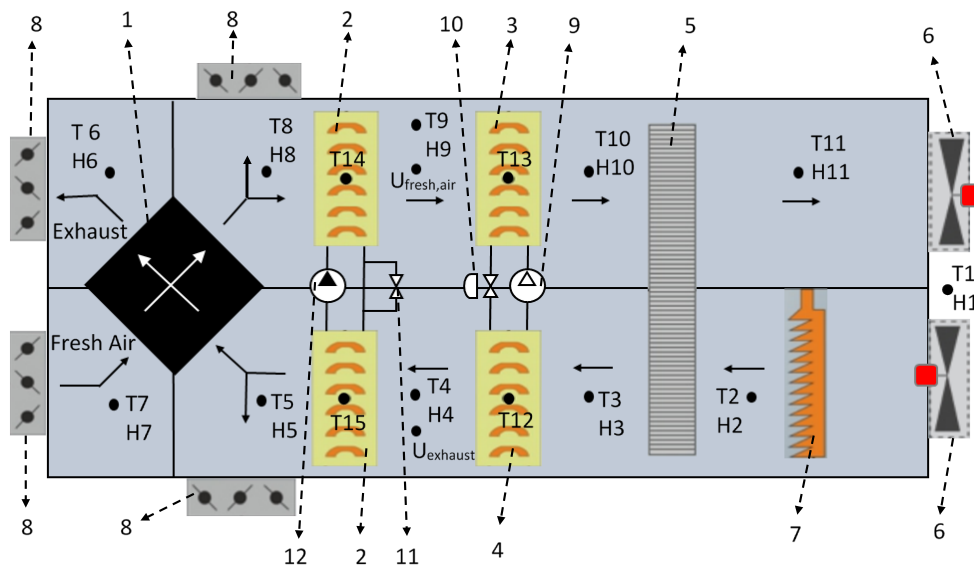


Figure 6. Flow chart of HVAC test unit

Since the experimental installation simulates a heat recovery unit operating in winter, the air sucked in by the fan is heated with a resistance to simulate the hot air indoor. The sucked air represents the polluted exhaust air in the indoor.

Automatic air flow control was carried out with 4 different dampers in the experimental installation. During the experiments, (T) dry bulb temperatures, (H) relative humidity, (U) air velocity and electrical data were measured digitally.

*Experimental test unit of thermal insulation in cooling application*

The energy savings provided by thermal insulation in cooling applications have been examined. In the controlled experiments in the cooling system designed for educational purposes, the efficiency increases in the insulated room compared to the uninsulated island was calculated by determining how many times the compressor stopped in a 60-minute period, how long the active cooling was

made and the total energy consumption of the system. The heat gains in the insulated and uninsulated room were determined separately.

With the automation system, the indoor temperature of the cooling room was adjusted to 10 °C, allowing the cooling system to operate for 60 minutes. When the compressor was turned off, the energy consumed because of the experiment, the electrical data of the evaporator (active power, reactive power, apparent power), the outer surface temperatures of the insulated and uninsulated cooling rooms, the inner surface temperatures and the indoor temperatures were measured. What needs to be considered while performing the cooling test is to determine how long the compressor is in operation and how long it does not work.

Figure 7 shows the cooling application test unit and system components. There are two rooms, insulated and non-insulated, in the experimental installation. With the cooling system, the indoor temperatures of both rooms were cooled to 10°. Measurements were made by adjusting the room indoor setting set temperature from the measurement and control panel. The heat gains in the two rooms were determined separately and compared in terms of efficiency. Heat gains are one of the most important factors affecting the cooling load. The heat gains from the walls of the

cold room increase the cooling load. Figure 13 shows the schematic picture of the test installation, the temperature and pressure measurement points. In Figure 7 and Figure8, 1 is the compressor, 2 is the condenser, 3 is the liquid tank, 4 is the filter holder, 5 is the flowmeter, 6 is the expansion valve, 7 is the evaporator, 8 is the insulated Room, 9 is the measurement and control panel and 10 is the uninsulated room. Table 1 show the measuring points of cooling system test unit.

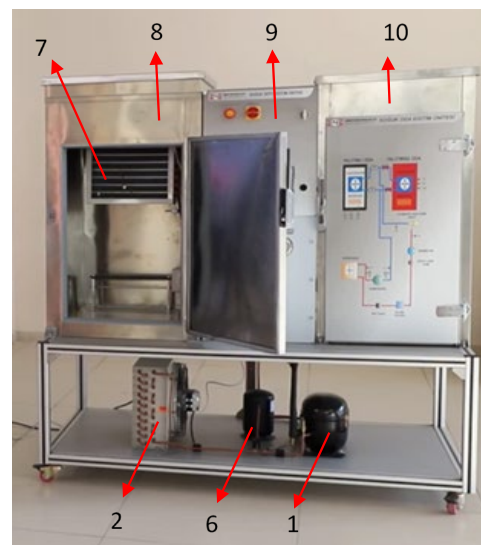


Figure 7. Cooling system test unit

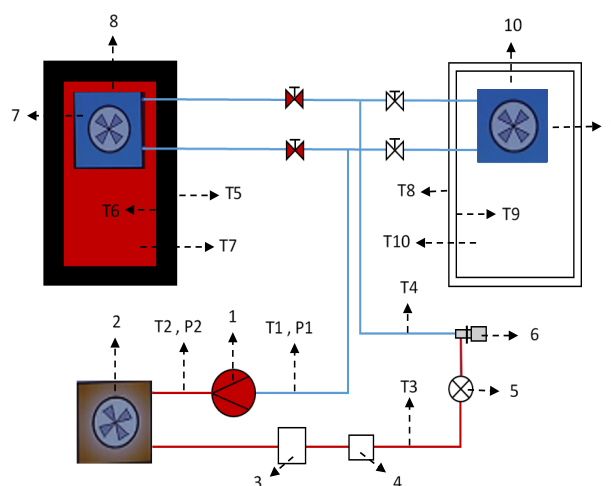


Figure 8. Flow chart of cooling system test unit

**Table 1.** Measuring points of cooling system test unit

Measuring point		Measuring point	
T1	Pump inlet temperature	T7	Insulated room indoor temperature
T2	Condenser inlet temperature	T8	Non-insulated room outer surface temperature
T3	Expansion valve inlet temperature	T9	Non-insulated room interior surface temperature
T4	Evaporator inlet temperature	T10	Non-insulated room interior
T5	Insulated room outer surface temperature	P1	Compressor inlet pressure
T6	Insulated room inner surface temperature	P2	Compressor outlet pressure

### 3. EXPERIMENTAL STUDIES, RESULTS, AND DISCUSSION

#### *Combustion furnace experiment*

Savings are made by transferring the recovered heat to the combustion air or by using the energy in a different part of the enterprise by pre-drying the product by heat recovery in the furnace. Sustainable increase in efficiency is ensured.

Waste heat is taken from the hot flue gas with the recuperator and transferred to the combustion air. Fuel will not be used as much as the equivalent of the recovered energy and energy savings are

achieved. In the experiments, 2 different test conditions in Table 2 were made to use the combustion furnace efficiently.

**Table 2.** Experimental variations in combustion furnace test unit

Experiment	Recuperator
1	Without recuperator
2	With recuperator

In each experiment, 3 measurements were made at 15-minute intervals. The reason for taking three values is to minimize reading errors. Table 3 shows the combustion furnace test parameters.

**Table 3.** Combustion furnace test parameters

	Without recuperator	With recuperator
Relative humidity (%)	31.2	26.2
Ambient temperature (°C)	23.2	25.6
Furnace temperature (°C)	715.33	713.33
Furnace pressure (mm SS)	-3.2	-2.53
Combustion air temperature in burner (°C)	24	303
Gas temperature at the chimney entrance (°C)	278.33	244.33
Fuel	Natural gas	Natural gas
Fuel flow rate (instantaneous) (m <sup>3</sup> /h)	8.8	7
Excess air coefficient	1.1	1.1
Combustion air flow rate (m <sup>3</sup> /h)	50	69.3
Process water flow rate (m <sup>3</sup> /h)	6	6
Process water temperature (°C)	8 (inlet) – 15 (outlet)	7.33 (inlet) – 14.33 (outlet)
Flue gas components (%)	0.216 (CO)	0.282 (CO)
	10.08 (CO <sub>2</sub> )	10.18 (CO <sub>2</sub> )
	5 (O <sub>2</sub> )	4.87 (O <sub>2</sub> )



Figure 9 shows the energy inputs and outputs to the combustion furnace.  $Q_{1-2}$  is energy entering the furnace,  $Q_3$  is the (useful energy) heat transfer to process water,  $Q_4$  is the flue gas heat,  $Q_5$  is the

heat loss from the surface and  $Q_6$  is the other heat loss. Figure 10 shows the combustion furnace energy output.

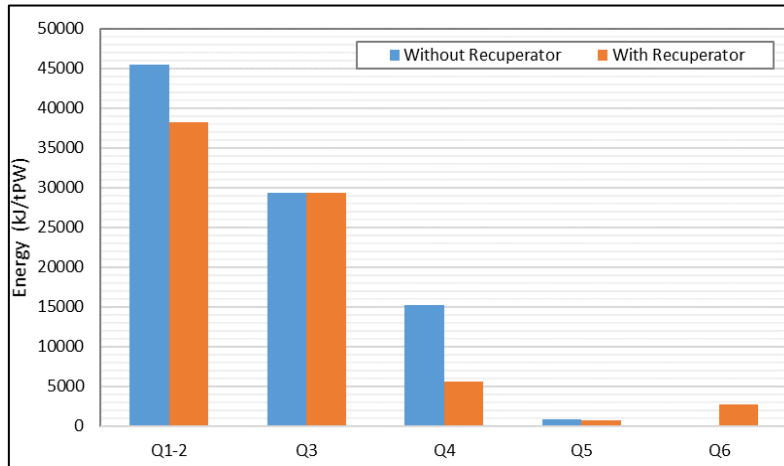


Figure 9. Energy inputs and outputs to the combustion furnace

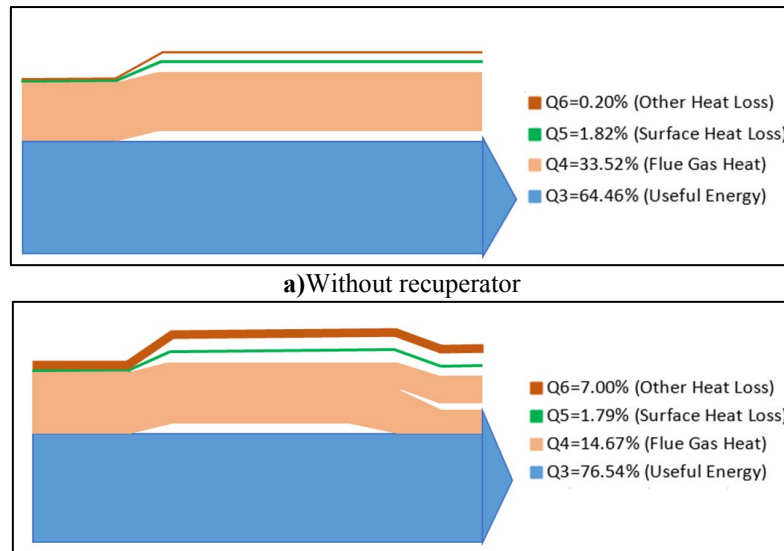
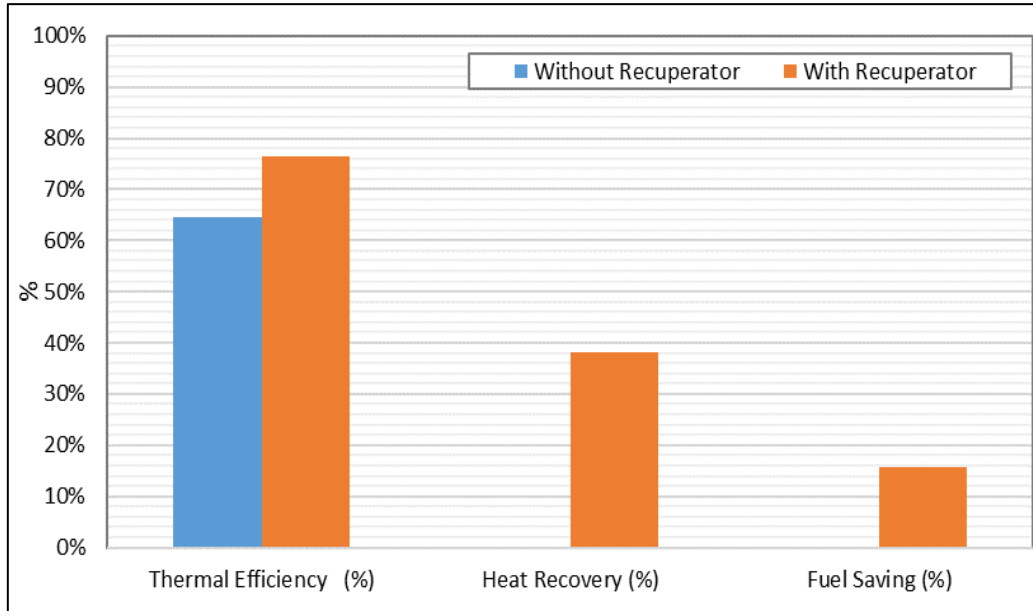


Figure 10. Sankey Chart of combustion furnace energy output

Figure 11 shows the thermal efficiency, heat recovery and fuel saving for furnace with and without recuperator. When heat is recovered from the flue gas with the recuperator, the natural gas consumption decreased to 6.4 Sm<sup>3</sup>/h. When the recuperator is used, 1.2 Sm<sup>3</sup>/h fuel savings, 38.2%

heat recovery and 15.79% fuel savings are achieved. While the boiler thermal efficiency was 64.46% when the recuperator was not used, the boiler thermal efficiency increased to 76.54% when the recuperator was used, and 4803.62 kJ/t PS energy was recovered from the chimney.



**Figure 11.** Thermal efficiency, heat recovery and fuel saving for furnace with and without recuperator

*Steam boiler test*

To increase the boiler efficiency, it is necessary to optimize the air-fuel mixture ratio, reduce the flue gas losses and the heat lost from the surface by convection and radiation. Efficiency calculations have also been made in the steam boiler in the experiments. The boiler operating with natural gas was operated with insufficient air, optimum air and excess air, and analysis was made using the measurement data in the experiments. Two measurements were made with an interval of 15 minutes for each experimental condition. Fuel flow rate, pressure and temperature entering the boiler, air flow rate, steam pressure, produced steam index, flue gas temperature, flue gas temperature after economizer, ambient temperature, boiler surface temperatures, conductivity degree of water

entering the boiler, O<sub>2</sub> and CO measurements were made.

Boiler efficiency was calculated using the loss calculation method. Since it is aimed to increase efficiency by determining and reducing losses, the loss method has been chosen. The total boiler efficiency can be easily calculated if the flue gas loss and the surface loss are known:

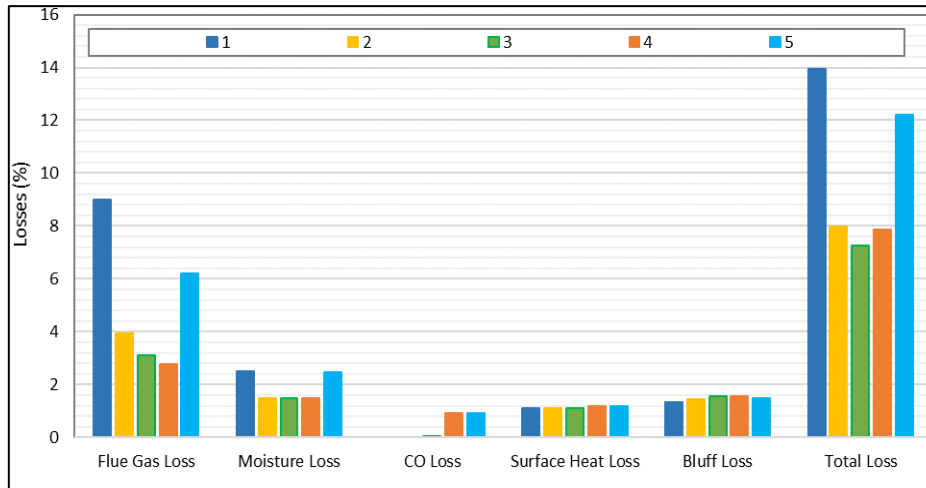
$$\text{Boiler efficiency (\%)} = 100 - (\text{flue gas loss}) - (\text{surface loss}) - (\text{bluff loss})$$

In the steam boiler experiments, measurements were made in 5 different experimental conditions described in the Table 4 to examine the efficient working conditions of the boilers. In Figure 12, the loss percentages in 5 different variations are given.

**Table 4.** Experimental variations in steam boiler test unit

Experiment	Economizer	Combustion Air
1	Without economizer	100% (Excess air)
2	With economizer	100% (Excess air)
3	With economizer	60% (Optimum air)
4	With economizer	40% (Insufficient air)
5	Without economizer	40% (Insufficient air)

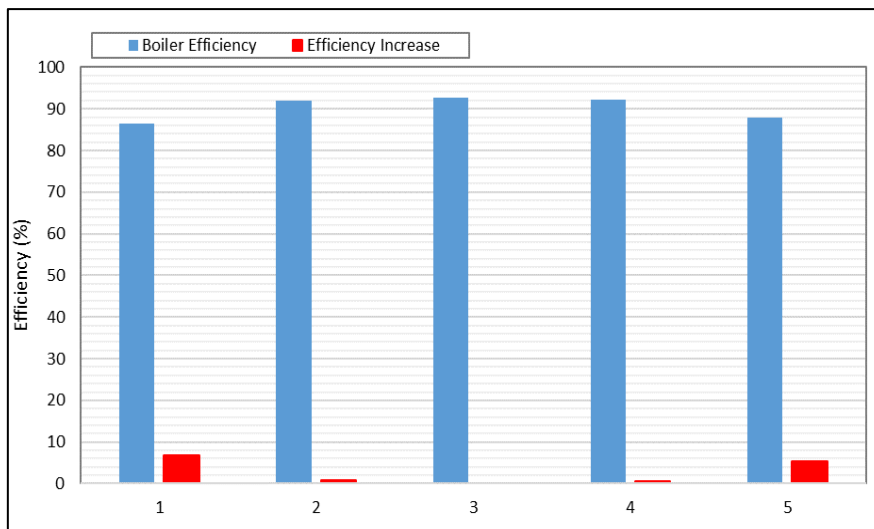




**Figure 12.** Steam boiler losses in the 5 different experiments

Figure 13 shows the steam boiler efficiency and efficiency increase in the 5 different experiments. With the economizer, the heat of the flue gas combustion air is transferred to the feed water or combustion air, thus saving is achieved. Efficiency increase is achieved by using optimum air and economizer in the 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup>, and 5<sup>th</sup> experimental

conditions and making improvements. The 3<sup>rd</sup> experiment was carried out under optimum conditions with the highest efficiency. The amount of fuel provided by heat recovery is determined by the product of fuel consumption and efficiency increase.



**Figure 13.** Steam boiler efficiency and efficiency increase in the 5 different experiments

Periodically controlling and modifying the air-fuel ratio in boilers is one of the easiest ways to increase efficiency. Most high temperature boilers use 10% to 20% excess air. If the amount of air is

too much or less than the theoretical amount, it will reduce the efficiency. The air-fuel ratio can be determined by measuring the flow rates or by analysing the exhaust gases [4].

Heat recovery experiment in HVAC system

In HVAC systems, the efficiency of three different systems that provide savings with heat recovery from the hot exhaust air evacuated from the indoor environment has been compared. In order to minimize the measurement errors that can be made in the experiments, three measurements were made for each system. In this study, the average of the calculated efficiencies for the measurement data obtained in three experiments is presented. In the experiments, 3 systems described in the Table 5 were used to provide heat recovery.

**Table 5.** Experimental variations in the heat recovery in HVAC systems test unit

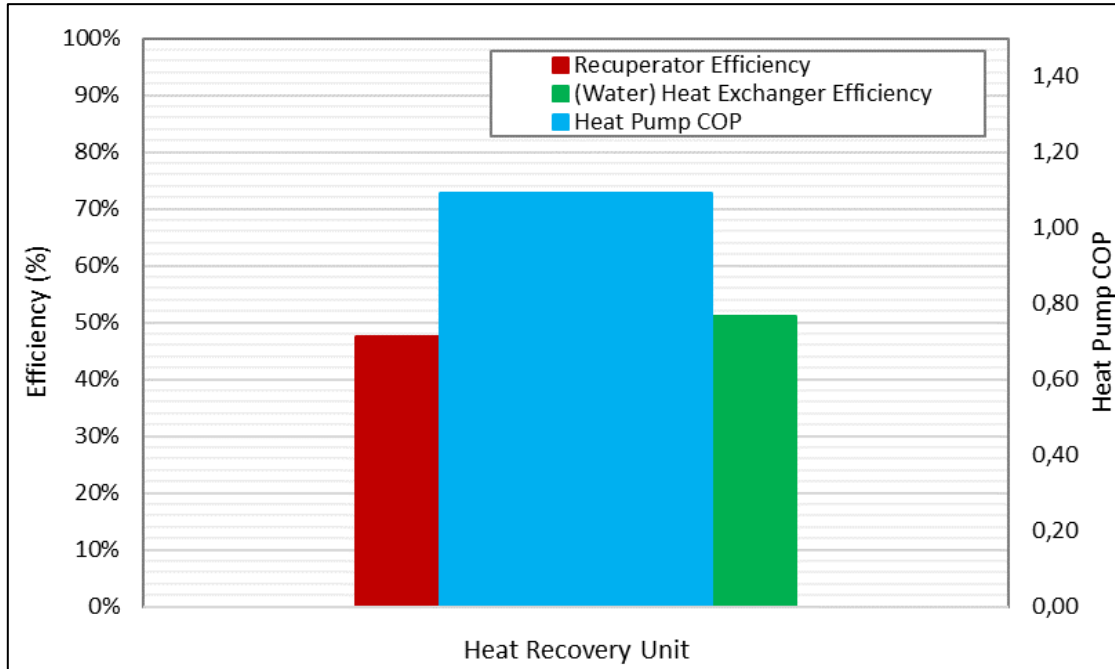
Experiment	Heat recovery unit
1	Recuperator
2	Heat exchanger
3	Heat pump

During the experiments, analysis was made by determining the control volume for each of the recuperator, water heat exchanger and heat pump heat recovery systems separately.

Figure 14 shows the heat recovery efficiencies in HVAC experiments for 3 different unit. In HVAC systems, heat recovery was achieved with 47% efficiency with the recuperator, 51% efficiency with the heat exchanger and 1.09 COP in the heat pump. In Table 6, the area, air velocity and flow rate, fresh air and exhaust air enthalpies, and heat transfer values in the experiments performed separately for 3 different heat recovery systems are given.

**Table 6.** Experimental parameters for 3 different heat recovery systems

Control Volume 1 (Recuperator)			
Fresh air		Exhaust	
Area [m <sup>2</sup> ]	0.231	Area [m <sup>2</sup> ]	0.231
Air velocity [m/sec]	0.7	Air velocity [m/sec]	0.8
Air density [kg/m <sup>3</sup> ]	1.292	Air density [kg/m <sup>3</sup> ]	1.292
Mass flow rate [kg/h]	682.136	Mass flow rate [kg/h]	748.5
h <sub>8</sub> [kJ/kg]	44.179	h <sub>5</sub> [kJ/kg]	56.702
h <sub>7</sub> [kJ/kg]	38.128	h <sub>6</sub> [kJ/kg]	45.078
Q <sub>8-7</sub> [kcal/h]	986.143	Q <sub>5-6</sub> [kcal/h]	2078.34
Control Volume 2 (Water - Heat changer)			
Fresh air		Exhaust	
Area [m <sup>2</sup> ]	0.231	Area [m <sup>2</sup> ]	0.231
Air velocity [m/sec]	0.8	Air velocity [m/sec]	0.9
Air density [kg/m <sup>3</sup> ]	1.173	Air density [kg/m <sup>3</sup> ]	1.292
Mass flow rate [kg/h]	780.88	Mass flow rate [kg/h]	843.138
h <sub>9</sub> [kJ/kg]	43.386	h <sub>4</sub> [kJ/kg]	59.291
h <sub>8</sub> [kJ/kg]	39.500	h <sub>5</sub> [kJ/kg]	52.535
Q <sub>8-9</sub> [kcal/h]	724.895	Q <sub>4-5</sub> [kcal/h]	1360.726
		Q <sub>dump</sub> [kcal/h]	60.2
Control Volume 3 (Heat pump)			
Fresh air		Exhaust	
Area [m <sup>2</sup> ]	0.231	Area [m <sup>2</sup> ]	0.231
Air velocity [m/sec]	0.8	Air velocity [m/sec]	0.8
Air density [kg/m <sup>3</sup> ]	1.196	Air density [kg/m <sup>3</sup> ]	1.1538
Mass flow rate [kg/h]	795.71	Mass flow rate [kg/h]	767.598
h <sub>10</sub> [kJ/kg]	46.691	h <sub>3</sub> [kJ/kg]	54.41
h <sub>9</sub> [kJ/kg]	36.832	h <sub>4</sub> [kJ/kg]	46.48
Q <sub>9-10</sub> [kcal/h]	1493.979	Q <sub>3-4</sub> [kcal/h]	336.015
		Q <sub>comp</sub> [kcal/h]	1034.58



**Figure 14.** Heat recovery efficiencies in HVAC experiments for 3 different unit

*Thermal insulation experiment in cooling system*

The energy savings provided by thermal insulation in cooling applications have been examined. In the controlled experiments in the cooling system designed for educational purposes, the efficiency increases in the insulated room compared to the uninsulated island was calculated by determining how many times the compressor stopped in a 60-minute period, how long the active cooling was made and the total energy consumption of the system. The heat gains in the insulated and uninsulated room were determined separately.

With the automation system, the indoor temperature of the cooling room was adjusted to 10 °C, allowing the cooling system to operate for 60 minutes. When the compressor was turned off, the energy consumed because of the experiment, the electrical data of the evaporator (active power, reactive power, apparent power), the outer surface temperatures of the insulated and uninsulated cooling rooms, the inner surface temperatures and the indoor temperatures were measured. What needs to be considered while performing the

cooling test is to determine how long the compressor is in operation and how long it does not work. In the experiments, measurements were made in 2 different experimental conditions described in the Table 7 to prove the importance of thermal insulation in cooling systems. Table 8 shows the cooling experimental unit parameters. Figure 15 shows the temperatures of insulated and uninsulated rooms in the cooling system. Table 9 shows the energy consumption and savings of insulated and uninsulated rooms in the cooling system.

**Table 7.** Experimental conditions in the thermal insulation test unit

Experiment	
1	Insulated room
2	Uninsulated room

An extra 0.176 kWh of energy was consumed for cooling in the uninsulated room. In the uninsulated room, 43.71% more energy was spent for the cooling process. 30.4% energy saving was achieved in the insulated room.

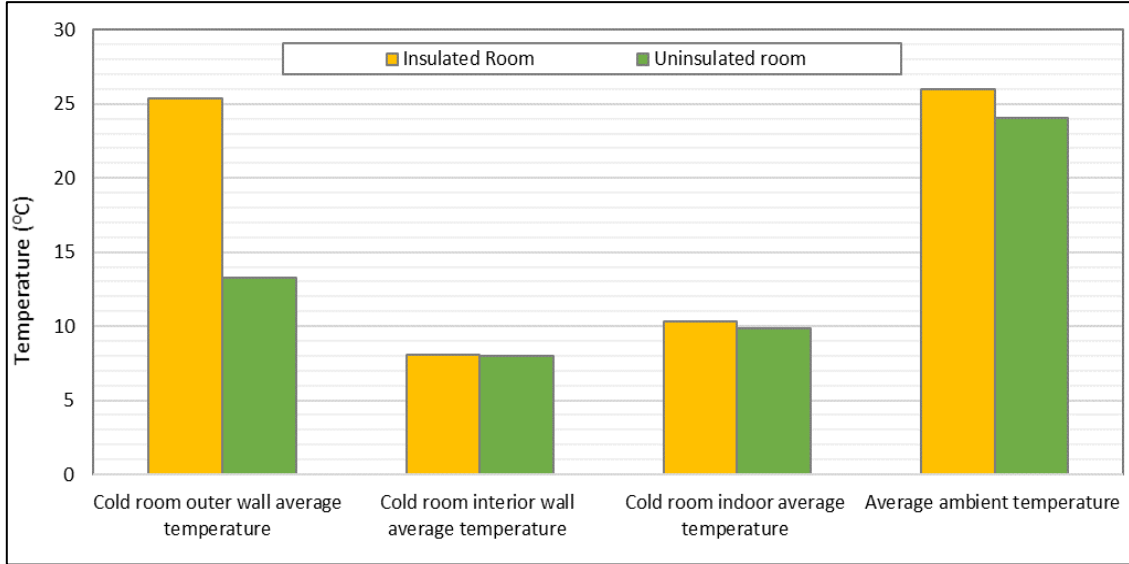


Figure 15. Temperatures of insulated and uninsulated rooms in the cooling system

Table 8. The cooling experimental unit parameters

	Insulated Room	Uninsulated Room
Set temperature (°C)	10	10
Compressor differential temperature (°C)	1	1
Experiment time (minutes)	60	60
Ambient temperature (average) (°C)	26.00	24.05
Surface material emissivity	0.16	0.16
Total wall surface area (m <sup>2</sup> )	1.50	1.50
Total ceiling surface area (m <sup>2</sup> )	0.25	0.25
U <sub>R</sub> three side surface (W/m <sup>2</sup> K)	0.967	0.901
U <sub>R</sub> ceiling (W/m <sup>2</sup> K)	0.967	0.901
U <sub>C</sub> three side surface (W/m <sup>2</sup> K)	1.276	1.496
U <sub>C</sub> ceiling (W/m <sup>2</sup> K)	2.626	3.078

Table 9. Energy consumption and savings of insulated and uninsulated rooms in the cooling system

	Insulated room	Uninsulated room
Insulated room total active energy (kWh)	0.403	0.579
Extra energy consumed (kWh)	-	0.176
Energy saving (%)	30.40	-

#### 4. CONCLUSIONS

Energy saving methods that can be applied in industrial facilities are scientifically proven practices. Thanks to energy management, undesirable emissions will decrease because of burning fewer fossil fuels and the effects of global warming caused by carbon emissions will decrease. In addition, energy saving, and efficiency will reduce the burden of new energy investments that countries must make and require very high investment.

The energy efficiency applications in the industry discussed in the study are the heat recovery in boilers and furnaces, thermal insulation, and heat recovery in HVAC systems to minimize the amount of energy consumed without reducing quality and performance. When the recuperator is used in combustion furnace, 1.2 Sm<sup>3</sup>/h fuel savings, 38.2% heat recovery and 15.79% fuel savings are achieved. While the boiler thermal efficiency was 64.46% when the recuperator was not used, the boiler thermal efficiency increased to 76.54% when the recuperator was used, and 4803.62 kJ/t PS energy was recovered from the chimney. With the economizer, the heat of the flue gas combustion air is transferred to the feed water or combustion air, thus saving is achieved in boiler. For a constant boiler heat output rate, every 1% increase in combustion efficiency means 1% fuel savings. The heat recovery efficiencies in HVAC experiments for 3 different unit. In HVAC systems, heat recovery was achieved with 47% efficiency with the recuperator, 51% efficiency with the heat exchanger and 1.09 COP in the heat pump. In the uninsulated room, 43.71% more energy was spent for the cooling process. 30.4% energy saving was achieved in the insulated room. The planned studies on energy management in the industry are to carry out an energy study in an operating factory and to determine the current situation in the factory, to increase the energy savings in the factory with efficiency improvement project applications and to save energy.

## 5. ACKNOWLEDGEMENT

In this paper, the data of training experiments conducted in the Energy Manager Training Laboratory of the Republic of Turkey Ministry of Energy and Natural Resources were used.

## 6. REFERENCES

1. AEO., 2018. Annual Energy Outlook 2018 with Projections to 2050. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2018.pdf>, 2018.
2. Lee, S., Teng, M., Fan, K., Yang, K., Horng, R. S., 2011. Application of an Energy Management System in Combination with FMCS to High Energy Consuming IT Industries of Taiwan. *Energy Conversion and Management*, 52, 3060-3070. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.031>
3. Hyman, B., Ozalp, N., Varbanov, P.S., Van, Fan, Y., 2019. Modelling Energy Flows in Industry: General Methodology to Develop Process Step Models. *Energy Conversion and Management*, 181, 528-543.
4. EML, Energy Management Lecture, "Republic of Turkey Ministry of Energy and Natural Resources.
5. Hirst, E., Brown, M., 2021. Closing the Efficiency Gap: Barriers to the Efficient Use of Energy. *Resour. Conserv. Recycl.*, 3 (4), 267-281.
6. Bunse, K., Vodicka, M., Schonsleben, P., Brühlhart, M., Ernst, F.O., 2011. Integrating € Energy Efficiency Performance in Production Management E Gap Analysis between Industrial Needs and Scientific Literature. *J. Clean. Prod.*, 19, 667-679. <http://doi:10.1016/j.jclepro.2010.11.011>.
7. France and the Institute for Industrial Productivity, 2012. IEA- International Energy Agency, Energy Management Programmes for Industry. OECD/IEA, Paris, Washington, USA.
8. IEA/OECD, 2018. IEA – International Energy Agency, Energy Efficiency, Analysis and Outlooks to 2040, Market Report Series.
9. Thollander, P., Palm, J., 2015. Industrial Energy Management Decision Making for Improved Energy Efficiency E Strategic System Perspectives and Situated Action in Combination. *Energies*, 8, 5694-5703. <https://doi.org/10.3390/en8065694>.
10. Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M., Thollander, P., 2016. Energy Management in Industry E a Systematic Review of Previous Findings and an Integrative Conceptual Framework. *J. Clean. Prod.*, 112, 3692-3708. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.060>.
11. Cagno, E., Worrell, E., Trianni, A., Pugliese, G., 2013. A Novel Approach for Barriers to Industrial Energy Efficiency. *Renew Sustain Energy Rev.*, 19, 290-308.

12. Zhang, S., Worrell, E., Crijns-Graus, W., 2015. Evaluating Co-Benefits of Energy Efficiency and Air Pollution Abatement in China's Cement Industry. *Appl Energy*, 147, 192-213.
13. Worrell, E., Bernstein, L., Roy, J., Price, L., Harnisch, J., 2009. Industrial Energy Efficiency and Climate Change Mitigation. *Energy Eff.*, 2, 109-123.
14. Tesema, G., Worrell, E., 2015. Energy Efficiency Improvement Potentials for the Cement Industry in Ethiopia. *Energy*, 93, 2042-2052.
15. Hasanbeigi, A., Menke, C., Therdyothin, A., 2011. Technical and Cost Assessment of Energy Efficiency Improvement and Greenhouse Gas Emission Reduction Potentials in Thai Cement Industry. *Energy Efficiency*, 4, 93-113.
16. Ates, S.A., Durakbasa, N.M., 2012. Evaluation of Corporate Energy Management Practices of Energy Intensive Industries in Turkey. *Energy*, 45, 81-91.
17. Hossain, S.R., Ahmed, I., Ferdous, S., Azad, A.S.M., Hasan, M., 2020. Empirical Investigation of Energy Management Practices in Cement Industries of Bangladesh. *Energy*, 212, 118741.
18. Andersson, E., Thollander, P., 2019. Key Performance Indicators for Energy Management in the Swedish Pulp and Paper Industry. *Energy Strategy Reviews*, 24, 229-235.
19. Andrews, R., Johnson, E., 2016. Energy Use, Behavioural Change, and Business Organizations: Reviewing Recent Findings and Proposing a Future Research Agenda. *Energy Res. Social Sci.*, 11, 195-208. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.09.001>.
20. Cheng, H., Hu, X., Zhou, R., 2019. How Firms Select Environmental Behaviours in China: The Framework of Environmental Motivations and Performance. *J. Clean. Off. Prod.*, 208(20), 132-141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.096>.
21. Tiller, S.R., 2012. Organizational Structure and Management Systems. *Leadersh. Manag. Eng.*, 2 (1), 20-23.
22. Sola, A.V.H., Mota, C.M.M., 2020. Influencing Factors on Energy Management in Industries. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119263.
23. Martin, R., Muûls, M., de Preux, L.B., Wagner, U.J., 2012. Anatomy of a Paradox: Management Practices, Organizational Structure, and Energy Efficiency. *Environ. Econ. Manag.*, 63, 208-223. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2011.08.003>.
24. Neves, F.O., Salgado, E.G., Beijo, L.A., 2017. Analysis of the Environmental Management System Based on ISO 14001 on the American Continent. *J. Environ. Manag.*, 199, 251-262. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.049>.
25. Marimon, F., Casadesús, M., 2017. Reasons to Adopt ISO 50001 Energy Management System. *Sustain. Times*, 9, 1740. <https://doi.org/10.3390/su9101740>.
26. Lozano, F.J., Lozano, R., Freire, P., Jimenez-Gonzalez, C., Sakao, T., Ortiz, M.G., 2018. New Perspectives for Green and Sustainable Chemistry and Engineering: Approaches from Sustainable Resource and Energy Use, Management, and Transformation. *J Clean Prod.*, 172, 227.

## Bir Konfeksiyon İşletmesinin Dikim Bölümünde İstatistiksel Proses Kontrol Tekniklerinin Uygulanması

Zehra KUMAŞ<sup>1</sup> ORCID 0000-0003-2210-0291

Pınar DURU BAYKAL<sup>\*1</sup> ORCID 0000-0003-1461-2203

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

Geliş tarihi: 02.01.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: KUMAŞ, Z., DURU BAYKAL, P., (2023). Bir Konfeksiyon İşletmesinin Dikim Bölümünde İstatistiksel Proses Kontrol Tekniklerinin Uygulanması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 211-224.

### Öz

Ülke ihracatında büyük bir paya sahip olan ve istihdam sağlayan konfeksiyon sektörü, farklı özelliklere sahip çok sayıda modeli, değişen parti büyüklüğünde, kısa üretim zamanlarında ve kaliteli üretmek zorundadır. Günümüzde konfeksiyonda model geliştirme, kalıp hazırlama, pastal planı oluşturma, serim ve kesim işlemlerinde bilgisayar destekli sistemler ve makineler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu durum hem işçilik maliyeti bakımından fayda sağlamış hem de hataların azalmasına yol açmıştır. Ancak konfeksiyonda asıl zaman alıcı ve emek yoğun bölüm olan dikim işleminde insana olan bağımlılık devam etmektedir. Dolayısıyla en çok hatanın ortaya çıktığı bölüm de dikimdir. Çalışmanın amacı; seçilmiş bir konfeksiyon işletmesinin dikim bölümünde hataları tespit edebilmek ve çözüm önerileri getirebilmek için istatistiksel proses kontrol tekniklerini uygulamak ve böylece hataları önleme ve azaltma yollarını araştırmaktır. Çalışmanın sonucunda; pantolon dikiminde en çok hata “bacak arası dikim” prosesinde görülmüştür, ardından sırasıyla “düğme dikme” ile “gizli kemer kapama” prosesleri hatanın en fazla görüldüğü prosesler olmuştur. Söz konusu bu üç hata, dikimdeki toplam hataların yaklaşık yarıya yakını oluşturmuştur. Bu dikim hatalarına neden olabilecek faktörleri belirlemek için neden-sonuç diyagramları hazırlanmış, hataları azaltmaya yönelik öneriler sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** İstatistiksel proses kontrol, Konfeksiyon, Dikim, Hata, Kalite

### Implementation of Statistical Process Control Techniques in the Sewing Department of an Apparel Plant

#### Abstract

The apparel industry, which has a large part in the country's exports and provides employment, has to produce a large number of models with different characteristics in varying batch sizes, in short production times and with high quality. Today, computer aided systems and machines are widely used in model development, pattern preparation, laying plan creation, laying and cutting processes. This situation both provided benefits in terms of labor cost and led to a decrease in faults. However, the dependency on

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Pınar DURU BAYKAL, [pduru@cu.edu.tr](mailto:pduru@cu.edu.tr)

humans continues in sewing, which is the time-consuming and labor-intensive part of apparel. Therefore, sewing is the part where the most faults occur. The aim of the study is to apply statistical process control techniques in order to detect faults and propose solutions in the sewing department of a selected apparel plant, and thus to investigate ways to prevent and reduce faults. As a result of the study; in trousers sewing, the most faults were seen in the "sewing between the legs" process, followed by the "button sewing" and "hidden belt closure" processes, respectively. These three faults accounted for nearly half of the total faults in sewing. Cause-effect diagrams were prepared to determine the factors that could cause these sewing faults, and suggestions were presented to reduce the faults.

**Keywords:** Statistical process control, Apparel, Sewing, Fault, Quality

## 1. GİRİŞ

Hızla gelişen ve değişen dünyamızın artan rekabet ortamında işletmelerin kaliteli üretimi kısa sürelerde ve düşük maliyetle gerçekleştirmeleri gerekmektedir. Ülke ihracatında büyük bir paya sahip olan ve istihdam sağlayan konfeksiyon sektöründe, çok farklı özelliklerde ham madde ve çok sayıda yardımcı malzeme kullanılması ve yüksek çeşitlilik gösteren modellerde hızlı üretim zorunluluğu hatalara zemin hazırlamaktadır. Günümüzde konfeksiyonda model geliştirme, kalıp hazırlama, postal planı oluşturma, serim ve kesim işlemlerinde bilgisayar destekli sistemler ve makineler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu durum hem işçilik maliyeti bakımından fayda sağlamış hem de hataların azalmasına yol açmıştır. Ancak konfeksiyonda asıl zaman alıcı ve emek yoğun bölüm olan dikim işleminde insana olan bağımlılık hâlâ devam etmektedir. Dolayısıyla en çok hatanın ortaya çıktığı bölüm de dikimdir.

Konfeksiyonda; giysinin formu (vücuda oturuşu), modeli, kullanılan malzemenin cinsi, üretim özellikleri (kullanılan metot) ve çalışan kişilerin yetenekleri kalite kavramını oluşturur. Buna göre modelde, malzemede, metotta, makinede ve işçide meydana gelecek değişikliklerle kaliteyi etkilemek mümkündür [1].

Konfeksiyonda üretim sürecinde ortaya çıkan hatalar; ürün kalitesini bozmakta, üretim verimliliğini olumsuz yönde etkilemekte ve üretim maliyetlerini arttırmaktadır. Ayrıca müşteri memnuniyetsizliğine, artan şikâyetlere ve pazar kaybına da yol açmaktadır. İşletmelerde üretim maliyetlerini düşürmek için kalite maliyetlerini

düşürmek ve hataların oluşmasını önlemek gerekmektedir.

*İstatistiksel proses kontrol;* bir ürünün en ekonomik ve gereksinimleri karşılayacak şekilde üretilmesini sağlamak amacıyla veri toplamak, analizini yapmak, yorumlamak ve çözüm yolları önermek üzere istatistiksel tekniklerin, üretimin tüm aşamalarında kullanılmasıdır. Amaç hem işletme içinde kusurları yakalamak hem de kusurlu ürün henüz üretilmeden müdahalede bulunarak önlem almaktır [2].

Prof. K. Ishikawa'ya göre sanayide karşılaşılan sorunların %95'i yedi temel teknikte çözümlenebilmektedir. Bu teknikler; akış diyagramı, çetele tablosu, pareto analizi, neden-sonuç diyagramı, histogram, dağılım diyagramı ve kontrol kartlarıdır [3].

Konfeksiyonda yapılan istatistiksel proses kontrol çalışmaları aşağıda özetlenmiştir.

Kaya (2000), çalışmasında konfeksiyon işletmelerinde kurulması gereken kalite sistemini incelemiştir. İlk olarak kalite kavramı genel olarak araştırılmıştır. Daha sonra konfeksiyon işletmesinde kalite sisteminin içermesi gereken kurallar belirlenmiştir. Bir konfeksiyon işletmesinde uygulamalı çalışma olarak istatistiksel kalite kontrolü yapılmıştır. Çalışmaya göre ilgili işletme şartlarına uygun kalite sistemi geliştirilmiştir [4].

Yücel (2003), konfeksiyon üretiminde meydana gelen dikim hatalarını ve bu hataların oluşum nedenlerini analiz etmiştir. Araştırmanın verileri bir konfeksiyon işletmesinden alınmıştır.



İşletmenin üç aylık bir periyotta ürettiği 72.945 adet pantolonun dikim hataları pareto analizi tekniğine göre belirlenmiştir. Ayrıca dikim elemanlarının deneyim süreleri ve kumaş ağırlıklarının dikim hatalarına olan etkileri incelenmiştir [5].

Yücel (2007), tarafından yapılan çalışmada bir tür hata belirleme ve önceliklerine göre derecelendirme yöntemi olan hata türü ve etki analizi (HTEA) yöntemi açıklanarak bir konfeksiyon işletmesindeki uygulaması analiz edilmiştir. Dikim hatalarını gidermeye yönelik HTEA sistematığı uygulanmıştır. Uygulamanın sonuçları 12 haftalık üretim sürecinde izlenmiştir. İşletmenin jean pantolon üretim hattında %4,1'lik, gömlek üretim hattında ise %5,2'lik bir dikim hatası azalması sağlanmıştır [6].

Kaya ve Erdoğan (2007), konfeksiyonda dikim aşamasında operatör özelliklerinin hata oranlarına etkilerini araştırmışlardır. Bu kapsamda incelenen operatör özellikleri cinsiyet, öğrenim düzeyi, yaş ve deneyimdir. Çalışma sonucunda cinsiyet faktörünün kalite hatalarını etkileyen bir faktör olduğu belirlenmiştir. Operatörün öğrenim düzeyinin, yaşının ve deneyiminin konfeksiyon üretiminde kalite hatalarını etkilemediği saptanmıştır [7].

Dengizler Kayaalp (2007), çalışmasında orta büyüklükte bir konfeksiyon işletmesinde “kalitenin iyileştirilmesi” çalışmalarını yapmıştır. Bu amaçla “istatistiksel kalite kontrol yöntemleri” üç aşamada kullanılmıştır. Bunlar; girdi kontrolleri, üretim sırasındaki kontroller ve final kontrolleridir. İşletmedeki kalitenin, rakam ve grafiklerle somut ve görsel hale gelmesiyle takip edilmesinin ve iyileştirilmesinin daha kolay hale geldiği görülmüştür [8].

Bek (2008), çalışmasında bir modelin dikim öncesi, dikim, dikim sonrası ve yükleme öncesi kontrolleri sonucunda verilerin toplanması ve analizi için istatistiksel proses kontrol tekniklerini kullanmıştır. Kontrol diyagramı, pareto diyagramı, neden-sonuç diyagramları, X, R, P kontrol kartları hazırlanmış ve prosesin yeterliliği kontrol edilmiştir [9].

Dengizler Kayaalp ve Erdoğan (2009), dikiş hatalarının “İstatistiksel Proses Kontrol (İPK) Yöntemleri” kullanılarak azaltılmasını incelemişlerdir. Çalışmada İPK yöntemlerinden kontrol listesi, pareto analizi, neden-sonuç diyagramı ve p kontrol grafiği kullanılmıştır. Çalışma sonucunda konfeksiyon işletmelerinde İPK yöntemlerini kullanarak dikiş hatalarının azaltılabileceği gösterilmiştir [10].

Özeren ve İlhan (2011) çalışmalarında, erkek takım elbisesi üreten bir işletmede İstatistiksel Proses Kontrol (İPK) yöntemlerinden; kontrol listesi, p kontrol grafiği ve pareto analizini kullanarak ceket dikim bölümünde en yüksek dikiş hatası oranına sahip işlemleri saptayarak kalite kontrol iyileştirme süreci için öneriler getirmişlerdir [11].

Duran ve Çetindere (2012), konfeksiyon sanayinde faaliyet gösteren bir işletmede üretilen elbise modeline ait hata analizinde ve bu hataların çözümlenmesinde istatistiksel proses kontrol tekniklerinden kontrol çizelgelerini, pareto analizini, kontrol grafiklerini, sebep-sonuç diyagramını ve gruplandırma tekniğini kullanmışlardır. Analizler sonucunda insandan kaynaklanan problemler üzerinde durulmuş ve bu problemin giderilebilmesine yönelik olarak kurum içi eğitimlerle çalışan personelin güçlendirilmesi konusuna ağırlık verilmesi gerektiği öngörülmüştür [12].

İslam ve ark. (2017), bir konfeksiyon işletmesinde kısa kollu polo gömlek ve tişört üretiminde dikiş hatlarını analiz etmişlerdir. Çalışmada, ana kusurları ve bunların yüzdesini bulmak ve ayrıca milyon giysi başına toplam kusur miktarı yardımıyla kusur standart seviyesini tespit etmek için Pareto analizi, Neden-Sonuç diyagramı ve Altı Sigma tekniklerinden faydalanılmıştır [13].

Abtey ve ark. (2018), hazır giyim endüstrisinin dikiş bölümünde İstatistiksel Proses Kontrol (SPC) tekniklerinden kontrol çizelgelerini pantolon dikiş hatalarına uygulamışlardır. Uygulama sonrasında dikiş bölümünde önemli gelişmeler sağlanmıştır. Kontrol çizelgelerinin uygulanmasından önceki ve

sonraki dört aylık analiz, reddedilme yüzdesinin %9,141'den %6,4'e düştüğünü göstermiştir [14].

Tahiduzzaman ve ark. (2018), T-Shirt dikiminde Pareto analizi ve Sebep-Sonuç diyagramları ile dikiş hatalarını tespit etmeyi ve hataları etkili bir şekilde en aza indirmeyi hedeflemişlerdir. Hataların %80'ini oluşturan 7 hata belirlenmiş ve bunları azaltmak üzere öneriler sunulmuştur [15].

Duran ve Düzdar Argun (2020), kot pantolon üretimi yapan konfeksiyon fabrikasına ait aylık dikim istatistikleri ile dikim sonucu ortaya çıkan hataları, istatistiksel kalite kontrol yöntemlerini kullanarak tespit etmişler ve hataya sebep olan faktörleri belirlemişlerdir. Pareto analizi yapılarak dikim hatası olan 8 işlem ele alınmıştır. Neden-Sonuç analizlerine göre insan faktörünün, diğer faktörlere oranla daha etkili olduğu anlaşılmıştır [16].

Gobena ve Kumar (2020), birbirini takip eden iki ay boyunca bir hazır giyim işletmesinde hataları kaydetmişlerdir. Pareto analizi ile kusurların %80'ini oluşturan 4 hata tespit edilmiştir. Neden-Sonuç diyagramları ile daha kaliteli ürünler ve daha yüksek üretim verimliliği elde etmek ve reddedilme oranını en aza indirmek için öneriler sunulmuştur [17].

Mughal ve ark. (2021), çalışmalarında seçilen dikiş bölümünde kusurları ortaya çıkarmayı ve en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Veriler kalite raporlarından ve araştırmacılar tarafından sahada elde edilmiştir. Veriler Excel, Pareto çizelgeleri ve Kılçık diyagramları ile analiz edilmiştir. Dikiş atlama ve leke en sık görülen kusurlar olarak tanımlanmıştır. Dikiş atlama hatalarının yaklaşık %50'sinin makine kaynaklı, %25'inin malzemeyle ilgili sorunlardan, %15'inin yöntem sorunlarından ve geri kalan %1'unun ise insan faktöründen kaynaklandığı bulunmuştur [18].

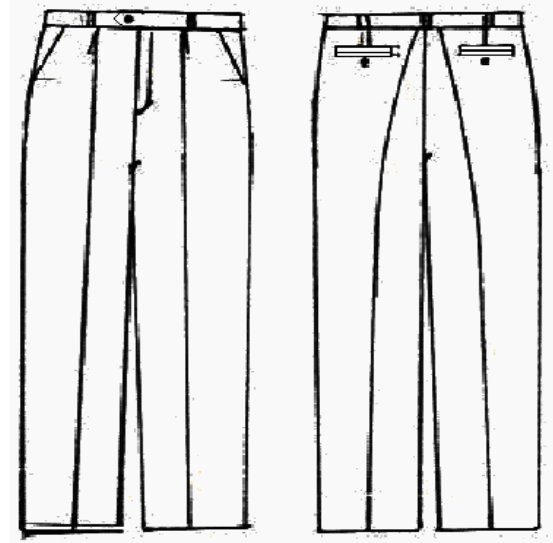
Bu çalışmada seçilmiş bir konfeksiyon işletmesinde pantolon dikim süreci incelenmiştir. Çalışma kapsamında bant içi ara kontrol yapılarak dikim hataları tespit edilmiştir. Dikimde en çok hataya neden olan proseslerin belirlenmesi, hata kaynaklarının tespiti ve çözüm önerileri için

istatistiksel proses kontrol teknikleri uygulanarak değerlendirmeler yapılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD

### 2.1. Materyal

Seçilen konfeksiyon işletmesi, 400'ün üzerinde çalışanı ve 3 bant ile kadın ve erkek alt grup üretimini gerek iç piyasaya ve gerekse de ihracata yönelik olarak yapmaktadır. İşletmede dikim prosesi incelenmiş olup üretimi yapılan erkek pantolon modeli Şekil 1'de verilmiştir. Pantolon kumaşı %97 pamuk, %3 elastan içeren düz renkte kumaştır. Model; 2 yan cepli, 2 arka çift fleto cepli bir erkek pantolonudur. İşletmede 38-40-42-44-46-48 olmak üzere 6 bedende ve lacivert, ten rengi, siyah ve açık gri olmak üzere 4 renkte üretim yapılmaktadır.



Şekil 1. Erkek pantolon modeli teknik çizimi

### 2.2. Metod

Bu çalışmada seçilen konfeksiyon işletmesinin tüm prosesleri genel olarak incelenmiştir. Daha sonra en çok hatanın görüldüğü proses olan dikim için istatistiksel kalite kontrol tekniklerinden; çetele tablosu, pareto analizi ve neden-sonuç (Balık Kılçığı) diyagramı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

**Çetele Tablosu:** Dikim proseslerinde ortaya çıkan hataların hangi sıklıkta olduğunu görebilmek üzere veriler toplanarak çetele tablosu (kontrol listesi) oluşturulmuştur. En çok hata oluşturan prosesi belirlemek için çubuk grafiği çizilmiştir. Böylece hatalar grafiksel olarak net bir şekilde görülebilmektedir.

**Pareto Analizi:** Çetele tablosu ve çubuk grafiğine göre hatalar büyükten küçüğe sıralanarak toplam içindeki yüzdesi belirlenmiştir. Daha sonra toplam içinde en çok hataya neden olan prosesi belirlemek için kümülatif yüzdeler hesaplanarak pareto diyagramı çizilmiştir.

**Neden-Sonuç (Balık Kılıcı) Diyagramı:** Pareto analizi sonucu proseslerde en yüksek frekansa sahip olan hatanın olası nedenlerini belirlemek için neden-sonuç (balık kılıcı) diyagramı çizilmiştir.

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Erkek pantolonunun üretiminde dikim süreci toplam 75 prostesten oluşmaktadır. Çizelge 1’de sırasıyla dikim prosesleri ve ilgili makineler görülmektedir.

**Çizelge 1.** Dikim prosesleri

Proses no	Proses adı	Makine adı
1	Contaya pens	Düz makine
2	Pens ütüleme	Ütü
3	Sağ conta takma	Kollu makine
4	Sol conta takma	Kollu makine
5	Araçlama	El İşi
6	Arka cep karşılığı ütüleme	Ütü
7	Fleto ütüleme	Ütü
8	Fleto cep yapma	Fleto makinesi
9	Çimaya çentik atma	El işi
10	Sol arka fleto iç çima	Düz makine
11	Sol arka cep çiması	Düz makine
12	Sol arka cep karşılığı	Düz makine
13	Sol arka cep torbası	Overlok makinesi
14	Sol arka cep gazisi	Düz makine
15	Sol arka cep çiması-birit atma	Düz makine
16	Sağ arka fleto iç çima	Düz makine
17	Sağ arka cep çiması	Düz makine

18	Sağ-sol arka cep ütüleme	Ütü
19	Sağ arka cep karşılığı	Düz makine
20	Sağ arka cep torbası	Overlok makinesi
21	Sağ arka cep gazisi	Düz makine
22	Sağ arka cep çiması-birit atma	Düz makine
23	Sağ-sol arka cep tutturma	Bıçaklı düz makine
24	Arka orta çatma	Kollu makine
25	Pervaz ve Beden Kemer Birleştirme-Biye Takma	Kemer Otomatı
26	Kemer ütüleme	Ütü
27	Kapalı patlet hazırlama	Düz makine
28	Patlet hazırlama	Biye makinesi
29	Patlet ve Conta Yan Cep Çizme	El İşi
30	Ön beden overlok	Overlok makinesi
31	Sağ-sol ön cep karşılığı	Düz makine
32	Ön cep pervazı	Düz makine
33	Sağ-sol ön cep overloğu	Overlok makinesi
34	Sağ-sol ön cep torba gazisi	Düz makine
35	Sağ ön cep birleştirme	Düz makine
36	Sağ ön yan cep gazisi	Düz makine
37	Sağ ön cep kapama	Düz makine
38	Sol ön cep birleştirme	Düz makine
39	Sol ön yan cep gazisi	Düz makine
40	Sol ön cep kapama	Düz makine
41	Açık patlet takma	Düz makine
42	Kapalı Patlet ve Fermuar Dikme	Düz Makine
43	Sağ-sol ön bağlama-birleştirme	Düz makine
44	Patlet üstü vurma	Düz makine
45	Ağı kesme	El işi
46	Ön-arka eşleme	El işi
47	Sol yan çatma	Overlok makinesi
48	Sağ yan çatma	Overlok makinesi
49	Kemer eşleme	El işi
50	Kemer takma	Düz makine
51	Kemer ucu vurma	Düz makine
52	Kemer ucu araçlama	El işi
53	Arka etiket takma	Düz makine
54	Yıkama talimatı takma	Düz makine

**Çizelge 1.** (devam)

Proses no	Proses adı	Makine adı
55	Arka birit takma	Düz makine
56	Paça biyesi	Düz makine
57	Biye araçlama	El işi
58	Paça biye tutturma	Düz makine
59	Cep üstü çift iğne	Düz makine
60	Sağ cebe arka birite punteriz	Punteriz makinesi
61	Sol cebe arka birite punteriz	Punteriz makinesi
62	Gizli kemer kapama	Düz makine
63	Bacak arası dikim	Kollu makine
64	Sağ-sol paça yapımı	Düz makine
65	Yan cep ve ön patlete punteriz	Punteriz makinesi
66	Arka cep punteriz	Punteriz makinesi
67	Apalet-yan cep ve arka cebe punteriz	Punteriz makinesi
68	Köprü işaretleme	El işi
69	Köprü çekme	Köprü makinesi
70	Otomat köprü	Otomat makinesi

71	Etiket ve düğme işareti alma	El işi
72	Etiket dikme	Punteriz makinesi
73	Göz ilik	İlik makinesi
74	Arka cebe düğme dikme	Düğme otomatı
75	Ön düğme dikme	Düğme otomatı

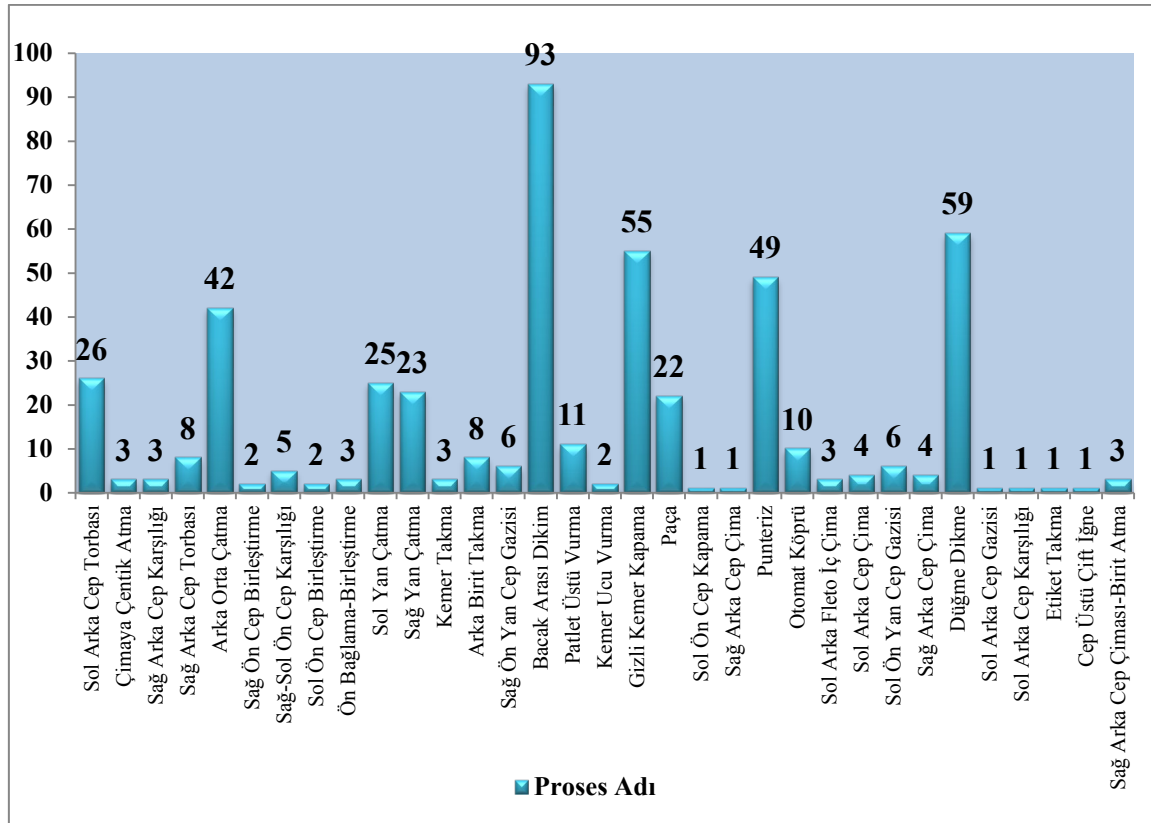
İşletmede bant içi ara kontrol yapılarak dikim hataları tespit edilmiştir. Dikim bandında yapılan rastgele kontrollerin sonucunda 33 proseste tespit edilen hatalar ve hata adetleri ile Çizelge 2’de verilen çetele tablosu oluşturulmuştur. Çetele kısmındaki “I” bir adet hatayı, “X” 10 adet hatayı ifade etmektedir. Çetele tablosuna göre en çok hataya neden olan proses 93 adet hata ile “*bacak arası dikim*” prosesidir. Bu prosesin hata oranı %19,14’tür. 59 hata adedi ve %12,14’lük hata oranı ile “*düğme dikme*” hataları 2. sırayı alırken, 55 hata adedi ve %11,32’lik hata oranı ile “*gizli kemer kapama*” hataları 3. sırayı almaktadır. Hataların tespit edildiği prosesler ve hata sayıları Şekil 2’de çubuk grafiği olarak gösterilmiştir.

**Çizelge 2.** Çetele tablosu

ÜRÜN ADI: SLİM-BALMES ERKEK PANTOLONU			TARİH: XXX		
ÜRÜN KODU: XXX			DEPARTMAN: DİKİMHANE		
Sıra no	Proses adı	Hata Türü	Çetele	Hata Adedi	Hata Oranı
1	Sol arka cep torbası	Tamamlanmamış dikiş, kısa fleto, katlı conta, dikiş eksik, ölçü hatası (bol dikilmiş cep torbası)	XX IIII I	26	%5,35
2	Çimaya çentik atma	Çentik eksik	III	3	%0,62
3	Sağ arka cep karşılığı	Dikiş eksik, conta dikişi yok	III	3	%0,62
4	Sağ arka cep torbası	Tamamlanmamış dikiş, kısa fleto, katlı fleto, dikiş eksik, ölçü hatası (bol dikilmiş cep torbası)	IIII III	8	%1,65
5	Arka orta çatma	Ölçü hatası (sağ-sol eşit değil), dikiş patlağı, dikiş kırması, dikiş eksik, dikiş kayması, düzgün olmayan dikiş	XXXX II	42	%8,64
6	Sağ ön cep birleştirme	Tamamlanmamış dikiş	II	2	%0,41
7	Sağ-sol ön cep karşılığı	Cep karşılığı birleşme dikiş hatası	IIII	5	%1,03
8	Sol ön cep birleştirme	Tamamlanmamış dikiş	II	2	%0,41
9	Ön bağlama-birleştirme	Katlanmış-Kıvrılmış dikiş	III	3	%0,62
10	Sol yan çatma	Dikiş patlağı, dikiş kırması	XX IIII	25	%5,14
11	Sağ yan çatma	Dikiş patlağı	XX III	23	%4,73
12	Kemer takma	Dikiş hatası (kemer izinden gidilmemiş dikiş)	III	3	%0,62
13	Arka birit takma	Ölçü hatası (birit ortada değil), birit dikişi tam değil, birit kayması	IIII III	8	%1,65
14	Sağ ön yan cep gazisi	Dikiş düşmesi	IIII I	6	%1,23
15	Bacak arası dikim	Dikiş patlağı, dikiş düşmesi, dikiş atlaması, dikiş kırması, dikiş kayması, tamamlanmamış dikiş	XXXXXXXXXX III	93	%19,14
16	Patlet üstü vurma	Dikiş atlaması, dikiş düşmesi, tamamlanmamış dikiş (sökük patlet)	X I	11	%2,26
17	Kemer ucu vurma	Dikiş atlaması	II	2	%0,41

Çizelge 2. (devam)

18	Gizli kemer kapama	Dikiş atlaması, dikiş patlağı, dikiş kemer astarını katlamış, dikiş gözükmemesi	XXXXX IIII	55	%11,32
19	Paça	Dikiş patlağı, dikiş atlaması, dikiş molalanması	XX II	22	%4,53
20	Sol ön cep kapama	Dikiş kırması	I	1	%0,21
21	Sağ arka cep çima	Dikiş kırması	I	1	%0,21
22	Punteriz	Dikişlerin düzgün olmaması	XXXX IIII IIII	49	%10,08
23	Otomat köprü	Dikiş astarı kıvrılmış, dikiş eksik	X	10	%2,06
24	Sol arka fleto iç çima	Tamamlanmamış dikiş	III	3	%0,62
25	Sol arka cep çima	Dikiş düşmesi	IIII	4	%0,82
26	Sol ön yan cep gazisi	Dikiş düşmesi	IIII I	6	%1,23
27	Sağ arka cep çima	Dikiş düşmesi	IIII	4	%0,82
28	Düğme dikme	Ölçü hatası (yanlış işaretleme, yanlış yere dikme, yanlış ilik ayarı, kayma), eksik ilik, eksik düğme, düğme söktük	XXXXX IIII IIII	59	%12,14
29	Sol arka cep gazisi	Dikiş kayması	I	1	%0,21
30	Sol arka cep karşılığı	Hatalı dikiş	I	1	%0,21
31	Etiket takma	Etiket eğri takılmış	I	1	%0,21
32	Cep üstü çift iğne	Dikiş atlaması	I	1	%0,21
33	Sağ arka cep çimasi-birit atma	Birit kayması, dikiş atlaması	III	3	%0,62
<b>Toplam Hata</b>				<b>486</b>	<b>%100</b>



Şekil 2. Çetele tablosu verileri ile oluşturulan prosese göre hata adedi çubuk grafiği

Çetele tablosu ve çubuk grafiğine göre dikimdeki hatalar büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır. Daha sonra toplam içinde en çok hataya neden olan prosesi belirlemek için kümülatif yüzdeler hesaplanarak pareto analizi yapılmış ve Çizelge 3 oluşturulmuştur. Dikimdeki hataların önem derecelerini belirlemek için pareto diyagramı elde edilmiştir (Şekil 3).

Şekil 3'teki pareto diyagramına göre yaklaşık %80'lik kümülatif yüzdeden sonraki prosesler genel olarak hata bakımından en az öneme sahip olan proseslerdir ve en az etkiyi oluşturmaktadırlar. Dikim bandında ilk önce iyileştirilmesi gereken proses "bacak arası dikim" prosesidir. Daha sonra önemli olan prosesler ise sırasıyla "düğme dikme" prosesi ile "gizli kemer kapama" prosesidir.

**Çizelge 3.** Pareto analizi proses hata tablosu

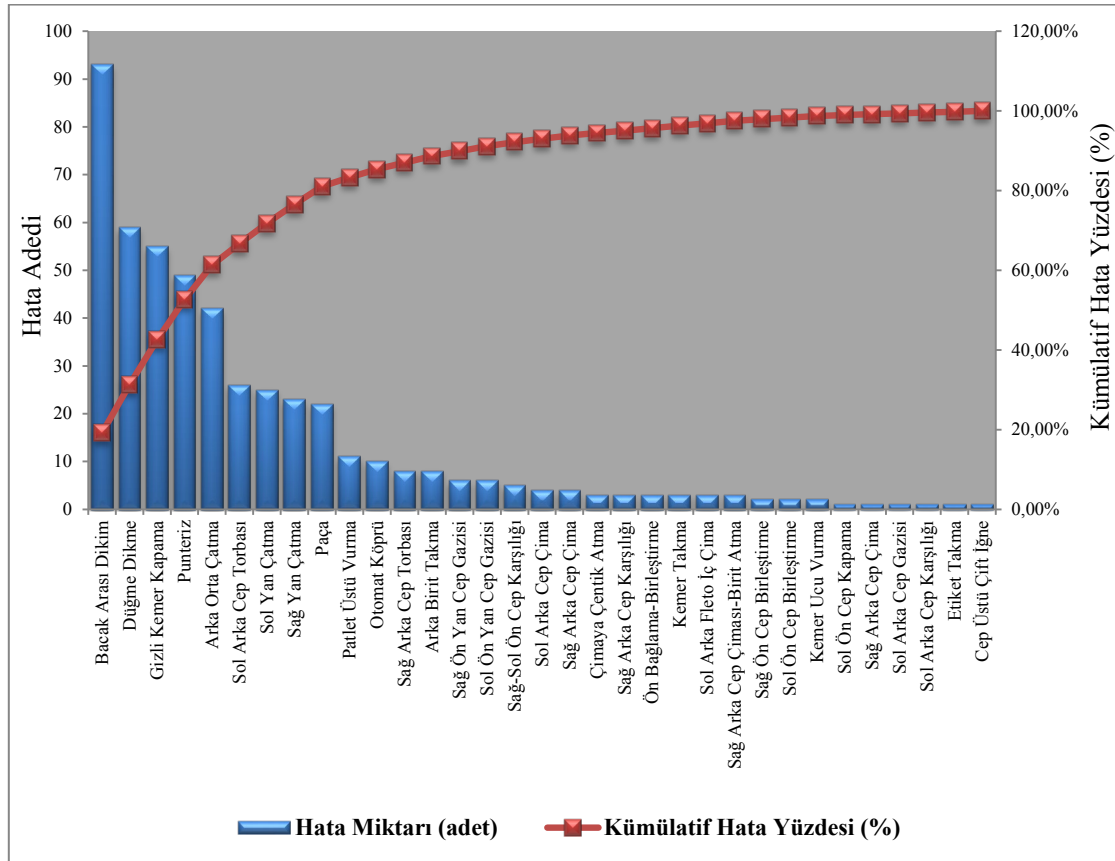
Proses adı	Hata adedi	Hata oranı (%)	Kümülatif yüzde (%)
Bacak arası dikim	93	%19,14	%19,14
Düğme dikme	59	%12,14	%31,28
Gizli kemer kapama	55	%11,32	%42,60
Punzeriz	49	%10,08	%52,68
Arka orta çatma	42	%8,64	%61,32
Sol arka cep torbası	26	%5,35	%66,67
Sol yan çatma	25	%5,14	%71,81
Sağ yan çatma	23	%4,73	%76,54
Paça	22	%4,53	%81,07
Patlet üstü vurma	11	%2,26	%83,33
Otomat köprü	10	%2,06	%85,39
Sağ arka cep torbası	8	%1,65	%87,04
Arka birit takma	8	%1,65	%88,69

Sağ ön yan cep gazisi	6	%1,23	%89,92
Sol ön yan cep gazisi	6	%1,23	%91,15
Sağ-sol ön cep karşılığı	5	%1,03	%92,18
Sol arka cep çima	4	%0,82	%93,00
Sağ arka cep çima	4	%0,82	%93,82
Çimaya çentik atma	3	%0,62	%94,44
Sağ arka cep karşılığı	3	%0,62	%95,06
Ön bağlama-birleştirme	3	%0,62	%95,68
Kemer takma	3	%0,62	%96,30
Sol arka fleto iç çima	3	%0,62	%96,92
Sağ arka cep çiması-birit atma	3	%0,62	%97,54
Sağ ön cep birleştirme	2	%0,41	%97,95
Sol ön cep birleştirme	2	%0,41	%98,36
Kemer ucu vurma	2	%0,41	%98,77
Sol ön cep kapama	1	%0,21	%98,98
Sağ arka cep çima	1	%0,21	%99,19
Sol arka cep gazisi	1	%0,21	%99,40
Sol arka cep karşılığı	1	%0,21	%99,61
Etiket takma	1	%0,21	%99,82
Cep üstü çift iğne	1	%0,21	%100
<b>Toplam</b>	<b>486</b>	<b>%100</b>	

Pareto analizi sonucu hata miktarı en fazla olan processte hataya sebep olan faktörlerin tespitinde Neden-Sonuç (Balık Kılçığı) diyagramı kullanılmıştır. Bu kapsamda hata kaynakları, ilgili ustabaşları, dikim operatörleri ve kalite kontrol personeli ile "beyin fırtınası" tekniği kullanılarak

belirlenmiştir. Neden-Sonuç diyagramında incelenen hata yatay bir çizgi ile gösterilir, çizginin bitimine hatanın adı yazılır ve bu çizgiye omurga denir. Omurganın her iki yanında çizgiler ile hataya yol açan ana faktörler belirtilir. Büyük kemik olarak ifade edilen bu ana faktörler belirlenirken 4M (İnsan, Makine, Malzeme, Metot)

temel olarak alınır. Ana faktörleri oluşturabilecek alt faktörler daha küçük çizgiler (küçük kemikler) ile gösterilir. Kesinliği bilinmeyen ancak muhtemel sebepler varsa bunlar da kesikli çizgilerle gösterilir. Önemli görülen nedenler daire içine alınır.



Şekil 3. Pareto diyagramı

Bu çalışmada hata sayıları fazla olan 3 proses için Neden-Sonuç diyagramı hazırlanmıştır (Şekil 4-6).

#### **Bacak Arası Dikim Prosesi Neden-Sonuç Diyagramı:**

Bacak arası dikim prosesinde tespit edilen 93 hata, hata isimleri ve sayıları ile detaylı olarak analiz edilmiş ve Çizelge 4'te verilmiştir. Neden-Sonuç diyagramı ise Şekil 4'te verilmiş ve aşağıda açıklanmıştır.

- **İnsan:** İşletmede çalışan personel fazla mesaiden dolayı çok çalışmakta ve yorgunluk hissetmektedir. İşlerine yeterince motive olmadıklarından dolayı dikkatsizdirler. Burada en önemli sebep işçilerin bazen işe özenmemeleridir. Bu nedenle işi eksik yapmaktadırlar.

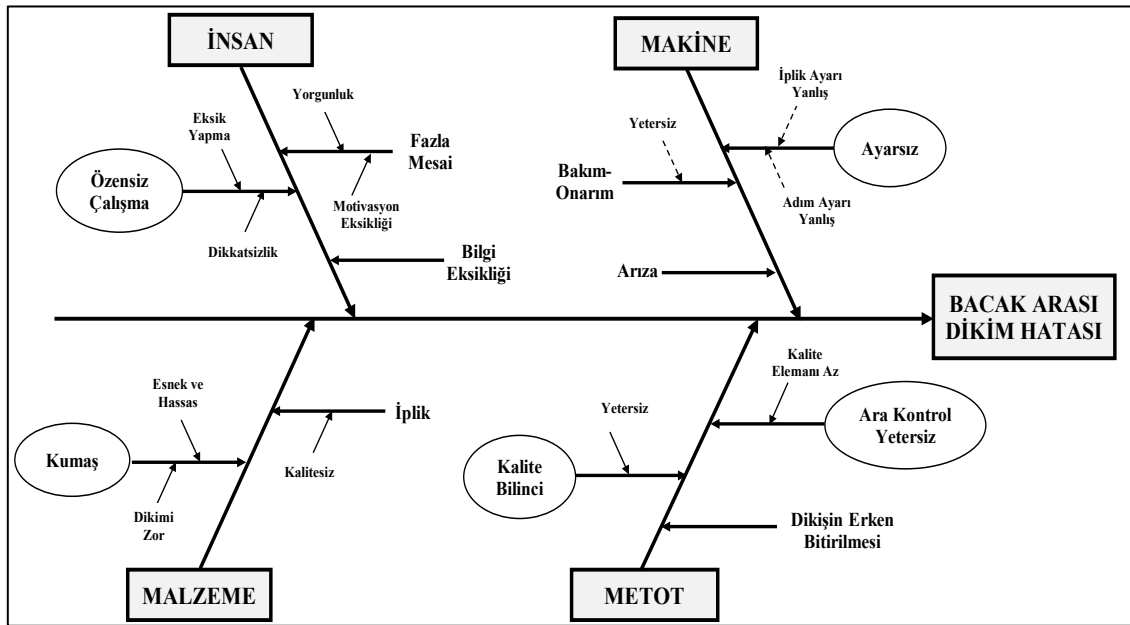
Çizelge 4. Bacak arası dikim prosesi çetele tablosu

Sıra no	Hata adı	Çetele	Hata adedi
1	Dikiş patlağı	XXX IIII III	38
2	Dikiş düşmesi	IIII II	7
3	Dikiş atlaması	XX IIII II	27
4	Dikiş kırması	X IIII I	16
5	Dikiş kayması	II	2
6	Tamamlanmamış dikiş	III	3
Toplam			93

- **Makine:** Makinelerin ayarsız oluşu dikişte düzensizlikler ve atlamalar oluşturmuştur. Ayrıca operatörün adım ayarını yanlış ayarlayabileceği düşünülerek dikişte hatalar oluşturabileceği kanısına varılmıştır.

Makinenin kısa süreli arızalanması dikim işleminde hatalara neden olmuştur.

- **Malzeme:** Kullanılan kumaş bir miktar esnek olduğundan rahat dikilemeyeceği kanısına varılmıştır.
- **Metot:** İşletmede kalitenin yeterince önemi kavranamamıştır. İşletmede yeterli kalite kontrol personeli bulunmamaktadır ve kalite bilinci yetersizdir. İşletmede sürekli bir ara kontrol yapılmamaktadır. Burada en önemli neden dikişin erken bitirilmesidir. Dikiş tam bitirilmeden dikim işlemi tamamlandığından parçaların birleşmesinde dikilmemiş kısımlar görülmüştür.



Şekil 4. Bacak arası dikim prosesi neden-sonuç diyagramı

#### Düğme Dikme Prosesi Neden-Sonuç Diyagramı:

Düğme dikme prosesinde tespit edilen 59 hata, hata isimleri ve sayıları ile detaylı olarak analiz edilmiş ve Çizelge 5'te verilmiştir. Neden-Sonuç diyagramı Şekil 5'te verilmiş ve aşağıda açıklanmıştır.

- **İnsan:** Burada en önemli hata nedeni, operatörün pantolonu doğru yerleştirememesi, düğme işareti olan yere düğmenin dikilmemesi sonucu düğme yerlerinde kayma meydana gelmesidir. İşletmede çalışan personelin fazla mesaiden dolayı yorgun olması ve bunun sonucu olarak dikkat ve motivasyon kaybının bu hataya yol açtığı sonucuna varılmıştır.

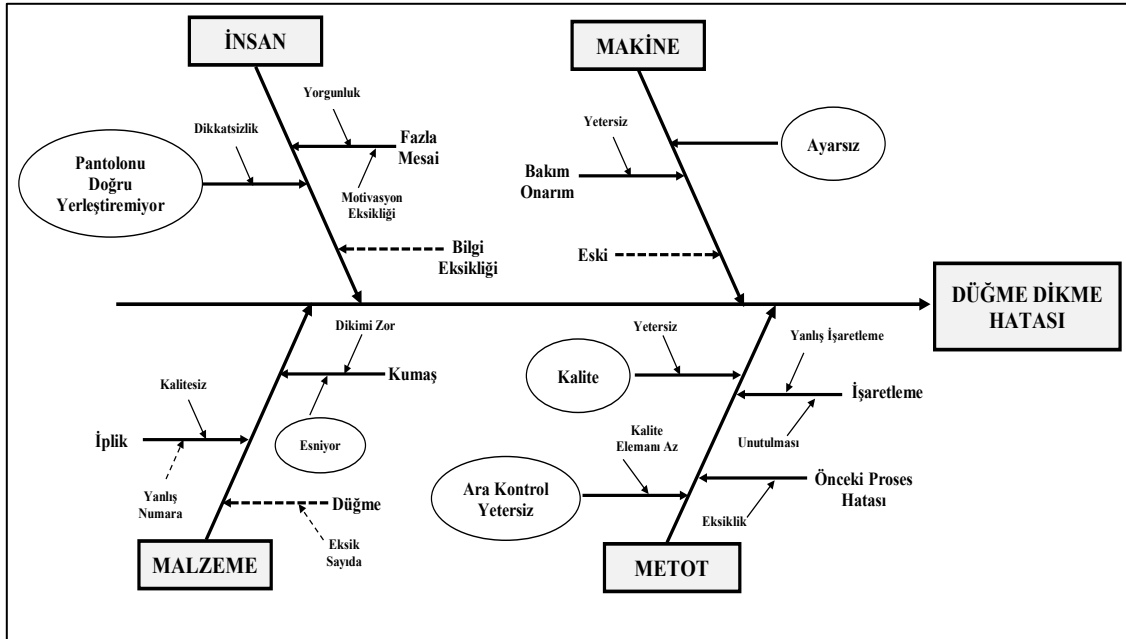


Çizelge 5. Düğme dikme prosesi çetele tablosu

Sıra no	Hata adı	Çetele	Hata adedi
1	Ölçü hatası	XXXXX III	53
2	Eksik ilik	II	2
3	Eksik düğme	III	3
4	Düğme sökülük	I	1
Toplam			59

- **Makine:** Makinelerin ayarsız oluşu düğme dikmede hatalara yol açmıştır.
- **Malzeme:** Kullanılan kumaş esnek olduğundan düğme dikimi sırasında kaymalar olabileceği ve hata oluşturabileceği kanısına varılmıştır. Ayrıca kullanılan ipliğin kalitesiz ve yanlış numarada olması düğmelerde sökülük oluşturmuştur.

- **Metot:** İşletmede kalite ekibi bulunmamaktadır ve kalite bilinci yetersizdir. İşletmede sürekli bir ara kontrol yapılmamaktadır. Düğme dikme hatalarına önceki proses hataları da neden olabilmektedir. Düğme dikme prosesinden önce göz ilik açma prosesi bulunmaktadır. Göz ilik açılmadan sadece düğmenin olması son kontrol sırasında ürünün düğme dikme hatası olarak ayrılmasına neden olmaktadır. Ayrıca düğme dikme prosesinden önce düğme yerleri işaretlenmektedir. İşaretleme sırasında kayma olması sonucunda yanlış işaretleme yapılabilmektedir. Düğme yerini dikim sırasında operatör işarete göre ayarlamaktadır. Yanlış işaretleme sonucu düğme dikme prosesinde hatalar oluşabilmektedir. Ayrıca düğme yerinin işaretlenmesi unutulduğunda operatör, düğme yerini düzgün ayarlayamamakta ve böylece hatalar görülmektedir.



Şekil 5. Düğme dikme prosesi neden-sonuç diyagramı

### Gizli Kemer Kapama Prosesi Neden-Sonuç Diyagramı:

Gizli kemer kapama prosesinde tespit edilen 55 hata, hata isimleri ve sayıları ile detaylı olarak

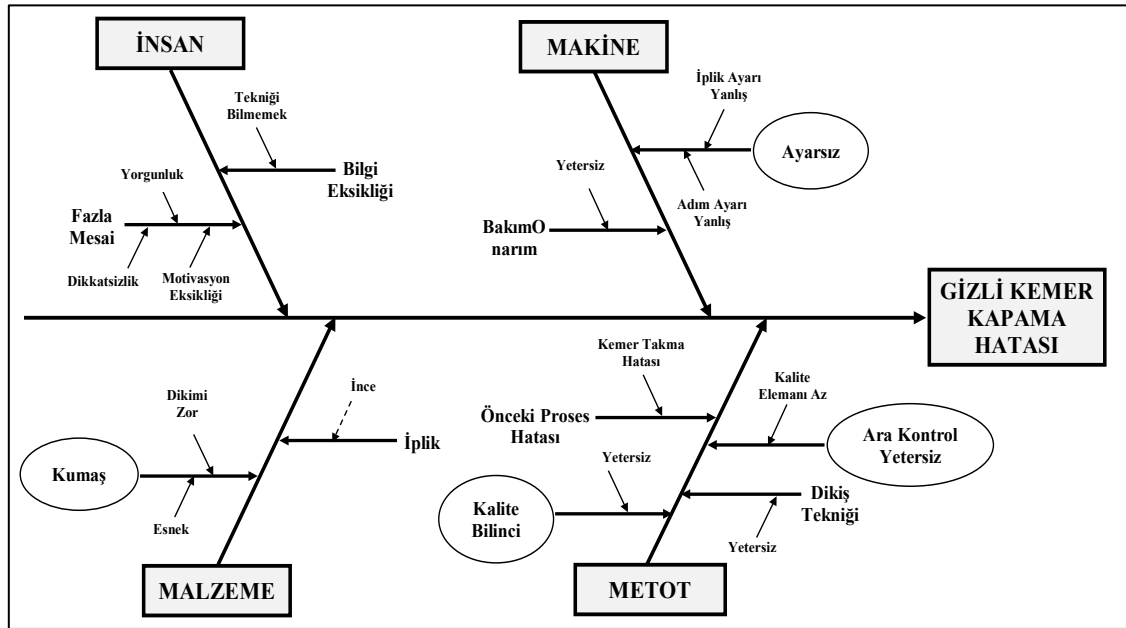
analiz edilmiş ve Çizelge 6'da verilmiştir. Neden-Sonuç diyagramı Şekil 6'da verilmiş ve aşağıda açıklanmıştır.

- **İnsan:** İşletmede çalışan personel fazla mesaiden dolayı çok çalışmakta ve yorgunluk hissetmektedir. İşlerine yeterince motive olamadıklarından dolayı dikkatsizdirler. Ayrıca personelin vasıfsız olması proseste hatalara neden olabilmektedir. Operatörün gerçekleştirdiği dikim işlemi hakkında bilgi eksikliği dikimde hatalar oluşturmaktadır.
- **Makine:** Makinelerin ayarsız oluşu dikişte düzensizlikler oluşturmuştur. Ayrıca adım ayarının hatalı oluşu atlama ve dikişte hatalara yol açmıştır.
- **Malzeme:** Kullanılan kumaş bir miktar esnek olduğundan rahat dikilemediği kanısına varılmıştır.

Çizelge 6. Gizli kemer kapama prosesi çetele tablosu

Sıra no	Hata adı	Çetele	Hata adedi
1	Dikiş atlaması	XXXX I	41
2	Dikiş patlağı	IIII	5
3	Dikiş kemer astarını katlamış	IIII I	6
4	Dikiş gözükmesi	III	3
<b>Toplam</b>			<b>55</b>

- **Metot:** İşletmede kalite ekibi bulunmamaktadır ve kalite bilinci yetersizdir. Gizli kemer kapamadan önce kemer takma ve uç vurma prosesleri vardır. Önceki prosesten kaynaklı hatalar, kemer kapamanın tam ve doğru yapılamamasına yol açmaktadır. Kemer kapama sırasında kumaş veya astarda katlamalar, birlikte dikimler hataya yol açabilmektedir.



Şekil 6. Gizli kemer kapama prosesi neden-sonuç diyagramı

#### 4. SONUÇ

Son yıllarda ortaya çıkan sıkı fiyat ve kalite rekabeti ortamında konfeksiyon işletmelerinin; gerekli ham madde ve malzemeleri çeşitli kaynaklardan uygun fiyatla ve istenilen zamanda

sağlaması, tüm faaliyetleri eldeki iş gücü ve makinelerden en iyi şekilde yararlanmak suretiyle son derece sınırlı süreler içinde gerçekleştirmesi gerekmektedir [19]. Kaliteyi etkileyebilecek çok fazla değişkenin olduğu konfeksiyon sektöründe proses kontrol önemli bir yere sahiptir. Özellikle de insana bağımlı yapısı nedeniyle dikimde

düzenli bir bant içi ara kontrol ve sonrasında istatistiksel proses kontrolü ile hata oranlarının azaltılması mümkündür.

Bu çalışmada pantolon üretimi yapan bir konfeksiyon işletmesinde bant içi ara kontrol ile dikim hataları tespit edilmiştir. Sonrasında istatistiksel proses kontrolü kapsamında çetele tablosu, pareto analizi ve neden-sonuç (balık kılıçığı) diyagramı kullanılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Bütün proseslerdeki hataların bir anda ortadan kaldırılması mümkün olmadığından Pareto analizi ve neden-sonuç diyagramlarından yararlanılmıştır. Yapılan analizlere göre pantolon dikiminde en çok hata “*bacak arası dikim*” prosesinde görülmüştür, ardından sırasıyla “*düğme dikme*” ile “*gizli kemer kapama*” prosesleri hatanın en fazla görüldüğü prosesler olmuştur. Söz konusu bu üç hata, toplam hataların yaklaşık yarıya yakınına oluşturmaktadır (% 42,60). Bu nedenle bu üç prosese öncelik verilerek bu hatalara neden olabilecek faktörleri belirlemek için neden-sonuç diyagramları hazırlanmıştır. Bu diyagramlar, hata sebeplerinin insan, makine, malzeme ve metot başlıkları altında detaylı bir şekilde analizini sağlamaktadır.

Dikim hatalarını ortadan kaldırmak için bu hataların neden oluştuğunu çok iyi anlamak gerekmektedir. Hazırlanan neden-sonuç diyagramlarına göre çıkarılan sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmiştir.

**İnsan:** İşletmede çalışan personel fazla mesaiden dolayı çok çalışmakta, yorgunluk, dikkatsizlik ve motivasyon eksikliği yaşamaktadır. Operatörler işlerine özenmemekte ve işi eksik yapmaktadırlar.

**Makine:** Makinelerin bakım-onarımındaki yetersizlikler, ayarların düzgün yapılmaması gibi nedenler dikimde atlamalara ve düzensiz dikişlere yol açarak makine kaynaklı hatalara sebep olmaktadır.

**Malzeme:** Kullanılan kumaşın esnek oluşu dikim sırasında kaymalara ve esnemelere neden olabilmekte, dikişi zorlaştırabilmektedir.

**Metot:** İşletmede yeterli kalite kontrol personeli bulunmamaktadır ve kalite bilinci yetersizdir. İşletmede sürekli bir ara kontrol yapılmamaktadır. Önceki proseslerden kaynaklı hatalar bir sonraki prosese taşınmaktadır.

Dikimde en fazla hataya neden olan üç proses ile ilgili yapılan genel değerlendirmeler sonrasında çözüm önerileri aşağıda sunulmuştur:

- İşletmede kalite ekibi oluşturulmalı, kalitenin önemi vurgulanarak kalite bilinci sağlanmalıdır. Düzenli bir bant içi ara kontrol sistemi oluşturulmalıdır.
- Fazla mesai uygulaması gözden geçirilerek gerekli düzenlemeler yapılmalıdır.
- Çalışanların motivasyonunu artırıcı çalışmalar yapılmalıdır.
- İşletmede verimli bir bakım-onarım planlaması yapılmalı ve işletilmelidir.
- Üretim elemanlarına tespit edilen hatalar bildirilmeli, hatasız üretim için gerekli eğitimler verilmelidir. Hatasız üretimin avantajları elemanlara anlatılmalıdır.
- İşletmede proses kontrol sistemi geliştirilmeli, üretim sırasında hataları en kısa zamanda yakalayıp yok edecek şekilde yeniden yapılandırılmalıdır. Gerekirse bilgisayar ortamında takip yapılmalı ve sürekli kontrol edilmelidir.
- Her birim için kalite kontrol talimatı oluşturulmalı ve bu talimatlar esas alınmalıdır. Hata nedenlerini ve hata adedini belirlemek için kalite kontrol kartları ve listeleri oluşturulmalı ve belirlenen hatalar bu listelere yazılmalıdır. Listeler toplantılarda tartışılarak çözüm yolları belirlenmelidir.
- Dikim prosesleri için işlem bilgi kartları oluşturulmalı ve ona göre dikim işlemi gerçekleştirilmelidir. Personellerin dikim ve dikiş teknikleri hakkında bilgilendirilmeleri sağlanmalıdır.

## 5. KAYNAKLAR

1. Akgül, M., 2006. Klasik Erkek Gömleği Üretiminde Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi ve Kalite Talimatlarının Hazırlanması. Yüksek

- Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul, 183.
2. Çolak, T., 2007. İstatistiksel Süreç Kontrolü ve Uygulamalar. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İstatistik Anabilim Dalı, Adana, 102.
  3. Ala, D., M., İkiz, Y., 2014. Ham Bornozluk Havlu Kumaşlarda Dokuma Üretimi Süresince Oluşan Kumaş Hatalarının Belirlenmesine Yönelik İstatistiksel Bir Araştırma. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(7), 244-252.
  4. Kaya, S., 2000. Konfeksiyonda Kalite Kontrol Sistemi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 93.
  5. Yücel, Ö., 2003. Dikimde Hata Oluşturan Nedenlerin Belirlenmesine Yönelik İstatistiksel Bir Araştırma. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(3), 327-332.
  6. Yücel, Ö., 2007. Konfeksiyon Üretiminde Hata Türü ve Etkileri Analizi. Tekstil ve Konfeksiyon Dergisi, 17(2), 126-131.
  7. Kaya, S., Erdoğan, M., Ç., 2007. Konfeksiyon İşletmelerinde Operatör Özelliklerinin Dikim Bölümündeki Kalite Hatalarına Etkisi. Tekstil ve Konfeksiyon Dergisi, 17(3), 207-213.
  8. Dengizler Kayaalp, İ., 2007. Konfeksiyon İşletmelerinde Kalitenin İyileştirilmesi Amacıyla İstatistiksel Kalite Kontrol Yöntemlerinin Kullanılması Üzerine Bir Araştırma. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 212.
  9. Bek, G.A., 2008. Bir Konfeksiyon İşletmesinde Proses ve Kalite Kontrol. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, 114.
  10. Dengizler Kayaalp, İ., Erdoğan, M., Ç., 2009. Konfeksiyon İşletmesinde Dikiş Hatalarının İstatistiksel Proses Kontrol Yöntemlerini Kullanarak Azaltılması. Tekstil ve Konfeksiyon Dergisi, 19(2), 169-174.
  11. Özeren, F., İlhan, İ., 2011. A Statistical Process Control Application for Sewing Faults in Men's Suit Production. Journal of Textile & Apparel/Tekstil ve Konfeksiyon, 21(4), 397-404.
  12. Duran, C., Çetindere, A., 2012. Konfeksiyon Sanayiinde Faaliyet Gösteren Bir İşletmede İstatistiksel Proses Kontrol Teknikleri ile Ürün Hatalarının Analiz Edilmesi. Ç.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 21(2), 233-254.
  13. Islam, T., Khan, S.A., Sakib, M.H., Sakib, A., Siddiquee, A.B., 2017. Analysis of Major Defects Position and Percentage in Sewing Lines of A Garments Factory with the Help of Pareto Chart, Cause Effect Diagram and Sigma Level. International Journal of Scientific Engineering Research, 8(7), 1885-1890.
  14. Abtey, M.A., Kropi, S., Hong, Y., Pu, L., 2018. Implementation of Statistical Process Control (SPC) in the Sewing Section of Garment Industry for Quality Improvement. Autex Research Journal, 18(2), 160-172.
  15. Tahiduzzaman, M., Rahman, M., Dey, S.K., Kapuria, T.K., 2018. Minimization of Sewing Defects of an Apparel Industry in Bangladesh with 5S & PDCA. American Journal of Industrial Engineering, 5(1), 17-24.
  16. Duran, R.M., Düzdar Argun, İ., 2020. Tekstil Üretiminde Dikimhane Atölyesinde Hata Analizi Uygulaması. International Marmara Sciences Congress (Imascon 2020 – Autumn), 4-5 Aralık 2020, Kocaeli, 633-639.
  17. Gobena, S.T., Kumar, S., 2020. Application of Pareto Analysis and Ishikawa Diagram on Sewing Industries Firm (A Case Study on Gulele Garment Share Company, Addis Ababa). International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM), 2(5), 489-499.
  18. Mughal, U.K., Khan, M.A., Kumar, P., Kumar, S., 2021. Identification and Analysis of Stitching Defects at the Stitching Unit: A Case Study. In Proceedings of the First Central American and Caribbean International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Port-Au-Prince, Haiti, June 15-16.
  19. Duru Baykal, P., Göçer, E., 2012. Konfeksiyonda Kumaş ve Model Çeşitliliğinin Üretimde Kalite ve Verimliliğe Etkisi. Tekstil ve Mühendis Dergisi, 19(87), 15-23.

## Next-Month Prediction of Hourly Solar Irradiance based on Long Short-Term Memory Network

İnayet Özge AKSU\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-0963-2982

<sup>1</sup>Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Computer and Informatics, Department of Artificial Intelligence Engineering, Adana

Geliş tarihi: 02.03.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: AKSU, İ.Ö., (2023). Next-Month Prediction of Hourly Solar Irradiance Based on Long Short-Term Memory Network. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(1), 225-232.

### Abstract

Today, in parallel with the population growth and the advancement of technology, development concerns have started to arise in terms of country administrators. Therefore, alternative solutions to classical energy sources are sought. Renewable energy sources are one of the preferred energy sources today. The popularity of renewable energy sources, including solar energy, is increasing day by day. Solar energy has the potential and accessibility to spread faster than other renewable energy sources. Since Türkiye is located in a region with a high potential in terms of solar energy, which is generally called the sun belt, it is a right decision to prefer solar energy as an energy source in our region. In this study, time series prediction using Long Short-Term Memory (LSTM) Network method is used for short-term solar irradiance estimation. In order to demonstrate the success of the results, a comparison was made with the Artificial Neural Network (ANN) method. Finally, prediction results of solar irradiance were compared with statistical tests and error analyzes were given in numerically.

**Keywords:** Long short-term memory, Solar irradiance, Time series prediction, Solar energy

### Uzun Kısa Dönemli Bellek Ağına Dayalı Saatlik Güneş Işınımının Gelecek Ay Tahmini

#### Öz

Günümüzde nüfus artışına ve teknolojinin ilerlemesine paralel olarak ülke yöneticileri açısından kalkınma kaygıları ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu nedenle klasik enerji kaynaklarına alternatif çözümler aranmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları günümüzde önerilen enerji kaynaklarından biridir. Güneş enerjisi de dahil olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının popüleritesi her geçen gün artmaktadır. Güneş enerjisi, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından daha hızlı yayılma potansiyeline ve erişilebilirliğine sahiptir. Türkiye genel olarak güneş kuşağı olarak adlandırılan güneş enerjisi potansiyeli yüksek bir bölgede yer aldığından bölgemizde enerji kaynağı olarak güneş enerjisini tercih etmek doğru bir karardır. Bu çalışmada, kısa dönem güneş ışınımı tahmini için Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) Ağı yöntemi kullanılarak zaman serisi tahmini kullanılmıştır. Sonuçların başarısını ortaya koymak için Yapay

---

\*Corresponding author (Sorumlu yazar): İnayet Özge AKSU, [oaksu@atu.edu.tr](mailto:oaksu@atu.edu.tr)

Sinir Ağları (YSA) yöntemi ile karşılaştırma yapılmıştır. Son olarak güneş ışınımının tahmin sonuçları istatistiksel testlerle karşılaştırılmış ve hata analizleri sayısal olarak verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Uzun kısa süreli hafıza, Güneş ışınımı, Zaman serisi tahmini, Güneş enerjisi

## 1. INTRODUCTION

One of the causes of many negative natural events experienced today is the climate crisis that has arisen due to carbon emissions. More and more fossil fuels are used to increase the increasing energy demand, and so the amount of carbon released to nature increases. Energy is an important factor for the continuity of nature and social life. As a result of the increase in the amount of greenhouse gas emissions due to human activities and the change in the concentration of natural greenhouse gases, the problem of climate change has reached significant dimensions. Climate change due to global warming is cited as a cause of many problems, from melting glaciers to changes in climate zones, from drought to changes in the ecological system. Solutions to this problem are being sought on both a global and national level. One of the recommended methods to meet the great demand in the energy field today is the use of renewable energy sources. Countries encourage the use of renewable energy because it is "clean energy". Recently, carbon border adjustment mechanism has come to the fore as a solution to the carbon emission problem. Companies doing business with industrialists in the EU are interested in this issue. When they use carbon emission-based methods during their production processes, they will face some sanctions during export. For this reason, companies are searching ways to meet their energy needs with more environmentally friendly methods.

Considering the climatic conditions and geography of Türkiye, the use of renewable energy sources is also important in reducing environmental problems caused by greenhouse gas emissions and reducing foreign dependency in the field of energy. Many countries, including Türkiye, are developing different applications to increase the use of environmentally friendly and sustainable energy

sources. Solar energy is one of Türkiye's main renewable energy sources [1]. With the widespread use of solar energy, many studies are made today on the estimation of solar radiation values. In this study, long short-term memory (LSTM) method, which is one of the deep learning approaches that has been used frequently in recent years, has been applied for the estimation of hourly values of the solar radiation in our country.

There are many studies on solar radiation in the literature. Angstrom was the first to propose the idea that the intensity of solar radiation could be calculated [2]. With the energy issue gaining importance day by day, studies in this field have reached different dimensions over time. There are many studies that developed empirical models for solar radiation estimation [3-6]. In addition to the excessive use of Artificial Neural Networks (ANNs) in this field, many data mining techniques are also successfully used to predict solar radiation. To forecast global radiation for Seeb locations, AI-Alawi and AI-Hinai [7] used a multilayer feed forward network. In the study, back propagation method was used to train the artificial neural network. In artificial neural network architectures, the signals that are given to the input layer change depending on the structure of the problem. In this study, mean values of wind speed, and sunshine hours, pressure, relative humidity, temperature, vapor pressure, and location, month were used as signals sent to the first layer. At the end of the study, it is seen that the mean MAPE ranged between 5.43 and 7.30. Solar radiation estimation is studied globally, as well as on a country-by-country and even regional basis. Real data from target regions are generally used in this field. Mellit and Pavan [8] proposed a useful technique for forecasting solar irradiance based on the ANN model, which could estimate the solar irradiance 24 hours in advance using the current values of the mean daily solar irradiance and ambient air temperature. The results obtained at the end of the study were evaluated for sunny

and cloudy days. In [9] using latitude, longitude, the number of days in the week, and the sunshine ratio as input variables, Khatib et al developed a multilayer perception model to forecast the clearness index in Malaysia. The neural network used is designed in a feed-forward structure. In Saudi Arabia, Alharbi [10] employed neural networks to estimate solar radiation and compared the results with classical training and Extreme Learning Machines (ELM). Pang et al [11] suggested a recurrent neural network model to research the role of new deep learning techniques in accurate solar radiation prediction. In 2011, the monthly average global solar radiation on a horizontal surface was calculated for the Gusau, Nigeria region [12]. Meteorological data was used as a forecasting method with feed forward back propagation neural network. While solar radiation is used as output parameter, maximum ambient sunshine duration, relative humidity and temperature are used as input signals. The predicted and measured levels of the global sun's radiation are given at the end of the study, emphasizing the success of the method.

In addition to these studies, the LSTM algorithm is applied frequently for solar radiation prediction. Recent developments in the LSTM algorithm offer a new perspective to address this issue. Qing and Niu [13] estimated hourly solar radiation values with the LSTM method, using the weather forecast values of the same time period as input data in their studies. Kara [14] used the LSTM method for the daily solar radiation estimation problem. The data of Çorum - Türkiye region is used and obtained results compared with different machine learning models. When the prediction performance of the LSTM model is compared with traditional machine learning models, it is stated that the LSTM results are more successful. Yildirim et al estimated one-hour-ahead solar radiation with different methods based on neural network using PV data from the Tarsus region in Türkiye in 2023 [15]. Numerical and graphical comparisons made at the end of the study show that the LSTM method is the most successful method for one hour forward solar radiation estimation. In the study in 2023 [16], the LSTM method was preferred to

estimate the Global horizontal solar Irradiation (GHI). Real data of Erfoud Moroccan city were used. The major goal is to simultaneously estimate hourly and sub-hourly GHI using only endogenous historical data over different time horizons. Two scenarios have been preferred: a yearly performances scenario that takes into account all climatic conditions and a seasonal performances scenario that distinguishes between the climatic conditions that define each season of the year. In the study, LSTM was compared with NN and (Random Forest) RF methods. Even with the high variability of GHI, the LSTM network is the most robust method. In comparison to ANN models, LSTM has good performance and high stability. In another study in 2023 [17], Short-Term Solar Irradiance estimation was made using three different estimation methods. When the results were examined using various error criteria, it was observed that the isolated convolutional neural network (CNN-1D) and LSTM methods were more successful. In this study, short-term solar irradiance estimation is aimed utilizing time series prediction using LSTM Network approach.

## 2. MATERIALS AND METHODS

Long Short-Term Memory (LSTM) is a specific recurrent neural network (RNN) proposed by Hochreiter and Schmidhuber for modeling temporal sequences [18]. The backpropagation mechanism used by RNN structures during calculation may cause problems in error backflow, whereas the LSTM method provides long-range dependencies. The memory blocks shown in Figure 1 have an important place during the information flow. In their structures, they contain special multiplying units called gates to control the flow of signal and memory cells that store the temporary state of the network. The gates in the LSTM architecture as follows [19]:

- The forget gate: The forget gate classifies the data as either being kept or being thrown away.
- The input gate: The cells are updated by the input gate.

- The output gate: The next concealed state is decided by the output gate.

Moreover, LSTM features an internal memory unit and gate structure to circumvent the RNN training difficulties of vanishing gradient and exploding gradient.

It is critical to calculate particular values in order for the architecture to function. Assume that the variables  $f_t$  for the forget gate,  $S$  for the candidate internal state,  $i_t$  for the input gate,  $h_t$  for the memory cell state,  $o_t$  for the output gate and  $C_t$  for the internal memory of the unit are all present. Figure 1 displays a few of these variables.

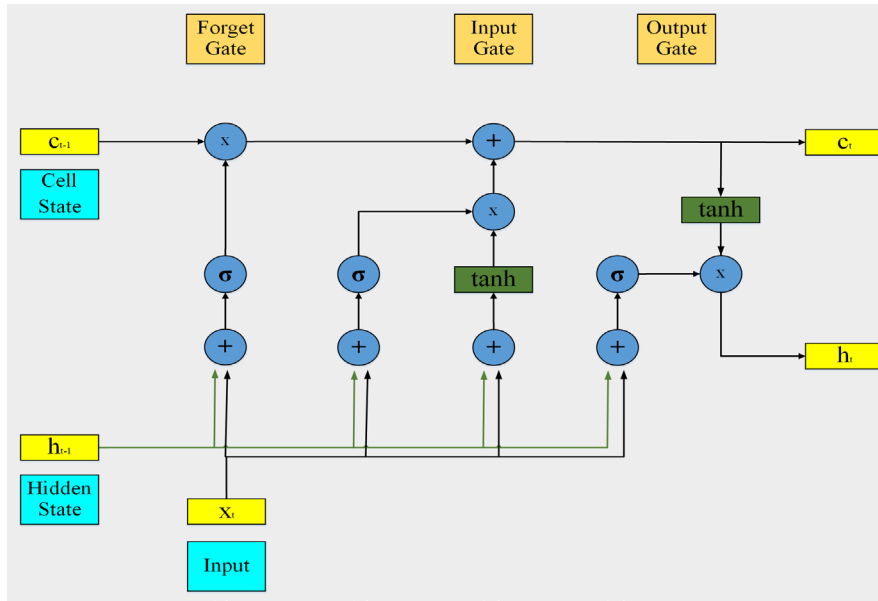


Figure 1. The structure of the LSTM Network method

In this situation, recursive equations of the LSTM method are defined as follows:

$$f_t = \sigma(W_f X_t + U_f h_{t-1} + b_f) \quad (1)$$

$$i_t = \sigma(W_i X_t + U_i h_{t-1} + b_i) \quad (2)$$

$$S = \tanh(W_c X_t + U_c h_{t-1} + b_c) \quad (3)$$

$$C_t = i_t S_t + f_t S_{t-1} \quad (4)$$

$$o_t = \sigma(W_o X_t + U_o h_{t-1} + V_o C_t + b_o) \quad (5)$$

$$h_t = o_t \tanh(C_t) \quad (6)$$

Here:

- $\sigma$  and  $\tanh$  are the activation functions,
- $X$  is the memory cell's input vector at time  $t$ ,

- $W_i, W_c, W_o, W_f, U_c, U_i, U_f, U_o,$  and  $V_o$  are weightes of the neural network.
- $b_f, b_c, b_i,$  and  $b_o$  are biases.

In addition:

$$\sigma = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (7)$$

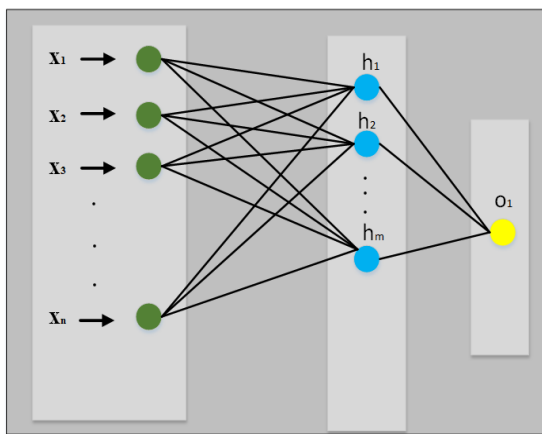
Equations 1,2, and 5 in this section defines the input, forget and output gates. Using these equations representing the gates, it is decided which part of the newly calculated candidates will be allowed to pass and which part will be forgotten.

Artificial Neural Network (ANN) is another technique applied in this study. ANNs are machine learning methods developed by modeling the



neural structures of the brain in a computer environment. Inspired by the functioning of the human brain, many different neural network models have been proposed. When the studies in literature are examined, it is seen that ANN models are frequently preferred in the solution of forward prediction problems.

The ANN structure generally consists of 3 layers, as shown in Figure 2; input layer, hidden layer and output layer. The signal from the outside is received through the input layer to the neural network structure. It is then transmitted to the output layer via the hidden layer, and as a result of the network, it is transmitted to the external environment via the output layer. The number of neurons in the hidden layer is chosen through trial and error in order to get the best results, whereas the number of neurons in the input layer and the output layer is chosen depending on the nature of the problem.



**Figure 2.** Architecture of Artificial Neural Network with 3 layers

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The data set used in this study was created with real-time data from a 1 MW PV plant. Two different artificial neural network models were used in the estimation phase in the study made with the data obtained by collecting 5-month irradiation data (January - May) from the solar power plant. The data were taken from the PV

panel at one-hour intervals. The time series data set of solar radiation was used in the study. The prediction is aimed with Long Short-Term Memory (LSTM) Neural Network by using 4-month data in the training phase and 1-month data in testing phase. In order to show the accuracy in time series data model, comparison was made with the Artificial Neural Network (ANN) method. At the end of the study, 3 different error criteria, Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE) and Mean Absolute Percentage Error (MAPE) were used in the comparison of the results obtained with the two methods. The error criteria used are as follows:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |e(t)| \tag{8}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (e(t))^2} \tag{9}$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{X_{desired} - X_{actual}}{X_{actual}} \right| \tag{10}$$

where n refers to the number of samples in the dataset and e refers to the error between predicted and actual values.  $X_{desired}$  and  $X_{actual}$  are the real value and the predicted value in the data set, respectively. Table 1 displays the results of the ANN and LSTM algorithms using the error criteria. The linear regression values of the estimation results are also given in Table 1.

**Table 1.** Performance results of LSTM and ANN methods

Error Criteria	LSTM	ANN
RMSE	142.8028	168.9314
MAE	86.1236	122.9337
MAPE	45.0233	64.1112
Regression	0.90186	0.85993

The graphical results of solar irradiation prediction are given in Figure 3. As seen in the figure, the estimation results obtained with LSTM are more consistent with the actual values. When the results are examined, it is seen that there is a more successful approach with the LSTM method, especially at the peak point.

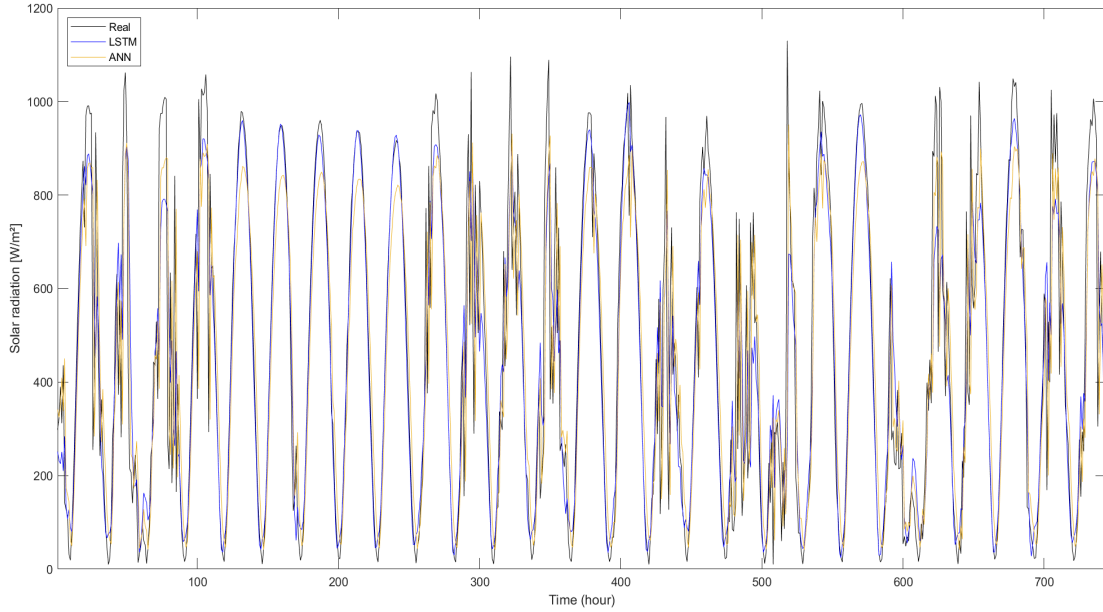


Figure 3. Predicted solar irradiation using an LSTM network

The results of the two estimation methods are given with the linear regression results. Regression is the process of fitting models to data. The simplest and most common type of regression is

linear regression since its graph shows a straight line. The regression graphs of the estimation results obtained with LSTM and ANN for solar radiation are given in Figure 4.

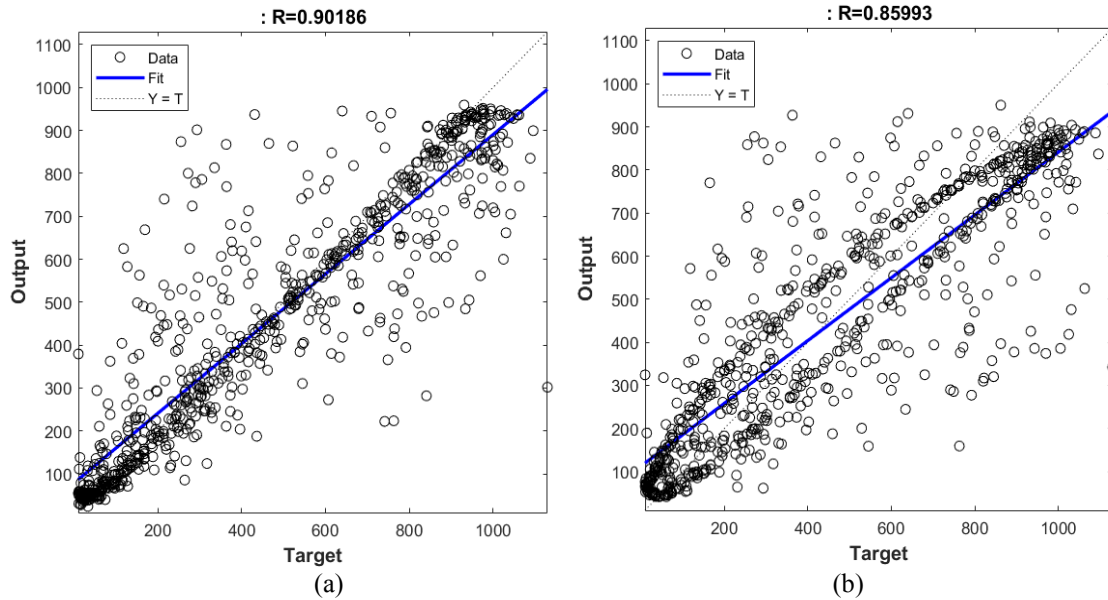


Figure 4. Regression graphs with (a) LSTM method (b) ANN method

#### 4. CONCLUSIONS

The amount of energy resources currently being used is expected to be insufficient given the daily rapid increase in the global energy supply. Renewable energy sources are being increasingly sought after as a solution to this issue. Solar energy, which is seen as a limitless resource, is the most widely used of these techniques. This study aims to estimate the levels of solar irradiation obtained from PV panels. The recently popular LSTM Network method has been preferred for the estimation process. A comparison was made with the ANN method to measure the success of the method. From the values obtained according to the error criteria, it is seen that both methods are within the acceptable error values but LSTM is more successful. In addition, it was determined that the LSTM method would provide closer values than ANN. When the graphical results are examined, it is seen that the LSTM method is more successful at peak points.

The recommendation for further study is to develop the combination of LSTM and Convolutional Neural Network (CNN) models.

#### 5. REFERENCES

1. Bayrakçı, A.G., Koçar, G., 2012. Utilization of Renewable Energies in Turkey's Agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 618-633.
2. Angstrom, A., 1924. Solar and Terrestrial Radiation. Report to the International Commission for Solar Research on Actinometric Investigations of Solar and Atmospheric Radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50(210), 121-126.
3. Sonmete, M.H., Ertekin, C., Menges, H.O., Haciseferoğullari, H., Evrendilek, F., 2011. Assessing Monthly Average Solar Radiation Models: A Comparative Case Study in Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 175, 251-77.
4. Badescu, V., Gueymard, C.A., Cheval, S., Oprea, C., Baci, M., Dumitrescu, A., Iacobescu, F., Rada, C., 2012. Computing Global and Diffuse Solar Hourly Irradiation on Clear Sky. Review and Testing of 54 Models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1636-1656.
5. Khatib, T., Mohamed, A., Sopian, K., 2012. A Review of Solar Energy Modeling Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 2864-9.
6. Behrang, M.A., Assareh, E., Noghrehabadi, A.R., Ghanbarzadeh, A., 2011. New Sunshinebased Models for Predicting Global Solar Radiation Using PSO (Particle Swarm Optimization) Technique. *Energy*, 36, 3036-49.
7. Al-Alawi, S.M., Al-Hinai, H.A., 1998. An ANN-based Approach for Predicting Global Radiation in Locations with No Direct Measurement Instrumentation, *Renewable Energy*, 14, 1-4, 199-204.
8. Mellit, A., Pavan, A.M., 2010. A 24-h Forecast of Solar Irradiance Using Artificial Neural Network: Application for Performance Prediction of a Grid-connected PV Plant at Trieste, Italy. *Solar Energy*, 84(5), 807-821.
9. Khatib, T., Mohamed, A., Sopian, K., Mahmoud, M., 2012. Solar Energy Prediction for Malaysia Using Artificial Neural Networks. *International Journal of Photoenergy*, 2012.
10. Alharbi, M.A., 2013. Daily Global Solar Radiation Forecasting Using ANN and Extreme Learning Machines: A Case Study in Saudi Arabia (Master of Applied Science Thesis). Halifax, Nova Scotia: Dalhousie University.
11. Pang, Z., Niu, F., O'Neill, Z., 2020. Solar Radiation Prediction Using Recurrent Neural Network and Artificial Neural Network: A Case Study with Comparisons. *Renewable Energy*, 156, 279-289.
12. Azeez, M.A.A., 2011. Artificial Neural Network Estimation of Global Solar Radiation Using Meteorological Parameters in Gusau, Nigeria. *Archives of Applied Science Research*, 3(2), 586-95.
13. Qing, X., Niu, Y., 2018. Hourly Day-ahead Solar Irradiance Prediction Using Weather Forecasts by LSTM. *Energy*, 148, 461-468.

14. Kara, A., 2019. Global Solar Irradiance Time Series Prediction Using Long Short-Term Memory Network. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 4, 7.
15. Yildirim, A., Bilgili, M., Ozbek, A., 2023. One-hour-ahead Solar Radiation Forecasting by MLP, LSTM, and ANFIS Approaches. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 135(1), 10.
16. Bounoua, Z., Mechaqrane, A., 202). Hourly and Sub-hourly Ahead Global Horizontal Solar Irradiation Forecasting via A Novel Deep Learning Approach: A Case Study. *Sustainable Materials and Technologies*, e00599.
17. Marinho, F.P., Rocha, P.A., Neto, A.R., Bezerra, F.D., 2023. Short-Term Solar Irradiance Forecasting Using CNN-1D, LSTM, and CNN-LSTM Deep Neural Networks: A Case Study with the Folsom (USA) Dataset. *Journal of Solar Energy Engineering*, 145(4), 041002.
18. Hochreiter, S., Schmidhuber, J., 1997. Long Short-Term Memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780.
19. Pustokhin, D.A., Pustokhina, I.V., Dinh, P.N., Phan, S.V., Nguyen, G.N., Joshi, G.P., 2023. An Effective Deep Residual Network Based Class Attention Layer with Bidirectional LSTM for Diagnosis and Classification of COVID-19. *Journal of Applied Statistics*, 50(3), 477-494.

## Kangal Termik Santralinin 3. Ünitesinin Enerji ve Ekserji Analizi

Hasan Can ADEM<sup>1</sup> ORCID 0000-0003-3546-7332  
Cahit GÜRLEK<sup>\*2</sup> ORCID 0000-0002-0273-2999

<sup>1</sup>Kangal Termik Santral Elektrik Üretim A.Ş., Kangal, Sivas

<sup>2</sup>Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sivas

Geliş tarihi: 23.02.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: ADEM, H.C., GÜRLEK, C., (2023). Kangal Termik Santralinin 3. Ünitesinin Enerji ve Ekserji Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 233-242.

### Öz

Fosil yakıtlı güç üretim sistemlerinin verimliliğinin artırılması; enerji üretiminin artması, yakıt kaynaklarının, çevre, ekosistem ve insan sağlığının korunması açısından önemlidir. Verim artırma uğraşları için enerji ve ekserji analizleri enerji sistemlerindeki enerji kayıplarının ve kullanılabilir iş potansiyelinin belirlenmesinde önemli araçlardır. Bu çalışmada 157 MW Kurulu gücündeki Kangal Termik Santrali 3. ünitesinin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Hesaplamalar 34 farklı noktadan elde edilen veriler kullanılarak termik santral ünitesinin her bir elemanı için gerçekleştirilmiştir. En yüksek ekserji kayıp oranı kazanda elde edilirken (84,768%) en düşük ekserji kaybı kondenser tahliye pompasında elde edilmiştir (0,0089%). İkinci yasa verimi en fazla yüksek basınçlı besleme suyu ısıtıcısında (%97,73) ve en az kazanda (%52,43) gerçekleşmiştir. Termik santral ünitesinin ısıl ve ikinci yasa verimleri sırasıyla %32,92 ve %53,53 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçların termik santralin optimize edilmesinde faydalı olacağı düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Ekserji analizi, Enerji analizi, Kangal, Termik güç santrali

## Energy and Exergy Analysis of the 3<sup>rd</sup> Unit of Kangal Thermal Power Plant

### Abstract

Improving the efficiency of fossil-fueled thermal power plants is important in terms of increasing energy production and protecting fuel resources, environment, ecosystem and human health. Energy and exergy analyses are effective tools for determining energy losses and the available work potential of energy systems when dealing with efficiency improvements. In this study, energy and exergy analysis of the 3rd unit of Kangal Thermal Power Plant with an installed capacity of 157 MW were performed. Calculations for each component of the thermal power plant unit were carried out using data obtained from 34 different nodes. The highest exergy loss rate was obtained for the boiler (84.768%) while the least exergy loss rate

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Cahit GÜRLEK, [cgurlek@cumhuriyet.edu.tr](mailto:cgurlek@cumhuriyet.edu.tr)

was obtained for the condenser drain pump (0.0089%). The second law efficiency was highest for the high pressure feed water heater (97.73%) and was lowest for the boiler (52.43%). The thermal and second law efficiencies of the thermal power plant unit were found to be 32.92% and 53.53%, respectively. It is thought that the obtained results will be useful in optimizing the power plant.

**Keywords:** Energy analysis, Exergy analysis, Kangal, Thermal power plant

## 1. GİRİŞ

Çevresel faktörler, artan enerji talebi ve fiyatları nedeniyle son yıllarda alternatif enerji kaynaklarına olan yönelim artmaktadır. Buna rağmen küresel kömür yakıtlı elektrik üretimi 2021'de tüm zamanların en yüksek seviyesine ulaşarak CO<sub>2</sub> salınım miktarını rekor seviyelere çıkarmıştır [1]. Yine 2021 yılı verilerine göre Türkiye'de elektrik üretiminin yaklaşık olarak %31'i (104,2 TWh) kömür kullanılarak gerçekleştirilmiştir [2]. Ek olarak Türkiye'deki kurulu gücün yaklaşık %20,5'ini katı yakıtlı santraller oluşturmaktadır ve verimleri %30-35 civarındadır [3-5]. Bu nedenle mevcut kurulu kömür yakıtlı termik santrallerin veriminin iyileştirilmesi; enerji üretiminin artması ve karbon salınım miktarlarının azaltılması gibi hem ekonomik hem de çevresel faktörler açısından önemlidir. Ekserji analizi kurulu santrallerin verimlerinin iyileştirilmesi için kullanılabilir iş kayıplarının ne oranda hangi bileşende gerçekleştiğinin belirlenmesinde önemli bir araçtır ve literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. Arslan, Seyitömer Termik Santrali için yaptığı enerji ve ekserji analizinde en fazla ekserji kaybının kazanda olduğunu tespit etmiştir [7]. Kaya, basit bir Rankine çevrimi için ekserji analizi yaparak net güç çıktısına etki eden parametreleri belirlemiştir. Kazan basıncının artırılarak türbin çıkış basıncının düşürülmesinin türbinin ekserjik verimini artırdığını gözlemiştir [8]. Erdem ve arkadaşları, Türkiye'de bulunan dokuz farklı kömür yakıtlı termik santralin için yaptıkları çalışmada en yüksek ekserji verimine (%37,88) Çan Termik Santrali'nin, en düşük ekserji

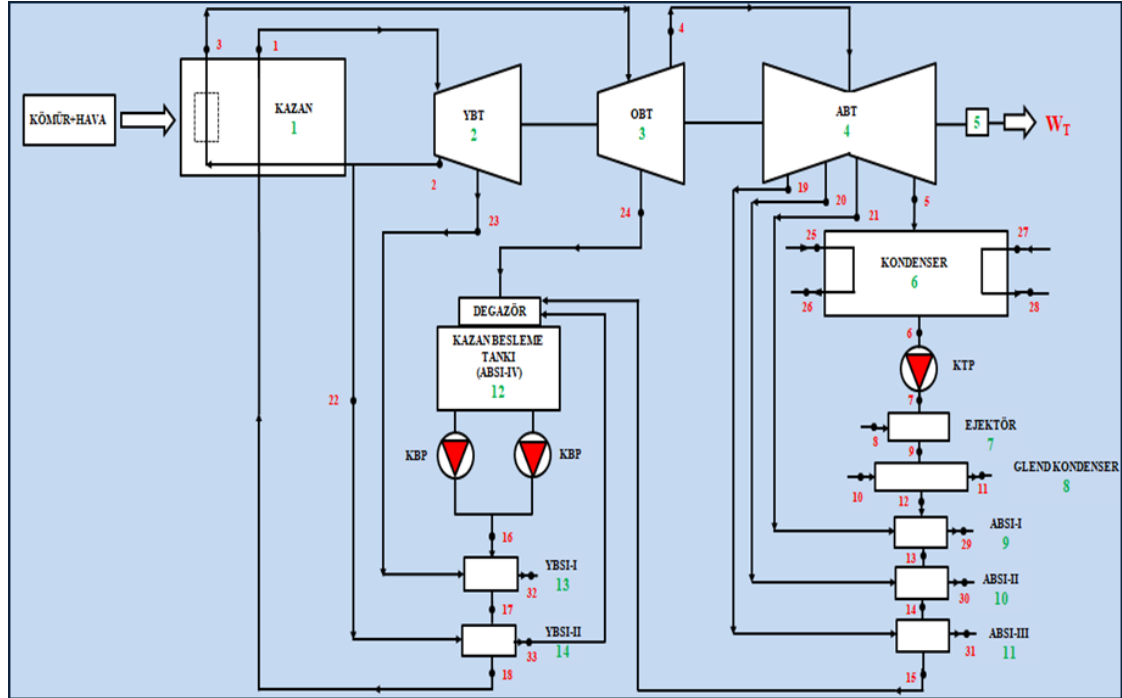
verimine ise (%28,55) Kangal Termik Santralinin, sahip olduğunu belirtmişlerdir [9]. Regulağadda ve arkadaşları, 32 MW gücünde bir kömür yakıtlı enerji santrali için yaptıkları ekserji ve enerji analizinde ekserji kaybının en fazla kazana olduğunu belirtmişler ve santralin enerji verimini %30,12, ekserji verimini ise %25,38 olarak hesaplamışlardır [10]. Coşkun ve arkadaşları, Çayırhan Termik Santrali için yaptıkları enerji ve ekserji analizleri aracılığıyla santralin ısı ve ikinci yasa verimlerini sırasıyla %38 ve %53 olarak bulmuşlardır. Santralde en fazla ekserji kayıplarının sırasıyla; kazan, türbin grupları, kondenser, ısıtıcı grup ve pompa gruplarında meydana geldiği belirtilmiştir [11]. Ünal ve Özkan, Tunçbilek Termik Santral için yirmi yedi farklı düğüm noktasına ait verileri kullanarak enerji ve ekserji hesaplamaları yapmışlardır. En yüksek enerji (%79,5) ve ekserji (%71,1) kayıp oranları kazan için elde edilmiştir. Santrale ait ısı ve ikinci yasa verimleri sırasıyla %32,3 ve %75,1 olarak hesaplanmıştır [12]. Ozdil ve arkadaşları, bir elektrik santralindeki Organik Rankine Çevriminin (ORC) evaporatör girişindeki su fazının etkisini gözlemek amacıyla farklı su fazları için ekserji yıkımı ve ekserji verimlerini hesaplamışlardır. Ekserji verimi; kalitesi 0,3 ve 0,7 olan su karışım formları için sırasıyla %41,04 ve %40,29 olarak hesaplanmıştır [13]. Ozdil ve Pekdur, Türkiye'de bulunan 14,25 MW'lık bir kojenerasyon sistemi için yaptıkları analizlerde en büyük tersinmezliğin, toplam sistem tersinmezliğinin %36'sı olan kazanda meydana geldiğini ve ayrıca, ekonomizör ve bacanın, sırasıyla %34 ve %25 gibi önemli miktarlarda tersinmezliklere sahip olduğunu bulmuşlardır [14]. Ozdil ve arkadaşları, sistem

bileşenleri; akışkan yataklı kömür yakıcı, ısı geri kazanımlı buhar jeneratörü, ekonomizör, fanlar, pompalar, siklon ve baca olarak ele alınan 6,5 MW'lık bir elektrik santrali için enerji ve ekserji analizleri yapmışlardır. En yüksek tersinmezliği akışkan yataklı kömür yakıcıda gözlemlemişlerdir [15]. Bayrakçeken, bir doğalgazlı kombine çevrim santrali için yaptığı enerji ve ekserji analizinde santralin ısı verimini %47,2, gaz türbininin verimini %31, buhar türbinin verimini %30,5 ve santralin ekserji verimini ise %45,7 olarak hesaplamıştır. En fazla enerji kaybının kondenser ve bacada en fazla ekserji kaybının ise %27,8 ile yanma odasında gerçekleştiği belirtilmiştir [16]. Altunbaş, Afşin-Elbistan bölgesinde bulunan linyit yakıtlı bir termik santralindeki toplam ekserji kaybını 436,7 MW, kazandaki ekserji kaybını ise 350,1 MW olarak hesaplamıştır. Santralin ısı verimi %35,7, ikinci yasa verimi ise %58,29 olarak bulunmuştur. Santraldeki ekserji kaybının azaltılması için kazan ve kondenserde ısı transferine engel olabilecek tortu oluşumunun azaltılması öneri olarak sunulmuştur [17]. Dikili ve arkadaşları, İstanbul'da faaliyet gösteren 410,8 MW gücündeki doğalgaz yakıtlı kombine çevrim güç santralinde enerji ve ekserji analizi yapmışlardır. En fazla enerji kaybının sırasıyla kondenser ve bacada, en fazla tersinmezliğin ise yanma odasında ve gaz türbininde olduğu tespit edilmiştir [18]. Kopaç ve arkadaşları, Çatalağzı Termik santrali için yaptıkları enerji ve ekserji analizi aracılığıyla en yüksek enerji kaybının kondenserde, en yüksek ekserji kaybının ise kazanda olduğunu bulmuşlardır [19]. Topal ve arkadaşları Zonguldak ilinde bulunan bir kömür yakıtlı süper kritik termik santrali için enerji ve ekserji analizi yapmışlardır. Kömürün enerjisinin %48,5'inin kondenserde soğutma suyuna aktarıldığı, ekserjisinin %49,2'sinin ise kazanda yok edildiği hesaplanmıştır. Santralin enerji verimi %33,65, ekserji verimi ise %31,42 olarak bulunmuştur [20].

Bu çalışmada Sivas'ta Kurulu olan 157 MW gücündeki Kangal Termik Santrali'nin 3. Ünitesi için ekserji ve enerji analizi yapılmıştır. Ünite 16 adet ana sistem elemanı bulunmaktadır. Her bir eleman için kayıp kullanılabilir ekserji ve ikinci yasa verimleri hesaplanmıştır.

## 2. YÖNTEM

Sivas Kangal Termik Santralinin 3. ünitesinin kurulu gücü 157 MW'dır. Bu ünite; 1 adet türbin grubu, 1 adet buhar kazanı, 1 adet kondenser, pompa grupları, ısıtıcı grupları ve yardımcı grup olarak adlandırılan glend kondenser ve ejektör yer almaktadır. Türbin grubu, alçak basınç türbini (ABT), orta basınç türbini (OBT) ve yüksek basınç türbininden (YBT) oluşmaktadır. Isıtıcı grupları ise 4 adet alçak basınç besleme suyu ısıtıcısı ve 2 adet yüksek basınç besleme suyu ısıtıcısından oluşmaktadır. Santral ünitesinde kondenser tahliye pompa (KTP) grubu ve kazan besleme pompa (KBP) grubu bulunmaktadır. Ünite alçak, yüksek ve orta basınç türbinlerinden alınan ara buharlar aracılığıyla besleme suyu ısıtılarak sistemin genel veriminin artırılması sağlanmaktadır. Alçak basınç türbininin belirli kademelerinden alınan ara buhar, alçak basınç besleme suyu ısıtıcılarına (ABSI-1, ABSI-2 ve ABSI-3) gönderilerek kademeli olarak besleme suyu ısıtılmaktadır. Orta basınç türbininden 4 nolu alçak basınç ısıtıcısı (ABSI-4) diye de adlandırılan kazan besleme tankına ara buhar verilmektedir. Yüksek basınç türbininden 1 nolu yüksek basınç besleme suyu ısıtıcısına (YBSI-1) ara buhar verilmektedir. 2 nolu yüksek basınç besleme suyu ısıtıcısına (YBSI-2) ise yüksek basınç türbininde iş görmüş ve tekrar kızdırılmak üzere kazana gönderilen buhar hattından ara buhar verilmektedir. Şekil 1'de ünitenin akış diyagramı sunulmuştur. Hesaplamalar için Şekil 1'deki 34 adet düğüm noktasına ait sıcaklık, basınç ve kütleli debi verileri kullanılmıştır.



Şekil 1. Kangal Termik Santralini 3. Ünitesinin akış diyagramı

Enerji ve ekserji analizleri için aşağıdaki kabuller ve denklemler kullanılmıştır. Potansiyel ve kinetik enerji değişimleri ihmal edilmiştir. Kazana giren havanın ve yanma sonu ürünlerinin mükemmel gaz olduğu kabul edilmiştir. Referans çevre koşulları 25 °C ve 1 bar olarak alınmıştır.

Enerjinin korunumu ilkesi sürekli akışlı açık sistemler için aşağıdaki şekildedir:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_c \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum \dot{m}_g \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad (1)$$

Burada  $\dot{Q}$  ve  $\dot{W}$  sırasıyla kontrol hacmin sınırlarından geçen ısı ve işi,  $\dot{m}$ ,  $h$ ,  $\frac{V^2}{2}$ ,  $gz$  ise sırasıyla kütleli debi, birim kütle başına entalpi ve kinetik ve potansiyel enerji değişimlerini temsil etmektedir. Potansiyel ve kinetik enerjiler ihmal edilirse enerjinin korunumu aşağıdaki gibi yazılır:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum (\dot{m}h)_c - \sum (\dot{m}h)_g \quad (2)$$

Tersinir iş aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$\dot{W}_{tr} = \sum \dot{m}_g \left( h - T_0 s + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum \dot{m}_c \left( h - T_0 s + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad (3)$$

Burada  $\dot{W}_{tr}$  tersinir işi,  $T_0$  ve  $s$  ise sırasıyla referans çevrenin mutlak sıcaklığını ve birim kütle başına entropiyi temsil etmektedir. Potansiyel ve kinetik enerjiler ihmal edilirse tersinir iş aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\dot{W}_{tr} = \sum \dot{m}_g (h - T_0 s) - \sum \dot{m}_c (h - T_0 s) \quad (4)$$

Termodinamiğin ikinci kanunu aşağıda sunulmuştur:

$$\Delta S_{net} = \Delta S_{üretim} = \sum \dot{m} (s_c - s_g) - \frac{\dot{Q}_A}{T_k} \quad (5)$$

Burada  $\Delta S_{net}$  ( $S_{üretim}$ ) entropi üretimini,  $\dot{Q}_A$  ve  $T_k$  ise sırasıyla çevreden yapılan ısı ve çevre sıcaklığını temsil etmektedir.



Termodinamiğin ikinci kanunu sistem ve çevre ile ısı alışverişi olmadığında aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\Delta S_{net} = \Delta S_{üretim} = \sum \dot{m} (s_{\dot{c}} - s_{\dot{g}}) \quad (6)$$

Tersinmezlik ve kayıp kullanılabilir ekserji birbirine eşit olup aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\dot{I} = T_0 \Delta S_{üretim} \quad (7)$$

Akış kullanılabilirliği herhangi bir x noktası için aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$\psi_x = (h_x - h_0) - T_0 (s_x - s_0) \quad (8)$$

Burada  $\psi_x$ ,  $h_x$  ve  $s_x$  sırasıyla herhangi bir x noktası için akış kullanılabilirliği, entalpi ve entropiyi temsil etmektedir. Kayıp kullanılabilir ekserji ayrıca aşağıdaki şekilde de ifade edilir:

$$\dot{W}_{fay} = \sum m_g \psi_g - \sum m_c \psi_c - X_{yokolan(ky)} \quad (9)$$

Burada  $\dot{W}_{fay}$  ve  $X_{yokolan(ky)}$  sırasıyla sistem elemanında üretilen işi ve kaybolan ekserjiyi temsil etmektedir.

İkinci kanun verimi,  $\eta_{II}$  aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\eta_{II} = 1 - \frac{X_{yokolan(ky)}}{\dot{W}_{tr}} \quad (10)$$

Üretilen net güç,  $\dot{W}_{net}$  aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{Türbin} - \dot{W}_{Pompa} \quad (11)$$

Burada  $\dot{W}_{Türbin}$  ve  $\dot{W}_{Pompa}$  sırasıyla türbinde üretilen iş ve pompa üretilen işi temsil etmektedir.

Santralin ısı verimi,  $\eta_{th}$  aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{giren}} \quad (12)$$

Bir Carnot makinesinin veya herhangi tersinir makine için ısı verim  $\eta_{tr}$ , aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\eta_{tr} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (13)$$

Burada  $T_L$  ve  $T_H$  sırasıyla düşük ve yüksek ısı depoların sıcaklıklarını temsil etmektedir.

Santralin ikinci yasa verimi  $\eta_{II}$ , aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{tr}} \quad (14)$$

Yakıtın fiziksel ekserjisi  $(\bar{e}x^{fiz})_{yakıt}$ , aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\left(\bar{e}x^{fiz}\right)_{yakıt} = \bar{c}_{p,yakıt} \left[ (T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + (\bar{R}T_0 \ln \frac{P}{P_0}) \quad (15)$$

Burada  $\bar{c}_{p,yakıt}$ ,  $T$  ve  $P$  sırasıyla yakıtın özgül ısısını, yakıtın giriş sıcaklığını ve yakıtın giriş basıncını temsil etmektedir.

Baca gazı fiziksel ekserjisi  $(\bar{e}x^{fiz})_{bg}$ , aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\left(\bar{e}x^{fiz}\right)_{bg} = \bar{c}_{p,bg} \left[ (T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + (\bar{R}T_0 \ln \frac{P}{P_0}) \quad (16)$$

Burada  $\bar{c}_{p,bg}$ ,  $T$  ve  $P$  sırasıyla baca gazı özgül ısısını, baca gazı çıkış sıcaklığını ve baca gazı çıkış basıncını temsil etmektedir.

Havanın fiziksel ekserjisi  $(\bar{e}x^{fiz})_h$ , aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\left(\bar{e}x^{fiz}\right)_h = \bar{c}_{p,h} \left[ (T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + (\bar{R}T_0 \ln \frac{P}{P_0}) \quad (17)$$

Burada  $\bar{c}_{p,h}$ ,  $T$  ve  $P$  sırasıyla havanın özgül ısısını, havanın giriş sıcaklığını ve havanın giriş basıncını temsil etmektedir. Yakıtın kimyasal ekserjisi  $\dot{E}_{xyakıt}$ , aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{E}_{x_{yakıt}} = \dot{m}_{yakıt} h_{yakıt} \quad (18) \quad \text{Ünite elemanlarının her biri için enerji ve ekserji dengesi Çizelge 1'de sunulmuştur.}$$

Burada  $\dot{m}_{yakıt}$ ,  $h_{yakıt}$  sırasıyla yakıtın kazana giriş kütleli debisini ve kömürün kalorisini temsil etmektedir.

**Çizelge 1.** Ünitenin enerji ve ekserji dengesi

Ünite elemanları	Enerji dengesi	Ekserji dengesi
Kazan	$\dot{E}_{yakıt} + \dot{E}_{18} + \dot{E}_2 = \dot{E}_{dg} + \dot{E}_1 + \dot{E}_3 + \dot{Q}_{k,kazan}$	$\dot{I}_k = \dot{E}_{x_{yakıt}} + \dot{E}_{x_{18}} + \dot{E}_{x_2} - \dot{E}_{x_{dg}} - \dot{E}_{x_1} - \dot{E}_{x_3}$
YBT	$\dot{E}_1 = \dot{E}_{23} + \dot{E}_2 + \dot{W}_{YBT} + \dot{Q}_{K,YBT}$	$\dot{I}_{YBT} = \dot{E}_{x_1} - \dot{E}_{x_{23}} - \dot{E}_{x_2} - \dot{W}_{YBT}$
ABT	$\dot{E}_4 = \dot{E}_{19} + \dot{E}_{20} + \dot{E}_{21} + \dot{E}_5 + \dot{W}_{ABT} + \dot{Q}_{K,ABT}$	$\dot{I}_{ABT} = \dot{E}_{x_4} - \dot{E}_{x_{19}} - \dot{E}_{x_{20}} - \dot{E}_{x_{21}} - \dot{E}_{x_5} - \dot{W}_{ABT}$
OBT	$\dot{E}_3 = \dot{E}_4 + \dot{E}_{24} + \dot{W}_{OBT} + \dot{Q}_{K,OBT}$	$\dot{I}_{OBT} = \dot{E}_{x_3} - \dot{E}_{x_{24}} - \dot{E}_{x_4} - \dot{W}_{OBT}$
Kondenser	$\dot{E}_5 + \dot{E}_{27} + \dot{E}_{25} = \dot{E}_{28} + \dot{E}_{26} + \dot{E}_6 + \dot{Q}_{K,KON}$	$\dot{I}_{KON} = \dot{E}_{x_5} + \dot{E}_{x_{27}} + \dot{E}_{x_{25}} - \dot{E}_{x_{26}} - \dot{E}_{x_{28}} - \dot{E}_{x_6}$
KTP	$\dot{E}_6 + \dot{W}_{KTP} = \dot{E}_7 + \dot{Q}_{K,KTP}$	$\dot{I}_{KTP} = \dot{E}_{x_6} - \dot{E}_{x_7}$
Ejektör	$\dot{E}_8 + \dot{E}_7 = \dot{E}_9 + \dot{Q}_{K,EJEKTÖR}$	$\dot{I}_{EJEKTÖR} = \dot{E}_{x_8} + \dot{E}_{x_7} - \dot{E}_{x_9}$
Glend Kondenser	$\dot{E}_{10} + \dot{E}_9 = \dot{E}_{11} + \dot{E}_{12} + \dot{Q}_{K,GLEND KON}$	$\dot{I}_{GLEND KON} = \dot{E}_{x_{10}} + \dot{E}_{x_9} - \dot{E}_{x_{11}} - \dot{E}_{x_{12}}$
ABSI-1	$\dot{E}_{12} + \dot{E}_{21} = \dot{E}_{29} + \dot{E}_{13} + \dot{Q}_{K,ABSI-1}$	$\dot{I}_{ABSI-1} = \dot{E}_{x_{12}} + \dot{E}_{x_{21}} - \dot{E}_{x_{29}} - \dot{E}_{x_{13}}$
ABSI-2	$\dot{E}_{20} + \dot{E}_{13} = \dot{E}_{30} + \dot{E}_{14} + \dot{Q}_{K,ABSI-2}$	$\dot{I}_{ABSI-2} = \dot{E}_{x_{20}} + \dot{E}_{x_{13}} - \dot{E}_{x_{30}} - \dot{E}_{x_{14}}$
ABSI-3	$\dot{E}_{19} + \dot{E}_{14} = \dot{E}_{31} + \dot{E}_{15} + \dot{Q}_{K,ABSI-3}$	$\dot{I}_{ABSI-3} = \dot{E}_{x_{19}} + \dot{E}_{x_{14}} - \dot{E}_{x_{31}} - \dot{E}_{x_{15}}$
ABSI-4	$\dot{E}_{24} + \dot{E}_{15} + \dot{E}_{33} = \dot{E}_{16} + \dot{Q}_{K,ABSI-4}$	$\dot{I}_{ABSI-4} = \dot{E}_{x_{24}} + \dot{E}_{x_{15}} + \dot{E}_{x_{33}} - \dot{E}_{x_{16}}$
KBP	$\dot{E}_{34} + \dot{W}_{KBP} = \dot{E}_{16} + \dot{Q}_{K,KBP}$	$\dot{I}_{KBP} = \dot{E}_{x_{34}} - \dot{E}_{x_{16}}$
YBSI-1	$\dot{E}_{16} + \dot{E}_{23} = \dot{E}_{32} + \dot{E}_{17} + \dot{Q}_{K,YBSI-1}$	$\dot{I}_{YBSI-1} = \dot{E}_{x_{16}} + \dot{E}_{x_{23}} - \dot{E}_{x_{32}} - \dot{E}_{x_{17}}$
YBSI-2	$\dot{E}_{22} + \dot{E}_{17} = \dot{E}_{33} + \dot{E}_{18} + \dot{Q}_{K,YBSI-2}$	$\dot{I}_{YBSI-2} = \dot{E}_{x_{22}} + \dot{E}_{x_{17}} - \dot{E}_{x_{33}} - \dot{E}_{x_{18}}$

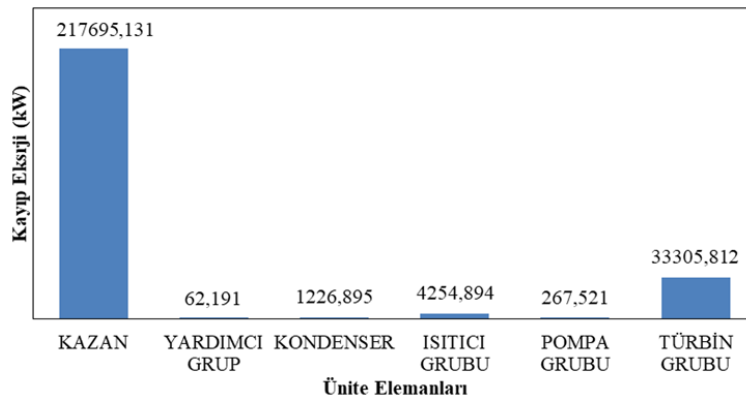
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kangal Termik Santralinin 3. ünitesinin 34 ayrı düğüm noktası için ölçülen basınç, kütleli debi ve sıcaklık değerleri ile bunlara ait faz durumu, entalpi ve entropi değerleri Çizelge 2'de sunulmuştur. Ünitenin eleman grupları için hesaplanan kayıp kullanılabilir ekserji değerleri Şekil 2'de görülmektedir. En fazla ekserji kaybının 217695,131 kW ile kazanda olduğu görülmektedir. Türbin grubu için bu değer 33305,812 kW olarak hesaplanmıştır. Türbin grubundan sonra en fazla ekserji kaybının 4254,894 kW ile ısıtıcı grubunda olduğu görülmektedir. Bunu takip eden en yüksek

kayıp ekserji 1226.895 kW ile kondenserde meydana gelmiştir. Pompa grubu için ekserji kaybı 267,521 kW tır. En az kaybın ise 62,191 kW ile yardımcı gruplarda meydana geldiği görülmektedir. Üniteyi oluşturan her bir sistem elemanı için kayıp kullanılabilir ekserji değerleri Çizelge 3'te sunulmuştur. En fazla ekserji kaybının kazanda en az ekserji kaybının ise pompa grubunda bulunan kondenser tahliye pompasında meydana geldiği görülmektedir. Kazandan sonra en yüksek ekserji kaybı ise 26534,464 kW ile alçak basınç türbininde meydana gelmiştir. Bunun en büyük sebebi sistemin diğer elemanları için gerçekleştirilen ara buhar alma işlemidir.

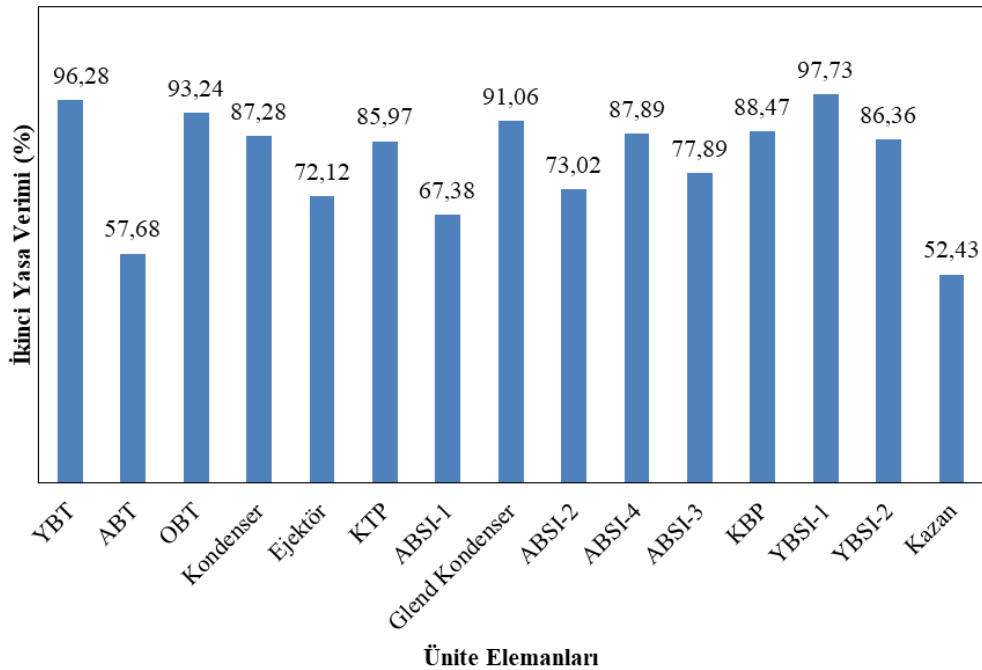
**Çizelge 2.** Ünitenin düğüm noktalarına ait veriler ve ilgili termodinamik özellikler

Düğüm no	Faz durumu	Sıcaklık T (°C)	Basınç P (Bar)	Debi m (kg/s)	Entalpi h (kJ/kg)	Entropi s (kJ/kgK)
0	-	25	1	-	104,9	0,3672
1	Buhar	535	135	133,33	3426	6,538
2	Buhar	336	40,5	122,64	3057	6,519
3	Buhar	535	37,3	115,28	3529	7,228
4	Buhar	230	3,42	109,44	2926	7,376
5	Buhar	38,1	0,0666	95,3	2570	8,292
6	Sıvı	38	0,92	95,3	159,2	0,5456
7	Sıvı	38,1	15	95,3	160,9	0,5464
8	Buhar	89,11	111	3,8	381,9	1,127
9	Sıvı	40	14,3	99,1	168,8	0,5718
10	Buhar	190	1,5	3,45	2853	7,602
11	Buhar	108	1,2	3,45	2690	7,315
12	Sıvı	40,81	14	99,1	172,1	0,5826
13	Sıvı	70,45	13,5	99,1	315,1	0,9521
14	Sıvı	100,6	12,4	99,1	422,05	1,313
15	Sıvı	124,4	12	99,1	523,2	1,574
16	Sıvı	166,9	145	117,29	713,4	1,994
17	Sıvı	217,6	145	117,29	936,4	2,474
18	Sıvı	268,2	145	117,29	1174	2,934
19	Buhar	231,2	3,43	4,07	2928	7,379
20	Buhar	148	1,46	5	2769	7,424
21	Buhar	76,7	0,41	5,07	2638	7,662
22	Buhar	365,8	39,72	12,35	3133	6,65
23	Buhar	420	16,67	11,2	3297	7,283
24	Buhar	306,1	7,14	5,84	3072	7,312
25	Sıvı	25	1,7	2986,11	105	0,3672
26	Sıvı	34	1,3	2986,11	142,6	0,4915
27	Sıvı	25	1,7	2986,11	105	0,3672
28	Sıvı	34	1,3	2986,11	142,6	0,4915
29	Sıvı	48	0,41	5,07	201	0,6768
30	Sıvı	66	1,46	5	276,4	0,9059
31	Sıvı	120	3,43	4,07	503,9	1,528
32	Sıvı	200	16,67	11,2	852,3	2,33
33	Sıvı	240	39,72	12,35	1038	2,701
34	Sıvı	164,5	12	117,29	695,3	1,987

**Şekil 2.** Üniteye bulunan eleman gruplarına ait kayıp kullanılabilir ekserji değerleri

**Çizelge 3.** Ünitenin her bir elemanına ait kayıp kullanılabilir ekserji değerleri

Ünite elemanları	Ekserji kayıpları (kW)
Kazan	217695,131
Yüksek basınç türbini (YBT)	1795,915
Alçak basınç türbini (ABT)	26534,464
Orta basınç türbini (OBT)	4975,432
Kondenser	1226,895
Kondenser tahliye pompası (KTP)	22,731
Ejektör	38,300
Glend kondenser	23,891
Alçak basınç ısıtıcısı-1(ABSI-1)	586,031
Alçak basınç ısıtıcısı-2(ABSI-2)	719,025
Alçak basınç ısıtıcısı-3(ABSI-3)	611,664
Kazan besleme tankı (ABSI-4)	546,637
Kazan besleme pompası (KBP)	244,790
Yüksek basınç ısıtıcısı-1(YBSI-1)	246,153
Yüksek basınç ısıtıcısı-2(ABSI-2)	1545,386



**Şekil 3.** Ünitenin her bir elemanına ait ikinci yasa verimleri

Şekil 3'te her bir ünite elemanı için ikinci yasa verimleri görülmektedir. İkinci yasa veriminin en düşük değeri %52,43 ile kazan için elde edilmiştir. En yüksek ikinci yasa verimine sahip ünite elemanın ise %97,73 ile 1 nolu yüksek basınç besleme suyu ısıtıcısı olduğu görülmektedir. Bunu

takip eden en yüksek verime sahip ünite elemanı %96,28 ile yüksek basınç türbinidir. Diğer ünite elemanlarının ikinci yasa verimleri büyükten küçüğe; orta basınç türbini (%93,24), glend kondenser (%91,06), kazan besleme pompası (%88,47), 4 nolu alçak basınç ısıtıcısı (%87,89),

kondenser (%87,28), 3 nolu yüksek basınç ısıtıcısı (%86,36), kondenser tahliye pompası (%85,97), 3 nolu alçak basınç ısıtıcısı (%77,89), 2 nolu alçak basınç ısıtıcısı (%73,82), ejektör (%72,12), 1 nolu alçak basınç ısıtıcısı (%67,38) ve alçak basınç türbini (%57,68) şeklinde sıralanmaktadır.

Çizelge 4'te bir ünite elemanına ait kayıp ekserji miktarının toplam ekserji kaybına oranı sunulmuştur. Ünitenin toplam ekserji kaybı 256812.444 kW olarak hesaplanmıştır. Ekserji kayıp oranı en fazla olan ünite elemanı %84,7681

ile kazandır. Türbin grubu için bu değer %12,9689 olduğu görülmektedir. Türbin grubundan sonra en fazla ekserji kayıp oranı %1,6568 ile ısıtıcı grubundadır. Bunu takip eden en yüksek kayıp oranı ise %0,477 ile kondenser için elde edilmiştir. Pompa grubunda ekserji kayıp oranı %0,1042'dir. En düşük ekserji kayıp oranı ise % 0,0242 ile yardımcı grupta meydana gelmiştir. Sistemin her bir elemanı teker teker ele aldığımızda ise en düşük ekserji kayıp oranının %0,0089 ile kondenser tahliye pompasında gerçekleştiği görülmektedir.

**Çizelge 4.** Ünitenin her bir elemanına ait ekserji kayıp oranları

Ünite elemanları	Ekserji kayıp oranı (%)
Kazan	84,7681
Yüksek basınç türbini (YBT)	0,6993
Alçak basınç türbini (ABT)	10,3322
Orta basınç türbini (OBT)	1,9374
Kondenser	0,4777
Kondenser tahliye pompası (KTP)	0,0089
Ejektör	0,0149
Glend kondenser	0,0093
Alçak basınç ısıtıcısı-1 (ABSI-1)	0,2282
Alçak basınç ısıtıcısı-2 (ABSI-2)	0,2800
Alçak basınç ısıtıcısı-3 (ABSI-3)	0,2382
Kazan besleme tankı (ABSI-4)	0,2129
Kazan besleme pompası (KBP)	0,0953
Yüksek basınç ısıtıcısı-1 (YBSI-1)	0,0958
Yüksek basınç ısıtıcısı-2 (ABSI-2)	0,6018
Toplam ekserji kaybı (KW)	256812,444

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Sivas Kangal Termik Santralinin 3. ünitesi için ekserji ve enerji analizi yapılmıştır. Üniteye bulunan 16 adet ana ünite elemanı için 34 adet düğüm noktasına ait ölçüm verileri kullanılarak ekserji kayıpları ve ikinci yasa verimleri hesaplanmıştır.

En fazla ekserji kaybının kazanda gerçekleştiği görülmektedir. Kazan içerisinde bulunan kızdırıcı boru yüzeylerinin kurum üfleme sistemi ile sürekli olarak temizlenmesi, kömür neminin azaltılması, kazana kömür değirmenleri aracılığıyla düzenli bir oranda kömür beslemesinin sağlanması ve hava yakıt oranının iyi ayarlanması gibi kazanda yapılacak iyileştirmelerin ekserji kaybını azaltacağı düşünülmektedir. Kazandan sonra en

fazla ekserji kaybının türbin grubunda meydana geldiği görülmüştür.

Kondenserde oluşan kayıpları azaltmak için kondenser içindeki boruların belli aralıklarla temizlenmesi gerektiği düşünülmektedir. En az ekserji kaybı yardımcı grup ve pompalarda meydana gelmiştir.

Elde edilen enerji ve ekserji analiz sonuçlarının santralin verimini artıracak çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

#### 5. TEŞEKKÜR

İlgili verileri sağlayan Kangal Termik Santral Elektrik Üretim A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

## 6. KAYNAKLAR

1. IEA, Coal-Fired Electricity, <https://www.iea.org/reports/coal-fired-electricity>, Erişim Tarihi: 23.03.2023.
2. BP, 2022. Statistical Review of World Energy 2022, 57.
3. TEİAŞ, Kurulu Güç Raporu-Aralık 2022, <https://www.teias.gov.tr/kurulu-guc-raporlari>, Erişim Tarihi: 10.01.2023.
4. Altinkaynak, M., Güneş, S., Yakut, A.K., 2018. Bir Termik Santralin Enerji Analizi. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 10 (3), 20-26.
5. Oktay, Z., 2009. Investigation of Coal-Fired Power Plants in Turkey and A Case Study: Can Plant. Applied Thermal Engineering, 29 (2-3), 550-557.
6. Khaieel, O.J., Ismail, F.B., Ibrahim, T.K., Hassan, S.H., 2022. Energy and Exergy Analysis of the Steam Power Plants: A Comprehensive Review on the Classification, Development, Improvements, and Configurations. Ain Shams Engineering Journal, (13), 3, 101640.
7. Arslan, O., 2005. Seyitömer Termik Santrali Birinci ve İkinci Yasa Çözümlenmeleri. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 129.
8. Kaya, M., 2008. Buharlı Güç Çevrim Veriminin Ekserji Analiziyle Belirlenmesi. CBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 1, 9.
9. Erdem, H.H., Akkaya, A.V., Cetin, B., Dagdas, A., Sevilgen, S.H., Sahin, B., Teke, I., Gungor, C., Atas, S., 2009. Comparative Energetic and Exergetic Performance Analyses for Coal-Fired Thermal Power Plants in Turkey. International Journal of Thermal Science, 48 (11), 2179–2186.
10. Regulagadda, P., Dincer I., Naterer, G.F., 2010. Exergy Analysis of a Thermal Power Plant With Measured Boiler and Turbine Losses. Applied Thermal Engineering, 30 (8-9), 970–976.
11. Coşkun, A., Geredelioğlu, Ç., Bolattürk, A., Gökaslan, M. Y., 2013. Çayırhan Termik Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir.
12. Ünal, F., Özkan, D. B., 2014. Tunçbilek Termik Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi. Tesisat Mühendisliği, 143, 5–13.
13. Ozdil, N.F.T., Segmen, M.R., Tantekin, A., 2015. Thermodynamic Analysis of an Organic Rankine Cycle (Orc) Based on Industrial Data. Applied Thermal Engineering, 91, 43-52.
14. Ozdil, N.F.T., Pekdur, A., 2016. Energy and Exergy Assessment of a Cogeneration System in Food Industry: A Case Study. Int. J. Exergy, 20 (2), 254-268.
15. Ozdil, N.F.T., Tantekin, A., Erbay, Z., 2016. Energy and Exergy Analyses of a Fluidized Bed Coal Combustor Steam Plant in Textile Industry. Fuel, 183, 441–448.
16. Bayrakçeken, H.B., 2019. Doğal Gazlı Kombine Çevrimli Bir Santralin Ekserji Analizi ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 176.
17. Altunbaş, F., 2020. Afşin Elbistan Termik Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 97.
18. Dikili, K., Kopaç, M., Erdoğan, B., Topuz, A., 2021. Doğalgaz Yakıtlı Kombine Çevrim Santralinde Enerji ve Ekserji Analizi. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(3), 2268-2277.
19. Kopac, M., Hilalci, A., 2007. Effect of Ambient Temperature on the Efficiency of the Regenerative and Reheat Çatalağzı Power Plant in Turkey. Applied Thermal Engineering, 27, (8–9), 1377–1385.
20. Topal H.İ., Bayram B., Bayram, K., Erdoğan B., Kopaç, M., 2022. Kömür Yakıtlı Süper Kritik Termik Santralin Enerji ve Ekserji Analizi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 10, 788-801.

## Numerical Investigation of the Passive Flow Control Around a Circular Cylinder

Tural TUNAY\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-5994-4565

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

Geliş tarihi: 28.01.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: TUNAY, T., (2023). Numerical Investigation of the Passive Flow Control Around A Circular Cylinder. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(1), 243-252.

### Abstract

The effects of a perforated cylinder on the passive flow control around a circular cylinder mounted on a wall were investigated. The perforated cylinder was placed outside of the single circular cylinder concentrically. The large-eddy simulation was used to resolve the flow field. The study was aimed at both reducing the drag coefficient of the single cylinder and controlling the fluctuating forces acting on the single cylinder caused by vortex shedding in the downstream wake. The results showed that the structure of the downstream wake flow of the single cylinder changed significantly after placing the perforated cylinder. For example, von Karman vortices disappeared, and the maximum magnitude of turbulent kinetic energy, TKE, in the downstream wake was reduced. The time-averaged drag coefficient of the single cylinder was decreased by 69%. In addition, the maximum value of the lift coefficient of the single cylinder was reduced by eight times when the perforated cylinder was placed outside the single cylinder.

**Keywords:** Cylinder, Drag, Flow control, LES, Vortex shedding

### Dairesel Silindir Çevresindeki Pasif Akış Kontrolünün Sayısal İncelenmesi

#### Öz

Mevcut çalışmada, delikli bir silindirin, duvara monte edilmiş dairesel bir silindir etrafındaki pasif akış kontrolü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Delikli silindir, tek dairesel silindirin dışına eş merkezli olarak yerleştirilmiştir. Akış alanının çözümlenmesinde büyük girdap simülasyonu kullanıldı. Çalışma hem tekil silindir üzerine etkiyen sürüklenme kuvveti katsayısının azaltılmasını hem de aşağı akış bölgesinde girdap kopmalarından kaynaklanan ve silindir üzerine etkiyen değişken kuvvetlerin kontrol edilmesini amaçlamıştır. Sonuçlar, tekil silindirin aşağı akış girdap bölgesindeki akış yapılarının delikli silindirin eş merkezli olarak yerleştirilmesinden sonra önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymuştur. Örnek olarak, von Karman girdap yapıları artık oluşmamıştır, ve aşağı akış girdap bölgesinde türbülans kinetik enerjisi

---

\*Corresponding author (Sorumlu yazar): Tural TUNAY, [ttunay@atu.edu.tr](mailto:ttunay@atu.edu.tr)

miktarı önemli ölçüde azalmıştır. Tek silindirin zaman ortalamalı sürtünme katsayısı değeri %69 oranında azalmıştır. Ayrıca, tek silindirin zamana bağlı kaldırma kuvveti katsayısının maksimum büyüklüğü, delikli silindir tek silindirin dışına eşmerkezli olarak yerleştirildikten sonra sekiz kat azalmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Silindir, Sürtünme direnci, Akış kontrolü, BGS, Girdap kopması

## 1. INTRODUCTION

Many industrial applications, which range from flow measurement to energy harvesting systems, involve flows around cylindrical objects. From an aerodynamics point of view, flows around cylindrical objects can be broadly classified as flows around bluff bodies which are characterised by separated flows, large recirculating flows in downstream wake and wake vortex shedding. The main problems generated by the flows around the cylindrical objects are the vibrations of cylinders owing to vortex shedding and significant drag coefficients due to pressure variations between the upstream and downstream regions of the cylinders. To lessen the negative consequences of the vortex shedding and the strength of the drag force, it is necessary to comprehend and regulate the flow characteristics surrounding cylinders.

In the previous literature, there are numerous studies in order to control the characteristics of the flows around cylinders [1-3]. Essentially, the control of flow around cylinders can employ either active or passive flow control techniques [4]. Both active and passive flow controls have their own advantages and disadvantages based on their applications. For example, a passive flow control does not need a power input whereas active flow control needs a power to actuate a moving attachment [5]. Furthermore, in active flow control the parameter which controls the flow can be varied according to the flow field as desired. On the other hand, passive flow control has a simplicity and a low cost [6]. There are many ways of applying passive flow control in the previous literature. For example, vortex generators [7], slats [8], flow vanes [9] and slits [10] are types of passive flow controls. The use of perforated structures is another type of the passive flow control in the previous literature [11]. The use of

perforated cylinders in the control of flow characteristics ranges from ocean engineering applications to heat transfer engineering [11,12].

The interaction of water waves with wall-mounted concentric cylindrical constructions, including a solid inner cylinder and a coaxial double-layered perforated cylinder, was studied by Liu et al. [13]. They concluded that there was a reduction in the hydrodynamic force operating on the inner cylinder as well as the wave height around its windward side. Additionally, Vijayalakshmi et al. [14] studied the wave acceleration and deceleration at the foremost and rearmost edges of the perforated cylinder that was concentrically placed outside of the single regular cylinder. They discovered that the incident wave height and the maximum wave inclination on the perforated cylinder were practically identical.

Sun et al. [15] defined two types of the flow mechanism in the downstream wake of the perforated cylinder with a regular cylinder placed concentrically inside it, depending on the porosity of the perforated cylinder, i.e.,  $\beta \leq 48\%$  and  $\beta \geq 61\%$ . They linked the first flow mechanism to the wake mode instability of the shear layers produced from the perforated cylinder's edge, and the second one with the merging of the shear layer vortices originating from the edge of the perforated cylinder with the vortices shed from the regular inner cylinder.

Durhasan et al. [16,17] experimentally investigated the characteristics of the flow around a cylinder with a perforated cylinder placed concentrically around it for various porosity and diameter ratios. Durhasan et al. [16] presented that the von Karman vortex street's formation was suppressed using perforated cylinders with porosity ratios between the ranges of  $0.4 \leq \beta \leq 0.8$ . In addition, they



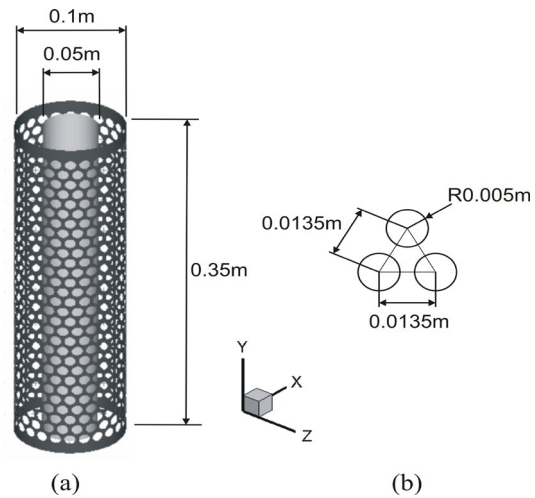
discovered that the cylinder's drag coefficient was decreased by 21% to 87% in comparison to that of a single, conventional cylinder, depending on the porosity and diameter ratio [17]. Furthermore, Durhasan et al. [17] claimed that it is still unclear how the perforated cylinder affects the cylinder's lift coefficient.

The impacts of a perforated cylinder positioned concentrically outside of a single regular cylinder on the features of the wake flow that occurred downstream of the regular cylinder were examined numerically in the present study. The large eddy simulation (LES), resolving a wide range of time and length scales of a flow field, was used to resolve the turbulent flow field surrounding the cylinders. Thus, a high resolution of the flow field around the perforated and regular cylinders were presented using a high fidelity turbulence model, i.e., the LES, in the present study. Additionally, there are limited information about the pressure field occurring around the perforated cylinder used for the passive flow control of the wake downstream of the single regular cylinder. The present study showed the detailed results of the drag, lift and pressure coefficients, along with thorough explanations of the velocity field data.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### 2.1. The Test Case

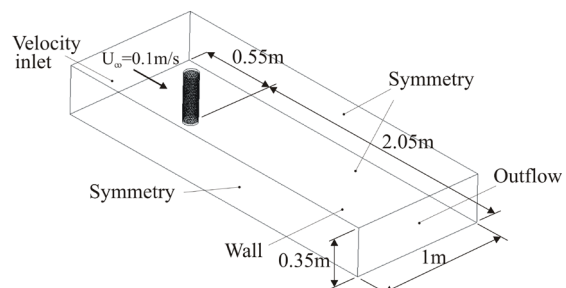
The geometric features of the single cylinder and the perforated cylinder, which are placed concentrically, are given in Figure 1. The diameters of the single cylinder and the perforated cylinder were  $D_i = 0.05$  m and  $D_o = 0.1$  m, respectively. The height of the cylinders was  $h = 0.35$  m. The radius of the holes on the perforated cylinder was  $R = 0.005$  m. The centers of the holes on the perforated cylinder were separated by a distance of  $0.0135$  mm. The porosity ratio of the perforated cylinder was  $\beta = 0.5$ . The porosity ratio,  $\beta$ , was calculated as the ratio of whole surface area of the holes on the cylinder to the total surface area of the cylinder.



**Figure 1.** (a) The three-dimensional view of the wall-mounted, single regular cylinder and the perforated cylinder which are placed concentrically. (b) The geometric features of the holes on the perforated cylinder

### 2.2. The Features of the Flow Field

Figure 2 provides the computational flow domain's dimensions and boundary conditions. The cylinders were positioned  $11 \times D$  distance downstream from the flow domain's inlet surface. Also, the cylinders were placed at the symmetry location in the lateral direction. The height, length, and width of the flow domain were  $7 \times D$ ,  $52 \times D$ ,  $20 \times D$ , respectively. The Reynolds number, based on the diameter of the single regular cylinder,  $D_i = 0.05$  m, and the velocity of the free stream flow,  $U_\infty = 0.1$  m/s, was  $Re_D = 5000$ .



**Figure 2.** The computational flow domain's geometry and the boundary conditions

On the flow domain's inlet surface, a uniform velocity profile with a velocity of  $U_\infty = 0.1$  m/s was established. The turbulent intensity at the inlet surface was assumed to be zero. On the lateral and upper surfaces of the flow domain, symmetry boundary conditions were applied. A no-slip boundary condition was applied to the surfaces of the cylinders and the ground. Finally, on the exit surface of the flow domain, the outflow boundary condition was used.

In the investigations, the flows around a single cylinder with and without a perforated cylinder placed outside it were simulated in order to compare their results. Thus, two meshes were employed in the investigations. The mesh of the simulation of the regular cylinder without a perforated cylinder had 1608413 cells. On the other hand, the mesh of the simulation of the single cylinder with the perforated cylinder had 7160164 cells. General view of the computational mesh is given in Figure 3.

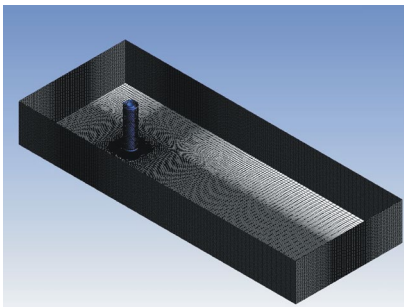


Figure 3. General view of the computational mesh

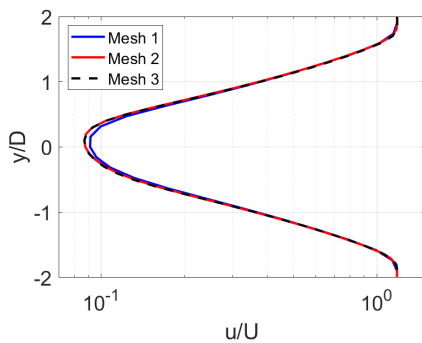


Figure 4. The velocity profiles which are obtained from different meshes at  $x/D = 6$  in the downstream wake region

Additionally, the results of the mesh independency study are presented in Figure 4 by comparing the profiles of the longitudinal velocity normalized with the freestream velocity at  $x/D = 6$ . The number of the computational cells in Mesh 1 to Mesh 3 were 4649874, 7160164, 8419225, respectively. The results obtained from Mesh 2 and Mesh 3 are close to each other. Therefore, Mesh 2 was decided to use in the computations.

The dimensionless wall distance,  $y^+$ , values on the cylinders' surfaces are presented in Figure 5. As shown in Figure 5, the  $y^+_{max}$  on the cylinders' surfaces are around 6.

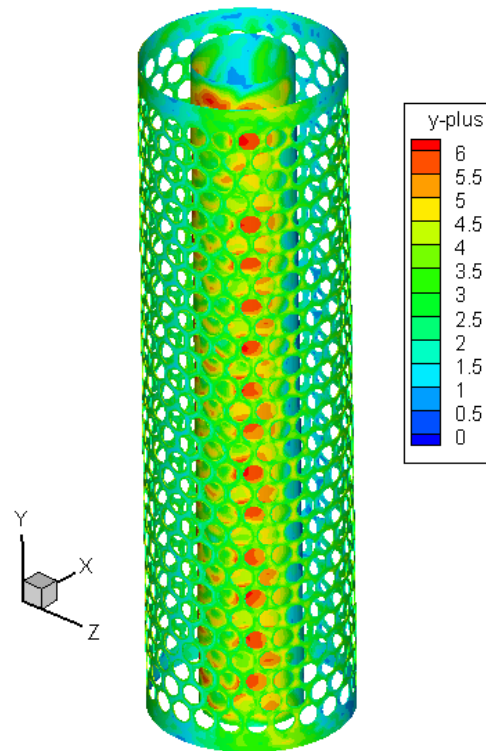
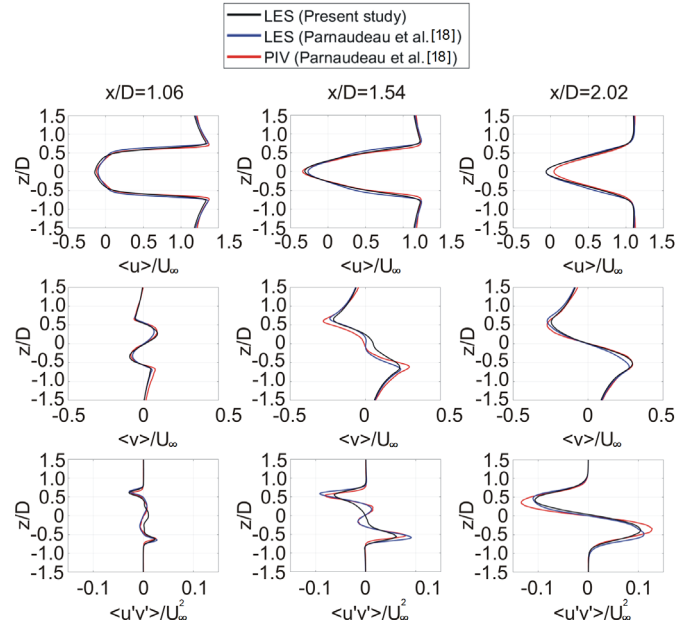


Figure 5. Contours of dimensionless wall distance,  $y^+$

Comparisons of the time-averaged x- and y-components of the velocities,  $\langle u \rangle / U_\infty$  and  $\langle v \rangle / U_\infty$  respectively, and time-averaged Reynolds stresses,  $\langle u'v' \rangle / U_\infty^2$ , obtained at three different locations in the downstream wake of the single cylinder with the corresponding experimental and numerical



**Figure 6.** Comparison of the time-averaged x- and y-components of the velocity results,  $\langle u \rangle / U_\infty$  and  $\langle v \rangle / U_\infty$  respectively, and time-averaged Reynolds stresses,  $\langle u'v' \rangle / U_\infty^2$  with the corresponding experimental and numerical results of Parnaudeau et al. [18]

results of Parnaudeau et al. [18] are given in Figure 6. In general, the results are coherent each other. The maximum differences between the  $\langle u \rangle / U_\infty$ ,  $\langle v \rangle / U_\infty$  and  $\langle u'v' \rangle / U_\infty^2$  results are less than 10%, 7%, 4% respectively. The maximum difference between  $\langle u \rangle / U_\infty$  results occurs on the vertical symmetry axis,  $z/D = 0$ , at  $x/D = 2.02$ . On the other hand, the maximum differences between the  $\langle v \rangle / U_\infty$  and  $\langle u'v' \rangle / U_\infty^2$  results occur on the shear layer after  $x/D = 1.54$ .

### 2.3. The Large Eddy Simulation

The large eddy simulation (LES) turbulence model was used to resolve the turbulent flow around the cylinders. The LES is a scale resolving high accuracy turbulence model that directly resolves large flow structures. The governing equations employed in the present study are given in Equations (1-5).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

The subgrid-scale stress,  $\tau_{ij}$ , is defined by Equation (3).

$$\tau_{ij} = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (3)$$

Equation (4) is a model for the subgrid-scale stress that results from the filtering procedure.

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_\tau \bar{S}_{ij} \quad (4)$$

The  $\bar{S}_{ij}$  is defined by Equation (5).

$$\bar{S}_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

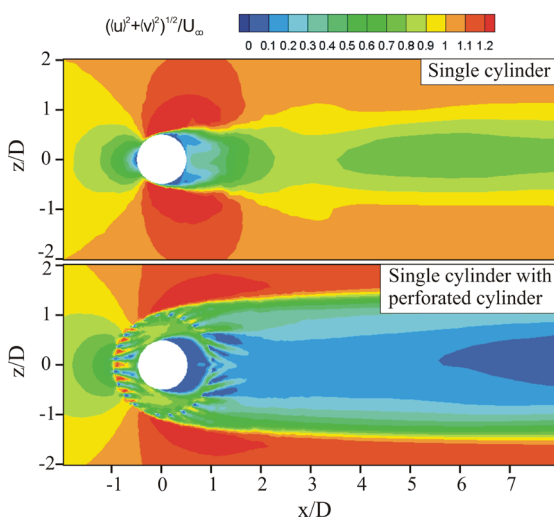
### 2.4. Numerical Method

Governing equations of the flow were solved with the aid of commercial CFD software, i.e., Ansys Fluent. Pressure-based segregated algorithm together with SIMPLEC and PRESTO schemes

were used. The resultant scalar system of equations was solved by using a point implicit linear equation solver in conjunction with an Algebraic Multigrid method. The computations were performed with a time step of  $\Delta t = 0.002s$ . The simulation took 42s to complete.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

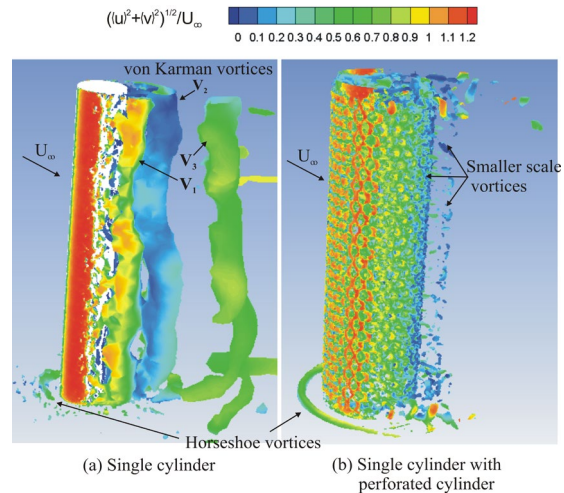
The goal of the current study was to examine the efficacy of using a perforated cylinder to manage the flow characteristics around a single, wall-mounted circular cylinder by positioning it concentrically outside of the cylinder. Therefore, the velocity and pressure fields which form around the cylinders were investigated using the streamlines, contours of velocity magnitudes, vorticity concentrations, turbulence quantities and force coefficients.



**Figure 7.** Contours of time-averaged velocity magnitude  $(\langle u^2 + \langle v^2 \rangle)^{1/2} / U_\infty$  in the  $xz$ -plane located at the vertical symmetry point of the cylinders,  $y = 0$

A comparison of the time-averaged velocity magnitude contours around a single cylinder and a single cylinder with a perforated cylinder is shown in Figure 7. An axial symmetry in the lateral direction, or  $z$ -direction, can be seen in the velocity magnitude contours surrounding the single cylinder. Besides, in the case of the single cylinder

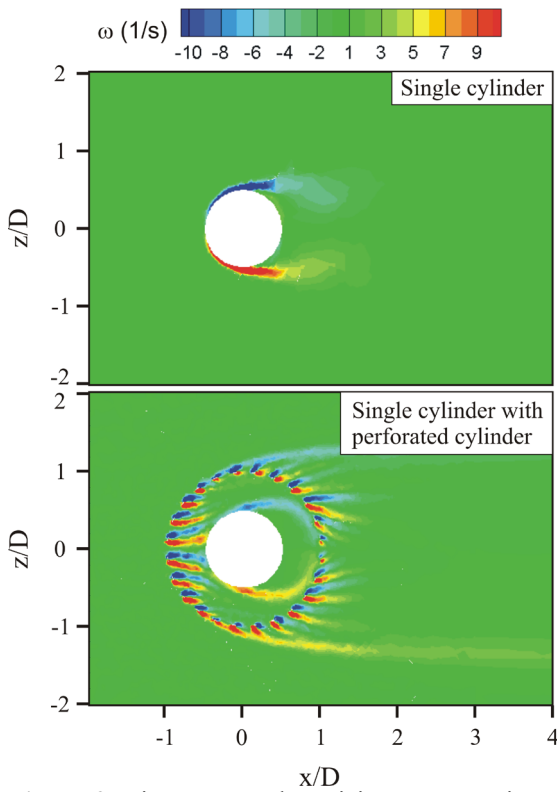
with a perforated cylinder, the symmetry of the flow field around the cylinders is preserved. On the other hand, the structure of the flow field around the single cylinder changes significantly after the placement of the perforated cylinder outside of the single cylinder. For example, the stagnation region on the upstream part of the single cylinder disappears, and the size of the dead flow region enlarges in the wake region of the single cylinder. Additionally, the lateral size of the downstream wake of the single cylinder with the perforated cylinder increases proportionally to the diameter of the perforated cylinder. In line with the lateral size of the downstream wake, the size of the area that covers the minimum magnitude of the velocity contours extends towards the far region in the downstream wake of the single cylinder with the perforated cylinder.



**Figure 8.** The instantaneous vorticity contours which are coloured by the velocity magnitude around the cylinders. Vortices are calculated by the Q-criterion

Figure 8 shows a three-dimensional view of the vortices formed around the cylinders. In this figure, Q-criterion is used for the calculation of the vortices. The vortices,  $V_i$ , developed in the downstream wake of the single cylinder present the characteristics of the large-scale von Karman vortices. These vortices form in the downstream

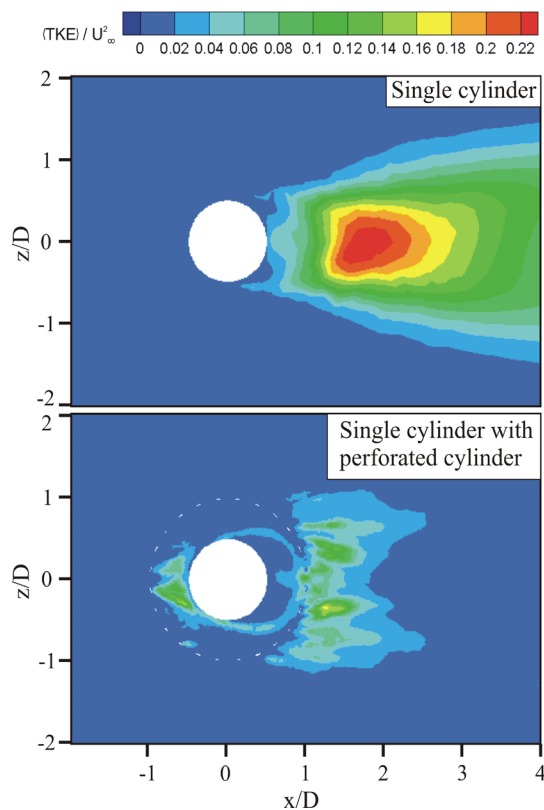
wake of the single cylinder periodically due to the flow separations on both the right and left lateral sides of the cylinder. After their development, these von Karman vortices shed in the wake flow and generate lifting forces that change their direction alternately. These large-scale von Karman vortices disappear in the case of the single cylinder with the perforated cylinder, and the small-scale vortices develop in the downstream wake. That means the perforated cylinder can help to reduce the unfavourable effects of the shedding forces caused by the vortices on the inner single cylinder.



**Figure 9.** Time-averaged vorticity concentrations,  $\omega_y$ , in the  $xz$ -plane positioned at the vertical symmetry location of the cylinders,  $y = 0$

The time-averaged  $y$ -component of the vorticity concentrations,  $\omega_y$ , are presented in Figure 9. In line with the contours of the velocity magnitude

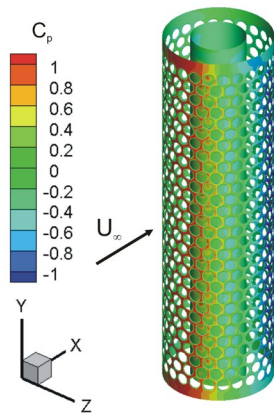
results, there is symmetry between the contours of the vorticity concentrations in the lateral direction, i.e.,  $z$ -direction, in both cases investigated. The counter-clockwise rotation of the vorticity concentrations is depicted by red contours, and the clockwise rotation is depicted by blue contours. The maximum magnitude of the vorticity concentrations developed around the single cylinder is decreased as a result of the perforated cylinder's placement outside of the single cylinder. Furthermore the length of the vorticity concentrations is constrained within the cross-sectional area of the perforated cylinder. Therefore, the shedding of the vortices in the downstream wake is prohibited by the perforated cylinder. Additionally, couples of the vorticity concentrations form downstream of each hole on the perforated cylinder.



**Figure 10.** The time-averaged turbulent kinetic energy normalized by the square of the free stream velocity,  $\langle TKE \rangle / U_\infty^2$



Figure 10 displays the outcomes of time-averaged turbulent kinetic energy normalized by the square of the free stream velocity,  $\langle \text{TKE} \rangle / U_\infty^2$ . The results show that the maximum magnitude of the  $\langle \text{TKE} \rangle / U_\infty^2$  in the downstream wake of the single cylinder with the perforated cylinder is reduced considerably. Additionally, the perforated cylinder completely changes the distribution of the  $\langle \text{TKE} \rangle / U_\infty^2$  contours around the single cylinder. For example, a new region of increased  $\langle \text{TKE} \rangle / U_\infty^2$  appears in the upstream part of the single cylinder after placing the perforated cylinder outside of it.

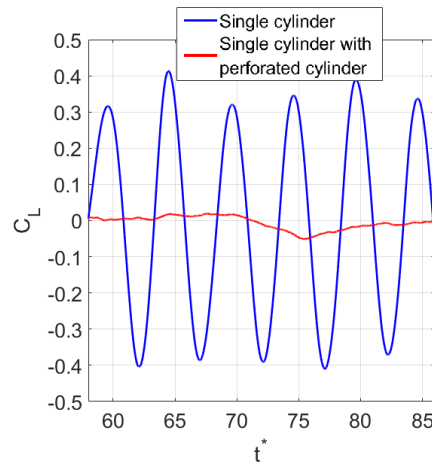


**Figure 11.** Time-averaged pressure coefficient results,  $\langle C_p \rangle$ , on the surfaces of the cylinders

Figure 11 shows that the maximum magnitude of the time-averaged pressure coefficient,  $\langle C_p \rangle$ , occurs at the stagnation point on the front surface of the perforated cylinder. Accordingly, the minimum magnitudes of  $\langle C_p \rangle$  occur on the rear surface of the perforated cylinder in the downstream direction. The magnitudes of  $\langle C_p \rangle$  on the surface of the regular cylinder are at moderate levels when compared to the ones that occurred on the surfaces of the perforated cylinder.

The time-averaged drag coefficients,  $\langle C_D \rangle$ , obtained from the single cylinder and the single cylinder with the perforated cylinder simulations are 1.09 and 0.34 respectively. The relative percent reduction in  $\langle C_D \rangle$  of the single cylinder after the perforated cylinder is placed outside of it is % 69.

Additionally, the unsteady lift coefficient,  $C_L$ , results obtained for both cases are presented in Figure 12. The lift coefficient results of the single cylinder show sinusoidal oscillations between the absolute maximum magnitudes of  $C_L = 0.4$ . These alternating oscillations in  $C_L$  of the single cylinder result are due to the alternating shedding of von Karman vortices developed in the downstream wake of the cylinder as presented in Figure 7, previously. On the other hand, the absolute maximum magnitude of the lift coefficient of the single cylinder is significantly reduced to a value of  $C_L = 0.05$ , i.e., eight times smaller than the one in the case of the single cylinder.



**Figure 12.** Comparison of the unsteady lift coefficient,  $C_L$ , results of the single cylinder and the single cylinder with the perforated cylinder simulations

#### 4. CONCLUSIONS

The goal of the current investigation was to determine how well a perforated cylinder could regulate the features of a wake flow that developed downstream of a single circular cylinder. The perforated cylinder was concentrically positioned outside of the single cylinder. The flow field was resolved using the large-eddy simulation method. The results showed that the structure of the downstream wake flow of the single cylinder changed significantly after placing the perforated cylinder outside of it, e.g., von Karman vortices

disappeared, and the maximum magnitude of turbulent kinetic energy, TKE, reduced. The time-averaged drag coefficient of the single cylinder was decreased by 69%. Additionally, the maximum magnitude of the lift coefficient of the single cylinder is decreased by eight times when the perforated cylinder was placed outside of the regular cylinder.

## 5. ACKNOWLEDGMENTS

The author acknowledges the support of the Mechanical Engineering Department, Adana Alparslan Turkes Science and Technology University, for providing computational support for this study.

## 6. REFERENCES

1. Ma, L.Q., Feng, L.H., 2019. Vortex Formation and Evolution for Flow Over a Circular Cylinder Excited by Symmetric Synthetic Jets, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 104, 89–104. doi:10.1016/j.expthermflusci.2019.02.008.
2. Zhang, X., Choi, K.S., Huang, Y., Li, H.X., 2019. Flow Control Over a Circular Cylinder Using Virtual Moving Surface Boundary Layer Control, *Experiments In Fluids*, 60:104. doi:10.1007/s00348-019-2745-y.
3. Gao, D.L., Chen, G.B., Huang, Y.W., Chen, W.-L., Li, H., 2020. Flow Characteristics of a Fixed Circular Cylinder with an Upstream Splitter Plate: on the Plate-Length Sensitivity. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 117, 110135.
4. Choi, H., Jeon, W.P., Kim, J., 2008. Control of Flow Over a Bluff Body, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 40, 113–39. doi:10.1146/annurev.fluid.39.050905.110149.
5. Tiainen, J., Grönman, A., Jaatinen-Värri, A., Backman, J., 2018. Flow Control Methods and Their Applicability in Low-Reynolds-Number Centrifugal Compressors - A Review, *Int. J. Turbomach. Propuls. Power*, 2018, 3, 2. doi:10.3390/ijtp3010002.
6. Paul, A.R., Joshi, S., Jindal, A., Maurya, S.P., Jain, A., 2013. Experimental Studies of Active and Passive Flow Control Techniques Applied in a Twin Air-Intake, *The Scientific World Journal*, 2013(523759), 8. doi:10.1155/2013/523759.
7. Ünal, U.O., Atlar, M., 2010. An Experimental Investigation into the Effect of Vortex Generators on the Near-Wake Flow of a Circular Cylinder, *Exp. Fluids* 48, 1059–1079. doi:10.1007/s00348-009-0791-6.
8. Chen, T., Jiang, X., Wang, H., Li, Q., Li, M., Wu, Z., 2021. Investigation of Leading-Edge Slat On Aerodynamic Performance of Wind Turbine Blade, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(8):1329-1343. doi:10.1177/0954406220941883.
9. Bari, S., Saad, I., 2013. CFD Modelling of the Effect of Guide Vane Swirl and Tumble Device to Generate Better In-Cylinder Air Flow in a CI Engine Fuelled by Biodiesel, *Computers & fluids*, 84, 262-269. doi:10.1016/j.compfluid.2013.06.011.
10. Gao, D.L., Chen, W.L., Li, H., Hu, H., 2017. Flow Around a Circular Cylinder with Slit, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 82, 287–301. doi:10.1016/j.expthermflusci.2016.11.025.
11. Neelamani, S., Koether, G., Schuttrumpf, H., Muttray, M., Oumeraci, H., 2000. Wave Forces on, and Water-Surface Fluctuations Around a Vertical Cylinder Encircled by a Perforated Square Caisson, *Ocean Engineering*, 27, 775–800.
12. Acharya, S., Dash, S.K., 2018. Natural Convection Heat Transfer from Perforated Hollow Cylinder with Inline and Staggered Holes, *Journal of Heat Transfer*, 140, 032501-1. <https://doi.org/10.1115/1.4037875>.
13. Liu, J., Lin, G., Li, J., 2012. Short-Crested Waves Interaction with a Concentric Cylindrical Structure with Double-Layered Perforated Walls, *Ocean Engineering*, 40, 76–90.
14. Vijayalakshmia, K., Neelamanib, S., Sundaravadivelua, R., Murali, K., 2007. Wave Runup on a Concentric Twin Perforated Circular Cylinder, *Ocean Engineering*, 34, 327–336. doi:10.1016/j.oceaneng.2005.11.021.

15. Sun, C., Azmi, A.M., Zhu, H., Zhou, T., Cheng, L., 2021. Experimental Study on Wake Structures of a Circular Cylinder Enclosed in a Screen Shroud Using PIV, *Ocean Engineering*, 230, 109056. doi:10.1016/j.oceaneng.2021.109056.
16. Durhasan, T., Pinar, E., Ozkan, G.M., Aksoy, M.M., Akilli, H., Sahin, B., 2018. PIV Measurement Downstream of Perforated Cylinder in Deep Water, *European Journal of Mechanics/B Fluids*, 72, 225–234.
17. Durhasan, T., Pinar, E., Ozkan, G.M., Akilli, H., Sahin, B., 2019. The Effect of Shroud on Vortex Shedding Mechanism of Cylinder, *Applied Ocean Research*, 84, 51–61.
18. Parnaudeau, P., Carlier, J., Heitz, D., Lamballais, E., 2008. Experimental and Numerical Studies of the Flow Over a Circular Cylinder at Reynolds Number 3900, *Physics of Fluids*, 20(8), 085101.



## Anamur-Kaledran Arası (Mersin) T5 Tünelinin Kaya Kütle Sınıflaması

Mehmet AYDOĞDU<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-2305-8585

Sedat TÜRKMEN<sup>\*1</sup> ORCID 0000-0002-9867-5545

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

Geliş tarihi: 04.01.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: AYDOĞDU, M., TÜRKMEN, S., (2023). Anamur-Kaledran Arası (Mersin) T5 Tünelinin Kaya Kütle Sınıflaması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 253-263.

### Öz

Çalışma, Mersin ile Antalya illeri arasında yapımı süren karayolunun Anamur ilçesi ile Kaledran arasında açılan T5 tünelinin mühendislik jeolojisi özellikleri ve kaya kütle sınıflaması çalışmalarını içermektedir. Anamur-Kaledran arası yol projesinde yeralan T5 tüneli 780 m uzunluğundadır. Bu çalışmada tünel güzergahının jeolojik özelliklerinin araştırılması ve değerlendirilmesiyle tünelde geçilecek birimlerin kaya kütle sınıflamasının yapılması ve kazı – destek yöntemlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma alanında Paleozoyik yaşlı metamorfik birimler egemen olup, tünel güzergahı bol eklemli, kırıklı ve çatlaklı Ordovisiyen yaşlı şistlerden oluşmaktadır. Şistler etkin paleotektonizmaya bağlı olarak deformasyona uğramış, parçalı – çok parçalı zonlar içermektedir. Belirlenen mühendislik özelliklerine göre RMR, Q ve NATM kaya sınıflamaları ile tünel güzergahı boyunca altı farklı kaya kütle sınıfı belirlenmiş ve bu gruplara göre kazı destekleme sınıflaması yapılmıştır. Kaya sınıflamaları sonucunda tünelin giriş ve çıkış kesimlerinin zayıf kaya, orta kesimlerinin orta kaya sınıfında olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Mühendislik Jeolojisi, Tünel, Kaya kütle sınıflaması, RMR, Q Sistemi, NATM

### Rock Mass Classification of T5 Tunnel Between Anamur-Kaledran (Mersin)

#### Abstract

This study includes the Engineering Geology properties and rock mass classification studies of the T5 tunnel opened between Anamur district and Kaledran on the motorway under construction between Mersin and Antalya provinces. The T5 tunnel included in the project is 780 m long. By investigating and evaluating the geological features of the tunnel route, it is aimed to rock mass classification units to be passed in the tunnel and to determine the excavation - support methods. Paleozoic aged metamorphic units are dominant in the study area. The tunnel route consists of heavily jointed, fractured and cracked Ordovician schists. The schists contain fragmented – multi-component zones that have been deformed due to active paleotectonics. Six different rock mass classes were determined along the tunnel route with RMR, Q and NATM rock classifications according to the determined engineering properties, and

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Sedat TÜRKMEN, [sturkmen@cu.edu.tr](mailto:sturkmen@cu.edu.tr)

excavation support classification was made according to these groups. As a result of the rock classifications, it was determined that the entrance and exit sections of the tunnel were in the weak rock class, and the middle sections were in the middle rock class.

**Key Words :**Engineering Geology, Tunnel, Rock mass clasification, RMR, Q System, NATM

## 1. GİRİŞ

Bu çalışma, Mersin-Antalya arasında yapımı devam etmekte olan yol projesinin, Mersin ili Anamur ilçesi ile Kaledran arasında yer alan T5 olarak adlandırılan tünel güzergahı ve çevresinde yer alan kayaların kaya kütle özelliklerini belirlemeyi ve tünel kazı ve destekleme açısından kaya kütle sınıflaması belirlemeyi amaçlanmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanı konum haritası (Google Earth, 2017)

Karayolu inşaatının Anamur-Kaledran arası planlanan karayolu projesi toplam 39 km uzunluğunda bir proje olup, T 5 Tüneli yaklaşık 780 m uzunluğundadır. Proje kapsamında Km: 224+765 – 225+560 arası gidişli gelişli çift tünel ile geçilmektedir. Tünel topografik şartlardan

dolayı mevcut karayolunun sağ tarafında kalmaktadır. Söz konusu karayolu projesi, Akdeniz bölgesinde Adana, Mersin ve Antalya illerini birbirine bağlayan önemli bir hattır [1].

Mersin ve Antalya önemli bir turizm altyapısına sahip iller olmalarının yanında aynı zamanda Akdeniz iklim koşulları açısından zengin tarım ürünlerine yetiştirilen önemli bir bölgedir. Yetiştirilen ürünlerin ülkenin diğer tüketim merkezlerine ulaştırılması gerekliliği, yolun önemini arttırmaktadır. Uzun yıllar hizmet veren Silifke – Anamur – Gazipaşa yolu, topoğrafyanın çok engebeli olmasına bağlı olarak alt yapı bakımından standartı düşük ve kullanıcılar açısından sıkıntılı bir güzergahı oluşturmaktadır. Proje, Mersin ve Antalya'nın kıydan standardı yüksek bir yolla birbirine bağlanmasını amaçlamaktadır. Proje ile ulaşım rahatlayacak ve yol standartı yükselecektir.

## 2. BÖLGESEL JEOLJİ

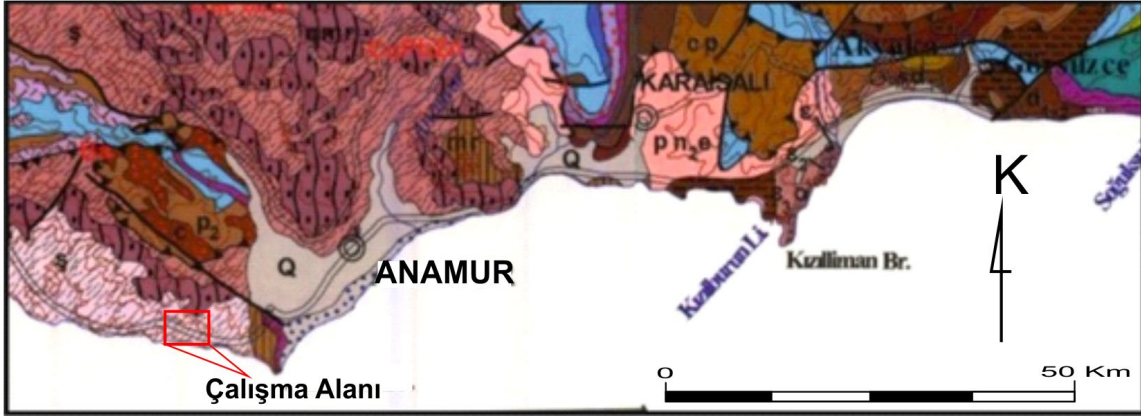
Anamur-Alanya yöresinde önceki çalışmalarda adlandırılan ve birlik olarak ayırtılan jeolojik birimler yüzeylenmektedir. Proje ve çevresinde Alanya Birliği olarak adlandırılan birimler mostra vermektedir. Birliğin adı, mostranın en iyi izlendiği Alanya ilçesinden alınmıştır [2,3]. Alanya birliği çoğunlukla metamorfik birimleri, mermer ve yeşil şistleri kapsar. Tipik yüzeylenmeler Gündoğmuş (Antalya), Alanya, Anamur bölgesinde izlenir (Şekil 2). Çalışma alanı ve çevresinde yüzeyleyen birimlerin ayırtman özellikleri, yaygın olarak Permien, Triyas ve erken Tersiyer yaşındaki birimleri içermesidir. Proje ve çevresinde Mesozoyik yaşlı birimlere rastlanılmamıştır. Metamorfizmanın etkin olduğu Permien ve Triyas yaşlı mermer ve yeşil şistler egemen kayaları oluşturur. Tersiyere ait kaya birimleri ise transgresiftir ve metamorfizma göstermezler [2-6].

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

#### 3.1. Tünel Güzergahının Jeolojisi

Anamur-Alanya arasında yaygın olarak Alanya Birliği üyelerine ait birimler görülmektedir.

Başlıca Paleozoyik ve Mesozoyik yaşlı mermer ve yeşil şistleri birimleri kapsar. Alanya, Anamur bölgesinde yüzeyleyen bu birimler Blumenthal, [2] tarafından Alanya Masifi adı altında incelenmiştir.



Şekil 2. Anamur ve Çevresinin 1/50000 Ölçekli Jeoloji Haritası [7]

Anamur-Kaledran arasında yer alan T5 tünel güzergahı önceki çalışmalarda değişik araştırmacılar tarafından Çakmak formasyonu olarak adlandırılan şist birimlerden oluşur. Yapılan arazi çalışmaları ve sondajlardan elde edilen veriler ve önceki çalışmalarda yapılan yaşlandırmalarda Çakmak formasyonunun yaşı Ordovisiyen olarak belirlenmiştir [5], (Şekil 3-6).



Şekil 3. Tüneli giriş portal kesim (Mersin – Anamur Yönü)

Anamur ve civarında yüzeyleyen metamorfik birimler, koyu yeşilimsi-sarı renkli, ince dokulu, gevrek, kırılğan, ince tabakalı, foliasyonlu, mikalı, fillatlardan oluşur. Tabaka yüzeylerinde ayrışma özelliği göstermektedir. Çakmak formasyonu içerisinde yer yer yumrulu kireçtaşı ve dolomit düzeyleri izlenir. Bu birimleri Geç Permiyen yaşlı birimler uyumsuz olarak örtmektedir [5]. Tünel güzergahının olduğu yamaçlarında, tünel giriş ve çıkış bölgelerinde birimin çok eklemlı ve kırıklı bir yapı sunduğu dolayısıyla orta-ileri derecede ayrışma gösterirken genel olarak zayıf-orta dayanımlı kaya özelliği göstermektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Tünel giriş kesimi ileri derecede eklemlı şistler (Çakmak Fm.)

### 3.2. Sondajlar Çalışmaları

Tünel güzergahındaki birimlerin tanımlanması, mühendislik jeolojisi ve jeoteknik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yönelik topografik şartlardan dolayı yalnızca 3 adet sondaj açılabilmiş, ayrıca arazide hat boyunca süreksizlik ölçümleri alınmıştır (Çizelge 1-3). Sondaj çalışmalarda deneylerin doğru sonuç verebilmesi için örneğin tek eksenli basınç dayanımı, elastisite modülü ve poisson oranı tayini gibi deneylerde uygun karot çapı seçilmiştir. Sondajların tamamında wire-line döner sondaj yöntemi ile karot alınmıştır [8,9].

### 3.3. Jeoteknik Veriler

Arazi çalışmaları ile elde edilen gözlemler, yapılan sondajlar ve laboratuvar test sonuçlarına göre tünel eksenli boyunca yüzeyleyen birimler için aşağıdaki ortalama jeoteknik veriler elde edilmiştir (Çizelge 1). Birimin şist ağırlıklı olması dolayısıyla değerler geniş aralıkta çıkmıştır.

RQD (%)	: 0 -75
Birim Hacm. Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	: 2,61 - 2,87
Tek Eksn. Sıkışma Dayanımı (MPa)	:22,01 - 103,5
Elastisite Modülü (GPa)	:13,30 - 65,19

Çizelge 1. Deney sonuçları özet çizelgesi

Sondaj no	Sondaj derinliği (m)	Birim hacim ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	Tek eksenli basınç direnci (UCS)(MPa)	Elastisite modülü (E) (GPa)	Poisson oranı	Nokta yük dayanım indeksi (MPa)
SK 1	13,00-13,10					2,25
SK 1	17,50-17,60					3,55
SK 1	22,80-23,00					3,49
SK 1	27,70-27,90	2,61	32,27	22,74	0,19	
SK 1	31,00-31,15					3,84
SK 2	147,80-148,00	2,74	101,46	35,48	0,27	
SK 2	150,30-150,45	2,81	58,28	28,57	0,28	
SK 2	154,00-154,15	2,70	74,02	31,08	0,26	
SK 2	159,10-159,25	2,77	89,99	34,55	0,25	
SK 2	164,60-164,80	2,74	67,45	22,46	0,26	
SK 2	173,70-173,80					1,82
SK 2	187,10-187,30	2,61	32,92	13,03	0,14	
SK 3	12,75-13,00	2,72	39,30	28,41	0,26	
SK 3	17,50-17,90	2,85	59,32	63,88	0,29	
SK 3	24,00-24,30	2,84	21,57	22,59	0,31	
SK 3	34,60-34,90	2,87	54,80	59,40	0,29	
SK 3	37,60-37,90	2,84	57,17	57,67	0,30	
SK 3	42,30-42,50					1,31

### 3.4. Süreksizlik Ölçümleri

Tünel güzergahı boyunca giriş kesiminde, orta bölümde ve çıkış bölgesinde, kaya kütle parametrelerin belirlenmesi amacıyla, arazide süreksizlik ölçümleri yapılarak, süreksizliklerin özellikleri belirlenmiştir. Tünel giriş bölgesinde, orta (eksen) ve çıkış kesiminde ölçülen süreksizlik değerleri, aşağıda ayrı ayrı sunulmuştur.

**Giriş kesimi (Km: 224+800'e Kadar):** Tünel girişinde süreksizlik sistemi incelendiğinde klivajlı yapı ile beraber 3 süreksizlik takımının hakim olduğu belirlenmiştir. Sarımsı yeşil - kahverengi şistlerde süreksizlik düzlemlerinde eğim; 25°-35°, eğim yönü; 090°-120° aralığında bir değer gösterir. Bu kesimde kaya kütlesi genellikle çok bozunmuş, zayıf-orta ve düşük dayanımlı bir özellik gösterir. Klivaj düzlemleri dışında izlenen süreksizlik takımının bir tanesinin eğimi 50°-70° arasında,





**Çizelge 2.** Sondaj listesi ve sondajlara ait bilgiler

No	KM	Sondaj no	Derinlik (m)	X	Y	Kot	Açıklama
1	224+800	SK-1	46,00	3990663	476081	279,00	PORTAL
2	225+200	SK-2	201,00	3990720	475693	409,00	EKSEN
3	225+510	SK-3	48,00	3990775	475379	267,00	PORTAL

**Çizelge 3.** Numune listesi

Sondaj no	Numune derinliği	Sondaj no	Numune derinliği	Sondaj no	Numune derinliği
1	13,00-13,20	2	147,80-148,00	3	12,75-13,00
	17,50-17,60		150,30-150,45		17,80-17,90
	22,80-23,00		154,00-154,15		24,00-24,30
	27,70-27,90		159,10-159,25		34,60-34,90
	31,00-31,15		164,60-164,80		37,60-37,90
			173,70-173,80		42,35-42,50
			187,10-187,30		

## 5. KAYA KÜTLE SINIFLAMALARI

Açılan sondajlar ile tünel güzergahının tamamının şist birimi (Çakmak formasyonu) içerisinde olduğunu anlaşılmıştır. Yapılan arazi çalışmaları, ölçümler ve laboratuvar deney sonucunda jeolojik ve jeoteknik değerlendirmelerle, tünelin giriş ve çıkış bölümlerindeki birimlerin çok ayrılmış zayıf-orta dayanımlı olduğu, orta bölümlerindeki birimlerin ise genel olarak orta dayanımlı, yer yer de orta-iyi dayanımlı özellikte olduğu belirlenmiştir. Elde edilen veriler ve arazi ölçümleri ışığında yaygın olarak kullanılan ampirik yaklaşımlar olan RMR, Q ve NATM kaya kütle sınıflamalarına göre tanımlamalar yapılmıştır [10-14]. Tünel kazı - destek sistemlerinin belirlenmesi için kullanılan parametreler, zamanımızda tünel kaya sınıflamaları için yaygın olarak kullanılan yaklaşımlar olması ve de kaya

kütle özelliklerini daha iyi yansıttığının öngörülmesinden dolayı ampirik yaklaşımına göre belirlenmiştir [10-14]. Elde edilen veriler ve arazi gözlemleri göz önüne alındığında tünel güzergahında altı bölüm için kaya kütle sınıflaması oluşturulmuştur (Şekil 7). Özet olarak verilmesi amacıyla giriş, orta kesim ve çıkış kesimine ait RMR, Q ve NATM sınıflama parametreleri Çizelge 4-10'da verilmiştir.

### Giriş Kesimi (224+765 - Km.224+800 arası)

Değerlendirmede Km: 224+800'de yapılan sondaj ile portal giriş kesiminde yapılan jeoteknik ölçümler ve veriler kullanılmıştır. Giriş kesiminde RMR=36 (zayıf kaya) ve Q=0,0625 (çok zayıf kaya) değerlerine göre Tüneli giriş kesiminin NATM sınıflamasında B3 kazı ve destek sistemi ile geçilmesi uygun olacaktır.

**Çizelge 4.** Giriş kesimine ait RMR kaya kütle sınıflama parametreleri

RMR	Sınıflaması	Puan
RQD	= 15*	4
Serbest basınç dayanımı	= 33 MPa**	4
Süreksizlik aralığı	: 0,02-0,6 mm	8
<b>Süreksizlik durumu</b>		
Süreksizliğin uzanımı	: >20 m	0
Süreksizlik açıklığı	: <1 mm	4
Pürüzlülük	: Orta pürüzlü	3
Dolgu durumu : Yumuşak dolgu <5 mm		2
Ayrışma	: Ayrılmış	1
Yer altı suyu	: Kuru	15
Temel RMR puanı	=	41
Süreksizlik yönü	: Orta	-5
(Tünel eksenine paralel ve dike yakın doğrultu ve eğim>45°)		
<b>RMR puanı</b>	<b>= 36</b>	<b>(Zayıf kaya)</b>

**Çizelge 5.** Giriş kesimine ait Q kaya kütle sınıflama parametreleri

Q	Sınıflaması	Puan
RQD= 15*	15	
Eklem sayısı (Jn)	: 3 Set (2X9)	18
Eklem ayrışması (Ja)	: Ayrışmış yumuşak dolgulu eklemeler	4
Su durumu (Jw)	: Kuru	1
SRF (Stres azaltma faktörü) (Portal Kesimi) (Şistozite düzleminin tünel kazısına etkisinin belirtilebilmesi amacıyla, birimin kendisi “zayıf zon” olarak kabul edilmiştir.)		5
$Q=(RQD/Jn)x(Jr/Jn)x(Jw/SRF)= (15/18)x(1,5/4)x(1/5)$		= 0,0625 (Çok zayıf kaya)

**Kaya Kütleli Elasto-Plastik Parametreleri:**

Kaya kütleli elasto-plastik parametreleri RockLab 1.0 programı kullanılarak elde edilmiş olup, program girdileri aşağıda sunulmaktadır [15-17].

$m_i$ , intakt kayanın (Hoek-Brown Dayanım Parametresi) = 10

$GSI = RMR-5 \Rightarrow 41-5=36$

$q$  (UCS-Tek Eksenli Basınç Dayanımı) = 33 MPa

$E_i = 23$  GPa (Tünel girişinde Km: 224+800 sondajından 5 adet numune elde edilmişti, bunlardan ancak bir tanesinden elastisite modülü deneyi yapılabilmiş olup bu deneyin sonucudur)

$MR \Rightarrow E_i/q=697$

**Örtü Kalınlığı** = 10 m

**D (Örselenme Faktörü)** = 0,4

**Orta Kesim-III (Km: 225+300–225-400 arası):**

Değerlendirmede Km: 225+200’de ve Km: 225+510’da yapılan sondaj kuyularının verileri kullanılmıştır. RMR=58 (orta-iyi kaya) ve Q=5,00 (zayıf-orta kaya) değerlerine göre T5 Tünelinin bu kesiminde **B1** kazı ve destek sistemi ile geçilmesi uygun olacaktır.

**Kaya Kütleli Elasto-Plastik Parametreleri:**

Kaya kütleli elasto-plastik parametreleri RockLab 1.0 programı kullanılarak elde edilmiş olup, program girdileri aşağıda sunulmaktadır.

$m_i$  (intakt kayanın Hoek-Brown Dayanım Parametresi) = 10

$GSI = RMR-5 \Rightarrow 63-5=58$

$q$  (UCS-Tek Eksenli Basınç Dayanımı) = 60 MPa

$E_i = 37$  GPa (Km: 225+200 sondajından 7 adet numune ve Km: 225+510 sondajından da 6 adet numune elde edilmiştir, bunlardan onbir tanesinden elastisite modülü deneyi yapılabilmiş olup bu deneylerin ortalama sonucudur)

$MR \Rightarrow E_i/q=617$

**Örtü Kalınlığı** = 135 m

**D (Örselenme Faktörü)** = 0,6 (T5 Tünelinin bu kesimlerinde, kaya kalitesi “orta-iyi kaya” sınıfındadır ve tünel kazılarının “patlatmalı” yapılması düşünülmektedir. Bu nedenle orta-iyi kayada, orta-iyi kalitede yumuşak patlatma yapılacağı düşünülerek “**D=0,6**” olarak belirlenmiştir.)

**Çizelge 6.** Orta kesim-III (Km:225+300 – 225-400 arası) RMR kaya kütle sınıflama parametreleri

RMR	Sınıflaması	Puan
RQD=30*		7
Serbest basınç dayanımı $\epsilon=60$ MPa**		7
Süreksizlik aralığı	: 0,06-2,0 m	13
<b>Süreksizlik durumu</b>		
Süreksizliğin uzanımı	: 3-10 m	2
Süreksizlik açıklığı	: <1 mm	4
Pürüzlülük	: Orta pürüzlü	3
Dolgu durumu	: Dolgusuz	6
Ayrışma	: Ayrışmış	6
Yer altı Suyu	: Kuru	15
	<i>Temel RMR Puanı=</i>	<i>63</i>
Süreksizlik yönü (Tünel eksenine paralel ve dike yakın doğrultu ve eğim>45°)	: Orta	-5
<b>RMR puanı</b>	=	<b>58 (Orta-İyi kaya)</b>

**Çizelge 7.** Orta kesim – III (Km:225+300 – 225-400 arası) Q kaya kütle sınıflama parametreleri

Q Sınıflaması		Puan
RQD	=30	15
Eklem sayısı (Jn)	: 3 Set	9
Eklem pürüzlülüğü (Jr)	Düzlemsel pürüzlü eklemler	1,5
Eklem ayrışması (Ja)	: Ayrışmamış eklemler	1
Su durumu (Jw)	: Kuru	1
SRF (Stres azaltma faktörü)		1
$Q=(RQD/Jn)x(Jr/Jn)x(Jw/SRF) = (30/9)x(1.5/1)x(1/1)$		<b>= 5.00 (Zayıf-Orta Kaya)</b>

**Çıkış Kesim (Km:225+530 – Tünel çıkışı arası)**

Değerlendirmede Km:225+510'da yapılan sondaj kuyusunun ve çıkış portal ayna kesiminden elde edilen verileri kullanılmıştır.

Bu kesimde RMR=40 (zayıf-orta kaya) ve  $Q=0,139$  (çok zayıf kaya) değerlerine göre T5 Tüneli çıkış portal kesiminde **B3** kazı ve destek sistemi ile geçilmesi uygun olacaktır.

**Kaya Kütleli Elasto-Plastik Parametreleri**

Kaya kütleli elasto-plastik parametreleri RockLab 1.0 programı kullanılarak elde edilmiş olup, program girdileri aşağıda sunulmaktadır.

$m_i$  (intakt kayanın Hoek-Brown Dayanım Parametresi) = 10

$GSI = RMR-5 \Rightarrow 45-5=40$

$q$  (UCS-Tek Eksenli Basınç Dayanımı) = 31 MPa

$E_i = 26$  GPa (Tünel çıkışında yapılan Km:225+510 sondajından 6 adet numune elde edilmiştir, bunlardan beş tanesinden elastisite modülü deneyi yapılabilmektedir. Bu sonuçlardan portal kesiminde olduğumuz için en düşük ikisinin ortalaması olan 26 GPa olan değer alınmıştır)

$MR \Rightarrow E_i/c=838$

**Örtü Kalınlığı** = 10 m

**D (Örselenme Faktörü)** = 0.4 (T5 Tüneli çıkış portal kesiminde, kaya kalitesi “zayıf kaya” sınıfındadır ve tünel kazılarının “patlatmalı” yapılması düşünülmektedir. Bu nedenle zayıf kayada, orta-iyi kalitede yumuşak patlatma yapılacağı düşünülerek “**D=0,4**” olarak belirlenmiştir.)

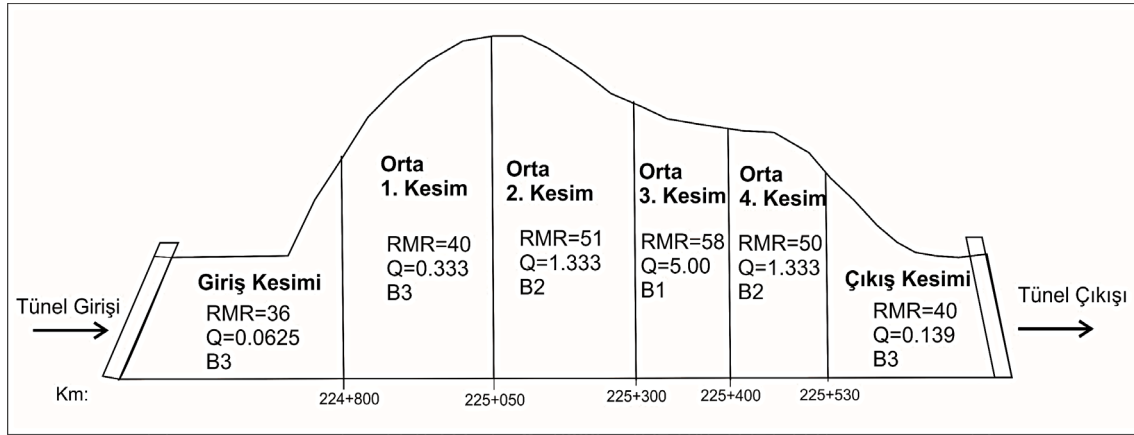
**Çizelge 8.** Çıkış kesim (Km:225+530) RMR kaya kütle sınıflama parametreleri

RMR sınıflaması		Puan
RQD	= 25*	6
Serbest basınç dayanımı	= 31 MPa**	4
Süreksizlik aralığı	: 0,02-0,6 m	8
<b><u>Süreksizlik durumu</u></b>		
Süreksizliğin uzanımı	: >20 m	0
Süreksizlik açıklığı	: <1 mm	4
Pürüzlülük	: Orta Pürüzlü	3
Dolgu durumu	: Yumuşak dolgu <5 mm	2
Ayrışma	: Orta ayrışmış	3
Yer altı suyu	: Kuru	15
<i>Temel RMR puanı= 45</i>		
Süreksizlik yönü	: Orta	-5
(Tünel eksenine paralel ve dike yakın doğrultu ve eğim>45 <sup>0</sup> )		
<b>RMR puanı</b>	<b>=40</b>	<b>(Zayıf-Orta kaya)</b>



**Çizelge 9.** Çıkış kesim (Km: 225+530) Q kaya kütle sınıflama parametreleri

Q Sınıflaması		Puan
RQD	= 25	25
Eklem sayısı (Jn)	: 3 Set (2x9)	19
Eklem pürüzlülüğü (Jr)	: Düzlemsel pürüzlü eklemler	1,5
Eklem ayrışması (Ja)	: Orta ayrılmış yumuşak dolgulu eklemler	3
Su durumu (Jw)	: Kuru	1
SRF (Stres azaltma faktörü)		5
$Q=(RQD/Jn)x(Jr/Jn)x(Jw/SRF) = (25/18)x(1,5/3)x(1/5) = 0,139$		<b>(Çok zayıf kaya)</b>

**Şekil 7.** Tünel güzergahı kazı destekleme bölümleri (RMR, Q ve NATM sınıflamasına göre)**Çizelge 10.** Tünel güzergahı kaya kütle sınıflamaları

Tünel kilometresi	RMR	Q	NATM	GSI	YÜK.	qc(Mpa)
KM: 224+800 (Giriş kesimi)	36 Zayıf kaya	0,0625 Çok zayıf kaya	B3	36	10 m	33
KM: 0+224+800-225+050 (Orta kesim 1)	40 Zayıf-orta kaya	0,333 Çok zayıf kaya	B3	40	115m	50
KM: 225+050-225+300 (Orta kesim 2)	51 Orta kaya	1,333 Zayıf kaya	B2	51	175m	72
KM: 225+300-225+400 (Orta kesim 3)	58 Orta- iyi kaya	5,00 Zayıf-orta kaya	B1	58	135m	60
KM: 225+400-225+530 (Orta kesim 4)	50 Orta kaya	1,333 Zayıf kaya	B2	50	95m	47
KM: 225+530 (Çıkış kesimi)	40 Zayıf-orta kaya	0,139 Çok zayıf kaya	B3	40	10m	31

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mersin-Antalya arasındaki D-400 Karayolu projesi içerisinde Antalya sınırına kadar 22 adet tünel projelendirilmiştir. Bu çalışmada Projenin Anamur kesiminde, Kaledran mevkiinde yer alan 780 m uzunluktaki T5 Tünelinin kazı ve desteklemesine

yönelik zemin parametreleri araştırılmıştır. T5 Tüneli güzergahını oluşturan eğemen jeolojik birim, önceki çalışmalarda Çakmak formasyonu olarak adlandırılan Paleozoyik yaşlı şistlerdir. Arazi incelemeleri, sahada yapılan ölçümler ve laboratuvar deney sonucunda jeolojik ve jeoteknik değerlendirmelerle, tünel güzergahının giriş, orta

ve çıkışında altı ayrı bölüm ayrılanmıştır. Bu altı bölüm için ampirik yaklaşımlara göre (RMR, Q ve NATM'ye göre) kaya kütle sınıflaması yapılmıştır. Genel olarak Giriş kesimi, orta Kesim ve çıkış kesimi olarak özetlenecek olursa, giriş kesiminde RMR=36 (zayıf kaya), Q=0.0625 (çok zayıf kaya) değerlerine göre NATM sınıflamasında B3 kazı ve destek sistemi ile geçilebileceği değerlendirilmiştir. Orta kesim KM: 225+300-225+400 arası RMR=58 (orta-iyi kaya) ve Q=5,00 (orta-iyi kaya) değerlerine göre bu kesiminde **B1** kazı ve destek sistemi ile geçilmesi uygun olacaktır. Çıkış kesimi RMR=40 (zayıf-orta kaya) ve Q=0,139 (çok zayıf kaya) değerlerine göre T5 Tüneli çıkış portal kesiminde **B3** kazı ve destek sistemi ile geçilmesi değerlendirilebilir.

Zor topografik koşullara bağlı olarak tünel giriş, orta ve çıkış kesimini yansıtabilecek şekilde toplam 3 adet araştırma sondaj kuyusu açılabilmiştir (SK 1 Km:224+800, SK 2 Km:225+200, SK 3 Km:225+510).

Jeolojik ve jeoteknik değerlendirmeler sonucunda, tünelin giriş ve çıkışındaki birimler ayrılmış, kırıklı ve çatlaklı bir yapıda olup, buna bağlı olarak zayıf-orta dayanımlı kaya sınıfında olduğu, tünelin orta bölümündeki birimlerin ise genel olarak az ayrılmış, orta derecede dayanımlı özellik gösterdiği, kaya sınıfı olarak da orta-iyi kaya olduğu belirlenmiştir. Tünelin orta kesimlerinin, NATM sınıflamasına göre B2 ve yer yer de B1 kaya sınıfı ile geçilmesi, özellikle giriş ve çıkış tarafında ayrışma ve süreksizlik durumuna bağlı olarak B3 kazı ve destek sınıfına göre geçilmesi öngörülmüştür. Ayrıca tünel güzergahında kazı sırasında daha az eklemli ve nispeten daha sağlam kesimlerle de karşılaşılması mümkün olup bu durumda kazı ve destekleme sistemi B2 olarak değiştirilebilir.

Sonuç olarak, şist türü metamorfik kayaların içerisinde açılan tünellerde, salt yüzey araştırmalarının kaya kütle sınıflaması açısından değerlendirmelerde yetersiz kaldığı bilinmektedir. Tünel açımından önce yapılan ayrıntılı yüzey araştırmaları raporları ile tünel açılması esnasında farklı durumlarla karşılaşılması söz konusu olabilir. Bu nedenle arazi araştırmalarının yanı sıra

tünel açımı sırasında kayanın durumunun sürekli kontrol edilerek revize edilebilmesinin olası olduğu göz önünde tutulmalıdır. Proje aşamasında belirlenen kazı ve desteklemelerle tünel kazısı sırasında karşılaşılan farklı durumların zaman ve maliyet açısından çok büyük sorunlara sebebiyet vermemesi için kazı sırasında tünel aynanın durumunun dikkatli şekilde gözlemlenmesi, ön sondajlar ve deformasyon ölçümlerinin yapılması ve gerekli önlemlerin zamanında kararlaştırılarak değişikliklere gidilmesi maliyet ve zaman açısından avantaj sağlayacaktır.

## 8. KAYNAKLAR

1. Aydoğdu, M., 2015. D-400 Karayolu T5 Tünelinin (Anamur-Kaledran Arası) Jeoteknik Olarak İncelenmesi. Ç.Ü. Fen Bilimleri Ens. Y.Lisans Tezi, Adana, 86.
2. Blumenthal, M.M., 1951. Batı Toroslarda Alanya Ard Ülkesinde Jeolojik İncelemeler: MTA Derg., Ankara, 5,134.
3. Özgül, N., 1976. Toroslar'ın Bazı Temel Jeolojik Özellikleri: Türkiye Jeol. Kur. Bült., 19, 65-78.
4. Demirtaşlı, E., 1987. Toroslar'da Seydişehir ve Silifke Otoktanlarının Antalya, Alanya ve Hadim Naplılarıyla Olan İlişkilerinin Stratigrafik ve Tektonik Açısından İncelenmesi: TPAO. Rapo., Ankara, 2457.
5. Usta, D., 2001. Anamur-Bozyazı Dolayımın (Alanya P 29-c2, c3, c4 paftalarının) Jeolojisi, 8-22.
6. Ulu, Ü., 1983. Sugözü-Gazipaşa (Antalya) Alanının Jeoloji İncelemesi. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, Ankara, 7(1), 3-10.
7. MTA, 2002. 1/500000 Ölçekli Jeoloji Haritası. Ankara.
8. ISRM, 1981. Rock Characterization, Testing and Monitoring. In: Brown, E.T. (Ed.), 1981. International Society for Rock Mechanics (ISRM) Suggested Methods. Pergamon, Oxford, 211.
9. ISRM (International Society for Rock Mechanics), 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. R. Ulusay and J.A. Hudson (eds.), Ankara, 628.

10. Barton, N., Lieu R., Lunde I., 1974. Engineering Clasification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Oslo Norway, 106.
11. Barton, N., 2002. Some New Q-Value Correlations to Assist in Site Characterizations and Tunnel Design. International Journal of Rock Mechanics ve Mining., 39,185-216.
12. Bieniawski, Z.T., 1973. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. Transaction of South African Institution of Civil Engineering, 15, 335-44.
13. Bieniawski, Z.T., 1974. Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application in Tunneling. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Congress of International Society for Rock Mechanics, Denver, 2, 27-32.
14. Bieniawski,, Z.T., 1989. Engineering Roek Mass Classification. Mc. GrawHill, New York, 237.
15. Hoek, E., Brown, E.T., 1997. Practical Estimates of Rock Mass Strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34(8), 1165-1186.
16. Hoek, E., Marinos, P., Benissi, M., 1998. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) Classification for Very Weak and Sheared Rock Masses: the Case of the Athens Schist Formation. Bulletin of Engineering Geology and Environment, 57, 151-60
17. Hoek, E., 1983. Strength of Jointed Rock Masses, 1983 Rankine Lecture. Geotechnique, 33(3), 187-223.



## A New Holistic Risk Analysis Approach Based on the House of Quality

Birsen İrem SELAMOĞLU\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-7730-098X  
Yusuf KUVVETLİ<sup>2</sup> ORCID 0000-0002-9817-1371

<sup>1</sup>Osmaniye Korkut Ata University, Department of Business Administration, Osmaniye, Türkiye

<sup>2</sup>Cukurova University, Department of Industrial Engineering, Adana, Türkiye

Geliş tarihi: 03.02.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: SELAMOĞLU, B.İ., KUVVETLİ, Y., (2023). A New Holistic Risk Analysis Approach Based on the House of Quality. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 38(1), 265-280.

### Abstract

Risk management is a crucial process that consists of many components. In risk management, different processes are considered, namely, risk identification, risk assessment, determination of preventive actions and monitoring. In this study, a novel risk management approach in which all risk processes are integrated is proposed. In this context, a holistic risk management approach based on the house of quality approach is introduced, and an eight-step creation process is defined. The proposed approach was applied for a primary health care center, and the hazards, risks to be occurred by these hazards, and preventive suggestions were presented. In the case study, twenty-five hazards were identified and eleven risks related to twenty-five hazards were identified and ranked. According to the risk priority numbers, five preventive actions were suggested and evaluated.

**Keywords:** Risk management, House of quality, Holistic risk analysis, Risk mitigation

### Kalite Evi Yaklaşımına Dayalı Yeni Bir Holistik Risk Analizi Yöntemi

#### Öz

Risk yönetimi, birçok bileşenden oluşan çok önemli bir süreçtir. Risk yönetiminde, risk tanımlama, risk değerlendirme, önleyici faaliyetlerin belirlenmesi ve izleme olmak üzere farklı süreçler dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada, tüm risk süreçlerinin entegre edildiği yeni bir risk yönetimi yaklaşımı önerilmiştir. Bu kapsamda, kalite evi yaklaşımına dayalı bütüncül bir risk yönetimi yaklaşımı tanımlanmıştır ve yeni yönteme ait sekiz aşamalı oluşturma planı açıklanmıştır. Önerilen yaklaşım bir birinci basamak sağlık kuruluşu için uygulanmış ve tehlikeler, bu tehlikelerin yaratacağı riskler ve önleyici öneriler sunulmuştur. Vaka çalışmasında, yirmi beş tehlike tanımlanmış ve yirmi beş tehlikeyle ilgili olarak on bir risk belirlenmiş ve sıralanmıştır. Risk öncelik sayılarına göre beş önleyici faaliyet önerilmiş ve değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Risk yönetimi, Kalite evi, Holistik risk analizi, Risk azaltma

\*Corresponding author: Birsen İrem SELAMOĞLU, [birsenselamoglu@osmaniye.edu.tr](mailto:birsenselamoglu@osmaniye.edu.tr)

## 1. INTRODUCTION

Sustainability is a term that refers to trying to create and maintain the conditions within considering an inherently efficient way to help current and future generations [1]. This concept changes the production environment in a way that puts the environment and human-being in focus. In addition to achieving sustainability, regulations are enforced by firms to consider the environment and occupational health. Accordingly, the firms are concerned with more environmental and efficient production strategies considering the environmental, occupational health, and safety hazards. The hazards may cause staff casualties and financial losses, besides interruptions on service and high-quality products. Healthcare systems need more attention to the hazards that may occur, as they provide emergency services and responsible for patients' health.

In healthcare systems, there are some specific activities for avoiding and reducing losses given as follows [2]:

- Creating a risk identification mechanism such as reports from medical records, incidents, staff refs, patient complaints, and quality improvement techniques,
- Establishing and maintaining good relationships among systems members who are quality team, medical staff, infection controller and other relevant members,
- Building policies, procedures, qualitative and statistical reports about risk management,
- Creating educational programs for staff on different risk management topics,
- Considering and managing the contract risks that may occur from affiliation, construction, leasing or management agreements,

Healthcare systems are different from other systems due to infection and epidemical risks. According to World Health Organization statistics, 7% of hospitalized patients in developed countries

and 10% of hospitalized patients in developing countries will be affected by at least one healthcare-associated infection at any given time [3]. Considering these reasons, it makes it hard to manage risk analysis and management processes on healthcare systems.

Risk can be defined as a random and possibly occurring event; however, it affects the organizational objectives in a negative way when it occurs [4]. In order to avoid such negative impacts, risks need to be carefully determined, probability and impacts of the risks when they occur should be analyzed in risk analysis studies. As seen in Figure 1, risk analysis and management is a process that starts from risk definition, which focuses on identifying hazards, continues with the risk assessment phase, which evaluates these hazards. Then, the corrective activities are planned in the mitigation phase, and finally the risks are tracked in the monitoring phase.

The risk analysis and risk management process are recurrent; therefore, each phase interacts with each other in different ways. Firstly, a hazard may cause more than one risk. Secondly, different risks may positively or negatively affect each other, and finally, corrective action may mitigate more than one risk and make this action privileged from other actions. Therefore, a holistic approach is needed to take into account these interactions between risk analysis and management process steps.

In this study, a novel holistic risk analysis and management approach is proposed to deal with the interaction between identification, assessment, mitigation, and monitoring processes. Quality function deployment (QFD) based risk analysis schema is applied for this purpose. QFD is a tool that improves quality by using mathematical analysis, which focuses on functional relationships by appending a series of matrices [5]. The mathematical analysis provides to translate customers' voice to functional company requirements by using visual and integrated thinking.

The new holistic method makes it possible to consider the risk analysis and management process

in a comprehensive way as following (i) assessing different hazards and their importance values regarding caused risks, (ii) assessing the hazards precisely with considering all risks that may occur, (iii) quantifying interaction between risks, and (iv) ordering the corrective actions according to their benefits. Unlike conventional risk analysis methods, the new method has a more integrated

view of risk analysis and management processes. The method can be considered as an effective way to manage many hazards, risks, and corrective actions together. For this aim, the method is applied to a primary care clinic with various hazards such as fire, explosion, ergonomics, and infections.

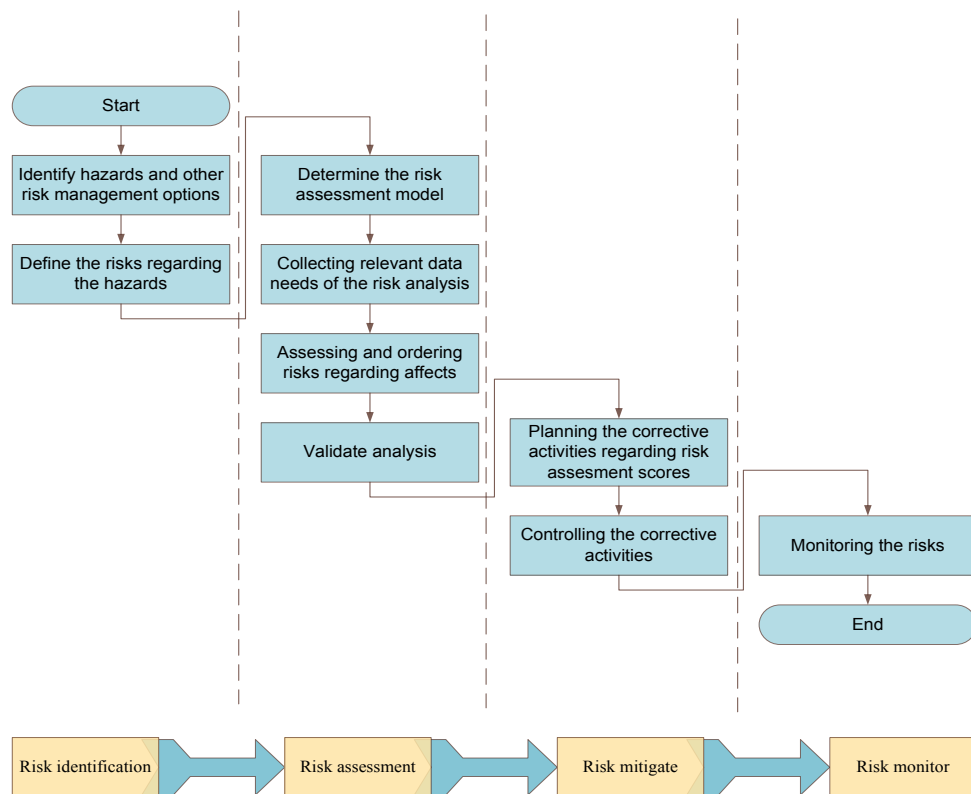


Figure 1. Risk analysis and management process

## 2. BACKGROUND

There are numerous studies on occupational health and safety in which different risk analysis approaches are used in different applications. While various applications of QFD, such as new product design, have been considered in the previous studies, the QFD method is one of these approaches applied in risk assessment studies. Besides, the integration of QFD with other risk analysis methods has attracted the attention of researchers recently. In their study, Fagnoli et al.

have combined QFD with Hierarchical Task Analysis and Human Error Assessment and Reduction Technique, and risks in agricultural practices are analyzed [6]. In another study, Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and QFD methods are used to conduct risk analysis at the robot design stage in determining reliability [7]. Another study integrates QFD and FMEA approaches with 2-tuple linguistic representation [8]. In their study, Lin et al. proposed an approach which integrates QFD and FMEA with goal programming in the new product design stage [9].

Kaddoura et al. proposed a method using QFD and DEMATEL techniques. In their study QFD and DEMATEL approaches are incorporated in the manholes risks analysis system [10]. In another study, QFD, FMEA, and Analytical Network Process are integrated for developing a fuzzy risk assessment approach [11]. One of the studies proposes a customer-oriented risk assessment approach acquired by integrating FMEA and QFD [12]. In their study, Chen has evaluated the service demand risks using FMEA and QFD methods [13]. QFD based risk assessment approach is proposed for the construction industry [14]. In the study, hazards are determined using a fuzzy analytic process and evaluated by using FMEA. Cinar and Cebi have proposed a hybrid risk assessment method for mining sector based on QFD, Fuzzy Logic and AHP techniques [15]. Haktanır has proposed a new method with an integrated picture fuzzy QFD and FMEA for the risk analysis of Digital Transformation [16].

Holistic risk analysis aims to evaluate risks comprehensively by focusing on different parameters collectively. In the literature, there are a number of applications of holistic risk analysis. In their study, Colombo has proposed an approach that considers human, technological, and organizational elements by a holistic approach called HORAM [17]. In another study, human and organizational factors have been incorporated with a holistic approach while considering uncertainties [18]. In another holistic risk analysis study with QFD, an approach called House of Safety has been proposed which evaluates the risks in machine design considering human-machine interaction [19]. In their study, Spears has handled information technology-based risks and considered a holistic approach that is focusing on technology, information, people, and processes [20]. Zhang and Mohandes used hybrid Z-numbers based multi-criteria decision-making method and proposed a holistic Z-numbers based risk management framework on occupational health and safety in green building construction projects [21]. Mishra et al. have proposed an integrated approach in order to assess microgrid's resilience in a holistic way [22]. Zhou et al. have proposed a holistic risk assessment framework based on

Bayesian Network Modelling [23]. Abba et al. have proposed a risk management framework for renewable energy investments. They used a holistic approach in their study [24].

The medical systems are vital for humans; therefore, risk identification, assessment, and prevention are essential. There are a number of studies focus on different medical systems-based risk assessments such as, oncology [25], emergency department [26] and multiple departments [27]. Liu has proposed improved FMEA techniques for proactive healthcare risk analysis [28]. These studies focus only on the risk assessment procedure in risk management using different methods. Risk assessment studies are generally considered for prioritizing hazards that are related to the system. Moreover, a hazard may cause more than one risk, but in general this is neglected. Accordingly, there is a need to consider the risk assessment, prioritize, analyze, and prevent processes in an integrated manner. Such an approach becomes even more critical in systems such as health systems that are open to risks due to the service provided and where service level is mandatory. A QFD-based system is a useful approach to meet the needs of this integrated structure. This study differs from the studies in the literature in this aspect. Therefore, the proposed approach is applied to a primary healthcare center to ensure the holistic risk management process.

## **2.1. Quality Function Deployment**

Quality function deployment is a powerful tool that provides decision support by using numerical indicators with graphical representations [29]. The first matrix of quality function deployment is the house of quality (HOQ), and it provides the transition from customer to product characteristics [30]. These properties make a powerful tool for new product development and other applications. HOQ consists of six parts, as shown in Figure 2. The steps of the HOQ is given as follows [31]:

1. Customer expectations about the products are handled in the customer requirements section.



2. In the customer requirements section, the relative importance of customer requirements is also prioritized.
3. Benchmark matrices are calculated by acquiring competitive assessment.
4. The engineering characteristics determine technical requirements about the products.
5. Customer requirements and engineering characteristics are ranked in order to calculate the relationship matrix.
6. Engineering characteristics may positively or negatively correlate; therefore, the correlations between the engineering characteristics are determined in the correlation matrix.
7. Finally, technical requirements are ranked based on the targets of the importance matrix and the best alternative is selected accordingly.

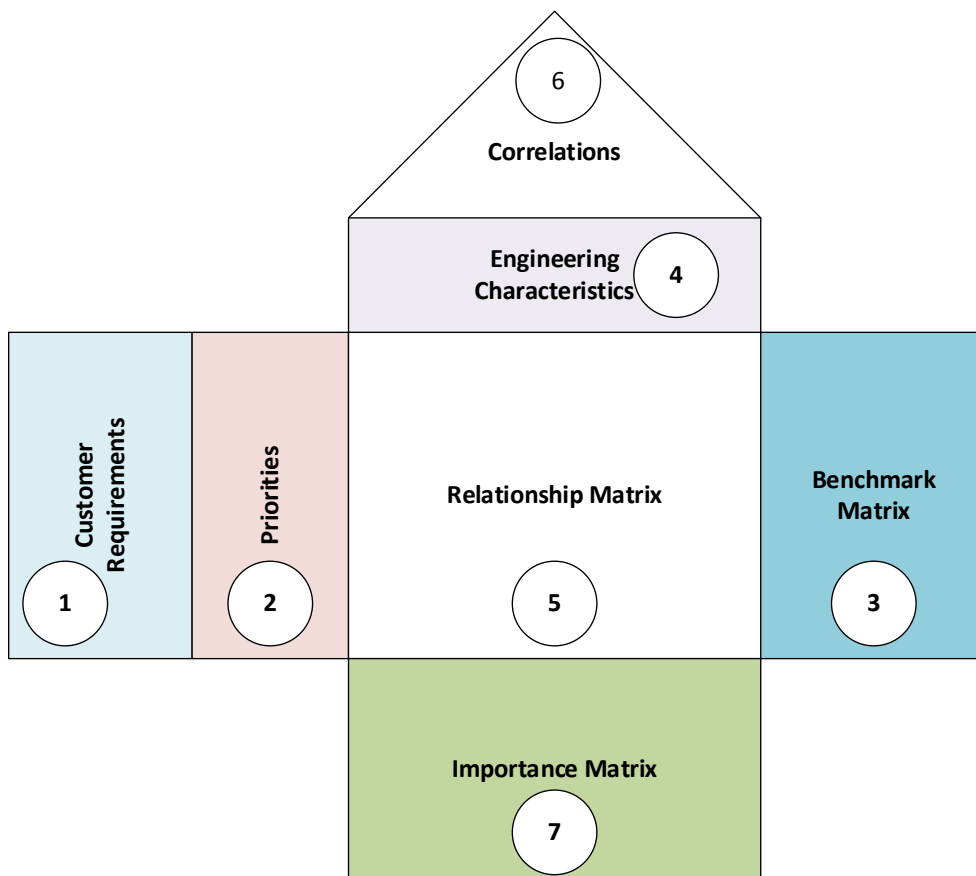


Figure 2. Basic HOQ structure

### 3. THE HRAM APPROACH

HOQ provides a holistic approach that considers both single and correlated effects of customer requirements, technical characteristics, and

comparing alternatives in an integrated manner. It makes it suitable for the HOQ approach to be used as a holistic approach in risk analysis, as outlined in Figure 3. The steps of the proposed holistic risk analysis method (HRAM) and the calculations done in these steps are as follows:

**Step 1. Identification of hazards**

In this step, hazards in the system are identified. Let  $i$  be the indices of hazards in the system.

**Step 2. Determination of probability values**

The risks in the hospital are mostly human-oriented. In order to determine the probability values, the probability scale for each hazard is calculated using the probability scale in Table 1. The scale has been defined based on expert opinion. Let  $p_i$  be the probability value of hazard  $i$ .

**Table 1. Probability scale**

Value	Level	Description
1	Very low	The occurrence of the hazard is less than $1/10^4$
2	Low	The occurrence of the hazard is between $1/10^4$ and $1/10^3$
3	Moderate	The occurrence of the hazard is between $1/10^2$ and $1/10^3$
4	High	The occurrence of the hazard is between $1/10$ and $1/10^2$
5	Very high	The occurrence of the hazard is greater than $1/10$

**Step 3. Identification of risks**

In this step, the risks of the system are defined. The engineering characteristics aim to maximize or minimize in classical HOQ; however, all risks are tried to be minimized in risk analysis. The risks are indexed by  $j$  and  $l$ .

**Step 4. Determination of the severity values**

In classical risk analysis studies, each hazard may cause only one risk which makes it hard to evaluate the severity of the risks. However, a hazard may cause more than one risk. Therefore, it is hard to evaluate the severity of the hazard. In the proposed holistic approach, severity values are applied using the scale given in Table 2. Similar to

the probability scale, the severity value of the hazard  $i$  and the risk  $j$  is denoted as  $s_{ij}$ .

**Table 2. Severity scale**

Value	Level	Description
1	Very low	Minor injury
2	Low	Needing first aid
3	Moderate	Work loss less than three days
4	High	Work loss more than three days
5	Very high	Fatality for human

**Step 5. Calculation of the risk priority numbers**

In most risk assessment studies, the risk priority number is calculated to rank the hazards. In this study, the risk priority number is calculated by using Equation 1. Let  $r_i$  denote the risk priority number of hazard  $i$ .

$$r_i = p_i * \sum_i^N s_{ij} \tag{1}$$

**Step 6. Determining preventive actions**

As this approach is holistic, it is crucial to determine the corrective activities. Preventive actions provide to avoid risks caused by hazards. In this step, there may be many preventive actions that affect hazards. Moreover, there is a prioritization of the preventive actions according to risk priority numbers of hazards and managerial decisions. Therefore, preventive actions can be associated to alternative benchmarks in the classic HOQ.

The question that may arise about preventive actions is how to measure these activities' impact on hazards. Let  $k$  denote the index of the preventive actions and  $w_{ik}$  denote the effect of the preventive action  $k$  on the hazard  $i$ . The preventive action scale is given in Table 3.

**Table 3.** The scale of preventive actions

Value	Effect
1	Eliminate the risk
3	Eliminate the risk majorly
5	Eliminate the risk on average
7	Eliminate the risk minorly
10	Not-improved the current risk
2,4,6,8,9	Intermediate values

**Step 7.** Indicating the correlations

The risks may correlate with each other. For instance, a collapse risk may also cause an explosion risk. Therefore, both positive and/or negative correlations are included in this holistic approach. Let  $c_{jl}$  denote the correlation between risk  $j$  and risk  $l$ . The valid range of the  $c_{jl}$  is  $\{-1, 0, +1\}$  where negative correlation, no correlation and positive correlation are indicated with -1, 0 and +1, respectively. The correlation is similar to relationship between technical requirements in the classical QFD.

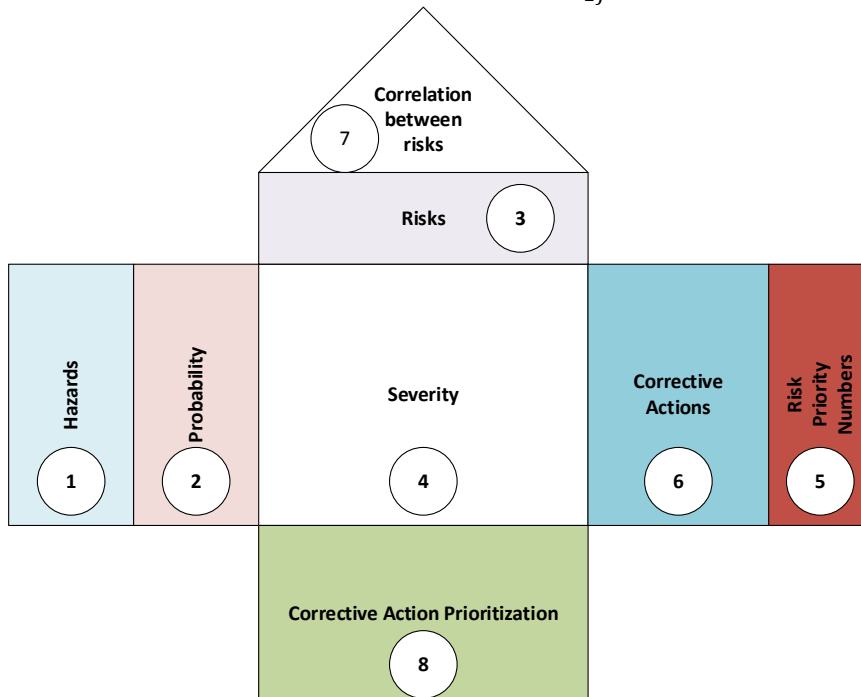
**Step 8.** Calculating the importance values of the preventive actions

The final step of the approach is to calculate the importance values of the preventive actions and the current situation on the risks. The importance values ( $x_{kj}$ ) can be calculated by using the Equation 2.

$$x_{kj} = \sum_{i=1}^N \frac{p_i * S_{ij} * W_{ik}}{10} + \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^M \frac{p_i * S_{il} * W_{lk} * c_{jl}}{10} \quad (2)$$

The first term focuses on the current risks, and the second term calculates the total correlated risks. Both terms are divided to 10 to normalize the total score by considering the maximum value of from Table 3. Relative importance value ( $I_{kj}$ ) according to these values can be calculated as Equation 3. Note that the current system is marked as the first preventive action, and for this reason, the relative importance value of the current system equals 0.

$$I_{kj} = \frac{x_{1j} - x_{kj}}{x_{1j}} \quad (3)$$



**Figure 3.** Graphical representation of HRAM

## 4. CASE STUDY

The proposed holistic approach is applied to a primary healthcare center in Adana, Turkey. Adana is one of the biggest cities in Turkey, having about 2.3 million population. Health practices in Turkey have increased with the impact of the COVID19 pandemic, and while the per capita health expenditure was 2 thousand 997 TL in 2020, it increased by 40.3% in 2021 to 4 thousand 206 TL [32].

In Turkey, each citizen has a dedicated primary care physician and a primary health care center. Primary health care centers provide preventive health services and primary care diagnosis, treatment, and rehabilitative health services for individuals and family members located near their place of residence or in a place where they can reach easily. According to the Turkish Minister of Health Statistics, there are about 26000 primary health care units in about 8000 centers, and around 3000 people access the service in each unit [33]. Furthermore, primary health care centers are crucial in the healthcare system. For this reason, a primary health care center is selected as a case for the holistic risk approach.

Three risk analysis experts having at least five years of experience identify and evaluate the hazards, risks, risk priority numbers, preventive actions, and the effects of preventive actions. There is a need to achieve consensus to make group decisions in rating probabilities, severities, and preventive actions. The Delphi method has been used to find the final values based on these three expert responses.

The results obtained from the application are given step by step as follows:

### Step 1. Identification of hazards

There are 25 different hazards identified in the system with various aspects: safety, infection, allergic and managerial aspects. The first column of Table 4 shows the defined hazards in the system.

### Step 2. Determination of probability values

The probability ( $p_i$ ) values for each hazard are selected from the scale given in Table 1 and the  $p_i$  values are given as the second column of Table 4. According to the results, the most probable risk is infection spreading (H7), lack of medical waste temporary storage area (H17), and respiration transmitted disease hazards (H18).

### Step 3. Identification of risks

In the system, 11 different risks are defined, which are collapse, fire, explosion, falling, infection, transmitted disease, irritation, health problem, injury, electric shock, and allergic disease.

### Step 4. Determination of the severity values

The severity ( $s_{ij}$ ) values for each risk and hazard pairs are selected from Table 2 and  $s_{ij}$  values are given in Table 4.

According to results, the most rated hazards for severity are deformed electric cables and plugs (H15) and lack of standards for controlling biological risks (H25).

### Step 5. Calculation of the risk priority numbers

Risk priority numbers ( $r_i$ ) for 25 hazards in the system are calculated by Equation 1 and the values are given in Table 4. According to risk priority numbers, the most crucial risk is respiration transmitted diseases (H18). The second most significant risk is the lack of standards for controlling biological risks (H25).

**Table 4.** Risk assessment matrix

Hazards (i)		Probability $p_i$	Risks (j)										Risk Priority Numbers			
			Collapse	Fire	Explosion	Falling	Infection	Transmitted disease	Irritation	Health problem	Injury	Electric shock	Allergic disease	$r_i$		
H1	Earthquake occurrence	2	5													10
H2	Natural gas connections	2		4	5											18
H3	Electric equipment	3		5												15
H4	Bad stored materials	3				1	3									12
H5	Existing kitchen department and propane cylinders usage	2		4	5											18
H6	Oxygen cylinder usage	3		4	5											27
H7	Infection spreading due to lack of air ventilation	5						3								15
H8	Chemical equipment usage	3							3							9
H9	Insufficient health and safety markings	4								3	3					24
H10	Lack of near-miss recording	3								3	3					18
H11	Lack of maintenance	3								3	3					18
H12	Lack of running instructions for a centrifuge device	3					4									12
H13	Inflammable and explosive equipment positioned near power generator	3		4	5											27
H14	Messy electric cables around the electric panel	2		4								4				16
H15	Deformed, uninsulated, old, broken electric cables and plugs	2		4		2						4				20
H16	Non-usage of fire extinguisher system and fire emergency plan	3		5												15
H17	Lack of medical waste temporary storage area	5					4									20
H18	Respiration transmitted diseases	5					4	4								40
H19	Lack of making a waste management plan	4						3		2						20
H20	Lack of collection and separation of contaminated packaging materials	4						4		2						24
H21	Lack of infected liquids and chemicals cleaning kit	4									3					12
H22	Calibration, periodic control, and maintenance absence for contaminated medical equipment at the sterilization unit	4						4								16
H23	Lack of cleaning plan	2						3								6
H24	Biocidal products usage for insect controlling	3								2			3			15
H25	Lack of usage of national or international standards for controlling biological risks	3					5	5								30

**Step 6.** Determining preventive actions

In the system, preventive actions for each hazard are identified. Preventive actions are clustered since some of them have similar characteristics. Finally, five main preventive actions are listed as follows: regulation compliance (A1), improving relationships with partners (A2), procedure,

documentation (A3), facility layout improvement (A4), and new equipment purchasing (A5). Preventive action groups determined in this study are given in Table 5. The preventive action groups improvement values found according to the scale given in Table 3. and given in Table 5,

**Table 5.** The scale of preventive actions

Hazards	Preventive actions	Groups					Improvement ( $w_{ki}$ )				
		A1	A2	A3	A4	A5	A1	A2	A3	A4	A5
H1	Achieving compliance with earthquake regulations	✓					3	10	10	10	10
H2	Creating licensed supplier relationships		✓				10	2	10	10	10
H3	Achieving regulation compliance for electric infrastructure	✓					2	10	10	10	10
H4	Creating and achieving the material stowing procedure			✓			10	10	5	3	10
H5	Re-positioning the propane cylinders and planning for controlling with gas detector				✓		10	10	10	3	10
H6	Positioning and storing regarding safety instructions				✓		10	10	10	4	10
H7	Improving air conditioning system					✓	10	10	10	10	1
H8	Building and tracking material safety system					✓	10	10	10	10	3
H9	Proper marking			✓			10	10	5	10	10
H10	Developing a reporting system			✓			10	10	7	10	10
H11	Creating maintenance plan			✓			10	10	7	10	10
H12	Creating working instructions			✓			10	10	5	10	10
H13	Positioning away from the power generator				✓		10	10	10	3	10
H14	Avoiding near storage inflammable, burning or chemical materials to the electric panel, creating dielectric field near to electric panel, improving electric infrastructure				✓		10	10	10	3	10
H15	Higher cable positioning and changing more resistive cable routes				✓		10	10	10	2	10
H16	Creating a fire plan and using a fire extinguisher			✓			10	10	3	10	10
H17	Setting temporary storage container for medical wastes regarding regulations				✓		10	10	10	1	10
H18	Determining the biological risk group and applying suitable isolation cautions			✓			10	10	3	10	10
H19	Developing a waste management plan for collecting, decomposing, temporary storing and cleaning, and disinfecting wastes			✓			10	10	3	10	10
H20	Decomposing the wastes as contaminated and non-contaminated materials					✓	10	10	10	10	1
H21	Acquiring cleaning kit and putting the safe cleaning instructions banners					✓	10	10	10	10	1
H22	Calibrating sterilization equipment and creating maintenance plans that accordance with current regulations	✓					1	10	10	10	10

**Table 5. (Continued)**

<b>H23</b>	<b>Creating cleaning plan with considering storing conditions, material labels, warnings, and personal protective equipment usage information</b>			✓			10	10	2	10	10
<b>H24</b>	Controlling biocidal products regarding biocidal usage regulations	✓					1	10	10	10	10
<b>H25</b>	Implementing national/international standards for avoiding transmission of biological infections or creating own work procedure for this aim	✓					1	5	10	10	10

**Step 7.** Indicating the correlations between risks

In this study, some of the risks correlate with others positively. Table 6 shows the correlations

between the risks. For instance, falling may cause different risks such as fire, health problems, and injury; therefore, it is marked as "+1"— here, all empty cells equal to 0.

**Table 6.** Correlations in risks

		Risks										
		Collapse	Fire	Explosion	Falling	Infection	Transmitted disease	Irritation	Health problem	Injury	Electric shock	Allergic disease
<b>Risks</b>	Collapse			+1								
	Fire				+1							
	Explosion	+1										
	Falling		+1					+1	+1			
	Infection						+1					
	Transmitted disease					+1		+1				
	Irritation											+1
	Health problem				+1		+1					
	Injury				+1							
	Electric shock											
	Allergic disease							+1				

**Step 8.** Calculating the importance values of the preventive actions

The importance values for the preventive actions are calculated using Equation 2 and summarized in Table 7. Each of these preventive actions affects at

least one hazard. Therefore, it is essential to rank these corrective actions. The importance values are expressed relative to the current system. The facility layout improvement found to be the best improvement.

**Table 7.** % Importance values of the preventive actions

Importance values of the preventive actions ( $X_{kj}$ )	Risks										
	Collapse	Fire	Explosion	Falling	Infection	Transmitted disease	Irritation	Health problem	Injury	Electric shock	Allergic disease
Current system	60	93	60	187	176	228	18	159	42	16	18
Regulation compliance	53	81	53	169.6	134.6	181.2	9.9	125.7	42	16	9.9
Improving relationships with partners	52	86.6	52	180.6	161	213	18	151.5	42	16	18
Procedure, documentation	60	81	60	146.6	124.3	159.3	18	113.3	30.6	16	18
Facility layout improvement	33.5	54.5	33.5	148.5	151.7	203.7	18	153.7	42	4	18
New equipment purchasing	60	93	60	169	148.1	192.9	11.7	123.9	31.2	16	11.7

The importance values of the preventive actions are determined by taking into account the relative improvement values given in Table 8. According to the results, the most crucial preventive action is the facility layout improvement (A4). Regulation compliance (A1) and procedure and

documentation (A3) ranked as second. Less necessary preventive action is improving relationships with partners (A2). It is expected, because improving relationship with partners affects only one hazard.

**Table 8.** The relative importance of the preventive actions

Relative Importance of the Preventive Actions ( $I_{kj}$ )	Risks										
	Collapse	Fire	Explosion	Falling	Infection	Transmitted disease	Irritation	Health problem	Injury	Electric shock	Allergic disease
Regulation compliance	0.12	0.13	0.12	0.09	0.24	0.21	0.45	0.21	0.00	0.00	0.45
Improving relationships with partners	0.13	0.07	0.13	0.03	0.09	0.07	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
Procedure, documentation	0.00	0.13	0.00	0.22	0.29	0.30	0.00	0.29	0.27	0.00	0.00
Facility layout improvement	0.44	0.41	0.44	0.21	0.14	0.11	0.00	0.03	0.00	0.75	0.00
New equipment purchasing	0.00	0.00	0.00	0.10	0.16	0.15	0.35	0.22	0.26	0.00	0.35

The overall HRAM graph is drawn in Figure 4. The results obtained from the novel holistic approach show that considering the severity value of multiple risks and hazards creates more probable and severe hazards than the  $r_i$  values. Furthermore, this approach integrates the risk

assessment and mitigation processes. Finally, HRAM provides a graphical representation for ease of managing the whole risk analysis processes. It shows that the HRAM provides more insights and managerial benefits.



HOLISTIC RISK ANALYSIS APPROACH

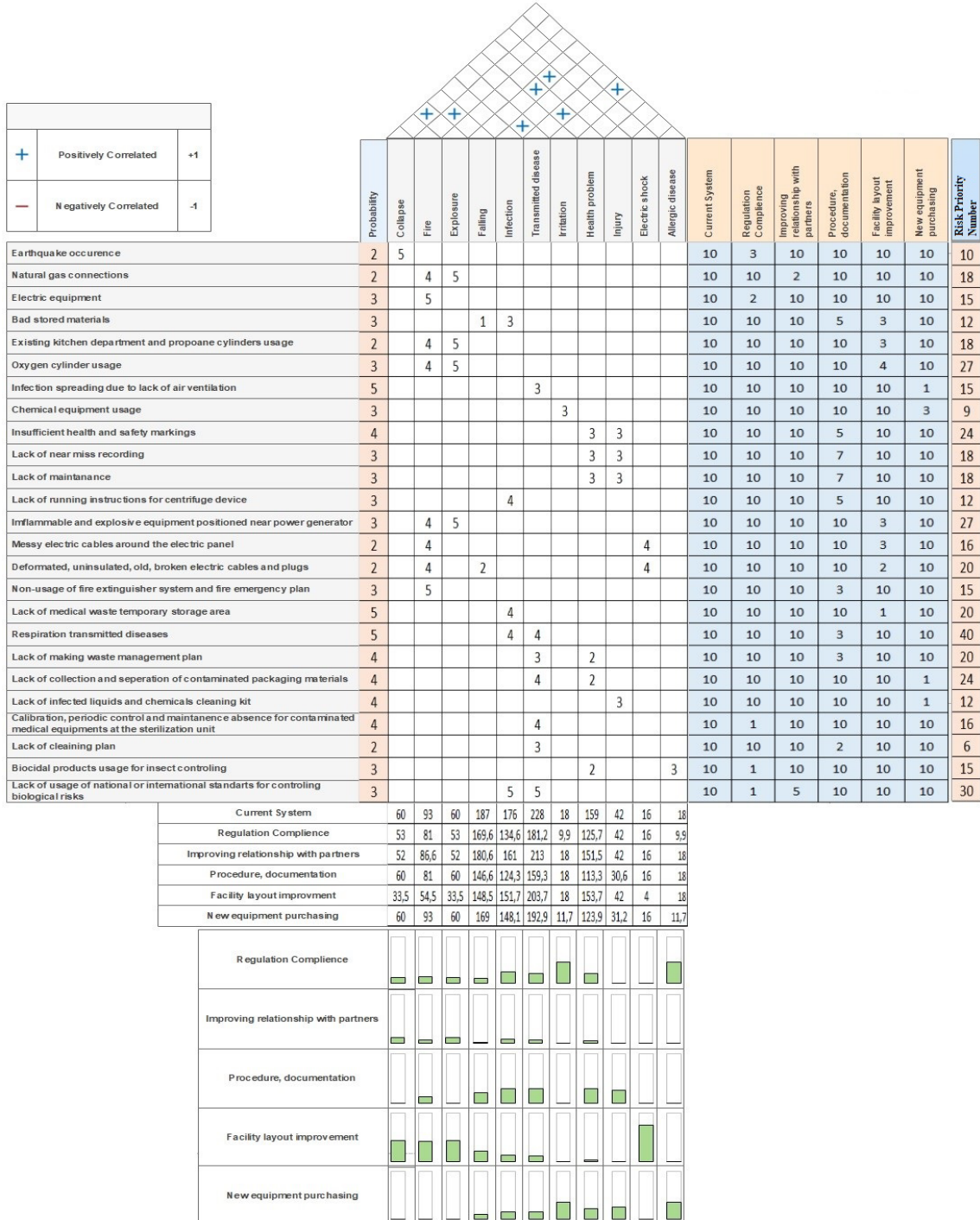


Figure 4. The HRAM graph for the primary healthcare center

## 6. CONCLUSION

Risk management is a broad subject applied in various types of organizations. The risk identification, assessment, mitigation and monitoring phases are the phases of the risk management processes. It is essential to integrate each of these phases. In this study, a holistic risk analysis approach based on HOQ is proposed. The holistic risk analysis approach differs from classical HOQ applications by adding calculations to perform the risk analysis. Conventional qualitative risk analysis methods are applications that evaluate all management processes independently, mostly supported by an expert opinion and based on the calculations made with different parameters such as probability and severity. In addition, data-driven advanced risk analysis methods are also available. There are limitations of the conventional risk analysis method since the issues such as the results obtained from the assessed risks and how they can be eliminated are independent. It is essential to integrate each of these phases. In this study, an 8-step holistic risk analysis approach based on HOQ is proposed. Thus, the entire risk analysis process (identification, assessment, mitigation and monitoring) and the relationships between these processes can be evaluated simultaneously with the HRAM approach.

Furthermore, the proposed holistic risk analysis provides a visual graphical method that monitors the overall risk management studies in a single chart. The proposed approach is applied to a primary health care center in Turkey, and the results show that the holistic risk analysis approach affects the risk assessment and mitigation processes significantly. According to the case study results, facility layout improvement was found to be most crucial preventive action so if 7 of the total 11 risks can be eliminated, there's a possibility that around ten percent improvement than the current system may occur. The results show that risks are expected to decrease when procedures and workflows are created correctly. The proposed method is applicable when integrated risk analysis is required in different systems such as production processes and service

processes. The other applications of the proposed approach may be considered as a future suggestion. Moreover, the fuzzy logic approach may be included to improve the holistic risk analysis approach further.

## 7. REFERENCES

1. EPA, What is sustainability, <https://www.epa.gov/sustainability>. Access date: 26.02.2019.
2. Carroll, R., 2009. Risk Management Handbook for Healthcare Organizations. John Wiley & Sons, 50-51.
3. Organization, WH, Health Care-Associated Infections Fact Sheet, [https://www.convatec.ca/media/1286/gpsc\\_ccisc\\_fact\\_sheet\\_en.pdf](https://www.convatec.ca/media/1286/gpsc_ccisc_fact_sheet_en.pdf), Access date: 25.01.2022.
4. Vose, D., 2008. Risk Analysis: A Quantitative Guide. John Wiley & Sons, 3.
5. Mallon, J., Mulligan, D., 1993. Quality Function Deployment-A System for Meeting Customers' Needs, *Journal of Construction Engineering and Management*, 119, 516-531.
6. Fagnoli, M., Lombardi, M., Haber, N., Puri, D., 2018. The Impact of Human Error in the Use of Agricultural Tractors: A Case Study Research in Vineyard Cultivation in Italy, *Agriculture-Basel* 8.
7. Korayem, M.H., Iravani, A., 2008. Improvement of 3P and 6R Mechanical Robots Reliability and Quality Applying FMEA and QFD Approaches, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24, 472-487.
8. Ko, W.C., 2013. Exploiting 2-tuple Linguistic Representational Model for Vonstructing HOQ-based Failure Modes and Effects Analysis, *Computers & Industrial Engineering* 64, 858-865.
9. Lin, C.Y., Lee, A.H.I., Kang, H.Y., 2015. An Integrated New Product Development Framework-An Application on Green and Low-carbon Products, *International Journal of Systems Science*, 46, 733-753.
10. Kaddoura, K., Zayed, T., 2018. Defect- and Component-based Assessment Model for Manholes, Tunnelling and Underground Space Technology, 82, 380-393.

11. Liu, H.-T., Tsai, Y.-I., 2012a. A Fuzzy Risk Assessment Approach for Occupational Hazards in the Construction Industry, *Safety Science*, 50, 1067-1078.
12. Koomsap, P., Charoenchokdilok, T., 2018. Improving Risk Assessment for Customer-oriented FMEA, *Total Quality Management & Business Excellence*, 29, 1563-1579.
13. Chen, S.H., 2016. Determining the Service Demands of an Aging Population by Integrating QFD and FMEA Method, *Quality & Quantity*, 50, 283-298.
14. Liu, H.T., Tsai, Y.I., 2012b. A fuzzy Risk Assessment Approach for Occupational Hazards in the Construction Industry, *Safety Science*, 50, 1067-1078.
15. Cinar, U., Cebi, S., 2020. A Hybrid Risk Assessment Method for Mining Sector based on QFD, Fuzzy Inference System, and AHP, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 39(5), 6047-6058.
16. Haktanır, E., 2022. Risk Analysis of Digital Transformation with an Integrated Picture Fuzzy QFD and FMEA Methodology, In *Intelligent and Fuzzy Systems: Digital Acceleration and The New Normal- Proceedings of the INFUS 2022 Conference*, Volume 1, (471-480). Cham: Springer International Publishing.
17. Colombo, S., 2019. The Holistic Risk Analysis and Modelling (HoRAM) Method, *Safety Science*, 112,18-37.
18. de la Canal, M.D., Ferraris, I.C., 2013. Risk Analysis Holistic Approach as a Base for Decision Making under Uncertainties, In: Zio, E., Baraldi, P., Pierucci, S., Klemes, J.J. (Eds.), 2013, *Prognostics and Health Management Conference*, Aidic Servizi Srl, Milano, 193-198.
19. Braglia, M., Di Donato, L., Gabbrielli, R., Marrazzini, L., 2018. The House of Safety: A Novel Method for Risk Assessment Including Human Misbehaviour, *Safety Science*, 110, 249-264.
20. Spears, J.L., 2005. A Holistic Risk Analysis Method for Identifying Information Security Risks, In: Dowland, P., Furnell, S., Thuraisingham, B., Wang, X.S. (Eds.), *Security Management, Integrity, and Internal Control in Information Systems*. Springer, New York, 185-202.
21. Zhang, X., Mohandes, S.R., 2020. Occupational Health and Safety in Green Building Construction Projects: A Holistic Z-Numbers-Based Risk Management Framework, *Journal of Cleaner Production*, 275, 122788
22. Mishra, S., Anderson, K., Miller, B., Boyer, K., Warren, A., 2020. Microgrid Resilience: A Holistic Approach for Assessing Threats, Identifying Vulnerabilities, and Designing Corresponding Mitigation Strategies, *Applied Energy*, 264, 114726.
23. Zhou, Y., Li, X., Yuen, K.F., 2022. Holistic Risk Assessment of Container Shipping Service Based on Bayesian Network Modelling, *Reliability Engineering & System Safety*, 220, 108305.
24. Abba, Z.Y.I., Balta-Ozkan, N., Hart, P., 2022. A Holistic Risk Management Framework for Renewable Energy Investments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112305.
25. van Tilburg, C.M., Leistikow, I.P., Rademaker, C.M.A., Bierings, M.B., van Dijk, A.T.H., 2006. Health Care Failure Mode and Effect Analysis: A Useful Proactive Risk Analysis in a Pediatric Oncology Ward, *Quality and Safety in Health Care*, 15, 58-63.
26. Chanamool, N., Naenna, T., 2016. Fuzzy FMEA Application to Improve Decision-Making Process in an Emergency Department, *Applied Soft Computing*, 43, 441-453.
27. Gul, M., Ak, M.F., Guneri, A.F., 2017. Occupational Health and Safety Risk Assessment in Hospitals: A Case Study using Two-Stage Fuzzy Multi-Criteria Approach, *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 23, 187-202.
28. Liu, H.C., 2019. *Improved FMEA Methods for Proactive Healthcare Risk Analysis*, Singapore: Springer, 73-96.
29. Maritan, D., 2015. *Practical Manual of Quality Function Deployment*. Springer.
30. Franceschini, F., 2016. *Advanced Quality Function Deployment*. CRC Press.
31. Kazemzadeh, R., Behzadian, M., Aghdasi, M., Albadvi, A., 2009. *Integration of Marketing*

- Research Techniques into House of Quality and Product Family Design, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 41, 1019.
32. TUIK, Sağlık Harcamaları İstatistikleri, 2021, Access date: 28.03.2023.
33. Turkish Ministry of Health, www.saglik.gov.tr, Access date: 22.03.2020.

## Elektrik Yapım İşi Sektöründe Bulanık Fine-Kinney Metodu ile Risklerin Önceliklendirilmesi

Umut ERGÜN<sup>\*1</sup> ORCID 0000-0003-3048-618X

Funda KAHRAMAN<sup>2</sup> ORCID 0000-0003-4333-4943

<sup>1</sup>Tarsus Üniversitesi/Lisansüstü Eğitim Enstitüsü/İş sağlığı ve Güvenliği Bölümü, Mersin

<sup>2</sup>Tarsus Üniversitesi/Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı/Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin

Geliş tarihi: 15.03.2023

Kabul tarihi: 29.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: ERGÜN, U., KAHRAMAN, F., (2023). Elektrik Yapım İşi Sektöründe Bulanık Fine-Kinney Metodu ile Risklerin Önceliklendirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 281-292.

### Öz

Elektrik yapım işi temel olarak; üretilen ve dağıtımına hazır elektriğin, hane ve işletmelere dağıtılması için gerekli olan alt yapının inşasını ve bu konuda önceden tesis edilmiş altyapıların modernizasyonunu ve büyütülmesini konu edinmiş bir alandır. Dolayısı ile ülkenin tüm büyüme ve kalkınma planlarında elektrik yapım işi sektörü ve üreteceği hizmet, stratejik bir öneme sahiptir. Elektrik yapım işi sektörü, ülkemiz mevzuatına göre çok tehlikeli işler sınıfında yer almaktadır. Her yıl pek çok ölümlü ve ağır yaralanmalı iş kazası meydana gelmektedir. Bu sebeple sektör içinde yer alan firmaların oluşturacakları risk değerlendirmeleri ve bu doğrultuda tehlikelerin giderilmesi oldukça önemlidir. Bu sürecin belirli bir plan dahilinde işletilmesi, hem firmanın zaman, iş gücü ve para gibi kısıtlı kaynaklarının verimli kullanılmasına hem de aciliyet arz eden tehlikelerin daha hızlı giderilmesine olanak sağlayacaktır. Bu çalışmada; sektörde referans alınmış bir firmanın Fine-Kinney metodu kullanılarak hazırlanmış olan risk değerlendirmesi baz alınarak, risklerin önceliklendirilmesi işlemi yapılmıştır. Bu veriler bulanık mantık yöntemiyle değerlendirilmiş ve bu iki yöntemin sonuçları karşılaştırılarak, tehlikelerin giderilme planı için karar vericilere, risk önceliklendirme sonucu sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Bulanık Fine-Kinney metodu, Risklerin önceliklendirilmesi, Elektrik yapım işi sektörü, İş sağlığı ve güvenliği

### Prioritization of Risks by Fuzzy Fine Kinney Method in Electrical Construction Sector

#### Abstract

Electrical construction works basically; is a field that deals with the construction of the infrastructure necessary for the distribution of electricity produced and ready for distribution to households and businesses, and modernization, and expansion of previously established infrastructures in this regard.

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Umut ERGÜN, [umut\\_ergun@tarsus.edu.tr](mailto:umut_ergun@tarsus.edu.tr)

Therefore, the electricity construction sector and the service it will produce has a strategic importance in all growth and development plans of country. The sector is in the category of very dangerous work according to the legislation of our country. Every year, many fatal and serious injury occupational accidents occur. For this reason, it is very important to eliminate the dangers in line with the risk assessments to be created by companies in the sector and these risk assessments. Operation of this process within a certain plan will enable the efficient use of the limited resources of the company such as time, labor, money, and faster elimination of urgent dangers. In this study; Risks were prioritized based on the risk assessment prepared using the Fine Kinney method of a company referenced in the sector. Afterward, the data were evaluated with the fuzzy logic method and the results of these two methods were compared and the risk prioritization result was presented to the decision makers for the hazard elimination plan.

**Keywords:** Keywords: Fuzzy Fine-Kinney method, Prioritization of risks, Electrical construction sector, Occupational health, and safety

## 1. GİRİŞ

Bu çalışmanın konu edindiği elektrik yapım işi sektörü temel olarak; üretilen elektriğin, hane ve işletmelere dağıtılması için gerekli olan alt yapının inşasını ve bu konuda önceden tesis edilmiş altyapıların modernizasyonunu ve büyütülmesini konu edinmiş bir alandır. Söz gelimi bir fabrikada üretilen bir ürünün, nihai tüketiciye ulaştırılması için uygulanacak lojistik faaliyetler için kullanılacak yolun inşası olarak nitelendirilebilir. Eğer bu yol oluşturulmazsa, elektriğin kullanımı ve buna bağlı pek çok modern hayat niteliği de ilgili lokasyona sağlanamaz. Bu sebeple elektrik yapım işi sektörü, hayati öneme sahip bir sektördür.

### 1.1. Elektrik Yapım İşi Kapsamında Yapılan Temel İşler

Ülkemizde çok tehlikeli sınıfta yer alan [1] elektrik yapım işinin içeriğini oluşturan işler temel olarak aşağıdaki gibidir:

- Kanal Açma ve kablo döşeme: Yeni yerleşim yerlerine elektrik hatları döşemek ya da mevcut yerleşim yerlerindeki havaî hatların yeraltına alınması için yapılan, yaklaşık 1-2 metre derinlik ve genişlikte kazı yapma ve açılan kanala uygun kablo serme işidir.
- Direk dikme ve iletken çekme: Aydınlatma direği, trafo veya iletken taşıyıcı direk dikme işleminin yanı sıra mevcut direklerin değiştirilmesi için ağaç, beton ya da demir direklerin sökülüp yenilerinin takılması işlemidir. Direk sökme ya da dikme işlemi için

de direğin yerleştirileceği çukuru kazma ve kapatma işleri oluşmaktadır. Yeni hatta iletken çekme ya da eski hattaki mevcut iletkenin demontajı sırasında yüksekte çalışma yapılmaktadır.

- Enerji nakil hattı işleri: Enerji santrallerinden şehir şebekesine enerjinin nakledilmesi için enerji nakil hattı direkleri olarak tabir edilen, geniş ve yüksek tipteki direklerin örülerek dikilmesi ve iletken çekilmesi işlemidir. Diğer işlerde olduğu gibi bu işte de çalışma sonrasında hattın enerjilendirilmesi yapılmaktadır.
- Trafo merkezi inşası ve demontajı: Yerleşim birimlerinde bulunan trafo binaları ve modüler, monoblok, beton köşkler olarak tanımlanan trafo yapılarının inşası, montajı ya da demontajı ve abone bağlantılarının yapılarak enerjilendirilmesi işidir. İçerisinde inşaat işleri barındırır.
- Saha dağıtım kutusu montaj-demontaj işleri: Saha dağıtım kutularının montajı ya da sökümü, abone bağlantılarının yapılması ve enerjilendirilmesi işidir.
- Direk üzerinde bakım onarım işleri: Direklerdeki aydınlatma armatürlerinin, potans ya da travers değişimleri, direklere korkuluk ya da uyarı levhalarının takılması vb. işlerdir.

### 1.2. Elektrik Yapım İşinde Risk Değerlendirmesine Konu Olan Faaliyetler

Hemen hemen her çok tehlikeli iş kategorisinde görülebilecek risklerden bağımsız olarak,

işletmenin faaliyetlerini yürütürken yapılan işe özgü olarak ortaya çıkan risklerin ana konuları ve alt dalları şunlardır:

#### **Direklerle Yapılan Çalışmalar**

Demir direklerle yapılan montaj-demontaj çalışmaları  
Ağaç direklerle yapılan montaj-demontaj çalışmaları  
Beton direklerle yapılan montaj-demontaj çalışmaları  
Örme direklerle yapılan montaj-demontaj çalışmaları  
Aydınlatma direğiyle yapılan montaj-demontaj çalışmaları

#### **Enerji Kesintili Ortamda Yapılan Çalışmalar**

Enerji kesme-verme süreci  
İletken montaj demontaj çalışmaları  
Saha dağıtım kutusu, pano montaj-demontaj çalışmaları  
Trafo, hücre, monoblok montaj-demontaj çalışmaları

#### **Enerjili Ortamda Yapılan Çalışmalar**

Bina yıkım çalışması  
İskele üzerinde yapılan bina onarım işleri

#### **İş Makineleri ve Ekipmanlarıyla Yapılan Çalışmalar**

Forkliftle yapılan çalışmalar  
Kazıcı yükleyiciyle yapılan çalışmalar  
Mobil vinçle yapılan çalışmalar  
Asfalt kesme makinesiyle yapılan çalışmalar  
Ekskavatörle yapılan çalışmalar  
Transmikserle yapılan çalışmalar  
Beton pompa makinesiyle yapılan çalışmalar  
Yatay sondaj makinesiyle yapılan çalışmalar  
Personel yükselticiyle yapılan çalışmalar  
Elektrikli el taşıma makinesiyle yapılan çalışmalar.

### **1.3. Literatür Taraması**

Çalışmanın içeriğini oluşturan bulanık Fine-Kinney yöntemi kullanılarak risk değerlendirme yapılan yakın zaman çalışmalar ve sonuçları aşağıda sıralanmıştır. Bununla birlikte bulanık mantık ve Fine-Kinney yöntemleri de ayrı ayrı incelenmiş ve literatür taramasına dahil edilmiştir.

Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı [2], Türkiye’de çalışma hayatını düzenleyen bir kurum

olarak faaliyet gösteren Bakanlık, 2012 yılında Avrupa Birliği ülkelerinde OHSAS 18001 olarak kullanılan standardın temelinde, İş Sağlığı Ve Güvenliği Kanunu oluşturularak yürürlüğe sokulmuştur.

Kinney, G. F., & Wiruth [3], günümüzde Fine-Kinney risk değerlendirme metodu olarak bilinen yöntemi literatüre kazandırmışlardır. Kinney ve Wiruth’ün geliştirdiği bu yöntem günümüzde pek çok sektörde uygulanmaktadır.

Oturakçı ve arkadaşları [4], inşaat sektöründe hizmet veren orta ölçekli bir firmanın yapımını üstlendiği bir yapı merkezi inşaatında belirlenen tehlikelere bulanık Fine-Kinney yöntemi ile risk değerlendirmesi yaparak, klasik yöntemle göre sonuçların daha hassas olduğunu tespit etmiştir.

Delibalta ve arkadaşları [5], bir çimento fabrikasında Fine-Kinney yöntemi kullanarak tespit edilen risklerin kabul edilebilir seviyelere indirgenebilmesi için çözüm önerileri sunmuştur.

Erdebilli ve arkadaşları [6], bir hidroelektrik barajında klasik ve bulanık Fine-Kinney yaklaşımları ile risk değerlendirmesi yapmış, çıkan sonuçların karşılaştırılması ile bulanık Fine-Kinney metodunun daha hassas sonuçlar ürettiğini ortaya koymuş ve terör saldırısı, deprem ve heyelanın çalışma yapılan baraj için en önemli risklerin olduğunu belirlemiştir.

Çakmak [7], Fine-Kinney, 5x5, Hata türü etkileri analizi ve 3T risk değerlendirme yöntemleri ile elde edilen risk skorlarını bulanık mantık çerçevesinde incelemiş ve tüm riskler için bir risk hiyerarşisi elde etmiştir.

Zoroğlu [8], incelenen kişilerin, vücut kitle indeksi, kandaki oksijen çözünürlük indeksi ve boyun çevresi gibi bazı sağlık verilerini bir bulanık sistemde girdi olarak kullanarak, uyku apnesi hastalığına yakalanma olasılığını araştırmış ve hafif, orta ve ağır ölçülerde tahmin çıktılarını elde etmiştir.

Ak [9], büyük ölçekli bir hastanede sinirsel bulanık mantık yaklaşımı ile risk değerlendirmesi

yaparak, kuruluştaki en önemli risk grubunun fiziksel risk grubunun olduğunu, elektrik, yangın ve diğer acil durum etmenlerinden kaynaklandığı tespit etmiştir.

Gül ve arkadaşları [10], raylı sistemler için bulanık Fine-Kinney tabanlı bir risk değerlendirmesi yapmış, riskleri derecelendirerek önlemler sunmuştur.

Çınar ve arkadaşları [11], limandaki gemi manevraları sırasında oluşan riskleri bulanık Fine-Kinney yaklaşımı ile incelemiş, kullanılan risk değerlendirme metodlarına göre bulanık Fine-Kinney yaklaşımının daha tutarlı sonuçlar ürettiğini ortaya koymuştur.

Durmaz [12], inşaat sektöründe hata modu ve etkileri analizi risk değerlendirme yöntemi ile kıyaslandığında, bulanık mantık yaklaşımının daha doğru ve güvenilir sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

Arıkan [13], kamu yönetiminde stratejik yönetim teknikleri üzerine, standardize edilememiş geleneksel risk değerlendirme yöntemleri yerine bulanık yöntemlerin sonuçlarını ortaya sunarak,

verilerin daha tutarlı olması sebebiyle karar vericilere risk değerlendirme yaklaşımlarının modernize edilmesini önermiştir.

Ertaş [14], yıkım faaliyetleri yapan firmalara, saha araştırmaları ve uzman görüşlerinden faydalanılarak bulanık tabanlı bir risk tahmin modeli ve bu riskleri azaltma ya da ortadan kaldırma yöntemi sunmuştur.

## 2. YÖNTEM

### 2.1. Materyal

Bu çalışmada, elektrik yapım işi sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın, faaliyetleri esas alınarak Fine-Kinney metodu ile hazırlanan risk değerlendirmesinde bulunan tehlike maddeleri; Elektrik, Yetkinlik, Çalışma Ortamı, Makine, Kişisel Güvenlik, Ekipman/Malzeme, Sağlık, Organizasyon, Yangın ve Kimyasal Maddeler olmak üzere 10 kategoriye ayrılmış ve bu kategoriye giren tehlikeler hem kendi içlerinde hem de bütün halinde değerlendirilmiştir. Toplam 915 tehlikenin sıralandığı tehlike tablosunun bir kısmı Çizelge 1’de sunulmuştur.

Çizelge1. Firmanın Fine-Kinney risk değerlendirme raporundan bir görüntü

Tehlike Kodu	Ana Kriter	Alt Kriter	Tehlikenin Tanımı	Olasılık	Siddet	Frekans	Sonuç	Riskin Derecesi	Risk Öncelik Değ.
T001	Kimyasal Etmenler	Yangın	İş makinası üzerinde bulunan akünün hasar alması sonucu yangın	1	40	1	40	Olası Risk	5
T002	Teknik Şartlar	Elektrik	Enerjili hatta yakın çalışmada topraklama yapılmaması	3	100	3	900	Çok Yüksek Risk	5
T003	Teknik Şartlar	Elektrik	Yeterli topraklama yapmadan çalışma	3	100	3	900	Çok Yüksek Risk	5
T004	Teknik Şartlar	Elektrik	Aydınlatma sokak fazının kesinti yapılan nokta dışından beslenmesi	3	100	3	900	Çok Yüksek Risk	5
T005	Planlama	Çalışma Ortamı	Çalışılan bölge değiştiğinde topraklamaların yerlerinin değiştirilmemesi	3	100	3	900	Çok Yüksek Risk	5
T006	Planlama	Kişisel Güvenlik	Ağaç direktte birden fazla kişinin çalışması	3	100	3	900	Çok Yüksek Risk	5
T007	Teknik Şartlar	Ekipman/ Malzeme	AG/YG topraklama aparatının kusurlu olması, eksik olması ya da elinde hiç bulunmaması	3	100	3	900	Çok Yüksek Risk	5



## 2.2. Metot

Fine-Kinney metodu ile hazırlanan risk değerlendirmesinden elde edilen risk skorları, kategoriler bazında aritmetik ortalamalar alınarak, o kategoriye ait ortalama risk puanı bulunmuştur. Ortalama risk puanı yüksek olan kategori, daha yüksek önemde tehlikeleri barındırıyor olacağından, ele alınması öncelikli kategori olarak değerlendirilip sıralama yapılmıştır. Ardından benzer süreç bulanık Fine-Kinney metodu ile de yapılarak, klasik Fine-Kinney sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve karar vericilere, risk değerlendirme tablosunda bulunan 915 tehlike maddesinin, hangisine öncelik verilerek aksiyon planı hazırlanması konusunda fayda sağlamaya çalışılmıştır.

### 2.2.1. Fine-Kinney Risk Değerlendirmesi

İşletmelerde iş sağlığı ve güvenliği faaliyetlerinin sürdürülmesi için ilgili çalışanların katılımıyla hazırlanan ve bir tür inceleme ve analiz ederek çözüm üretme işlemi olan risk değerlendirmesi, temel olarak mevcut ya da gerçekleşmesi mümkün tehlikeleri ve yaşanırsa ortaya çıkması muhtemel riskleri belirtirken, bu risklerin hangi uygulama ya da uygulamalarla bertaraf edileceğini veya kabul edilebilir seviyeye indirileceğini ortaya koymayı amaçlamaktadır [2].

Fine-Kinney metodu, ilk olarak Fine tarafından 1971 yılında deterministik ve kantitatif bir yöntem olarak literatüre sunulmuş, ardından Kinney tarafından 1976 yılında geliştirilmiş ve oldukça eski bir kantitatif yöntem olmasına karşın halen yaygın şekilde pek çok sektörde kullanılmaktadır [3].

Fine-Kinney yönteminde, tehlikeli bir işin risk değeri hesaplanırken, tehlikenin olma potansiyeli ve olumsuz neticelenme olasılığına ilaveten, işin ne sıklıkta tekrarlanıyor olması da dikkate alınmaktadır. Fine-Kinney yöntemini matris yönteminden ayıran ana özellik, frekansın yani tehlikenin yaşanma sıklığı değerinin de hesaba katılmasıdır [4]. Örneğin, yüksekte çalışan bir personelin düşme potansiyeli (Olasılık), düşerse hayatını kaybetme ihtimali (Şiddet) ve çalışanın gün içinde ne sıklıkta (Frekans) yükseğe çıkıp çalıştığına dair verilerin bileşkesi ve bu bileşkenin skor değerlendirme tablosundaki yeri o tehlikeye ait risk seviyesini verecektir.

Fine-Kinney yönteminde risk derecesi aşağıdaki yolla elde edilir [5]:

$$\text{Risk Skoru} = \text{Olasılık} \times \text{Sıklık} \times \text{Şiddet}$$

Yöntem aracılığıyla risk değerlendirme skorunun elde edilmesi için kullanılan değerler tablosu, Çizelge 2’de, skor aksiyon planı tablosu ise Çizelge 3’te gösterilmiştir [3].

Çizelge 2. Fine-Kinney metoduna göre risk değerlendirmesi değerler tablosu

OLASILIK DEĞERİ	OLASILIK	FREKANS DEĞERİ	FREKANS	ŞİDDET DEĞERİ	ŞİDDET
10	Beklenir, Kesin	10	Hemen Hemen Sürekli Günde 8 Kez den Fazla	100	Birden Fazla Ölümlü Kaza Çevresel Felaket
6	Yüksek, Oldukça mümkün	6	Sık Günde En Çok 8 Kez	40	Ölümlü Kaza, Uzun Kaybı Ciddi Çevresel Zarar
3	Olası	3	Ara Sıra Haftada En Çok 6 Kez	15	Kalıcı Hasar / Yaralanma, İş Kaybı Çevresel Engel Oluşturma, Şikayet
1	Mümkün Fakat Düşük	2	Sık Değil Ayda En Çok 5 Kez	7	Önemli Hasar / Yaralanma, Dış İlk Yardım
0,5	Beklenmez Fakat Mümkün	1	Seyrek Yılda En Çok 12 Kez	3	Küçük Hasar / Yaralanma, İç İlk Yardım
0,2	Pratikte İmkansız	0,5	Çok Seyrek Yılda En Çok Bir Kez	1	Ucuz Atlatma Çevresel Zarar Yok
0,1	Neredeyse İmkansız		<b>RİSK SKORU=OLASILIK x FREKANS x ŞİDDET</b>		

**Çizelge 3.** Fine-Kinney metoduna göre risk değerlendirmesi skor tablosu

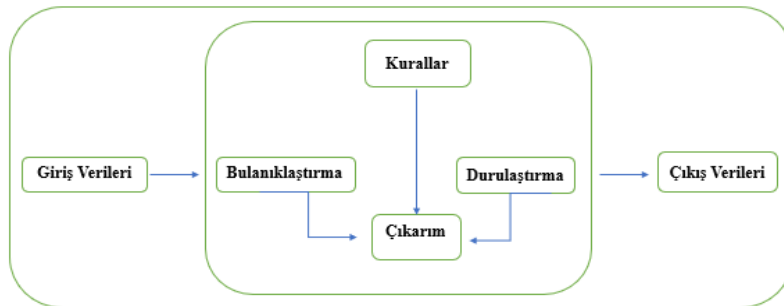
RİSK DEĞERİ	RİSK ADI	EYLEM	TERMİN SÜRESİ
$400 < R$	ÇOK YÜKSEK RİSK	Hemen gerekli önlemler alınmalı veya tesis, bina, çevrenin kapatılması düşünülmelidir.	1 Hafta içinde
$200 < R \leq 400$	YÜKSEK RİSK	Kısa dönemde iyileştirilmelidir	Birkaç hafta içerisinde
$70 < R \leq 200$	ÖNEMLİ RİSK	Düzeltilici Faaliyet Gerekmetedir.	Birkaç ay içerisinde
$20 < R \leq 70$	OLASI RİSK	Gözetim altında uygulanmalıdır	Yıl içerisinde
$R \leq 20$	KABUL EDİLEBİLİR RİSK	Önem öncelikli değildir	Yıl içerisinde

### 2.2.2. Bulanık Fine-Kinney Yaklaşımıyla Risk Değerlendirmesi

Firmanın bulanık risk değerlendirmesi yapılırken, işletme faaliyetlerinden ve diğer sebeplerden doğan tanımlanmış tüm tehlikeler ve klasik Fine-Kinney risk değerlendirmede yer alan veriler kullanılmıştır. Çalışmada Fine-Kinney metodunun belirlediği ve literatürde kabul görmüş olan; olasılık, şiddet ve sıklık değerleri baz alınarak bulanık değerler oluşturulmuş ve bu değerler bulanık mantık süreci çerçevesinde risk öncelik değeri hesaplanmıştır. Bu hesabın yapılmasında MATLAB R2022b programında Mamdani çıkarım sistemi kullanılmıştır [6].

### 2.2.2.1. Bulanık Fine-Kinney Risk Modeli Sürecinin Belirlenmesi

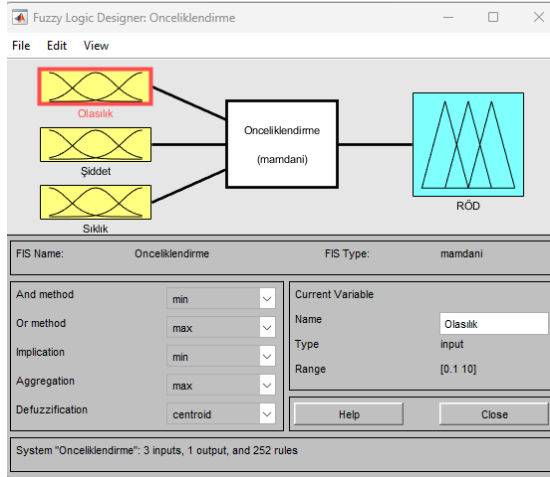
Firmanın faaliyetlerinden doğan tespit edilebilmiş 915 adet tehlikenin bulunduğu risk değerlendirme raporundan bulanık risk değerlendirme yapılabilmesi için Bulanık Risk Değerleme Modeli hazırlanmıştır [7]. Bu model sistemdeki giriş ve çıkış verileri, kuralların bulunduğu kural tabanı, bulanıklaştırma ve durulaştırma işlemleri tanımlanmıştır. Hazırlanan Bulanık Risk Modeli Sürecinin ana işleyiş şeması Şekil 1’de verilmiştir [8].



**Şekil 1.** Bulanık risk modeli süreci

Bulanık mantık süreci için önce olasılık, şiddet ve sıklıktan oluşan giriş verileri belirlenmiştir. Bu veriler MATLAB programında üçgen üyelik fonksiyonlarıyla bulanıklaştırılmış, modelin kural tabanına, firmanın risk değerlendirme ekibinde de yer alan, konunun uzmanları tarafından belirlenen 252 kural yazılarak, Mamdani çıkarım sisteminde

Centroid durulaştırma yöntemiyle durulaştırma yapılarak risk öncelikleri tespit edilmiştir [9]. Değerler ve ifadeler Fine-Kinney Risk Değerlendirme metodundaki ifadeler ve değerlerdir. MATLAB’da oluşturulan model yapısına ait programın ekran çıktısı Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. MATLAB giriş çıkış verileri ekran çıktısı

### 2.2.2.2. Bulanıklaştırma İşlemi

Her tehlikenin olasılık, şiddet ve sıklık değerleriyle üç sistem girişi belirlenmiştir. Bu giriş değerleri tehlikeye ilişkin belirlenen kesin sayılardır ve üçgen üyelik fonksiyonları ile bulanıklaştırılarak dilsel değişkenlere dönüştürülmüştür. Çizelge 3, Çizelge 4 ve Çizelge 5’de olasılık, şiddet ve sıklık bulanık giriş kümelerinin dilsel değişkenlere çevrilmiş halleri verilmiştir. Bulanık değerler kısmındaki değerleri Fine-Kinney metodundaki değerler baz alınarak belirlenmiştir. Örneğin şiddet değerlerinin belirtildiği tabloda bulunan değerlerden ilkyardım gerektiren yaralanma seviyesi için bulanık değer, (1,3,7) olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, Olasılık değerlerinin bulunduğu tablodaki örneğin mümkün fakat düşük için (1,3,6), Sıklık tablosundaki örneğin Yılda en çok 12 kez değeri için üyelik fonksiyonu (0.5,1,2) olarak tanımlanmıştır [10].

Çizelge 3. Bulanık risk değerlendirme olasılık tablosu

Olasılık	Dilsel Değişken	Ağırlığı (O)	Bulanık Değeri
Beklenir, kesin	Çok yüksek	10	(6,10,10)
Yüksek, Oldukça mümkün	Yüksek	6	(3,6,10)
Olası	Orta	3	(1,3,6)
Mümkün fakat düşük	Düşük	1	(0.5,1,3)
Beklenmez fakat mümkün	Çok düşük	0,5	(0,2,0.5,1)
Pratikte İmkânsız	Beklenmez	0,2	(0,1,0,2,0.5)
Neredeyse İmkânsız	İmkânsıza Yakın	0,1	(0,0,1,0,2)

Çizelge 4. Bulanık risk değerlendirme şiddet tablosu

Şiddet	Dilsel Değişken	Ağırlığı (S)	Bulanık Değeri
Birden fazla ölüm, çevre felaketi	Felaket	100	(40,100,100)
Ölüm tehlikesi, sürekli iş göremezlik	Çok şiddetli	40	(15,40,100)
Majör yaralanma, uzuv kaybı, kalıcı sakatlık	Şiddetli	15	(7,15,40)
Tedavi gerektiren ancak iyileşilen kaza	Orta	7	(3,7,15)
İlkyardım gerektiren yaralanma	Küçük	3	(1,3,7)
Yaralanmasız olay	Önemsiz	1	(0,1,3)

Çizelge 5. Bulanık risk değerlendirme şiddet tablosu

Sıklık	Dilsel Değişken	Ağırlığı (S)	Bulanık Değeri
Günde 8’den fazla	Sürekli	10	(6,10,10)
Günde 8 veya daha az	Sık	6	(3,6,10)
Haftada en çok 6 kez	Ara sıra	3	(2,3,6)
Ayda en çok 5 kez	Sık değil	2	(1,2,3)
Yılda en çok 12 kez	Seyrek	1	(0.5,1,2)
Yılda en çok 1 kez	Çok seyrek	0,5	(0,0.5,1)

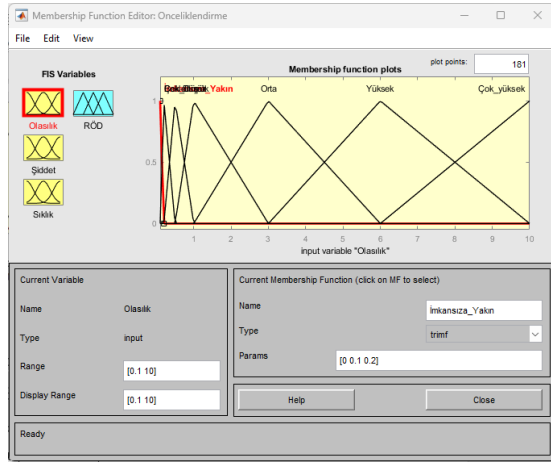
Giriş verilerini takiben sistemin çıktısını oluşturacak olan “Risk Öncelik Değeri-RÖD” belirlenmiştir. Risk öncelik değeri için bulanık ölçek Çizelge 6’da belirtilmiştir [11]. Çizelgede bulunan risk skoruna ait farklı seviyelerdeki üçgen üyelik fonksiyonun değerleri, Fine-Kinney yöntemindeki risk skorlarına ait seviyelerdeki değerlerin aritmetik ortalamaları kabul edilmiştir [11]. Örneğin tablodaki “Olası Risk” seviyesine ait üyelik fonksiyonu (10,45,135) değerlerinden 45 değeri, 20 ile 70’in toplamının yarısından, 135 değeri de bir üst seviyedeki 70,200 aralığı için belirtilen sayıların toplamının yarısından gelmektedir. Benzer şekilde “Yüksek Risk” için üyelik fonksiyonu (135,300,600) olarak belirlenmiştir. Bu belirlemeler, risk değerlendirme raporunda bulunan en düşük ve en yüksek değerler baz alınarak yapılmıştır. Firmanın risk değerlendirme raporunda en yüksek değer 900’dür. Bu sebeple değişken aralık değerlerinin 0-900 arasında tutulmasıyla beraber, üyelik fonksiyonlarının değerlerinin aralığı da 0-900 olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 6.** Risk öncelik değeri için bulanık ölçek

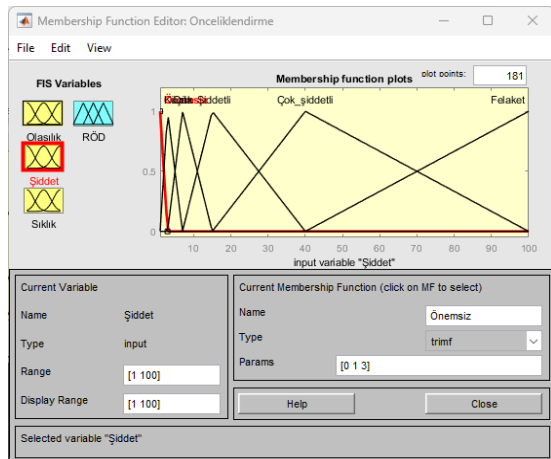
RÖD Dilsel Değişken	Risk Değeri	Bulanık Fine-Kinney Üçgen Üyelik Fonksiyonu	Ağırlığı (RÖD)
Çok Yüksek Risk	$R > 400$	(300,600,900)	5
Yüksek Risk	$200 < R \leq 400$	(135,300,600)	4
Önemli Risk	$70 < R \leq 200$	(45,135,300)	3
Olası Risk	$20 < R \leq 70$	(10,45,135)	2
Kabul Edilebilir Risk	$R \leq 20$	(0,10,45)	1

### 2.2.2.3. Üyelik Fonksiyonlarının Oluşturulması

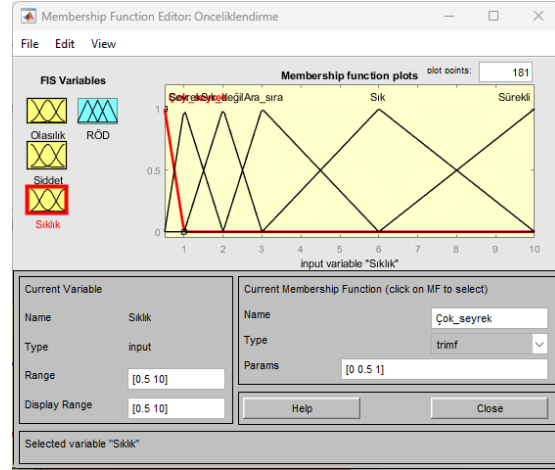
MATLAB programına üyelik fonksiyonu yazım ekranı aracılığıyla girilen modelin, olasılık, şiddet ve sıklık verileriyle üyelik fonksiyonları oluşturulmuştur [5]. Üyelik fonksiyonlarının program çıktıları Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir.



**Şekil 3.** Olasılık üyelik fonksiyonu ekran çıktısı

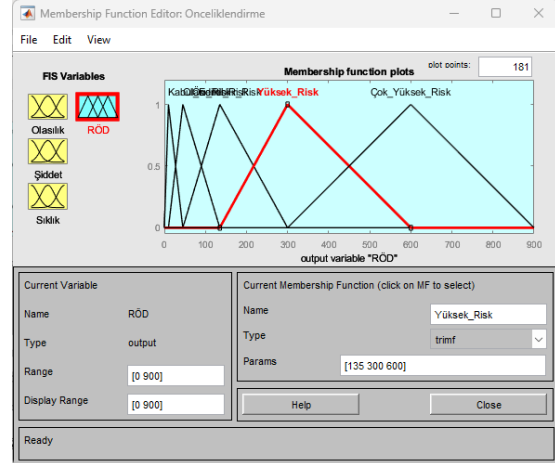


**Şekil 4.** Şiddet üyelik fonksiyonu ekran çıktısı



**Şekil 5.** Sıklık üyelik fonksiyonu ekran çıktısı

Sonraki aşamada modelin çıktısı olan Risk Öncelik Değeri üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur [12]. RÖD'ün çıkış kümesi [0,900] aralığında 5 adet üçgen alt küme ile belirtilmiştir. RÖD'ün üyelik fonksiyonuna ait program çıktısı Şekil 6'da verilmiştir.



**Şekil 6.** Risk öncelik değeri ekran çıktısı

### 2.2.2.4. Kural Tabanının Oluşturulması

MATLAB'ın kural penceresi olan Rule Editör'de sistem için 252 kural tanımlanmıştır [13]. Bu kurallar, risk analizinin yapımında da görev alan uzman kişiler tarafından oluşturulmuştur. Kuralların

Çizelge 7. Tanımlanan kurallar tablosu

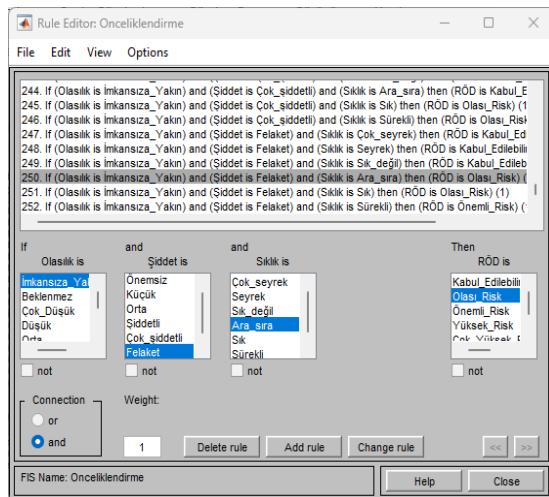
	SİDDET	SIKLIK						
		Çok Seyrek	Seyrek	Sık Değil	Ara sıra	Sık	Sürekli	
OLASILIK	İmkansız/Yakın	Önemsiz	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk
		Küçük	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk
		Orta	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk
		Siddetli	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk
		Çok Siddetli	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	Olası Risk
		Felaket	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	Olası Risk	Önemli Risk
	Beklenmez	Önemsiz	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk
		Küçük	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk
		Orta	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk
		Siddetli	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk
		Çok Siddetli	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	Olası Risk	Önemli Risk
		Felaket	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	Olası Risk	Önemli Risk	Önemli Risk
	Çok düşük	Önemsiz	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk
		Küçük	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk
		Orta	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	Olası Risk	Olası Risk
		Siddetli	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	Olası Risk
		Çok Siddetli	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	Olası Risk	Önemli Risk	Önemli Risk
		Felaket	Olası Risk	Olası Risk	Önemli Risk	Önemli Risk	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Düşük	Önemsiz	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	
	Küçük	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	
	Orta	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	Olası Risk	Olası Risk	
	Siddetli	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	Olası Risk	Önemli Risk	Önemli Risk	
	Çok Siddetli	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	Önemli Risk	Önemli Risk	Yüksek Risk	Yüksek Risk	
	Felaket	Olası Risk	Önemli Risk	Önemli Risk	Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	
Orta	Önemsiz	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	
	Küçük	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	Olası Risk	Önemli Risk	
	Orta	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	Olası Risk	Olası Risk	Önemli Risk	Yüksek Risk	
	Siddetli	Olası Risk	Olası Risk	Önemli Risk	Önemli Risk	Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	
	Çok Siddetli	Olası Risk	Önemli Risk	Yüksek Risk	Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	
	Felaket	Önemli Risk	Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	
Yüksek	Önemsiz	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	
	Küçük	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	Olası Risk	Önemli Risk	Önemli Risk	
	Orta	Olası Risk	Önemli Risk	Önemli Risk	Önemli Risk	Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	
	Siddetli	Olası Risk	Önemli Risk	Önemli Risk	Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	
	Çok Siddetli	Önemli Risk	Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	
	Felaket	Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	
Çok yüksek	Önemsiz	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Kabul Edilebilir Risk	Önemli Risk	
	Küçük	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	Olası Risk	Önemli Risk	Önemli Risk	Yüksek Risk	
	Orta	Olası Risk	Olası Risk	Önemli Risk	Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	
	Siddetli	Önemli Risk	Önemli Risk	Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	
	Çok Siddetli	Önemli Risk	Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	
	Felaket	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	

yazımında IF-THEN koşulu arasında AND bağlacı kullanılması dikkate alınmıştır. Tanımlanan kurallar Çizelge 7’de, kural tabanının program çıktısı ise Şekil 7’de verilmiştir.

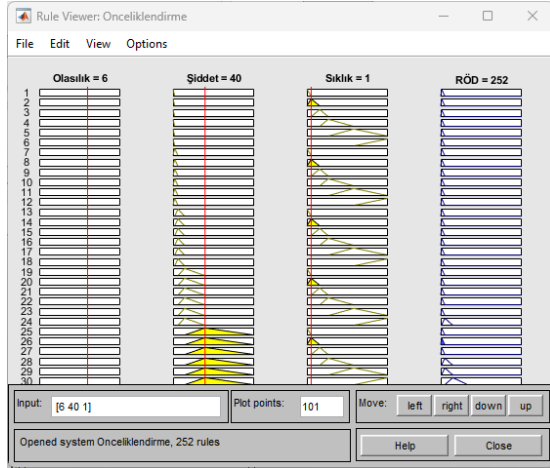
### 2.2.2.5. Bulanık Çıkarım ve Durulaştırma

MATLAB programında bulanık çıkarım ve durulaştırma işleminde Mamdani yöntemi seçilmiştir. Durulaştırma aşamasında kullanılacak yöntem, bulanık çıkarım ekranında (FIS Editör) bulunan Durulaştırma açılır menüsü yardımıyla “centroid” olarak seçilmiştir. Bulanık kural tabanındaki kuralların işlenmesi için “and” metodunda “min”, “veya” metodunda ise “max” yöntemi seçilmiştir [14].

Kural gösterim penceresinde, girdi değişkenleri için farklı değerler belirtildiğinde oluşturulan bulanık sistem çıktı değeri yine aynı ekranda gözlemlenmektedir. Farklı değer alternatifleri input kısmından değiştirilerek, farklı RÖD değerlerine ulaşmak mümkün olabilmektedir. Modelin Bulanık Çıkarım Editörü Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Bulanık risk değerlendirme oluşturulan kural tabanı



Şekil 8. Bulanık çıkarım ekranı

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

#### 3.1. Klasik Fine-Kinney ve Bulanık Fine-Kinney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Fine-Kinney risk değerlendirme raporundan elde edilen kategorilerin risk seviye değerleri, tablodaki bulunma sayıları ve aldıkları risk skorlarının ortalamaları ve buna bağlı oluşan önem sıraları, klasik Fine-Kinney metodu için Çizelge 8’de verilmiştir.

MATLAB programının Kural Gösterim Penceresi (Rule Viewer) aracılığıyla elde edilen bulanık Fine-Kinney sonuçlarından derlenen risk seviye değerleri, alınan skorların ortalamaları ve bu ortalamalara göre ortaya çıkan önem sıralamaları ise Çizelge 9’da verilmiştir.

**Çizelge 8.** Klasik Fine-Kinney risk değerlendirmesinden elde edilen önem sıralaması

Klasik Fine-Kinney								
Tehlike Türü	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	Önemli Risk	Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Toplam	Ortalama Risk Puanı	Önem Sırası
Elektrik	0	0	12	3	20	35	442,3	1
Yetkinlik	0	13	20	54	3	90	207,3	2
Çalışma Ortamı	2	34	113	81	18	248	198,6	3
Makine	0	8	28	27	6	69	194,1	4
Kişisel Güvenlik	7	37	49	47	6	146	169,4	5
Ekipman/Malzeme	4	16	102	60	5	187	166,1	6
Organizasyon	2	12	28	22	1	65	148,0	7
Sağlık	3	20	2	14	0	39	131,5	8
Yangın	0	10	17	3	1	31	130,3	9
Kimyasal Maddeler	0	3	1	1	0	5	96,6	10
<b>TOPLAM</b>	<b>18</b>	<b>153</b>	<b>372</b>	<b>312</b>	<b>60</b>	<b>915</b>	<b>188,4</b>	

**Çizelge 9.** Bulanık Fine-Kinney risk değerlendirmesinden elde edilen önem sıralaması

Bulanık Fine-Kinney								
Tehlike Türü	Kabul Edilebilir Risk	Olası Risk	Önemli Risk	Yüksek Risk	Çok Yüksek Risk	Toplam	Ortalama Risk Puanı	Önem Sırası
Elektrik	0	0	0	3	32	35	405,4	1
Yangın	0	0	0	3	26	31	388,1	2
Makine	0	0	0	10	59	69	383,3	3
Organizasyon	0	0	2	12	51	65	367,2	4
Yetkinlik	0	0	6	11	73	90	366,4	5
Çalışma Ortamı	0	0	8	60	180	248	360,5	6
Ekipman/Malzeme	1	0	3	51	132	187	356,4	7
Sağlık	0	0	2	15	22	39	332,1	8
Kişisel Güvenlik	0	3	14	46	83	146	322,8	9
Kimyasal Maddeler	0	3	0	1	1	5	163,4	10
<b>TOPLAM</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>35</b>	<b>212</b>	<b>661</b>	<b>915</b>	<b>411,8</b>	

Çizelge 8 ve Çizelge 9’a bakıldığında klasik Fine-Kinney yaklaşımında kategorilere ait 18 adet kabul edilebilir risk mevcuttur, bulanık Fine-Kinney yaklaşımında kabul edilebilir risk değeri yalnızca 1 adettir. Benzer şekilde klasik Fine-Kinney metoduna göre olası risk sayısı 153 iken bulanık Fine-Kinney metodunda sadece 6 adettir. Bununla beraber, klasik Fine-Kinney yaklaşımında 312 adet yüksek risk içeren tehlike bulunurken bulanık Fine-Kinney sonuçlarında 212 adet bulunmaktadır. Yine klasik yöntemde çok yüksek risk seviyesinde 60 adet tehlike bulunurken, bulanık yaklaşımda bu sayı 661 olarak görülmektedir. Klasik yaklaşımda 5 risk seviyesinde de tehlikelerin bulunmasına karşın, bulanık yaklaşımda 7 tehlike hariç bütün tehlikeler, olası risk, önemli risk ve yüksek risk başlıkları altında toplanmış durumdadır. Klasik Fine-Kinney yaklaşımında tehlikeler çoğunlukla olası risk, önemli risk ve yüksek risk alanlarında kümelenmişken, bulanık Fine-Kinney metodunda, yüksek risk ve çok yüksek risk alanlarında kümelenmiştir.

Klasik Fine-Kinney ve bulanık Fine-Kinney metodlarıyla yapılan çalışmada elde edilen sonuçlara bakıldığında, tehlikelerin önceliği açısından ilk sırada bir farklılık görülmemektedir. Her iki yöntem de elektrik kategorisi altındaki tehlikeleri, birinci öncelikte belirlemektedir. Benzer şekilde son öncelik değerleri, her iki yönetime göre de kimyasal maddeler kategorisidir. Yine sağlık kategorisinin iki yöntemde de öncelik sırası 8. sıradadır. İki yöntemin bulgularındaki farklılar diğer kategorilerde oldukça değişken olarak gözlemlenmektedir.



Bu çıktılardan farklı olarak yine sonuçlar kıyaslandığında, kategorilerdeki tehlike sayılarının artması toplam tehlikeler içindeki ağırlığını da arttırmakta ve o kategoriyi daha önem verilir bir konuma yükseltmektedir. Örneğin 50 tehlikenin 5 tanesi çok yüksek risk seviyesinde iken yani oran olarak yüzde 10 seviyesinde iken, sayının söz gelimi 25 olarak değişmesi, aynı oranı yüzde 50 seviyesine çıkartmış olur ki bu durum, karar vericiler için ilgili kategori üzerinde çalışılmasının gerekliliği konusunda daha dikkat çekici olacaktır.

Klasik Fine-Kinney ve bulanık Fine-Kinney yöntemlerinden elde edilen verilere göre ortaya çıkan önem sıralamaları sadeleştirilmiş biçimde Çizelge 10'da verilmiştir.

**Çizelge 10.** Klasik ve bulanık Fine-Kinney sonuçlarının ortalama risk puanına göre karşılaştırılması

Tehlike Türü	Ortalama Risk Puanına Göre	
	Klasik Fine Kinney	Bulanık Fine Kinney
Elektrik	1	1
Yetkinlik	2	5
Çalışma Ortamı	3	6
Makine	4	3
Kişisel Güvenlik	5	9
Ekipman/Malzeme	6	7
Organizasyon	7	4
Sağlık	8	8
Yangın	9	2
Kimyasal Maddeler	10	10

#### 4. SONUÇLAR

Yaşadığımız dönemde faaliyet gösteren firmalar açısından rekabet koşulları oldukça ağırdır. Firmaların içinde buldukları zaman, iş gücü ve sermaye gibi çeşitli kısıtlar, hatalı analizlere ve bunun sonucunda hatalı süreçlerin işletilmesine imkân tanımamaktadır. Bu sebeple firmaların faaliyetlerini sürdürmeleri için yapmaları gereken fizibilite çalışmaları kapsamında, iş sağlığı ve güvenliği alanında yapılan risk değerlendirmeleri güvenilir olmalı ve doğru sonuçları üretmelidir.

Aksi durumda yanlış konulara, hatalı değerler atfedilerek esas uğraşılması gereken sorunlara doğru önem ve öncelik tanınmasından uzaklaşılması durumu söz konusu olabilir. Bu durum da hem firmanın kaynaklarının hatalı tüketilmesine hem de can kaybı gibi telafisi mümkün olmayan sonuçların yaşanmasına sebep olabilir. Bu bakış açısı üzerine yaptığımız risklerin önceliklendirmesi konulu çalışmadaki bulgularının, sektördeki firmalar için önemli olduğunu düşünüyoruz.

Risk değerlendirme raporundaki mevcut 915 tehlikenin giderilmesi için nereden başlanması gerektiğine ve firmanın mevcuttaki, zaman, iş gücü, para vb. kaynaklarının, hangi kategorideki tehlikelerin giderilmesine öncelik vererek kullanılması gerektiğine karar verilmesi noktasında, ara değerleri belirleyememesi ve hassas sonuç üretmemesi sebebiyle klasik Fine-Kinney yöntemi yetersiz kalmaktadır. Klasik Fine-Kinney metodu ile bulanık Fine-Kinney metodunun çıktılarına bakıldığında sonuçların genellikle uyumlu bir şekilde bulanık metotta bir üst önem derecesine çıkmış olduğu görülmektedir. Mevcut tehlike kategorilerinin, ortalama risk puanı baz alınarak yapılan önceliklendirme işlemlerinin karşılaştırmaları göstermektedir ki, klasik Fine-Kinney yönteminde kabul edilebilir olarak sonuçlanan tehlikeler, bulanık Fine-Kinney yönteminde olası risk ya da daha üstü risk değerlerinde olarak görülmektedir. Benzer şekilde olası risk ve önemli risk olarak klasik Fine-Kinney yönteminde karşılaştığımız tehlikeler de bulanık Fine-Kinney yönteminde daha üst önem derecelerinde yer almaktadır.

Bu durumda klasik yöntemde kabul edilebilir risk ve olası risk olarak karşılaştığımız tehlikeler için addedilen tehlikeler için de eylem planları hazırlanması gerekecektir. Bu sonuç aslında risk değerlendirmesinin amacına hizmet eden bir sonuçtur çünkü risk değerlendirmesinin temel amacı, mevcut tehlikeleri ve olası etkilerini doğru belirleyip, bunun için çalışma stratejileri oluşturarak uygulanmasına katkı sağlamaktır. Bu anlamda bulanık tabanlı yöntem hemen her tehlike için klasik yöntemden daha yüksek bir risk değeri

üretmiştir ve literatürdeki benzer çalışmalarla paralel doğrultuda olarak daha tutarlı bir yol gösterici konumundadır. Bu sonuç, amaçlanan tehlikeler arasındaki ilişkileri gözeterek değerlendirme yapma ve etkileşimli bir risk değerlendirmesi yapılabilmesi açısından olumludur.

Yapılan bu çalışmanın, elektrik yapım işi sektöründe özgün bir çalışma olmasının yanı sıra başka sektörlerdeki firmalar için de uygulanmasının, gerçekte risklerin hangi öncelikte olduğunun tespiti ve buna uygun adımların atılması hususlarında faydalı olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu makale Umut Ergün'ün Tarsus Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Fakültesi'nde yazdığı, "Elektrik Yapım İşi Sektörü İçin Analitik Hiyerarşi Süreci, Analitik Ağ Süreci ve Bulanık Mantık Yaklaşımları ile Risk Değerlendirmesi: Bir Firma Örneği" başlıklı doktora tezinden üretilmiştir. Söz konusu firmanın desteklerine teşekkürlerimizi sunarım.

## 6. KAYNAKLAR

1. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İşyeri Tehlike Sınıfları Listesi, <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/yonetmelik/9.5.16909-Ek.xls>. Son erişim: 13.01.2023), (2012), Ankara.
2. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/06/20120630-1.htm>. (Son erişim: 13.01.2023), (2012), Ankara.
3. Kinney, G.F., Wiruth, A.D., 1976. Practical Risk Analysis for Safety Management (No. NWCTP-5865). Naval Weapons Center China Lake CA.
4. Oturakçı, M., Dağsuyu C., 2017. Risk Değerlendirmesinde Bulanık Fine-Kinney Yöntemi ve Uygulaması. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, (1-1), 17-25 Ara. 2017.
5. Delibalta, S.M., Türkmen, T.O., 2022. Kayseri Çimento Fabrikasında Kaza Risk Faktörlerinin Fine-Kinney Metodu ile Analizi, *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 6(3), 131-139.
6. Erdebilli, B., Gür, L., 2020. Bulanık Fine-Kinney Yöntemiyle Risk Değerlendirmesi Uygulaması. *Journal of Industrial Engineering*, 31(1), 75-86.
7. Çakmak, E., 2015. İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirme Yöntemlerinin Bulanık Mantık Yaklaşımı ile Analizi: Kobi Uygulama Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 164.
8. Zoroğlu, C., 2015. Bulanık Uzman Sistem Kullanarak Tıkayıcı Uyku Apnesi Sendromunun Ciddiyet Seviyesinin Tahmini. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 65.
9. Ak, M.F., 2017. İş Sağlığı ve Güvenliğinde Sinirsel Bulanık Mantık Yaklaşımı Kullanılarak Risk Değerlendirmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 129.
10. Gül, M., Çelik, E., 2018. Fuzzy Rule-Based Fine-Kinney Risk Assessment Approach for Rail Transportation Systems. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24, 1786-1812.
11. Çınar, F., Solmaz, M.S., Çakmak, E., 2021. Evaluation of Ship Manoeuvres in Port by Using Fuzzy Fine Kinney Method. *International Journal of Environment and Geoinformatics (IJEGEO)*, 8(4), 537-548, doi.10.30897/ijegeo.938973.
12. Durmaz, R.C., 2010. İnşaat Sektöründe Bulanık Risk Değerlendirmesi Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 131.
13. Arkan, R., 2014. Stratejik Yönetim için Bulanık Risk Değerlendirme Modelleri ve Karşılaştırmalı Analizi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 139.
14. Ertaş, H.M., 2016. Yıkım İşlerinde Risk Analizi ve Risk Değerlendirmesi için Yeni Bir Yöntem Önerisi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 344.



## 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 yayınlansın veya yayınlansın iade edilmez. Makaleleri yayınlama yetkisi dergi yayın kuruluna aittir.

Makalenin tamamı bilgisayar ortamında hazırlanmalı baskıya hazır biçimde iki adet (birisinde yazar adları ve adresleri olmamak üzere) **Dergi web sayfasında verilen örnek şablona uygun hazırlanmış olarak elektronik ortamda veya e-posta ekinde gönderilmelidir.**

Makale, A4 (210x297 mm) boyutlu kağıda, Windows uyumlu Word ortamında, Times New Roman font kullanılarak, birer aralıkla yazılmalı, ana başlıklar 12 Punto (koyu), yazar adları 12 Punto (koyu), alt başlıklar ve metin 10 punto olmalıdır.

Çizimler ve çizelgelerle birlikte, makaleler 15 sayfadan, kısa bildirimler 4 sayfadan daha uzun olmamalıdır. Makale Türkçe ise: Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Öz, Anahtar Kelimeler, Abstract (İngilizce öz), **Keywords, Metin, Semboller** (gerekliyse), **Teşekkür** (gerekliyse) ve **Kaynaklar**,

Makale İngilizce ise: İngilizce Başlık, Türkçe Başlık, Abstract, Keywords, Öz (Türkçe öz), **Anahtar Kelimeler, Text, Notations** (gerekliyse), **Acknowledgments** (gerekliyse) ve **References** sırası içinde düzenlenmelidir.

**Başlık** kısa ve açık olmalı, içeriği yansıtılabilmelidir. **Öz** (ve **Abstract**) çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 150 kelimeyi aşmamalıdır. En az üç, en fazla beş tane anahtar kelime verilmelidir. Başlık, Öz ve İngilizce başlıklı Abstract birinci sayfaya sığdırılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır. **Metin** yalnız bir dil ve anlatımla yazılmalı, makale Türkçe ise Türkçe, makale İngilizce ise İngilizce yazım kurallarına uygun olmalıdır.

Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralanmalıdır. Denklemler numaralanmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir. Yazılarda yalnızca SI birimleri kullanılmalıdır. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalıdır. Teşekkür olabildiğince kısa olmalı, çalışmaya katkısı ve desteği bulunan kişi ve kuruluşlar belirtilmelidir. Çizelgeler, çizimler ve fotoğraflar metin içine yerleştirilmeli, her birine numara ve başlık verilmeli ve başlıklar çizim ve fotoğrafların altına, çizelgelerin üstüne yazılmalıdır.

Kaynaklar metinde köşeli parantez içinde numaralanmalı ve kaynaklar listesinde metin içinde veriliş sırasına uygun biçimde belirtilmelidir. Etik kuralları gereğince, alıntılar tırnak içinde verilmeli ve bir referans numarası ile kaynak belirtilmelidir. Kaynaklarda şu bilgiler verilmelidir:

**Makale ise:** Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. makalenin tam başlığı. derginin adı, cilt, sayı, başlama ve bitiş sayfaları.

**Kitap ise:** Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. kitabın tam adı. cilt numarası, varsa editörü, yayımlandığı yer, son sayfa no.

**Bildiri ise:** Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. 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, yayımlandığı yer.

**Web Sitesi ise:** Yazar(lar) belli ise; yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, varsa yayımlandığı yıl. yazının başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.

**Kurum/Kuruluşlara ait ise:** Kurum adı, varsa yayımlandığı 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 yayımlandığı yıl, konunun tam adı, Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.