

GAZI  
JOURNAL OF  
ENGINEERING  
SCIENCES



---

#### EDİTÖR / EDITOR - IN – CHIEF

**İsmail ŞAHİN**

Gazi University, Ankara, Turkey  
e-mail: [editorgjes@gmail.com](mailto:editorgjes@gmail.com)

---

#### YARDIMCI EDİTÖRLER / ASSOCIATE EDITORS

**Harun GÖKÇE**

Gazi University  
e-mail: [harungokce@gazi.edu.tr](mailto:harungokce@gazi.edu.tr)

**Volkan YILMAZ**

Gazi University  
e-mail: [volkan@gazi.edu.tr](mailto:volkan@gazi.edu.tr)

---

#### ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

**Abdullah AKDOĞAN**

Pamukkale University

**Alper BÜYÜKKARAGÖZ**

Gazi University

**Amin MIRZAPOUR**

Zanjan İslami Azad University

**Ayhan AYTAÇ**

National Defense University

**Bülent ÖZKAN**

Gazi University

**Erdem CÜCE**

Recep Tayyip Erdoğan University

**Fecir DURAN**

Gazi University

**Fatih ŞAHİN**

Gazi University

**G. Serdar TOMBUL**

ASELSAN

**Halil KARAKOÇ**

Hacettepe University

**Hüseyin GÖKÇE**

Çankırı Karatekin University

**M. Hanefi CALP**

Karadeniz Technical University

**Mustafa BOZ**

Karabük University

**Mustafa GÜNAY**

Karabük University

**Serhat KARAP**

TUBİTAK-SAGE

**Tayfun MENLİK**

Gazi University

**Umit ATİLA**

Gazi University

---

#### YAYIN DANIŞMA KURULU / ADVISORY BOARD

**Adnan SÖZEN**

Gazi University, Turkey

**Andrew PINKERTON**

Lancaster University, England

**Bekir Sami YILBAŞ**

King Fahd University, Sudia Arabia

**Farzollah MIRZAPOUR**

University of Zanjan, Iran

**Herbert M. REYNOLDS**

Michigan State University, USA

**Jamal KHATIB**

University of Wolverhampton, England

**Majid MEGHDADI**

University of Zanjan, Iran

**Mustafa KURT**

Gazi University, Turkey

**Nowruz ALLAHVERDİ**

Karatay University, Turkey

**Reza Negarastani**

RIETEX, England

**Salman NISAR**

National University of Sci. and Tech., Pakistan

**Shahin JALILI**

TebriZ University, Iran

**John KINUTHIA**  
University of South Wales, England

**Jonathan C. BORG**  
University of Malta, Malta

**Hossam KISHAWY**  
University of Ontario Technology, Canada

**Kürşad SEZER**  
Gazi University, Turkey

**Şakir TAŞDEMİR**  
Selçuk University, Turkey

**Tahsin Tecelli ÖPÖZ**  
John Moores University, England

**Yasir JOYA**  
GIK Institute, Pakistan

#### **DİL EDİTORLERİ / LANGUAGE EDITORS**

**Türkçe/Turkish:** V. Savaş YELOK (Hacı Bayram Veli University)

**İngilizce/English:** H. Kürşad SEZER (Gazi University)

#### **TEKNİK EDİTÖR / TECHNICAL EDITOR**

**Neslihan TOP**  
Gazi University  
e-mail: [editorgjes@gmail.com](mailto:editorgjes@gmail.com)

#### **BU SAYININ HAKEMLERİ / REVIEWER OF THIS ISSUE**

Abdulkadir KARACI

Adem ÖZÇELİK

Ahmet MAVİ

Alaattin KAÇAL

Alaettin UÇAN

Alper Nabi AKPOLAT

Battal DOĞAN

Bilal GÜMÜŞ

Cemal ÇARBOĞA

Cengiz Eldem

Ceren KARAMAN

Çağlar CONKER

Çağrı Vakkas YILDIRIM

Dilek APAR

Ercan GEMİCİ

Fatih ŞAHİN

Halil KARAKOÇ

Hasan ÖZCAN

Hüseyin GÖKÇE

Kamil ŞİRİN

Kasım ÖZACAR

Kemal AKYOL

M. Hanefi CALP

Mehmet Ali SİLGU

Mehmet Fatih IŞIK

Murat UÇAR

Mustafa AKKAYA

Mustafa YENİAD

Nesrin AYDIN ATASOY

Nursel ALTAN ÖZBEK

Okan ERKAYMAZ

Okan ÖZDEMİR

Ramazan DONAT

Reza DANESHAZARIAN

Serdar BİROĞUL

Şükrü Gökhan ELÇİ

Tanju TEKER

Tayfun MENLİK

Yusuf SÖNMEZ

**Gazi Journal of Engineering Sciences has been published three issues per year**

#### **CORRESPONDENCE ADDRESS :**

Gazi Akademik Yayıncılık  
Gazi Üniversitesi Gölbaşı Yerleşkesi Teknoplaza Binası Bahçelievler mahallesi,  
320. Sok., No: 3/B GÖLBAŞI / ANKARA  
Tel: +90-312-9113311 Fax: +90-312-9113312  
e-mail: [editorgjes@gmail.com](mailto:editorgjes@gmail.com)

## İÇİNDEKİLER / CONTENTS

<i>GMAW Esaslı Eklemeli İmalat İle Üretilen Düşük Karbonlu Çeliğin Mekanik Özellikleri</i> <i>Mechanical Properties of Low Carbon Steel Produced by GMAW-based Additive Manufacturing</i>	
<b>Mustafa GÜNAY, İskender YEŞİLDAĞ</b> .....	175-182
<i>Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Çevriminde R134a Yerine R1234yf ve R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile R1234yf/CNTs Nanosoğutucu Akışkanların Kullanımının Termodinamiğin I. ve II. Kanunları Bakımından Teorik Olarak İncelenmesi</i> <i>Theoretical Analysis of Usage of R1234yf Refrigerant and R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and R1234yf/CNTs Nanorefrigerants instead of R134a in the Vapor Compression Refrigeration Cycle in terms of I. and II. Laws of Thermodynamics</i>	
<b>Kemal BİLEN, Kayhan DAĞIDIR, Erol ARCAKLIOĞLU</b> .....	183-195
<i>Parametre Kestirimi Newton-Raphson Yöntemiyle Yapılan MATLAB/GUI Tabanlı Fotovoltaik Sistem Simülatörü</i> <i>A MATLAB/GUI Based Photovoltaic System Simulator for Estimation of PV Parameter using Newton-Raphson Method</i>	
<b>İbrahim BULDU, Mustafa Ergin ŞAHİN</b> .....	196-212
<i>Elektrokimyasal Jet İşleme (EJI) Parametrelerinin İşlenen Kanal Geometrilerine Etkisi</i> <i>The Effect of Electrochemical Jet Machining (EJI) Parameters on Processed Channel Geometries</i>	
<b>Emre AYHAN, Mustafa YURDAKUL, Can ÇOĞUN</b> .....	213-221
<i>Covid-19 Salgın Sürecinde Hava Kalitesi Tahmini: Zonguldak Örneği</i> <i>Air Quality Forecast in the Covid-19 Outbreak Process: Zonguldak Case</i>	
<b>Büşra Duygu ÇELİK, Nursal ARICI</b> .....	222-232
<i>Üretim Parametrelerinin Termoplastik Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi</i> <i>An Investigate of the Effect of Manufacturing Parameters on the Mechanical Properties of Thermoplastic Composites</i>	
<b>Uğur Görkem ÇAKICI, Osman Selim TÜRKBAŞ, Bora YILDIRIM</b> .....	233-242
<i>İşin Olsun Platformu İlanlarında İçerik Kontrolü</i> <i>An Investigate of the Effect of Manufacturing Parameters on the Mechanical Properties of Thermoplastic Composites</i>	
<b>İşıl TUNCER, Şeref KESKİN, Mehmet APAYDIN</b> .....	243-252
<i>Güneş Bacası Güç Santrallerinde Kule Çapının Çıkış Gücüne Etkisi</i> <i>Impact of Tower Diameter on Power Output in Solar Chimney Power Plants</i>	
<b>Pinar Mert CUCE, Harun SEN, Erdem CUCE</b> .....	253-263

*Web Tabanlı Sürücü Davranışları Analiz Uygulaması*

*Web Based Driver Behaviors Analysis Application*

**Nesrin AYDIN ATASOY, Furkan ÇAKMAK**.....264-276

*Nokta Direnç Kaynağı ile Birleştirilen Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çeliğin Mekanik Özellikleri Üzerinde Elektrod Uç Tipinin Etkisinin İncelenmesi*

*Investigation of the Effect of the Electrode Tip Type on the Mechanical Properties of Advanced High Strength Steel Combined with Resistance Spot Welding*

**Bilge DEMİR, Muhammed ELİTAŞ, Hüseyin KARAKUŞ**.....277-285

*Yeni Betonarme Katmanla Güçlendirilen Bir Betonarme Yapının Nümerik Olarak İncelenmesi*

*Numerical Investigation of a Reinforced Concrete Structure Strengthened by New Reinforced Concrete Layer*

**Ömer MERCİMEK**.....286-297

*Elektrikli Araçlarda Batarya Şarj Ünitesi için LLC Rezonans Dönüştürücünün Kurulumu, Modellemesi ve Analizi*

*Installation, Modeling and Analysis of LLC Resonance Converter for Battery Charger in Electric Vehicles*

**Ünal YILMAZ, Ali KIRÇAY**.....298-308

*Yapay Zeka Destekli Kavramsal Tasarım: Tekerlekli Sandalye Tasarım Seçenekleri Değerlendirmede Bulanık Mantık Kullanımı*

*Artificial Intelligence Assisted Conceptual Design: Using Fuzzy Logic For the Evaluation of Design Variants of A Wheelchair*

**Nurullah YÜKSEL, Hüseyin R. BÖRKLÜ**.....309-319

*Myrtus communis (Mersin) ve Üzüm Çekirdeği Özütü Kullanılarak Gümüş Nanoparçacık Biyosentezi ve Karakterizasyonu*

*Biosynthesis and Characterization of Silver Nanoparticles Using Myrtus Communis (Myrtle) and Grape Seed Extract*

**Mustafa GÜNGÖRMÜŞ**.....320-329

*Reducing the Musculoskeletal Disorders-induced Production Employee Absenteeism Through the Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire and Ordinal Logistic Regression Model*

*Cornell Kas-İskelet Rahatsızlık Anketi Kullanarak Kas-İskelet Rahatsızlıkları Kaynaklı Üretim Çalışanı Devamsızlıklarının Azaltılması ve Sıralı Lojistik Regresyon Modeli*

**Duygu İNCİ, Mürüvvet Deniz SEZER, Bengü GÜNGÖR, Pırıl ERGÖNENÇ**.....330-345

*Buji Ateşlemeli Bir Motorda Yüksek Performans ve Düşük Emisyon Elde Etmek Amacıyla Kullanılacak Optimum Metanol Oranının Cevap Yüzey Metodu ile Belirlenmesi*

*Determination of Optimum Methanol Ratio to be Used with the Aim of Obtaining High Performance and Low Emissions in a Spark Ignition Engine by Response Surface Methodology*

**Hayri YAMAN, Murat Kadir YEŞİLYURT, Samet USLU**.....346-358

# GMAW Esaslı Eklemeli İmalat İle Üretilen Düşük Karbonlu Çeliğin Mekanik Özellikleri

Mustafa GÜNAY<sup>\*a</sup>, İskender YEŞİLDAĞ<sup>b</sup>

<sup>a\*</sup> Karabük Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük, Türkiye

<sup>b</sup> Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 78050, Karabük, Türkiye

## MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 08.09.2021  
Kabul: 02.11.2021

### Anahtar Kelimeler:

Eklemeli imalat  
Düşük karbonlu çelik  
WAAM  
Mekanik özellikler  
Deformasyon hızı

## ÖZ

Tel ark eklemeli imalat, özellikle büyük ebatlı metal parçaların ekonomik üretimi ve nispeten yüksek biriktirme oranları gerektiren bir dizi uygulamalar için yüksek esneklik ve verimliliğe sahiptir. Bu çalışmada, düşük karbonlu çelik telden gaz metal ark kaynağı (GMAW) tabanlı eklemeli imalat uygulanarak üretilen parça mekanik özelliklerinin (çekme dayanımı ve mikrosertlik) deformasyon hızına göre değişimi araştırılmıştır. Bu bağlamda, eklemeli imalat parçadan dikiş yönüne dik ve paralel olarak hazırlanan numunelere 1 ve 4 mm/sn hızlarında çekme deneyleri uygulanmıştır. Kaynak dikiş yönüne dik numunelerde, süneklikteki anizotropik davranış yüzünden deformasyon hızının artmasıyla çekme dayanımında artış görülürken yüzde uzama miktarlarında azalma belirlenmiştir. Çekme hızının dört kat artmasıyla dikiş yönüne paralel numunede çekme dayanımı ortalama 545 MPa, dik numunede ise 524 MPa olarak elde edilmiştir. Dikiş yönüne paralel numunede orijinal numuneye göre çekme deformasyonundan kaynaklanan mikrosertlikte artış olmuştur. Deformasyon oranlarına göre bu artış 1 mm/sn ve 4 mm/sn için sırasıyla ortalama %56 ve %64 olarak hesaplanmıştır. Dikiş yönüne dik numunelerde, bu oranlamada bir miktar azalma olsa da orijinal numuneye göre mikrosertlik değerlerindeki artış sırasıyla %46 ve %53 olarak belirlenmiştir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.01>

# Mechanical Properties of Low Carbon Steel Produced by GMAW-based Additive Manufacturing

## ARTICLE INFO

Received: 08.09.2021  
Accepted: 02.11.2021

### Keywords:

Additive  
manufacturing  
Low-carbon steel  
WAAM  
Mechanical properties  
Deformation speed

## ABSTRACT

Wire arc additive manufacturing has high flexibility and efficiency, especially for the economical production of large-size metal parts and a range of applications that require relatively high deposition rates. In this study, the variation of the mechanical properties (tensile strength and microhardness) of the part produced by gas metal arc welding (GMAW) based additive manufacturing from low carbon steel wire according to the deformation rate was investigated. In this context, tensile tests at 1 and 4 mm/sec speeds were applied to the samples prepared perpendicular and parallel to the seam direction from the additive manufacturing part. In the samples perpendicular to the weld seam direction, an increase in tensile strength was observed with an increase in the deformation rate due to the anisotropic behavior in ductility, while a decrease in percent elongation was determined. With the increase of the tensile speed four times, the average tensile strength of the sample parallel to seam direction was 545 MPa, and the vertical specimen was 524 MPa. In the sample parallel to the seam direction, there was an increase in microhardness resulting from tensile deformation compared to the original sample. This increase relative to the deformation rates was calculated as 56% and 64% on average for 1 mm/sec and 4 mm/sec, respectively. Although there was a slight decrease in this ratio in samples perpendicular to the seam direction, the increase in microhardness values compared to the original sample was determined as 46% and 53%, respectively.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.01>

\*Corresponding author: [mgunay@karabuk.edu.tr](mailto:mgunay@karabuk.edu.tr)

To cite this article: M. Günay and İ. Yeşildağ, "Mechanical Properties of Low Carbon Steel Produced by GMAW-based Additive Manufacturing", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 175-182, 2021.  
doi:10.30855/gmbd.2021.03.01

## 1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Additive manufacturing (AM), well-known as rapid prototyping and 3D printing, is a modern method that enables part production by combining materials in layers, unlike traditional machining methods. AM technology has many advantages for example the production of parts with complex geometry, fast production, low cost, efficient use of materials, and is suitable for remote production. However, the disadvantages of AM are that it is more costly than mass production in large numbers, limited material type and part size, and post-production machining applications such as heat treatment, machining, etc.[1]. At the same time, these methods allow the repair of a damaged part. AM methods cover a wide variety of materials such as plastics, metals, composites, ceramics, and have begun to be used effectively in the production of various parts in important industrial areas such as aviation, health, dentistry, jewelry, marine and energy [2]. AM methods include laser beam melting (LBM), direct metal laser sintering/melting (DMLS/E), spark plasma sintering (SPS), selective laser melting (SLM), electron beam melting (EBM), laser engineered mesh forming (LENS), and wire arc additive manufacturing (WAAM) technologies are used in the manufacture of metal parts.

WAAM is a cost-effective and convenient technique for the rapid production of large and medium-sized components and structures. This method uses classic arc-based welding equipment for multilayer deposition in a layered manner to create large structures and parts [3]. Productions with WAAM may exhibit better mechanical properties than machined industrial grades. The applicability of this technique has been verified with materials ranging from titanium, aluminum, stainless steel to Inconel. Compared to other additive manufacturing techniques, WAAM has low equipment costs, reduced lead time, high deposition rates and density components [4], [5]. It is also preferred for its minimum resource and energy requirements. All these favorable features support the applicability of WAAM in the aerospace, automobile and medical industries. Also, the high deposition rate leads to lower resolution and wavy surface quality, respectively. It is imperative to be careful and prepared when working with wire arc additive manufacturing due to the high heat input limiting material selection [6]. The WAAM technique is suitable for a range of applications that require a near net shape, freedom of design, economical production of large-size metal parts, and relatively high deposition rates. Reduced material wastage and

production time compared to traditional manufacturing methods creates additional advantages and opportunities for hybrid manufacturing, the production of functionally graded materials, and moderately complex parts [7]. On the other hand, the entire manufacturing process, from understanding and interpreting part models to the design and preparation of a manufacturing process, requires skilled operators. However, the WAAM process provides a high degree of flexibility and economic efficiency than traditional welding, coating or subtractive manufacturing techniques [8]. Multi-pass weld reduces wastage and offers much faster speeds than powder-based additive manufacturing (AM) techniques. The deposition rate of WAAM technology using the GMAW process is two to three times higher than plasma arc welding (PAW) or gas tungsten arc welding (GTAW) based techniques [9].

In recent years, some of the researches on the mechanical properties of parts produced with WAAM technology from various metal materials are summarized below. Duraisamy et al. produced a 4 mm thick plate by feeding ER347 stainless steel wire ( $d=1.2$  mm) with WAAM parameters such as different current and welding speed. As a result of the investigations, it was stated that the thermal transitions during the formation of the plate showed better ductility and anisotropic properties matched to the industrial quality (AISI 347). While the microhardness of WAAM-produced plates gradually changed in the range of 203.5-248.2 HV along the deposition direction, it was stated that the tensile strength changed at 0 and 90° orientation angles [10]. Queguineur et al. investigated the usability of 316L steel and Cu-Al alloy materials in the WAAM method to reduce manufacturing errors in large castings for marine vessels. The part produced by cold metal transfer assisted welding technology was examined in terms of production time, corrosion and mechanical properties. Tests on 316L stainless steel created results close to the mechanical properties of typically welded joints in welding procedure qualification reports. However, it has been stated that there is a slight decrease in the yield and tensile strength of the Cu-Al alloy material [11]. Wang et al. performed WAAM studies with 316L stainless steel ( $\varnothing 1.2$  mm wire) at different arc modes and at a constant deposition rate, examining structural integrity, microstructures, and mechanical properties. Even though the deposition rate and scanning rate of SpeedPulse and SpeedArc WAAM are the same, the SpeedArc technique has been found to have lesser heat input and upper cooling rate. Thanks to its lesser heat input and finer solidification structure, the part

produced with this technique has more tensile strength and hardness than a component produced with the SpeedPulse technique [12]. Lin et al. investigated the microstructure and mechanical properties of the material deposited by XC-45 cored metal wires. The mechanical properties of the XC-45 part produced by WAAM and the AISI 1045 part produced via conventional processes were compared. It was stated that the hardness of the part increased from bottom to top, and the mean hardness of the lower, middle and upper regions was measured as 238 HV, 243 HV and 250 HV, respectively. As a result of the tensile tests, the average yield/tensile strength was determined as 620 MPa/817 MPa in the parallel direction and 580 MPa/615 MPa in the perpendicular direction [13]. Le et al. investigated the effects of deposition strategy and heat input on the shape and microstructure development of thin-walled components in the GMAW-based additive manufacturing process from ER70S-6 steel wire. The results showed that the alternative deposition direction strategy (opposite deposition directions of two neighboring layers) is more suitable for constructing thin walls of relatively regular height. The microstructure of the walls led to variation in hardness from top to bottom (157-192 HV5). Therefore, the stress behaviors of the constructed material also demonstrated anisotropic properties, with yield strength and tensile strength varying between 320-362 MPa and 429-479 MPa, respectively [14].

When both the review and research studies on steel materials by wire arc additive manufacturing are examined, it is seen that there are many process parameters that affect the size, microstructure and mechanical properties of thick and/or thin-walled parts produced with WAAM technology. In order to improve the database in terms of optimization of the inlet heat setting and process parameters, which directly affect the thermomechanical process mechanism that develops during the deposition process, more investigations based on the WAAM method are required. In the present research, the mechanical properties of the part manufactured from SG2 (ER70S-6) steel wire by using the GMAW method were investigated. In addition to the literature in this research, the changes in the mechanical properties of the steel material produced with WAAM according to the deformation rate were compared.

In this research, low carbon (1 mm) steel material with the code G42 3CMG3Si1 according to TS EN ISO 14341-A and produced as welding wire with the code SG2 by Askaynak was chosen. M20 welding gas was used during the welding process.

Some mechanical properties of the material and the chemical composition of the welding gas are given in Table 1.

## 2.MATERIAL AND INVESTIGATION METHODOLOGY (MATERİYAL VE ARAŞTIRMA METODOLOJİSİ)

In this research, low carbon (1 mm) steel material with the code G42 3CMG3Si1 according to TS EN ISO 14341-A and produced as welding wire with the code SG2 by Askaynak was chosen. M20 welding gas was used during the welding process. Some mechanical properties of the material and the chemical composition of the welding gas are given in Table 1.

Table 1. Mechanical properties and welding gas chemical composition (SG2 mekanik özellikleri ve kaynak gazı kimyasal bileşimi) [15]

Mechanical properties			
Yield strength	Tensile strength	Elongation	Notch impact strength
440 MPa	540 MPa	%30	60 J (-30)
Welding gas chemical composition (%)			
Ar-80	O <sub>2</sub> -8	CO <sub>2</sub> -12	

A Fronius Transpuls Synergic 3200 model MIG/MAG welding machine was adapted to the Kuka KR10R1420 model robot to produce parts with the additive manufacturing technique. Welding parameters were decided as a result of preliminary experiments, taking into account the Fronius Weld Connect software and the thickness of the base plate. In the WAAM process, 10 mm S235JR steel material was used as the base plate and the surface was grinded before the welding process and the oil, dirt and corrosive layer on the surface was cleaned. During the welding process, the pass temperature was controlled with the Sinometer BM380 laser infrared temperature measuring device. The parameters used for the welding process are given in Table 2.

Table 2. Welding parameters (Kaynak parametreleri)

Current	218 A
Wire feed speed	11 m/min
Voltage	22.5 V
Gas flow rate	15 l/min
Distance of torch to workpiece	13 mm

The dimensions of the steel part produced by wire arc additive manufacturing were chosen as 120x120x12 mm. The part manufacturing process was carried out at room temperature, and the torch was



always held at a right angle during the welding process. Also, attention was taken to keep the transition temperature below 150°C in order to minimize the effects that may occur due to heat and to prevent the expansion of the weld pool [16]. During the WAAM, a 60 sec pause was applied between the deposited of one weld seam and the next, and the final cooling of the part was carried out in calm air at room temperature. On the other hand, it was stated that the weld seam is formed in the form of an indented-protruding surface of 1-2 mm on average in the WAAM method, and this defect can only be removed by machining from all surfaces of the part [17]. Therefore, in order to better evaluate the tensile strength of the part produced with WAAM technology, 1.5 mm depth of chip was removed from all surfaces of the part before preparing test samples according to the standard (ISO 6892-1-2009). Then, tensile test specimens were prepared in parallel and perpendicular to the weld seam by wire electrical discharge machining from the middle part of the additive manufacturing part.



Figure 1. Experimental environment image  
(Deneysel ortam görüntüsü)

### 3. RESULTS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

#### 3.1. Tensile Strength (Çekme Dayanımı)

Tensile tests were carried out at 1 mm/sec and 4 mm/sec speeds on samples cut parallel and perpendicular to the weld seam. The tensile test graph of the sample cut parallel to the seam direction from the part produced by additive manufacturing is shown in Figure 2. In the graphs, lines 1 and 2 are the stress-strain curves for the samples applied tensile test at 1 mm/sec, and lines 3 and 4 at 4 mm/sec.

As a result of the experiments, the yield strength of the samples was determined as 402 MPa, and the tensile strength was determined as 530 MPa, at a deformation rate of 1 mm/sec. The rupture occurred as a result of an average elongation of 33% in the samples. When this result is compared with the SG2

material, the mechanical features of which are given in Table 1, it is seen that there is a decrease in the yield strength of the additive manufacturing part and an increase in the tensile strength. As a result of the tensile process at a speed of 4 mm/sec, average yield strength of 417 MPa, a tensile strength of 545 MPa, and an elongation of 32% were obtained. It is possible to explain this change in yield and tensile strength according to the deformation rate with the classical dislocation mechanism. The increase in the dislocation density in metal materials according to the load makes the plastic deformation process difficult. This process cause the mechanical properties of the material to improve [18]. In the present study, the increase in the deformation rate increased the yield and tensile strength of the part manufactured with WAAM technology, similar to the literature [19].

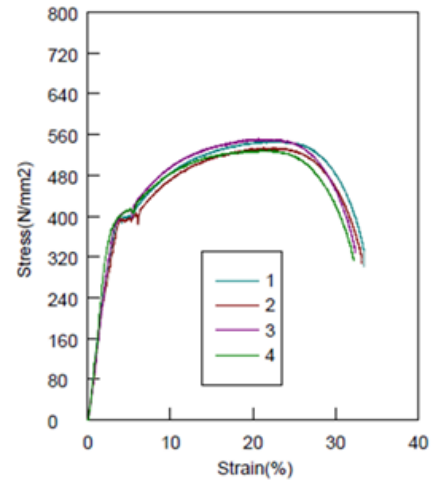


Figure 2. Tensile plot of the sample parallel to seam direction (Dikis yönüne paralel numunenin çekme grafiği)

The stress-strain curves of the samples prepared perpendicular to the weld seam are given graphically in Figure 3. When the tensile test results of the samples perpendicular to the weld seam were examined, an elongation of 32.2% was obtained with an average yield of 353 MPa and tensile strength of 498 MPa at a deformation rate of 1 mm/sec. When these values are compared with the results of the samples in the direction parallel to the weld seam, it can be seen that there is a decrease in yield and tensile stresses. This result is compared with the mechanical properties given for SG2 welding wire, it was determined that there was only a slight increase in the amount of elongation (Table 1). When the tensile process at a speed of 4 mm/sec was applied to the samples prepared in the direction perpendicular to the seam, the yield stress of 382 MPa and tensile stress of 524 MPa were achieved. The elongation amount of the

samples was measured as 26.7% on average, which is 17.08% lower than the percent elongation amount of the samples pulled at low speed. The low elongation in vertical samples indicates anisotropic property in ductile behavior. This characteristic in ductility usually occurs in additively fabricated parts and has been stated in many researches for numerous metals and alloys [12, 20]. On the other hand, it is an indication that the formability decreases due to the dislocation mechanism at high deformation speed in part produced by the WAAM technique.

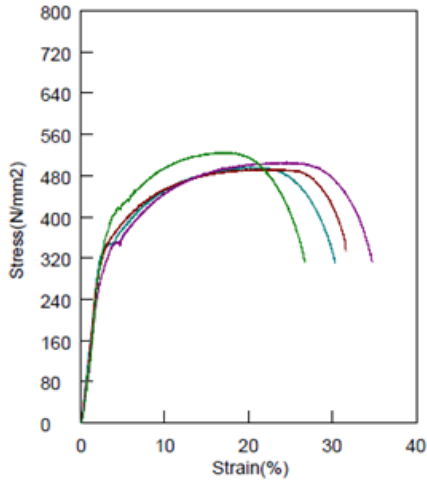


Figure 3. Tensile plot of the sample perpendicular to seam direction (*Dikiş yönüne dik numunenin çekme grafiği*)

When the percentage elongation amounts are evaluated collectively, 3% more elongation was observed in the tensile specimens prepared parallel to the weld direction for a deformation rate of 1 mm/sec compared to the specimens perpendicular. In the tensile process at 4 mm/sec, the specimens parallel to the weld seam direction exhibited 19.8% more elongation. Although there are similar results in the literature [21, 22], the possible excess of possible porosities and heterogeneous microstructure distribution in samples perpendicular to seam direction are thought to be the main reason for this result. On the other hand, if the tensile graphs obtained from the samples in the direction parallel and perpendicular to the weld seam are carefully examined, it can be seen that there is a striking difference in yield stress. It can be said that the yield behavior is explicit in the samples prepared in the direction parallel to the seam, and it is not explicit in the direction perpendicular to the seam except for the sample no 1. This result in yield stress behavior is related to whether the C atom is in free form in the solid solution [23]. In addition, this indicates low homogeneity and metallurgical structural differences

in samples perpendicular to the weld seam. As it is known, in multi-pass welding processes applied on top of each other in the welding process, each pass causes the ductility to increase by exposing the previously deposited material to heat treatment. Consequently, in multi-run welding, microstructural differences occur due to heterogeneous heat dissipation, which often negatively affects mechanical properties [24].

### 3.2. Microhardness (*Mikrosertlik*)

The microhardness of the GMAW-based additive manufacturing part was measured by applying the Vickers method on samples parallel and perpendicular to the weld seam before and after tensile deformation. The measurement was carried out for 15 seconds and under a load of 5 kg. The pictures given in Figure 4 show the samples with microhardness measurement before and after tensile deformation. The average values of the results obtained from the measurements made from 5 different places with 0.5 mm spacing from the rupture surfaces of the samples were evaluated graphically. The hardness results of the 1 mm/sec (Deform-1) and 4 mm/sec (Deform-2) samples and the samples without tensile deformation (Original) are shown in Figures 5 and 6 for the specimens in parallel and perpendicular, respectively.

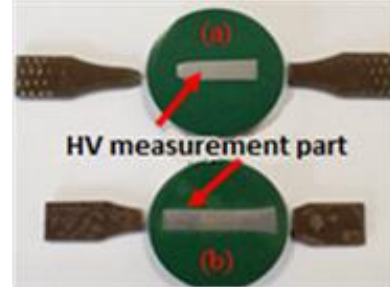


Figure 4. Microhardness measurement samples a) After deformation, b) Original (*Mikrosertlik ölçüm numuneleri, a) Deformasyon sonrası, b) Orijinal*)

The blue-colored line in Figure 5 shows the microhardness changes of the specimens without tensile deformation, the red line at 1 mm/sec and the green line at 4 mm/sec. The original microhardness value of the samples produced by WAAM was measured to be 156 HV on average. When the graph is examined, it is seen that the hardness of the samples subjected to tensile deformation is quite close among themselves and higher than the samples without the tensile test. As emphasized in the literature [25], the strain hardening that occurred in the case of a high deformation rate increased the microhardness by triggering an increase in the dislocation density. For this reason, the microhardness of the samples

subjected to tensile deformation was obtained higher. Similarly, an increase in the hardness of the WAAM part occurred as the deformation rate increased from 1 mm/sec to 4 mm/sec (Figure 5). Compared to the microhardness of the original sample, the microhardness values of the samples subjected to deformation increased by an average of 56% and 64% for 1 and 4 mm/sec, respectively.

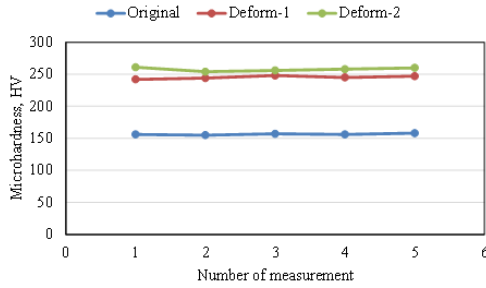


Figure 5. Hardness of the sample parallel to seam direction (*Dikiş yönüne paralel numunenin sertliği*)

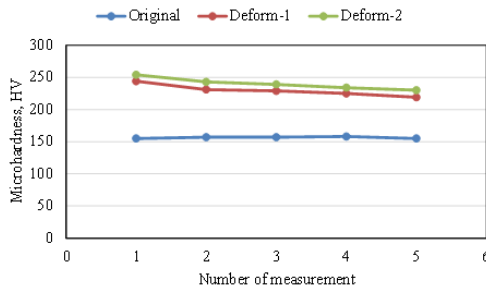


Figure 6. Hardness of the sample perpendicular to seam direction (*Dikiş yönüne dik numunenin sertliği*)

As seen from Figure 6, the microhardness changes, in general, are similar to those of the samples parallel to the seam direction. On the one hand, while the undeformed (original) specimens gave very close results in both directions, differences were observed in the microhardness values of the specimens subjected to tensile deformation in the parallel and perpendicular directions to the weld seam. The hardness values of the samples perpendicular to seam direction were lower than those of the parallel samples. The main reason for this result, as emphasized in the tensile test results, is the anisotropic properties and microstructural differences due to the welding thermal cycle (melting-cooling) [22, 24]. On the other hand, the increased strength by reason of the dislocation mechanism occurred with the increase of the tensile deformation rate from 1 to 4 mm/sec resulted in an increase in the hardness of the material. In the direction perpendicular to the weld seam, the microhardness of the specimens subjected to tensile strain compared to the original specimen is an average increase of 46% and 53% for 1 mm/sec and 4 mm/sec,

respectively. In addition, the consistency ( $\pm 3$  HV) in the microhardness changes of the original samples is attributed to the homogeneous microstructure distribution within all layers accumulated from the bottom to the top of the thick piece produced by WAAM [14, 26].

#### 4. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS (*SONUÇLAR VE ÖNERİLER*)

In this research, the mechanical properties of a thick-walled steel piece produced by applying WAAM technology based on GMAW method integrated with an industrial welding robot were investigated. The results obtained are summarized below:

- In general, the mechanical properties of the parts produced by additive manufacturing have been improved by increasing the deformation rate. On the other hand, while the samples in the direction parallel to the weld seam showed significant yielding behavior according to the deformation rate, some of the samples in the direction perpendicular to the weld showed insignificant yielding.

- The average tensile strength was determined as 530 MPa for the specimen parallel to the seam and 498 MPa for the specimen perpendicular to the seam at a deformation rate of 1 mm/sec. Similarly, the tensile strength of the specimen perpendicular to the seam decreased when the deformation rate increased fourfold.

- While the microhardness of the samples prepared in the direction parallel to the seam was measured at an average of 245 HV for 1 mm/sec, it was determined as 229 HV in the vertical sample. When the deformation rate increased, this change in microhardness values was measured as 257HV and 240HV, respectively.

- In the future, studies can be conducted on the fracture behavior of parts produced by GMAW-based wire arc additive manufacturing. More importantly, a lot of research needs to be done on the optimization of WAAM production parameters to reduce secondary operations to improve part size, surface quality and/or metallurgical structure homogeneity.

#### CONFLICT OF INTEREST STATEMENT (*ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ*)

The authors declare that there is no conflict of interest.

**REFERENCES (KAYNAKLAR)**

- [1] H. Dedeakayoğulları and A. Kacal, "Eklemeli İmalat Teknolojileri ve Kullanılan Talaşlı İmalat Yöntemleri," *İmalat Teknol. ve Uygulamaları*, vol. 1, no. 1, pp. 1–12, 2020.
- [2] M.Y. Kayacan and N. Yılmaz, "DMLS Eklemeli İmalatta Süreç Ve Maliyet Modeli Geliştirilmesi," *J. Polytech.*, vol. 0900, no. 3, pp. 763–770, 2018, doi: 10.2339/politeknik.428093.
- [3] J.J. Lewandowski and M. Seifi, "Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 46, no. April, pp. 151–186, 2016, doi: 10.1146/annurev-matsci-070115-032024.
- [4] F. Martina, J. Mehnen, S.W. Williams, P. Colegrove and F. Wang, "Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 6, pp. 1377–1386, 2012, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002.
- [5] B. Cong, R. Ouyang, B. Qi and J. Ding, "Influence of cold metal transfer process and its heat input on weld bead geometry and porosity of aluminum-copper alloy welds," *Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng/Rare Met. Mater. Eng.*, vol. 45, no. 3, pp. 606–611, 2016, doi: 10.1016/s1875-5372(16)30080-7.
- [6] C.R. Cunningham, J.M. Flynn, A. Shokrani, V. Dhokia and S.T. Newman, "Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing," *Addit. Manuf.*, vol. 22, no. June, pp. 672–686, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.06.020.
- [7] J.L. Prado-Cerqueira, J.L. Diéguez and A.M. Camacho, "Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM)," *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 895–902, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.154.
- [8] M. Chaturvedi, E. Scutelnicu, C.C. Rusu, L.R. Mistodie, D. Mihailescu and S. Arungalai Vendan, "Wire arc additive manufacturing: Review on recent findings and challenges in industrial applications and materials characterization," *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 6, 2021, doi: 10.3390/met11060939.
- [9] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri and H. Li, "A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 31, pp. 101–110, 2015, doi: 10.1016/j.rcim.2014.08.008.
- [10] R. Duraisamy, S. Mohan Kumar, A. Rajesh Kannan, N. Siva Shanmugam and K. Sankaranarayanan, "Reliability and sustainability of wire arc additive manufactured plates using ER 347 wire-mechanical and metallurgical perspectives," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 235, no. 10, pp. 1860–1871, 2021, doi: 10.1177/0954406219861136.
- [11] A. Queguineur, G. Rückert, F. Cortial and J.Y. Hascoët, "Evaluation of WAAM for large-sized components in naval applications\_NavalGroup 2017," *Weld. World*, vol. 62, no. 2, pp. 259–266, 2017.
- [12] L. Wang, J. Xue and Q. Wang, "Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 751, no. November, pp. 183–190, 2019, doi: 10.1016/j.msea.2019.02.078.
- [13] Z. Lin, C. Goulas, W. Ya and M.J.M. Hermans, "Microstructure and mechanical properties of medium carbon steel deposits obtained via wire and arc additive manufacturing using metal-cored wire," *Metals (Basel)*, vol. 9, no. 6, 2019, doi: 10.3390/met9060673.
- [14] V.T. Le, D.S. Mai and Q.H. Hoang, "A study on wire and arc additive manufacturing of low-carbon steel components: process stability, microstructural and mechanical properties," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 42, no. 9, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1007/s40430-020-02567-0.
- [15] İ. Yeşildağ, "Düşük alaşimli çelikten tel ark eklemeli imalat ile üretilen bir parçanın mekanik özelliklerinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, 2020.
- [16] T. Wang, Y. Zhang, Z. Wu and C. Shi, "Microstructure and properties of die steel fabricated by WAAM using H13 wire," *Vacuum*, vol. 149, pp. 185–189, 2018, doi: 10.1016/j.vacuum.2017.12.034.
- [17] A. Busachi, J. Erkoyuncu, P. Colegrove, F. Martina and J. Ding, "Designing a WAAM based manufacturing system for defence applications,"

*Procedia CIRP*, vol. 37, no. October, pp. 48–53, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.08.085.

[18] Q. Kun, Y. Li-Ming and H. Shi-Sheng, “Mechanism of Strain Rate Effect Based on Dislocation Theory,” *Chinese Phys. Lett.*, vol. 26, no. 3, p. 036103, Mar. 2009, doi: 10.1088/0256-307X/26/3/036103.

[19] J.H. Kim, D. Kim, H.N. Han, F. Barlat and M.G. Lee, “Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels: Experiment and constitutive modeling,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 559, pp. 222–231, 2013, doi: 10.1016/j.msea.2012.08.087.

[20] Q. Zhang, J. Chen, Z. Zhao, H. Tan, X. Lin and W. Huang, “Microstructure and anisotropic tensile behavior of laser additive manufactured TC21 titanium alloy,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 673, pp. 204–212, 2016, doi: 10.1016/j.msea.2016.07.040.

[21] X. Xu, S. Ganguly, J. Ding, S. Guo, S. Williams and F. Martina, “Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire + arc additive manufacture process,” *Mater. Charact.*, vol. 143, no. December, pp. 152–162, 2018, doi: 10.1016/j.matchar.2017.12.002.

[22] A. Lopez, R. Bacelar, I. Pires, T.G. Santos, J.P. Sousa and L. Quintino, “Non-destructive testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 21, no. April 2019, pp. 298–306, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.03.020.

[23] M. Türkmen, S. Gündüz, “Çift fazlı çeliklerde martenzit morfolojisinin statik deformasyon yaşanma davranışı üzerine etkisi,” *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 28, no. 2, pp. 353–362, 2013.

[24] C.V. Haden, G. Zeng, F.M. Carter, C. Ruhl, B.A. Krick and D.G. Harlow, “Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties,” *Addit. Manuf.*, vol. 16, no. 2010, pp. 115–123, 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.05.010.

[25] P. Dirisu, G. Supriyo, F. Martina, X. Xu and S. Williams, “Wire plus arc additive manufactured functional steel surfaces enhanced by rolling,” *Int. J. Fatigue*, vol. 130, no. December 2018, p. 105237, 2020, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105237.

[26] N. Sridharan, M.W. Noakes, A. Nycz, L.J. Love, R.R. Dehoff and S. S. Babu, “On the toughness scatter in low alloy C-Mn steel samples fabricated using wire arc additive manufacturing,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 713, no. July 2017, pp. 18–27, 2018, doi: 10.1016/j.msea.2017.11.101.

This is an open access article under the CC-BY license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



# Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Çevriminde R134a Yerine R1234yf ve R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile R1234yf/CNTs Nanosoğutucu Akışkanların Kullanımının Termodinamiğin I. ve II. Kanunları Bakımından Teorik Olarak İncelenmesi

Kemal BİLEN<sup>a</sup>, Kayhan DAĞIDIR<sup>b,\*</sup>, Erol ARCAKLIOĞLU<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06010, Ankara, Türkiye

<sup>b</sup> Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 33400, Mersin, Türkiye

## MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 01.05.2021  
Kabul: 20.09.2021

### Anahtar Kelimeler:

R134a, R1234yf,  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CNTs,  
Nanosoğutucu  
akışkan,  
R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  
R1234yf/CNTs, BSSS,  
COP.

## ÖZ

Bu çalışmada; soğutucu akışkan olarak R134a kullanılan bir Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Sisteminde (BSSS'de), R134a'nın alternatifi olarak görülen R1234yf soğutucu akışkanı, alüminyumdioksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve karbon nanotüp (CNT) nanoparçacıkları ilavesiyle iş akışkanı olarak kullanılmıştır. Soğutma sistemi aynı şartlarda, yalnızca iş akışkanı değiştirilerek, termodinamik bakımdan teorik olarak incelenmiştir. İncelemeler, farklı buharlaşma ve yoğuşma sıcaklıkları için geniş bir aralıkta gerçekleştirilmiştir. BSSS'de iş akışkanı olarak R134a ve R1234yf kullanımına yönelik -7 °C buharlaşma ve 45 °C yoğuşma sıcaklıklarındaki analizler sonucunda, sistemin soğutma tesir katsayısı (COP) R134a için 1.950 ve R1234yf için 1.824 olarak hesaplanmış, COP değerleri arasında %6.46'lık bir fark ortaya çıkmıştır. Bu sonuç, ikinci kanun verimleri (ekserji verimleri) arasında ise %6.44'lük bir fark oluşturmuştur. Bu fark göz önüne alınarak, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CNT nanoparçacıklarının ilavesiyle elde edilen R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve R1234yf/CNTs nanosoğutucu akışkanları için analizler tekrar edilmiştir. Analizler sonucunda, COP değerinin ve ekserji veriminin, nanoparçacık hacimsel oranı ile artmakta olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, -7 °C buharlaşma ve 45 °C yoğuşma sıcaklıklarında, R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılan sistemde, R134a'nın tek başına kullanıldığı duruma göre COP değerindeki ve ekserji verimindeki artışların sırasıyla %18.46 ve %18.43 değerlerine kadar ulaştığı tespit edilmiştir. R1234yf/CNTs kullanılması durumunda ise bu artışlar sırasıyla, %6.92 ve %6.89 değerlerine ulaşmaktadır.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.02>

## Theoretical Analysis of Usage of R1234yf Refrigerant and R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and R1234yf/CNTs Nanorefrigerants instead of R134a in the Vapor Compression Refrigeration Cycle in terms of I. and II. Laws of Thermodynamics

## ARTICLE INFO

Received: 01.05.2021  
Accepted: 20.09.2021

### Keywords:

R134a, R1234yf,  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CNTs,  
Nanorefrigerant,  
R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

## ABSTRACT

In this study, in a Vapor Compression Refrigeration System (VCRS) using R134a as refrigerant, R1234yf refrigerant considered as an alternative to R134a has been used as working fluid with the addition of aluminumdioxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and Carbon NanoTubes (CNTs) nanoparticles. This system has been theoretically investigated in terms of thermodynamics under the same conditions, only by changing the working fluid. Investigations have been performed over a wide range for varying evaporation and condensation temperatures. The system using R134a and R1234yf as the working fluid have been analysed at the same conditions. As a result of the analyses at -7 °C evaporation

\*Corresponding author: kayhandagidir@tarsus.edu.tr

To cite this article: K. Bilen, K. Dağidir and E. Arcaklıoğlu, "Theoretical Analysis of Usage of R1234yf Refrigerant and R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and R1234yf/CNTs Nanorefrigerants instead of R134a in the Vapor Compression Refrigeration Cycle in terms of I. and II. Laws of Thermodynamics", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 183-195, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.03.02

R1234yf/CNTs,  
VCRS, COP.

and 45 °C condensation temperature, the Coefficient of Performance (COP) of the system has been calculated as 1.950 and 1.824 for pure R134a and R1234yf, respectively. There is a difference of 6.46% between COP values. Similarly, a difference of 6.44% between the second law efficiencies (exergy efficiencies) have been found as well. Thus, R1234yf refrigerant with the addition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CNTs nanoparticles has been used as the nanorefrigerant instead of R134a refrigerant at the same conditions in analyses. As a result of the analyses, it has been observed that the COP and exergy efficiency increase with the nanoparticle volumetric concentration. Results have revealed that COP and exergy efficiency have increased up to values of 18.46% and 18.43% compared to usage of pure R134a refrigerant at -7 °C evaporation and 45 °C condensation temperatures for the R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanorefrigerant, respectively. Similarly, these increases have reached up to values 6.92% and 6.89% for R1234yf/CNTs nanorefrigerant as well.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.02>

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Soğutma sistemleri günümüzde hem büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda hem de nispeten küçük ölçekli uygulamalarda çok yaygın hale gelmiştir. Hatta sağlık ve gıda gibi çok önemli sektörlerde artık bir zorunluluktur. Konu böylesine önemli olunca, araştırmacıların da bu alana olan ilgileri artmıştır. Birçok araştırmacı bu alanda çalışmalar yürütmektedir. Diğer taraftan son yıllarda artan küresel endişeler çerçevesinde, önemli uluslararası çevre örgütleri tarafından mevcut durumda kullanılmakta olan bazı soğutucu akışkanların kısıtlanmasına yönelik kararlar alınmıştır. R134a soğutucu akışkanı da kullanımına kısıtlama getirilen soğutucu akışkanlardandır [1]. Araştırmacılar, R134a yerine alternatif soğutucu akışkan arayışına başlamışlardır. Bu araştırmalar kapsamında R1234yf soğutucu akışkanı, R134a için iyi bir alternatif olarak önerilmekte ve güncel çalışmalarda en iyi alternatiflerden biri olarak gösterilmektedir [2-5]. Ancak R1234yf soğutucu akışkanı, R134a yerine kullanıldığında sistemin performansında bir miktar düşüş olduğu görülmüştür. Bu performans düşüşü hem teorik çalışmalarla hem de deneysel çalışmalarla ortaya konmaktadır.

Li vd. [6] tarafından yapılan çalışmada, R1234yf soğutucu akışkanının R134a'nın yerini alıp alamayacağı deneysel olarak araştırılmıştır. Araştırmanın sonucunda, R1234yf soğutucu akışkanı için sistemin soğutma tesir katsayısı (COP), 40 °C yoğuşma ve 0 °C buharlaşma sıcaklığında R134a soğutucu akışkanına göre %20 daha düşük çıkmıştır. R134a'nın kısıtlanması ve R1234yf'nin bu soğutucu akışkana iyi bir alternatif olmasına karşın, ortaya çıkan performans düşüşü önemli bir problem oluşturmaktadır. Enerji verimliliğinin oldukça önemli hale geldiği günümüzde, herhangi bir performans

düşüşü mutlaka üzerine gidilmesi gereken bir sorun olarak karşımızda durmaktadır.

Bu durumda; R1234yf'nin, R134a yerine kullanılabilirliğine karşın ortaya çıkan performans düşüşünün farklı yöntemlerle iyileştirilebilmesine yoğunlaşmak akılcı bir yaklaşım olacaktır. Bu doğrultuda, son dönemde dikkat çeken uygulamalardan olan nanosoğutucu akışkan uygulamasına R1234yf'nin dahil edilmesi dikkate değerdir.

Nanoakışkan teknolojisinin bir alt uygulaması olan nanosoğutucu akışkan uygulaması, soğutucu akışkana nanoparçacık katkısını içermektedir. Nanosoğutucu akışkanlar, son dönemde özellikle Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Sistemlerinde (BSSS'lerde) sıklıkla kullanılmaktadır [7]. Nanoparçacık ilavesinin akışkanların termofiziksel özelliklerinde bir iyileşme sağladığı, soğutucu akışkanlar üzerinde de denenmekte olduğu ve nanosoğutucu akışkan uygulamasının giderek önem kazandığı bilinmektedir [8-10]. Ajayi vd. [11], R134a soğutucu akışkanı kullanılan bir BSSS'de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparçacığı katkısının etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. İnceleme sonucunda nanoparçacık katkısının sistemin performansını artırdığı belirtilmiştir. Adelekan vd. [12] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada ise R600a soğutucu akışkanı kullanılan sisteme grafen nanoparçacığı ilavesinin sistem performansına etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, nanoparçacık katkısının artmasıyla sistem performansının da arttığı belirtilmiştir.

Adelekan vd. [13] tarafından gerçekleştirilen bir başka deneysel çalışmada ise yine R600a soğutucu akışkanı kullanılan sisteme titanyumdioksit (TiO<sub>2</sub>) nanoparçacığı ilavesinin sistem performansına etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda, nanoparçacık katkılı sistemin yalın haldeki sistemden daha iyi bir performansa sahip olduğu ifade edilmiştir. Jatinder

vd. [14] deneysel çalışmalarında R600a ve sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) olmak üzere iki farklı soğutucu akışkan kullanılan sistemde  $TiO_2$  ilavesinin sistem performansına etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, aynı şartlarda  $TiO_2$  katkılı R600a kullanılan sistemin LPG kullanılan sistemden daha iyi bir performansa sahip olduğu ifade edilmiştir. Babarinde vd. [15] R600a kullanılan sisteme CNTs ilavesinin etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda sistemin enerji tüketiminin nanoparçacık ilavesiyle düşmekte olduğu ifade edilmiştir. Aynı zamanda CNTs katkısıyla birlikte R600a kullanımının R134a'ya bir alternatif olarak düşünülebileceği de vurgulanmıştır. Babarinde vd. [16] tarafından gerçekleştirilen bir başka deneysel çalışmada ise R600a kullanılan sisteme grafen nanoparçacıklarının etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, en yüksek COP değerine 3.2 ile nanoparçacık katkılı durumda ulaşıldığı belirtilmiştir. Salem [17], R134a kullanılan BSSS'de, CNTs ilavesinin etkisini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışma sonucunda nanoparçacık katkısının sistem performansını iyileştirdiğini belirtmiştir. Nair vd. [18] R134a kullanılan sistemde  $Al_2O_3$  ilavesinin sistem performansına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, COP değerinde nanoparçacık ilavesiyle birlikte %6.5 oranında bir iyileşme gözlemlenmiştir. Mohan vd. [19] deneysel çalışmalarında CNTs, altın ve kloroaurikosit ( $HAuCl_4$ ) nanoparçacıklarının R134a kullanılan sisteme ilavesinin performans üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneysel inceleme sonucunda; maksimum COP değerine, hacimsel olarak %0.1 altın ve %0.005 CNTs'nin birlikte ilavesiyle erişildiği belirtilmiştir. Chauhan [20], R134a kullanılan sisteme  $Al_2O_3$  ve silisyumdioksit ( $SiO_2$ ) nanoparçacıklarını ayrı ayrı ve birlikte ekleyerek sistem performansını deneysel olarak incelemiştir. Deneyler sonucunda nanoparçacıkların birlikte kullanımının, ayrı ayrı kullanımına kıyasla sistem performansını daha çok geliştirdiğini paylaşmıştır. Pico vd. [21] R32 soğutucu akışkanı kullanılan sisteme elmas nanoparçacığı ilavesini deneysel olarak incelemişler ve sonuç olarak nanoparçacık katkısıyla soğutma kapasitesinde %5, COP değerinde ise %0.5 artış olduğunu rapor etmişlerdir. Adelekan vd. [22] R600a kullanılan sisteme  $TiO_2$  ilavesinin sistem performansına etkilerini deneysel olarak incelemişler ve sonuç olarak COP değerinin nanoparçacık katkısıyla 4.2 ile en yüksek değerine eriştiğini ifade etmişlerdir. Joshi vd. [23] R134a ve R600a soğutucu akışkanlarının kullanıldığı sisteme  $Al_2O_3$  ilavesinin sistem performansına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak, kütsel olarak %0.1  $Al_2O_3$  içeren R600a'lı sistemdeki COP değerinin,

R134a'nın tek başına kullanıldığı sisteme kıyasla %37.2'lik artışla en yüksek değerine eriştiği belirtilmiştir. Senthilkumar ve Anderson [24] deneysel çalışmalarında, R410a kullanılan sisteme  $SiO_2$  ilavesinin sistem performansına etkisini incelemişlerdir. İnceleme sonucunda, nanoparçacık ilavesinin sistem performansını artırdığını rapor etmişlerdir.

Literatürde yer alan ve bu çalışma kapsamında incelenen deneysel çalışmalarda, nanoparçacık ilaveli sistemlerin güvenli ve verimli bir şekilde çalıştıkları vurgulanmaktadır. Son zamanlarda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda tercih edilen soğutucu akışkanlar ve nanoparçacıklar Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Güncel çalışmalarda tercih edilen soğutucu akışkanlar ve nanoparçacıklar (*Preferred refrigerants and nanoparticles in current studies*).

Sıra	Referans	Soğutucu akışkan	Nano parçacık	Yıl
1	Ajayi vd. [11]	R134a	$Al_2O_3$	2019
2	Adelekan vd. [12]	R600a	Grafen	2019
3	Adelekan vd. [13]	R600a	$TiO_2$	2019
4	Jatinder vd. [14]	R600a ve LPG	$TiO_2$	2019
5	Babarinde vd. [15]	R600a	CNTs	2020
6	Babarindea [16]	R600a	Grafen	2020
7	Salem [17]	R134a	CNTs	2020
8	Nair vd. [18]	R134a	$Al_2O_3$	2020
9	Mohan vd. [19]	R134a	CNT, Altın ve $HAuCl_4$	2020
10	Chauhan [20]	R134a	$Al_2O_3$ ve $SiO_2$	2020
11	Pico vd. [21]	R32	Elmas	2020
12	Adelekan vd. [22]	R600a	$TiO_2$	2021
13	Joshi vd. [23]	R134a ve R600a	$Al_2O_3$	2021
14	Senthilkumar ve Anderson [24]	R410a	$SiO_2$	2021

Tablo 1 incelendiğinde son dönemde nanoparçacık olarak genellikle metaloksitlerin ve karbon esaslı nanoparçacıkların tercih edilmekte olduğu görülmektedir. Tablo 1'e göre, metaloksitlerden en çok tercih edilen nanoparçacık  $Al_2O_3$  iken, karbon esaslı nanoparçacıklardan en çok tercih edilen nanoparçacık ise CNTs olmuştur. Buna göre bu çalışmada, çalışmayı zenginleştirmek için metaloksit esaslı  $Al_2O_3$  ve karbon esaslı CNT tercih



edilmiştir. Tercih sebebi olarak yaygın kullanımlarının yanında farklı morfolojik yapıları ve farklı termofiziksel özellikleri etkili olmuştur. Her iki nanoparçacığın morfolojik yapıları ve bazı termofiziksel özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 2’de görüldüğü gibi, bu iki nanoparçacığın termofiziksel özellikler birbirinden bir miktar farklıdır. Bununla birlikte,  $Al_2O_3$  küresel yapıda iken CNTs silindirik yapıdadır.

Tablo 2. Çalışma kapsamında tercih edilen nanoparçacıkların morfolojik yapıları ve bazı termofiziksel özellikleri (*Morphological structures and some thermophysical properties of the preferred nanoparticles within the scope of the study*) [25].

Sıra	Özellik	$Al_2O_3$	CNT
1	Morfolojik yapı	Küresel	Silindirik
2	Özgül yüzey alanı	138 m <sup>2</sup> /g	200 m <sup>2</sup> /g
3	Yoğunluk	3690 kg/m <sup>3</sup>	2100 kg/m <sup>3</sup>
4	Özgül ısı	880 J/(kg K)	9124 J/(kg K)
5	Isı iletim katsayısı	40 W/(m K)	3007.4 W/(m K)

Tüm bu gelişmeler incelendiğinde nanosoğutucu akışkanların daha etkin kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda bu çalışma kapsamında, BSSS’lerde sıklıkla kullanılan R134a yerine alternatifi olan R1234yf’nin kullanımı teorik olarak analiz edilmiştir. Analizler sonucunda, R1234yf kullanımının hem COP değerinde hem de ekserji veriminde düşüğe sebep olduğu görülmüştür. Bu nedenle, literatürdeki güncel gelişmeler doğrultusunda, R1234yf’nin nanoparçacık ilavesiyle kullanımının sistem performansını artıracağı öngörülmüştür. Böylece, literatürde sıklıkla tercih edilen  $Al_2O_3$  ve CNT nanoparçacıklarının R1234yf’ye ilavesinin sistem performansı üzerindeki etkilerinin teorik olarak incelenmesi faydalı görülmüştür. Teorik modelin oluşturulabilmesi için literatürde yer alan benzer çalışmalar [26, 27] incelenmiş, çalışma kapsamında kullanılmasına karar verilen teorik model doğrulanmıştır. Doğrulan teorik model,  $Al_2O_3$  veya CNTs ilaveli R1234yf’nin BSSS’de iş akışkanı olarak değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

Özet olarak bu çalışmanın amacı; BSSS’lerde sıklıkla iş akışkanı olarak kullanılan R134a yerine alternatifi R1234yf’nin aynı şartlarda kullanımının termodinamiğin I. ve II. kanunları bakımından incelenmesidir. Literatürden edinilen bilgiler dahilinde, R134a yerine tek başına R1234yf kullanımının performans düşüşüne neden olduğu bilinmektedir. Çalışmada aynı zamanda; bu

performans düşüşünün, nanoparçacık ilavesiyle telafi edilip edilemeyeceğinin belirlenmesi de amaçlanmıştır. Bunun için; R1234yf’nin BSSS’de,  $Al_2O_3$  veya CNTs ilavesiyle nanosoğutucu akışkan olarak kullanımı termodinamiğin I. ve II. kanunları bakımından irdelenmiştir. Termodinamiğin II. kanunu kapsamında yapılan incelemeler, sistemin toplam ekserji veriminin belirlenmesiyle sınırlı tutulmuştur.

## 2. TEORİK MODEL (THEORETICAL MODEL)

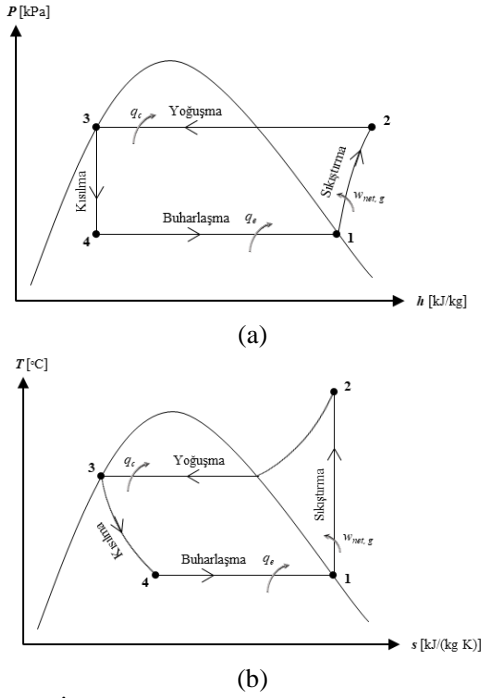
Bu çalışmada kullanılan yöntem; literatürdeki benzer çalışmalar yardımıyla, nanosoğutucu akışkanların BSSS’lerdeki kullanımına uygun olarak geliştirilen teorik bir yaklaşıma dayanmaktadır. Bu yaklaşım ilerleyen kısımda detaylı olarak izah edilmiştir.

Teorik model, Aktas vd. [26] tarafından gerçekleştirilen çalışma temel alınarak oluşturulmuştur. Aynı çalışma, Kumar vd. [27] tarafından R134a ve R152a soğutucu akışkanlarına zirkonyumdioksit ( $ZrO_2$ ) nanoparçacığı katkısının etkilerini incelemek için temel alınmıştır.

Teorik modelin daha iyi anlaşılabilmesi için öncelikle ideal bir BSSS ele alınmış ve kullanılacak temel termodinamik eşitlikler ifade edilmiştir. Şekil 1’de ideal bir Buhar Sıkıştırıcı Soğutma Çevrimi (BSSÇ) görülmektedir.

İdeal BSSÇ aşağıdaki dört hal değişiminden oluşur:

- 1-2 Kompresörde izentropik sıkıştırma,
- 2-3 Yoğuşturucuda sabit sıcaklık ve sabit basınçta ısı çıkışı,
- 3-4 Genleşme cihazında sabit entalpide kısılma,
- 4-1 Buharlaştırıcıda sabit sıcaklık ve sabit basınçta ısı girişi.



Şekil 1. İdeal BSSÇ'nin  $P$ - $h$  ve  $T$ - $s$  diyagramları ( $P$ - $h$  and  $T$ - $s$  diagrams of ideal VCRC).

Çalışmanın amacı; çeşitli soğutucu ve nanoşutucu akışkanların etkisinin karşılaştırılması olduğu için akışkanlara aşırı kızdırma ve aşırı soğutma uygulanmamış, sistem ideal kabul edilerek akışkanın 1 noktasında doymuş buhar ve 3 noktasında doymuş sıvı olduğu varsayılmıştır. Sistemin COP değeri doğrudan kompresördeki enerji tüketimine bağlı olduğundan bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen incelemelerde kompresörün izentropik verimi, doğrulama çalışmalarında yararlanılan kaynaktaki değer olan  $\eta_{izen} = 0.51$  olarak alınmıştır. Şekil 1'de  $P$ - $h$  ve  $T$ - $s$  diyagramları verilen ideal çevrim için enerji dengesi birim kütle başına yazılırsa, buharlaştırıcıdaki ısı girişi  $q_e$ , yoğuşturucudaki ısı çıkışı  $q_c$  ve kompresördeki enerji tüketimi  $w_{net,g}$  olacaktır. Tüm hesaplamalar, sürekli rejim koşullarında geçerli olan bağıntılar kullanılarak yapılmıştır. İdeal BSSÇ için ilgili bağıntılar aşağıda verilmiştir.

#### I. Kanun analizi:

$$COP = \frac{\text{Arzu edilen çıktı}}{\text{Gerekli girdi}} = \frac{\text{Soğutma etkisi}}{\text{Kompresör enerji tüketimi}} = \frac{q_L}{w_{net,in}} \quad (1)$$

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (2)$$

$$q_c = h_2 - h_3 \quad (3)$$

$$w_{net,g} = h_2 - h_1 \quad (4)$$

$$\eta_{izen} = \frac{\text{izentropik kompresör işi}}{\text{Gerçek kompresör işi}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (5)$$

$$COP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (6)$$

#### II. Kanun analizi:

$$COP_{tersinir} = COP_{maksimum} = COP_{Carnot} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (7)$$

$$\eta_{II, çevrim} = \frac{COP}{COP_{tersinir}} \quad (8)$$

Denklem 7 ile verilen bağıntıdaki  $T_L$  ve  $T_H$  sırasıyla, soğutulacak ve ısıtılacak ortam sıcaklıklarını göstermekte olup bu çalışmada,  $T_L = 273.15$  K ve  $T_H = 298.15$  K olarak alınmıştır. Yukarıdaki bağıntılar, sistemin I. ve II. kanun analizleri için yeterlidir. Ancak, çalışma kapsamında sistem ayrıca nanoşutucu akışkanlar için de analiz edileceğinden bir denklem daha ilave edilmelidir. Bu denklem, nanoşutucu akışkanların yoğunluğunu veren 9 numaralı eşitliktir [26].

$$\rho_{nr} = \omega \rho_{np} + (1 - \omega) \rho_{pr} \quad (9)$$

$$v_{nr} = \frac{1}{\rho_{nr}} \quad (10)$$

İlk olarak, yukarıdaki bağıntılar yardımıyla, R134a ve R1234yf soğutucu akışkanları için ilgili değerler yerlerine yazılarak COP ve  $\eta_{II, çevrim}$  değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra, nanoparçacık ilavesinin etkisi, Denklem 9 ve Denklem 10 yardımıyla hesaplamalara yansıtılmıştır. Nanoparçacık hacimsel oranı, nanoparçacık yoğunluğu ve soğutucu akışkan yoğunluğu Denklem 9'da yerlerine yazılarak nanoşutucu akışkanın yoğunluğu elde edilmiştir. Elde edilen yoğunluk değeri Denklem 10'da yerine yazılarak nanoşutucu akışkanın özgül hacmi hesaplanmıştır. Nanoparçacık ilavesinin, soğutma sisteminin çalışma basınçlarını değiştirmedeği kabul edilmiştir. Bu durumda, basınç değerleri yanında ikinci bir özellik olarak özgül hacimlerin de bilinmesi, nanoşutucu kullanılan sistemin bu çalışma kapsamındaki I ve II. kanun analizleri için yeterli olmaktadır.

Çalışmada kullanılan teorik modelin güvenilirliğini sağlamak için Aktas vd. [26] tarafından yapılan çalışma tekrarlanarak doğrulanmıştır. Doğrulama çalışması için bu çalışmanın seçilmesinde, literatürde genel kabul görmesi ve bazı çalışmalarda [27] referans olarak alınmış olması etkili olmuştur. Doğrulama çalışmasında kullanılan veriler, ilgili çalışmadan [26] alınan verilerdir. Doğrulama çalışmaları kapsamında elde edilen veriler Aktas vd. [26] tarafından elde edilen veriler ile karşılaştırmalı olarak Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te görüldüğü gibi doğrulama çalışmalarında elde edilen sonuçlarla

referans olarak alınan çalışmanın sonuçları neredeyse aynıdır.

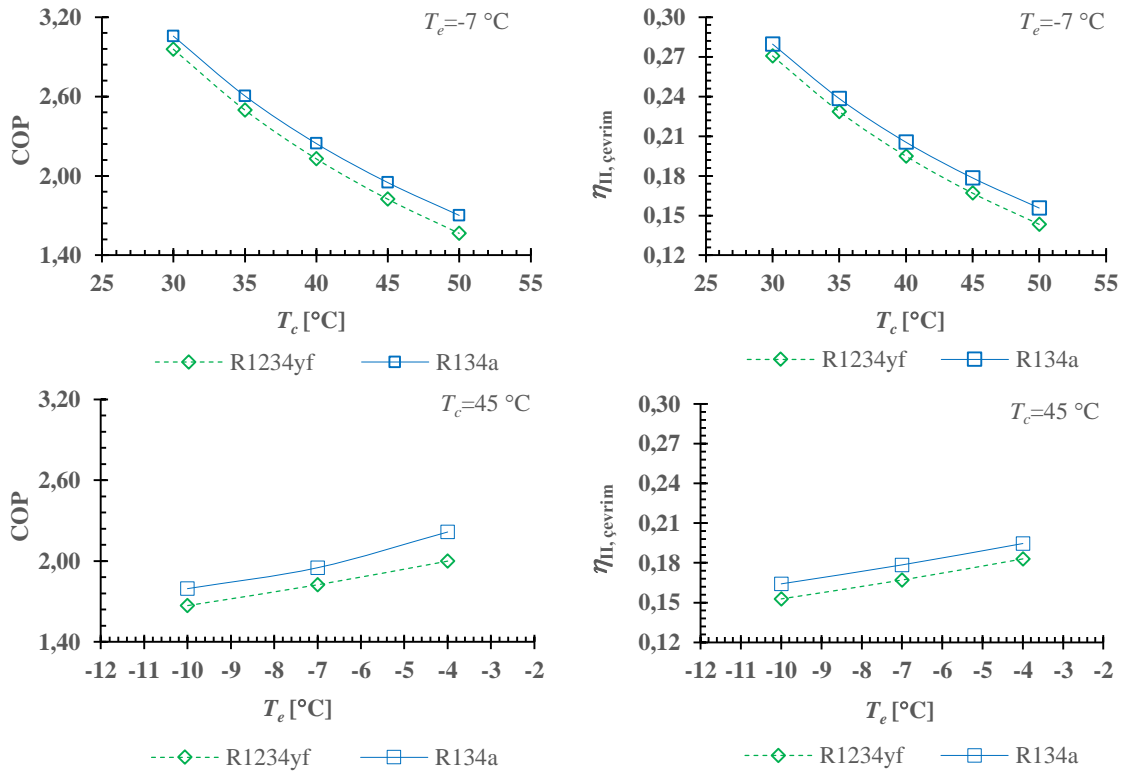
Tablo 3. COP değerleri bakımından teorik modelin doğrulanmasına ilişkin veriler (*Some data related to validation of the theoretical model in terms of COP values*).

	Soğutucu akışkan	$\omega$	$\rho_{Al_2O_3}$ (kg/m <sup>3</sup> )	COP
Aktas vd. [26]	R134a	0	-	1.96
Doğrulama	R134a	0	-	1.95
Aktas vd. [26]	R134a/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0006	3690	2.29
Doğrulama	R134a/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0006	3690	2.28
Aktas vd. [26]	R134a/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0006	2200	2.15
Doğrulama	R134a/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0006	2200	2.14

Referans alınan çalışmada [26] yalnızca enerji analizi yer aldığından, doğrulama çalışmaları enerji analizi ile sınırlı kalmıştır. Gerçekleştirilen enerji

analizinin doğrulanmış olması teorik modelin doğruluğu için yeterli görülmüştür. Modelin doğruluğu ortaya çıktıktan sonra çalışmanın detaylandırılması için II. kanun analizi de çalışmaya dahil edilmiştir.

Doğrulan bu teorik model öncelikle R134a soğutucu akışkanı için uygulanmış ve arkasından R1234yf soğutucu akışkanı için tekrarlanmıştır. Daha sonra, %0.01'den %0.1'e kadar %0.01'er artışlarla nanoparçacık hacimsel oranları değiştirilerek R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve R1234yf/CNTs nanosöğütücü akışkanları oluşturulmuştur. Bu nanosöğütücü akışkanlar, -7 °C sabit buharlaşma sıcaklığına karşın farklı yoğuşma sıcaklıklarında ve 45 °C sabit yoğuşma sıcaklığına karşın farklı buharlaşma sıcaklıklarındaki analizlerde kullanılmıştır. Analizler, mühendislik denklem çözücü (EES) yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. R134a ve R1234yf için farklı yoğuşma ve farklı buharlaşma sıcaklıklarındaki COP ve ekserji verimi değerleri (*COP and exergy efficiency values at various condensation and evaporation temperatures for R134a and R1234yf*)

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışma, R134a akışkanının kullanımının kısıtlanmasıyla alternatif soğutucu akışkan arayışları çerçevesinde temellendirilmiştir. Bu nedenle öncelikle R134a ve en güçlü alternatifleri arasında yer

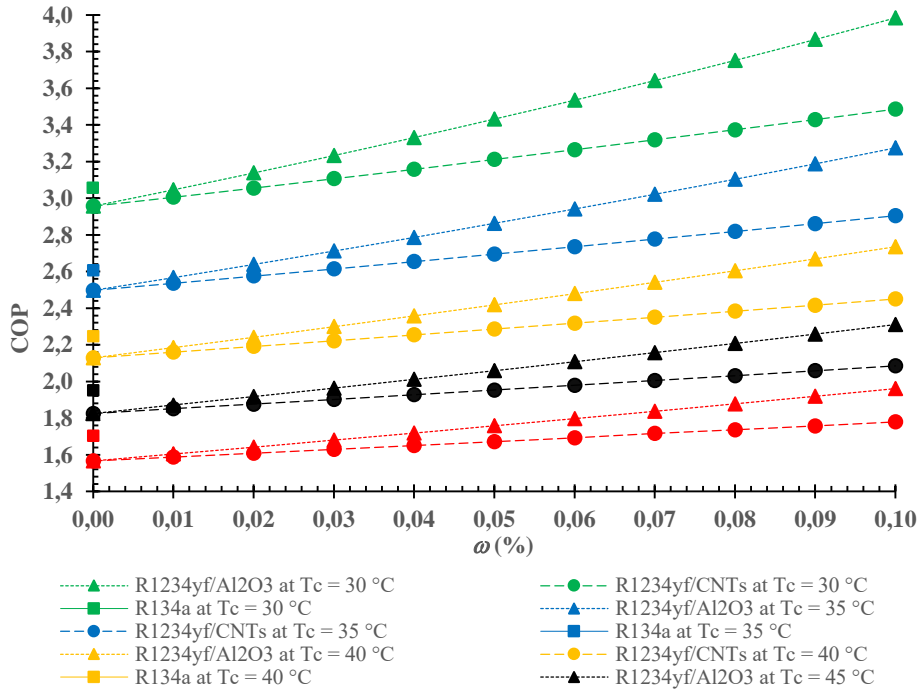
alan R1234yf akışkanının tek başlarına kullanımları durumu için I. ve II. kanun analizleri yapılmıştır. Analizler; buharlaşma sıcaklığı (T<sub>e</sub> = -7 °C) sabit tutularak farklı yoğuşma sıcaklıkları (T<sub>c</sub> = 30, 35, 40, 45 ve 50 °C) için ve yoğuşma sıcaklığı (T<sub>c</sub> = 45 °C) sabit tutularak farklı buharlaşma sıcaklıkları (T<sub>e</sub> = -4, -7 ve -10 °C) için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen

sonuçlar Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekil 2’deki sonuçlar incelendiğinde; tüm durumlar için, R134a kullanılan sistem R1234yf kullanılan sistemden hem COP hem de ekserji verimi bakımından daha yüksek bir performansa sahip olduğu görülür. Diğer taraftan, azalan yoğuşma sıcaklıklarında ve artan buharlaşma sıcaklıklarında hem COP değerlerinin hem de ekserji veriminin arttığı görülür.

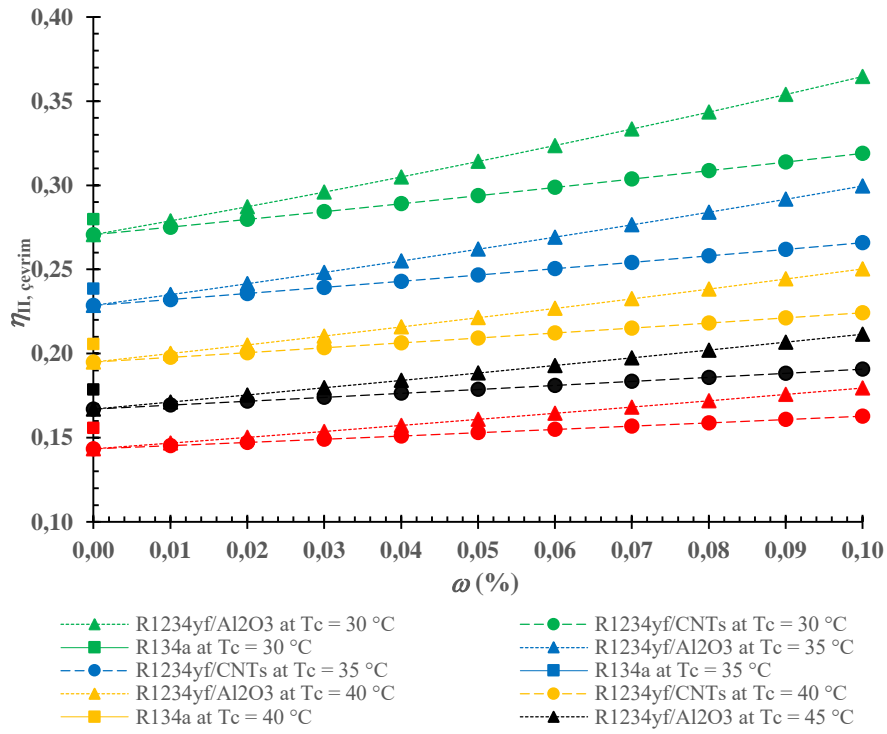
Çalışmada; R134a ve R1234yf akışkanlarının aynı sistemde tek başlarına kullanılmasıyla oluşan yaklaşık %7’lik performans düşüşünün, nanoşutucu akışkan kullanımıyla telafi edilebileceği termodinamik analizler ile ortaya konmuştur. Termodinamiğin I. ve II. kanunları bakımından yapılan bu analizler; nanoparçacık hacimsel oranı %0.01’den %0.1’e kadar %0.01’er artışlarla on farklı değer için gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7’de gösterilmiştir.

Şekil 3’te, -7 °C sabit buharlaşma sıcaklığına karşın farklı yoğuşma sıcaklıkları için R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

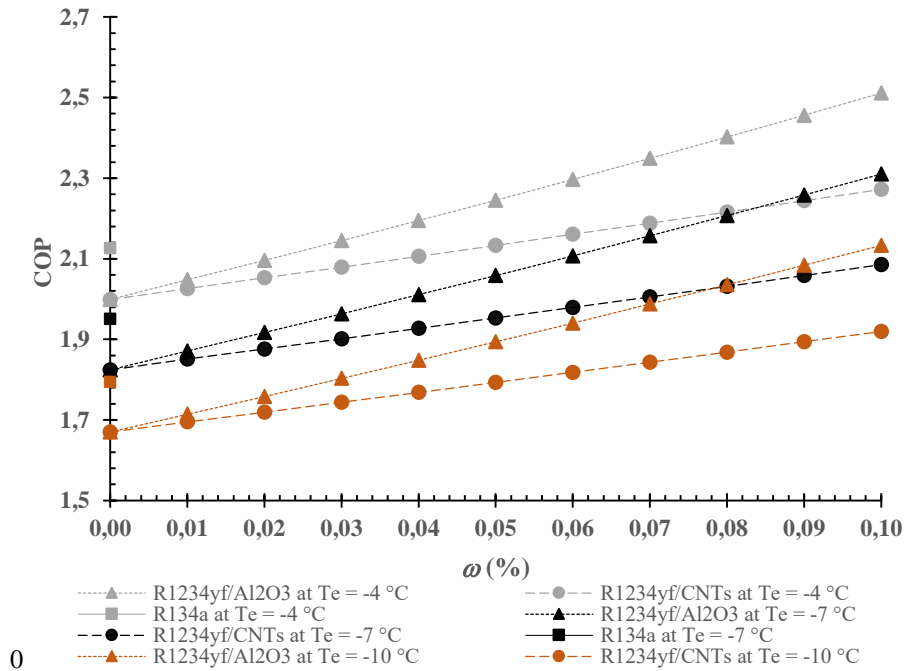
ve R1234yf/CNTs nanoşutucu akışkanlarının farklı parçacık hacimsel oranlarındaki COP değerleri gösterilmiştir. Şekil 3’te görüldüğü gibi tüm durumlarda; nanoparçacık ilavesi, COP değerini artırmaktadır. Bu artış, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için CNT’ye kıyasla daha yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir. Benzer şekilde, -7 °C sabit buharlaşma sıcaklığına karşın farklı yoğuşma sıcaklıkları için R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve R1234yf/CNTs’nin farklı parçacık hacimsel oranlarındaki ekserji verimleri Şekil 4’te gösterilmiştir. Şekil 4’te görüldüğü gibi tüm durumlarda; nanoparçacık ilavesi, ekserji verimini artırmaktadır. Bu artış, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için CNT’ye kıyasla yine daha yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir. Şekil 3’te yer alan COP değerlerinin ve Şekil 4’te yer alan ekserji verimi değerlerinin, aynı buharlaşma sıcaklığı için yoğuşma sıcaklığının düşmesiyle arttığı görülmektedir.



Şekil 3. -7 °C sabit buharlaşma sıcaklığında farklı yoğuşma sıcaklıkları için COP değerlerinin nanoparçacık hacimsel oranı ile değişimi (Variation of COP values with the nanoparticle volumetric ratio for various condensation temperatures at -7 °C constant evaporation temperature).



Şekil 4.  $-7$  °C sabit buharlaşma sıcaklığında farklı yoğuşma sıcaklıkları için ekserji veriminin nanoparçacık hacimsel oranı ile değişimi (Variation of exergy efficiency with the nanoparticle volumetric ratio for various condensation temperatures at  $-7$  °C constant evaporation temperature).



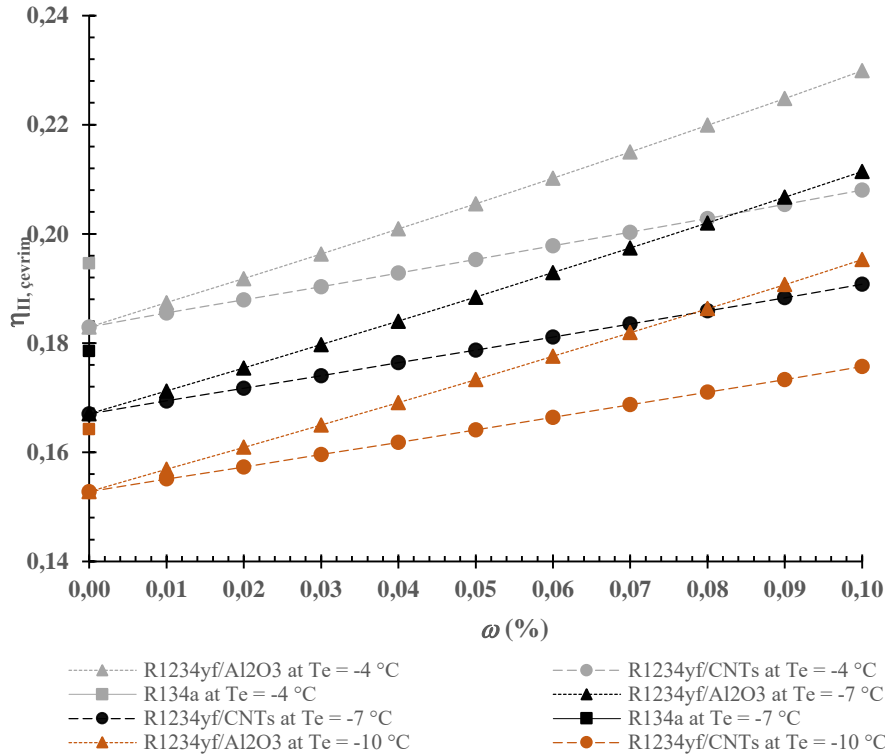
Şekil 5.  $45$  °C sabit yoğuşma sıcaklığında farklı buharlaşma sıcaklıkları için COP değerlerinin nanoparçacık hacimsel oranı ile değişimi (Variation of COP values with the nanoparticle volumetric ratio for various evaporation temperatures at  $45$  °C constant condensation temperature).

Şekil 5'te, 45 °C sabit yoğuşma sıcaklığına karşın farklı buharlaşma sıcaklıkları için R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve R1234yf/CNTs nanoşutucu akışkanlarının farklı parçacık hacimsel oranlarındaki COP değerleri gösterilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi tüm durumlarda; nanoparçacık ilavesi, COP değerini artırmaktadır. Bu artış, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için CNT'ye kıyasla daha yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir. Benzer şekilde, 45 °C sabit yoğuşma sıcaklığına karşın farklı buharlaşma sıcaklıkları için R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve R1234yf/CNTs'nin farklı parçacık hacimsel oranlarındaki ekserji verimleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi tüm durumlarda; nanoparçacık ilavesi, ekserji verimini artırmaktadır. Bu artış, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için CNT'ye kıyasla yine daha yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir. Şekil 5'te yer alan COP değerlerinin ve Şekil 6'da yer alan ekserji verimi değerlerinin, aynı yoğuşma sıcaklığı için buharlaşma sıcaklığının yükselmesiyle arttığı görülmektedir.

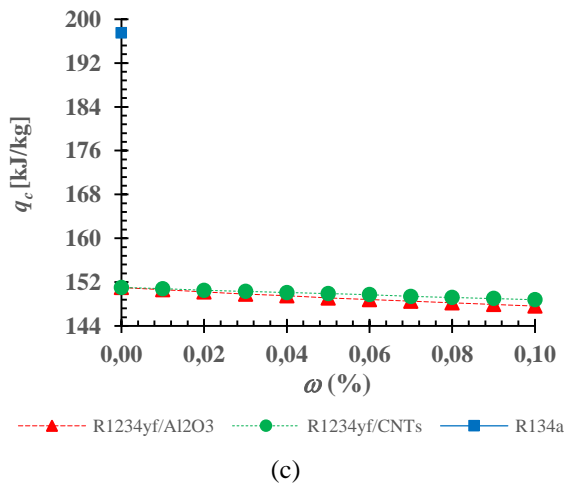
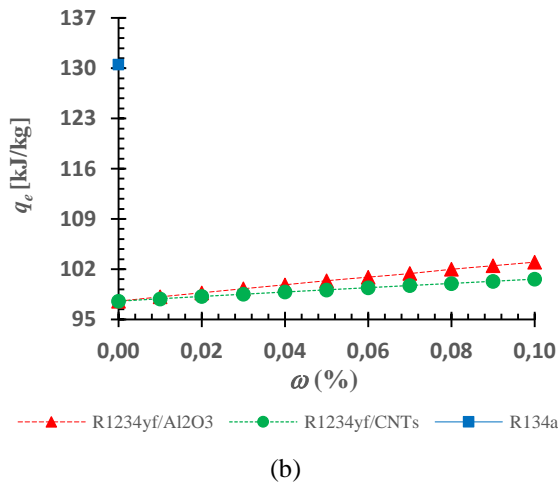
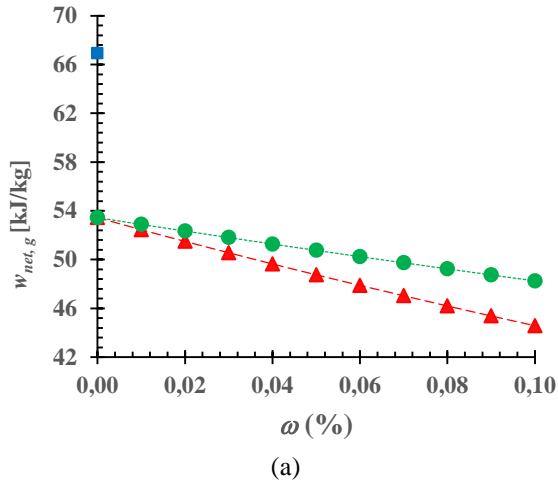
Şekil 3 ve Şekil 5 incelendiğinde COP değerinde, Şekil 4 ve Şekil 6 incelendiğinde ise ekserji veriminde; her iki nanoparçacık için de yaklaşık olarak %0.05 hacimsel oranından itibaren, R134a'nın tek başına kullanıldığı sisteme göre artışın başladığı ve bu artışın, en fazla %18 seviyesine kadar çıktığı

görülmektedir. Böylece, R1234yf'nin tek başına kullanıldığı durumda R134a'ya göre ortaya çıkan ve COP için %6.46, ekserji verimi için ise %6.44 olan performans düşüşlerinin telafi edilebileceği, hatta artış sağlanabileceği görülmektedir.

Analizler neticesinde, nanoparçacık ilavesinin her durumda COP değerinde ve ekserji veriminde artış sağladığı görülmüştür. Değerlendirmeleri kolaylaştırmak ve henüz yeni sayılabilecek nanoşutucu akışkan uygulaması sonuçlarını daha doğru yorumlayabilmek için incelemeler detaylandırılmıştır. Bu kapsamda; sabit buharlaşma (-7 °C) ve sabit yoğuşma (45 °C) sıcaklıkları için, birim akışkan kütlesi başına kompresör enerji tüketimi, buharlaştırıcıdaki ısı geçişi (soğutma etkisi) ve yoğuşturucudaki ısı geçişinin (ısıtma etkisi) nanoparçacık hacimsel oranı ile değişimi incelenmiş ve sonuçlar Şekil 7'de gösterilmiştir. Buna göre; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparçacığının ilavesi daha etkin olmakla birlikte, nanoparçacık hacimsel oranının artmasıyla kompresör enerji tüketimi ve yoğuşturucudaki ısı geçişi azalmakta, buna karşın soğutma etkisi artmaktadır. Bu durum, soğutma sistemleri için oldukça önemlidir.



Şekil 6. 45 °C sabit yoğuşma sıcaklığında farklı buharlaşma sıcaklıkları için ekserji veriminin nanoparçacık hacimsel oranı ile değişimi (Variation of exergy efficiency with the nanoparticle volumetric ratio for various evaporation temperatures at 45 °C constant condensation temperature).



Şekil 7. Sabit yoğuşma ve buharlaşma sıcaklıklarında nanoparçacık hacimsel karışım oranına bağlı olarak a) Kompresör enerji tüketimi, b) Soğutma etkisi ve c) Yoğuşturucudaki ısı geçişi (Depending on the nanoparticle volumetric concentration at constant condensation and evaporation temperatures a) Compressor energy consumption, b) Cooling effect and c) Heat transfer in condenser).

#### 4. DEĞERLENDİRME (CONCLUSION)

Bu çalışmada; ideal bir BSSÇ, termodinamiğin I. ve II. kanunu bakımından teorik olarak incelenmiştir. İncelemelerde öncelikle iş akışkanı olarak tek başına R134a ele alınmış, enerji ve ekserji bakımından analiz edilmiştir. Ardından çevrim aynı şartlarda tek başına R1234yf için analiz edilmiş ve bu iki akışkan performans kriterleri bakımından karşılaştırılmıştır. Çalışmada, R1234yf'nin kullanılması durumunda performans düşüşü saptanmış ve bu performans düşüşünün, R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> veya R1234yf/CNTs nanoşutucu akışkanlarının kullanımıyla önlenebileceği öngörülmüştür. R134a ve R1234yf'nin tek başlarına kullanımı ile R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve R1234yf/CNTs'nin kullanımının, termodinamiğin I. ve II. yasaları bakımından mukayese edildiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- R134a yerine tek başına R1234yf kullanımı, sistemin COP değerinde ve ekserji veriminde düşüşe neden olmaktadır. Bu düşüş miktarları, incelenen farklı buharlaşma ve yoğuşma sıcaklıkları için COP değerinde %3.24 ila %7.99 ve ekserji veriminde %3.25 ila %7.90 aralığında hesaplanmıştır.

- Beklendiği gibi, sabit buharlaşma sıcaklığında, yoğuşma sıcaklığının mümkün olduğunca düşük tutulması, sistem performansını artırmaktadır.

- Yine beklediği gibi, sabit yoğuşma sıcaklığında, buharlaşma sıcaklığının mümkün olduğunca yüksek tutulması, sistem performansını artırmaktadır.

- R1234yf/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve R1234yf/CNTs nanoşutucu akışkanlarının kullanımı sistemin performansını iyileştirmektedir. Bu iyileşme, R134a'nın tek başına kullanımına kıyasla COP değeri ve ekserji verimi için sırasıyla, R1234yf/%0.1Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanımında %18.46 ve %18.43; R1234yf/%0.1CNTs kullanımında ise %6.92 ve %6.89 olmaktadır. Bu artışlar, kıyaslanmanın R1234yf'nin tek başına kullanılması durumu için yapılırsa, R1234yf/%0.1Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanımında %26.64 ve %26.59; R1234yf/%0.1CNTs kullanımında ise %14.31 ve %14.25 gibi çok daha yüksek oranlarda gerçekleşmektedir.

- Nanoparçacık hacimsel oranı arttıkça COP değeri ve ekserji verimi de artmaktadır.

- Nanoparçacık hacimsel oranı arttıkça kompresör enerji tüketimi azalmaktadır.

- Nanoparçacık hacimsel oranı arttıkça soğutma etkisi artmaktadır.
- Kompresör enerji tüketimindeki azalma miktarı, soğutma etkisindeki artış miktarından fazla olduğundan, nanoparçacık hacimsel oranı arttıkça yoğuşturucudaki ısı geçişi düşmektedir.
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesi CNT ilavesine göre, COP değeri ve ekserji verimi bakımından daha yüksek bir artış sağlamaktadır. Bu durum, çalışma kapsamındaki tüm analizler için geçerlidir.

Özetle bu teorik çalışmada; nanosoğutucu akışkan kavramına kapsamlı bir bakış sunulmuş, pratik bir yaklaşımla bir BSSS için ortaya somut veriler konmuştur. Nanosoğutucu akışkanların, BSSS'lerde kullanılmaya değer bir konumda oldukları anlaşılmıştır. Ancak yine de nanosoğutucu akışkanlar konusu araştırılmaya muhtaçtır. Önemli öngörüler kazandırabilen teorik çalışmalar deneysel çalışmalarla desteklenmelidir. Ayrıca, daha fazla sayıda alternatif soğutucu akışkan ve nanoparçacık için çalışmalar yapılmalıdır. Bu teorik çalışma; termodinamik özellikleri hakkında literatürde kısıtlı bilgi bulunan nanosoğutucu akışkanların BSSS'ler için önemli bir potansiyele sahip olduklarını göstermektedir. Araştırmacıların bu potansiyelden yararlanmaları soğutma uygulamaları açısından önem arz etmektedir. Gelecek çalışmalarda; BSSS'lerde tek tür nanoparçacık kullanımının yanı sıra birden fazla türde nanoparçacık (hibrit) kullanımının incelenmesinin araştırılmaya değer olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, R134a gibi soğutucu akışkanlara alternatif olan R1234yf haricindeki soğutucu akışkanların da nanosoğutucu olarak kullanılmasına yönelik çalışmaların yapılması önerilmektedir.

#### SİMGELER (SYMBOLS)

$h$	: Özgül entalpi	[kJ/kg]
$P$	: Basınç	[kPa]
$q$	: Isı geçişi	[kJ/kg]
$s$	: Özgül entropi	[kJ/(kg K)]
$T$	: Sıcaklık	[°C] veya [K]
$w$	: Özgül iş	[kJ/kg]

#### Yunan simgeleri (Greek symbols)

$\rho$	: Yoğunluk	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\nu$	: Özgül hacim	[m <sup>3</sup> /kg]
$\omega$	: Hacimsel oran	[%]
$\eta$	: Verim	[%]

#### Alt indisler (Subscripts)

$c$	: Yoğuşturucu
$e$	: Buharlaştırıcı
$g$	: Giren
$H$	: Yüksek
$izen$	: İzentropik
$L$	: Düşük
$np$	: Nanoparçacık
$nr$	: Nanosoğutucu akışkan
$pr$	: Yalın haldeki soğutucu akışkan

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışmada yazarları, '1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı' kapsamındaki 119M074 numaralı proje ile destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Regulation (EU) No. 517/2014 of the European Parliament and of the Council on Fluorinated Greenhouse Gases and Repealing Regulation (EC) No. 842/2006.
- [2] A.G. Devecioğlu and V. Oruç, "Characteristics of some new generation refrigerants with low GWP," *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1452-1457, 2015. doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.258
- [3] A.G. Devecioğlu and V. Oruç, "A comparative energetic analysis for some low-GWP refrigerants as R134a replacements in various vapor compression refrigeration systems," *Journal of Thermal Science and Technology*, vol. 38, no. 2, pp. 51-61, 2018.
- [4] M. Rashed, O. Huzayyin, M.A. Kassem, and S. Kaseb, "A novel thermodynamic design model of a new HFO refrigerant single phase vapor jet cooling system," *International Journal of Refrigeration*; vol. 110, pp. 153-167, 2020. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2019.10.029
- [5] L.P.M. Colombo, A. Lucchini, and L. Molinaroli, "Experimental analysis of the use of R1234yf and R1234ze(E) as drop-in alternatives of R134a in a water-to-water heat pump," *International Journal of Refrigeration*, 115, pp. 18-27, 2020. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.03.004



- [6] Z. Li, K. Liang, and H. Jiang, "Experimental study of R1234yf as a drop-in replacement for R134a in an oil free refrigeration system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 153, pp. 646-654, 2019. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.050
- [7] H.E.A.S. Mohamed, K. Bilen, K. Dağdır, and E. Arcaklıoğlu, "Investigation of the effect of nanorefrigerants on performance of the vapor compression refrigeration cycle: A review study," *1<sup>st</sup> International Conference on Advances in Mechanical and Mechatronics Engineering (ICAMMEN)*, pp. 79-87, 8-9 November, Ankara/Turkey, 2018.
- [8] A. Bhattad, J. Sarkar, and P. Ghosh, "Improving the performance of refrigeration systems by using nanofluids: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3656-3669, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2017.10.097
- [9] S.S. Sanukrishna, M. Murukan, and P.M. Jose, "An overview of experimental studies on nanorefrigerants: Recent research, development and applications," *International Journal of Refrigeration*, vol. 88, pp. 552-577, 2018. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2018.03.013
- [10] A. Kasaeian, S.M. Hosseini, M. Sheikhpour, O. Mahian, W.M. Yan, and S. Wongwises, "Applications of eco-friendly refrigerants and nanorefrigerants: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 96, pp. 91-99, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2018.07.033
- [11] O.O. Ajayi, D.E. Ukasoanya, M. Ogbonnaya, E.Y. Salawu, I.P. Okokpujie, S.A. Akinlabi, E.T. Akinlabi, and F.T. Owoeye, "Investigation of the effect of R134a/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-nanofluid on the performance of a domestic vapour compression refrigeration system," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 112-117, 2019. doi: 10.1016/j.promfg.2019.05.012
- [12] D.S. Adelekan, O.S. Ohunakin, J. Gill, I.P. Okokpujie, and O.E. Atiba, "Performance of an iso-butane driven domestic refrigerator infused with various concentrations of graphene based nanolubricants," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 1146-1151, 2019. doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.069
- [13] D.S. Adelekan, O.S. Ohunakin, J. Gill, O.E. Atiba, I.P. Okokpujie, and A.A. Atayero, "Experimental investigation of a vapour compression refrigeration system with 15 nm TiO<sub>2</sub>-R600a nano-refrigerant as the working fluid," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp.1222-1227, 2019. doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.079
- [14] G. Jatinder, O.S. Ohunakin, D.S. Adelekan, O.E. Atiba, A.B. Daniel, J. Singh, and A.A. Atayero, "Performance of a domestic refrigerator using selected hydrocarbon working fluids and TiO<sub>2</sub>-MO nanolubricant," *Applied Thermal Engineering*, vol. 160 (114004), pp. 1-12, 2019. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114004
- [15] T.O. Babarinde, S.A. Akinlabi, and D.M. Madyira, "Energy performance evaluation of R600a/MWCNT-nanolubricant as a drop-in replacement for R134a in household refrigerator system," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 639-647, 2020. doi: 10.1016/j.egyr.2019.11.132
- [16] T.O. Babarinde, S.A. Akinlabi, D.M. Madyira, and F.M. Ekundayo, "Enhancing the energy efficiency of vapour compression refrigerator system using R600a with graphene nanolubricant," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1-10, 2020. doi: 10.1016/j.egyr.2019.11.031
- [17] M.R. Salem, "Performance enhancement of a vapor compression refrigeration system using R134a/MWCNT-oil mixture and liquid-suction heat exchanger equipped with twisted tape turbulator," *International Journal of Refrigeration*, vol. 120, pp. 357-369, 2020. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.09.009
- [18] V. Nair, A.D. Parekh, and P.R. Tailor, "Experimental investigation of a vapour compression refrigeration system using R134a/Nano-oil mixture," *International Journal of Refrigeration*, vol. 112, pp. 21-36, 2020. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2019.12.009
- [19] K. Mohan, S. Sundararaj, K.G. Kannan, and A. Kannan, "Experimental analysis on refrigeration system using CNT, gold & HAuCl<sub>4</sub> nano fluids," *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, pp. 360-366, 2020. doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.156
- [20] S.S. Chauhan, "Performance evaluation of ice plant operating on R134a blended with varied concentration of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>/PAG composite nanolubricant by experimental approach," *International Journal of Refrigeration*, vol. 113, pp. 196-205, 2020. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.01.021
- [21] D.F.M. Pico, L.R.R. Silva, O.S.H. Mendoza, and E.P.B. Filho, "Experimental study on thermal and tribological performance of diamond nanolubricants

applied to a refrigeration system using R32,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 152 (119493). pp. 1-11, 2020.

doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119493

[22] D.S. Adelekan, O.S. Ohunakin, M.H. Oladeinde, G. Jatinder, O.E. Atiba, M.O. Nkiko, and A.A. Atayero, “Performance of a domestic refrigerator in varying ambient temperatures, concentrations of TiO<sub>2</sub> nanolubricants and R600a refrigerant charges,” *Heliyon*, vol. 7 (e06156), pp. 1-13, 2021.

doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06156

[23] Y. Joshi, D. Zanwar, and S. Joshi, “Performance investigation of vapor compression refrigeration system using R134a and R600a refrigerants and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle based suspension,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 1511-1519, 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.732

[24] A. Senthilkumar and A. Anderson, “Experimental investigation of SiO<sub>2</sub> nanolubricants for R410A vapour compression refrigeration system,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 3613-3617, 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.659

[25] M. Devarajan, N.P. Krishnamurthy, M. Balasubramanian, B. Ramani, S. Wongwises, K.A. El-Naby, and R. Sathyamurthy, “Thermophysical properties of CNT and CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrid nanofluid,” *Micro & Nano Letters*, vol. 13, pp. 617-621, 2018. doi: 10.1049/mnl.2017.0029

[26] M. Aktas, A.S. Dalkilic, A. Celen, A. Cebi, O. Mahian, and S. Wongwises, “A theoretical comparative study on nanorefrigerant performance in a single-stage vapor-compression refrigeration cycle,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 1-12, 2015.

[27] V.P.S. Kumar, A. Baskaran, and K.M. Subramanian, “A performance study of vapour compression refrigeration system using ZrO<sub>2</sub> nano particle with R134a and R152a,” *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 6, no. 12, 410-421, 2016.

This is an open access article under the CC-BY license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



# Parametre Kestirimi Newton-Raphson Yöntemiyle Yapılan MATLAB/GUI Tabanlı Fotovoltaik Sistem Simülatörü

İbrahim BULDU<sup>a</sup>, Mustafa Ergin ŞAHİN<sup>b</sup>

<sup>a</sup> RTE Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 53100, Rize, Türkiye

<sup>b</sup> RTE Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 53100, Rize, Türkiye

## MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 23.05.2021  
Kabul: 09.11.2021

### Anahtar Kelimeler:

Fotovoltaik güneş pili,  
Fotovoltaik güneş pili  
modülü ve modelleri,  
MATLAB GUI  
simülasyonu,  
Newton-Raphson  
metodu

## ÖZ

Bu çalışmada ilk olarak güneş pilinin çalışma prensibi, bileşenleri ve bağlantı şekilleri ile eşdeğer devre modeli çıkarımı incelenmiştir. Fotovoltaik (FV) güneş pili modülü genel eşdeğer devre modeli matematiksel denklemleri MATLAB programına uyarlanmıştır. Güneş pilinin akım denklemi çözümü için Newton-Raphson yöntemi kullanılarak MATLAB grafiksel kullanıcı ara yüzü (GUI) ortamında bir ara yüz oluşturulmuştur. Kullanılan model güneş ışınımı ve sıcaklık gibi değişen çevresel koşulları da içerecek şekilde tasarlanmıştır. Oluşturulan ara yüz ile kullanıcı; ışınım, sıcaklık, seri direnç, ideallik faktörü ve seri-paralel bağlı hücre sayıları gibi parametreleri değiştirerek akım ile gerilim ( $I-V$ ) ve güç ile gerilim ( $P-V$ ) eğrilerini kolayca elde edebilmektedir. Bu çalışmada iki ayrı üretici firmaya ait güneş paneli verileri için farklı parametreler kullanılarak karakteristik eğriler elde edilmiştir. Ayrıca kullanıcı bu ara yüz sayesinde fotovoltaik hücrenin değişken değerlerini girerek maksimum akım ( $I_{mp}$ ), maksimum gerilim ( $V_{mp}$ ), maksimum güç ( $P_{mp}$ ), giriş gücü ( $P_{in}$ ), doldurma faktörü ( $DF$ ) ve verim ( $\eta$ ) gibi değerleri kolaylıkla elde edebilmektedir. Bu sayede bu alanda çalışanlar için kullanıcıya kolaylık sağlayan bir ara yüz geliştirilmiştir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.03>

## A MATLAB/GUI Based Photovoltaic System Simulator for Estimation of PV Parameter using Newton-Raphson Method

## ARTICLE INFO

Received: 23.05.2021  
Accepted: 09.11.2021

### Keywords:

Photovoltaic solar cell,  
Photovoltaic solar cell  
module and models,  
MATLAB GUI  
simulation,  
Newton Rapson  
method

## ABSTRACT

In this study, the working principle, components and connection types of the solar cell and the equivalent circuit model extraction were examined. The mathematical equations of the photovoltaic (PV) solar cell module general equivalent circuit model were adapted to the MATLAB software. An interface was created in the MATLAB GUI environment using the Newton-Raphson method to solve the current equation of the solar cell. The model used also includes changing environmental conditions such as solar radiation and temperature. With the interface created, the user; can quickly obtain Current-Voltage ( $I-V$ ) and Power-Voltage ( $P-V$ ) curves by changing parameters such as radiation, temperature, series resistance, ideality factor and number of cells connected in series-parallel. In this study, characteristic curves were obtained by using different parameters for the solar panel data of two other manufacturers. In addition, the user can quickly get values such as maximum current ( $I_{mp}$ ), maximum voltage ( $V_{mp}$ ), maximum power ( $P_{mp}$ ), input power ( $P_{in}$ ), filling factor ( $FF$ ) and efficiency ( $\eta$ ) by entering the variable values of the photovoltaic cell through this interface. In this way, an interface that provides convenience to the user has been developed for those working in this field.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.03>

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

\*Sorumlu yazar: [mustafaerginsahin@yahoo.com](mailto:mustafaerginsahin@yahoo.com)

To cite this article: İ. Buldu ve M.E. Şahin, "A MATLAB/GUI based photovoltaic system simulator for estimation of PV parameter using Newton-Raphson method", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 196-212, 2021.  
doi:10.30855/gmbd.2021.03.03

Günümüzde fosil yakıtların dışa bağımlı olması ve fosil yakıtların sınırlı kaynaklara sahip olması yanında küresel ısınma ve çevre kirliliğini arttırması gibi nedenlerden dolayı sürdürülebilir bir enerji kaynağı olmadığı görülmektedir. Fosil yakıtların neden olduğu sorunlar ve yok edilmesi için gerekli maliyetlerin çok yüksek olması, enerji üretiminde temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarını gündeme getirmiş ve yenilenebilir enerji kaynakları keşfedilmiştir [1]. Güneşten gelen enerji günümüzde ısı enerjisine dönüştürülerek yâda elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılmaktadır [2]. Güneş enerjisi ısı enerjisine dönüştürülürken “toplaçlar”; elektrik enerjisine dönüştürülürken de “güneş gözeleri- güneş pilleri” kullanılmaktadır [3].

Güneş gözeleri doğrudan güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirir. Bu sistemlerde güneş takip sistemi ve güç elektroniği dönüştürücüleri kullanılarak sürekli var olan en yüksek güneş enerjisi miktarı elde edilir. Günümüzde güneş enerjisinden elektrik elde edilen güneş elektrik santralleri (GES) ve güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren güneş panelleri giderek yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır [4]. Güneş panellerinin verimi pillerin iç dirençleri, üretildiği malzeme, kontak yapıları, ışık şiddeti ve sıcaklık değişimi gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple güneş pilleri ile ilgili yapılacak olan çalışmalarda daha doğru sonuçlara ulaşabilmek için bu değerlerin güneş pillerinin verimini nasıl etkileyeceğini ortaya koyacak bir model oluşturulması gerekir [5]. Günümüze ulaşan fotovoltaik hücre modellemesine ilişkin birçok bilimsel çalışma ortaya konmuş olup geliştirilen yeni FV sistemlerle ilgili araştırmalarda devam etmektedir [6-12].

Bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde FV hücre modellemesi için çeşitli varsayımlarda bulunduğu görülmektedir. Bu yaklaşımlar, tek diyotlu ve dirençli eşdeğer devre modeli, tek diyotlu ve iki dirençli eşdeğer devre modeli, iki diyotlu ve iki dirençli eşdeğer devre modelleridir [13-18]. Tek diyotlu olan model üstel olarak ifade edilmekte ve tek üstel ifade içermekte, iki diyotlu olan model ise çift üstel model olarak bilinmektedir. Tek diyotlu model iki diyotlu modele göre daha basit olduğundan benzetim çalışmaları için daha kapsamlı bir kullanımı vardır. Ancak iki diyotlu olan modelde, çift üstel ifade bulunduğundan sıcaklık ve ışıma bağlı parametrelerin bulunması daha zordur ancak daha doğru sonuç verir [19].

Literatüre bakıldığında Bayındır ve diğerleri tarafından yapılan benzer çalışmada güneş paneline

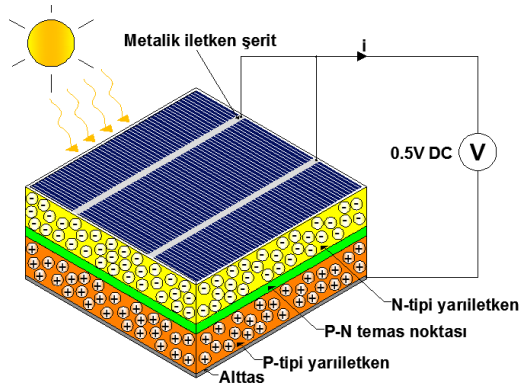
MATLAB/Simulink programı ile modelleme yapılarak MATLAB/GUI ile bir kullanıcı ara yüzü oluşturulmuş, ancak bu çalışmada sadece ışıma ve sıcaklık parametreleri değiştirilerek iki farklı fotovoltaik modüle ait karakteristik eğrileri çizdirilmiştir [17]. Şahin ve Okumuş’ un yaptığı çalışmada ise güneş modülünün karakteristik eğrileri farklı parametreler için doğrulanmıştır, ancak kullanıcıların değişimini görmek istediği parametre için kod üzerinden ilgili parametreyi değiştirmesi gerekmektedir [20]. Türkmenoğlu ve Güngör tarafından MATLAB/Simulink ve MATLAB/GUI ortamında ile aynı özelliklere sahip güneş pili modellenmiş ve her iki sistemde de ışıma ve sıcaklık değeri, seri ve paralel direnç ve hücre sayıları gibi etkenleri değiştirerek FV hücre ve modül karakteristiklerinin incelendiğini söylemişler ancak MATLAB/Simulink modelinde sadece 1000 W/m<sup>2</sup> radyasyon, 25°C sabit sıcaklık, 0.001 Ω seri direnç ve 1000 Ω paralel direnç değerleri için FV hücre, modül ve dizinin karakteristik eğrileri gösterilmiştir. MATLAB/GUI modelinde ise aynı parametre değerlerinde yalnız FV hücrenin karakteristik eğrileri verilmiştir [12]. Eteiba ve arkadaşları yaptıkları çalışmada FV hücre, modül ve dizi simülasyonu için MATLAB/GUI ara yüzü oluşturmuş, oluşturulan ara yüz ile farklı ışıma ve sıcaklık değerleri değiştirilerek karakteristik eğrileri elde edilmiş ancak diğer parametrelerin değişimi incelenmemiştir [21].

Yapılan çalışmada ise; öncelikle güneş pillerinin yapısı, matematiksel denklemleri ve eşdeğer devre modeli verilmiştir. Tek diyotlu fotovoltaik pilin basitleştirilmiş eşdeğer devresi üzerinden güneş pilinin genel matematiksel benzetim modeli MATLAB programına uyarlanmış ve modele ilişkin bir arayüz tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu arayüz kullanıcıya kolaylık sağlayan ve grafiksel bir arayüz yapısına sahip olan MATLAB/GUI programında hazırlanmıştır. Bu arayüz ile kullanıcı seri ve paralel hücre sayısı ile sıcaklık değerleri, güneş ışımasını gibi güneş pili parametrelerine göre *I-V* ve *P-V* eğrilerini kolay ve hızlı bir şekilde inceleyebilir. Yine kullanıcı bu arayüz sayesinde fotovoltaik hücre değişken değerlerini girerek maksimum akım ( $I_{mp}$ ), maksimum gerilim ( $V_{mp}$ ), maksimum güç ( $P_{mp}$ ), giriş gücü ( $P_{in}$ ), doldurma faktörü ( $DF$ ) ve verim ( $\eta$ ) değerlerini kolayca elde edebilir. Bu arayüz ile bu alanda çalışan öğrenci, araştırmacıların ve panel üreticilerinin hiçbir kod veya program yazmaya gerek duymadan istediği değişkeni değiştirip fotovoltaik hücre karakteristik eğrilerini ve ilgili değerleri hızlı ve kolay bir biçimde elde etmesi amaçlanmıştır.

## 2. GÜNEŞ PİLİNİN YAPISI, MATEMATİKSEL MODELİ ÇIKARIMI VE EŞDEĞER DEVRESİ (STRUCTURE OF PV, MATHEMATICAL MODEL TAKE OUT AND EQUIVALENT CIRCUIT)

### 2.1. Güneş Piliinin Çalışma Prensibi (Working Principle of Solar Cell)

Bilindiği üzere, güneş pilleri üzerine düşen güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren bir p-n yarıiletken aygıttır. Güneş pilleri katmanlı yapıda olup üst katman optik pencere katmanı, alt katman ise temel katman olarak adlandırılır. Güneşten gelen ışık tanecikleri (fotonlar) optik pencere tarafından soğrulmaktadır. Soğrulmuş fotonlar atomlara çarparak elektron boşluk çifti oluşturmaktadır. Elektronlar p-n eklem bölgesinde oluşan elektriksel alanın etkisiyle geçide doğru sürüklenmektedir. Geçitte oluşan elektriksel alanın yönü azınlık yük taşıyıcılarının (p-tipi malzeme için azınlık yük taşıyıcısı elektronlar, n-tipi malzeme için azınlık yük taşıyıcısı boşluklar) geçide doğru hareketi yönündedir. Bu süreç esnasında geçitten geçen yük taşıyıcıları fotovoltaiik akım ve gerilim oluşturmaktadır. Bu fotovoltaiik değerlerden üretilen akımı soğurucu bölge, üretilebilecek gerilimi ise geçitte oluşan engel geriliminin yüksekliği belirler. Şekil 1 fotovoltaiik güneş pilinin çalışma prensibini göstermektedir.



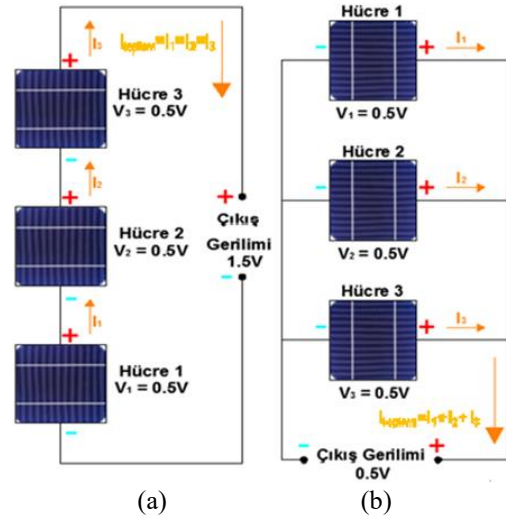
Şekil 1. Güneş pilinin çalışma prensibi (Working principle of solar cell)

### 2.2. FV Sistem Bileşenleri ve Bağlantı Çeşitleri (PV System Components and Connection Types)

Bir güneş hücresi çıkışında yaklaşık olarak 0.5 Volt civarında bir gerilim üretir [22]. Elde edilen gerilim yada akım çıkışını arttırmak ve daha fazla güç elde etmek için hücreler seri veya paralel bağlanarak güneş pili modülleri, modüller bir araya getirilerek güneş panelleri ve çok sayıda panelin birleştirilmesi ile daha büyük yüzeyli güneş dizileri elde edilebilir [23].

Hücrelerin seri bağlanması bir hücrenin pozitif (+) yönünün, diğer hücrenin negatif (-) yönü ile bağlanmasıyla Şekil 2(a) da ki gibi gerçekleştirilir. Üretilen akım tek bir yoldan gideceği için ilk hücredeki akım ikinci ve üçüncü

hücrelerin de üzerinden aynı şekilde geçer. Dolayısıyla güneş hücreleri seri bağlandıklarında sadece toplam gerilim artmış olur. Burada üretilen akım ise sabittir ve devrenin her yerinde aynı değerdedir [24]. Panellerin seri bağlanmasının dezavantajı, panellerin herhangi birinde kısmen gölgede kalma durumunda olduğu gibi bir aksama, panellerin tümü etkilenmişçesine sistem performansını olumsuz etkileyecektir [25]. Paralel bağlama ise bir hücrenin pozitif (+) kısmının, diğer hücrenin pozitif (+) kısmına, negatif (-) kısmının ise diğer hücrenin negatif (-) kısmına bağlanmasıyla Şekil 2(b) deki gibi gerçekleştirilir. Burada üretilen elektrik akımı tek bir yolu takip etmez. Kaynakların birbirlerine paralel bağlandığı durumda akım artarken, gerilim ise sabit kalır. Sistemden elde edilmek istenen akımın artması için hücrelerin veya panellerin birbirlerine paralel bağlanması gerekmektedir [21, 24].



Şekil 2. Güneş pillerinin, (a) seri ve (b) paralel bağlanması (Series (a) and parallel (b) connection of solar cells) [21]

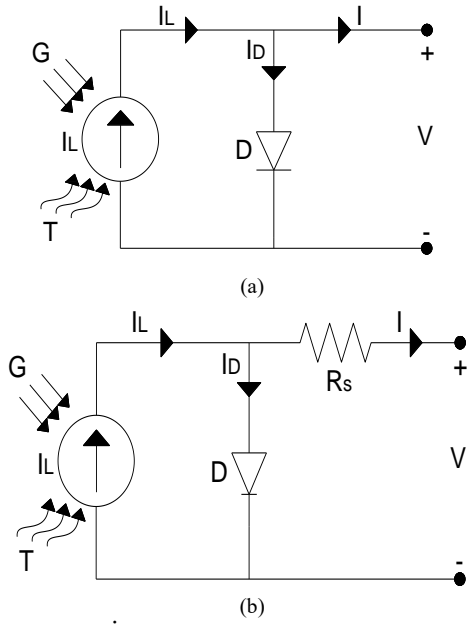
### 2.3. Güneş Pili Modeli ve Eşdeğer Devresi (Solar Cell Model and Equivalent Circuit)

Güneş pilleri karanlık ortamda aktif olan bir aygıt değildir ve bir diyot gibi çalışır. Herhangi bir akım yada gerilim üretemez. Buna rağmen dışardan bir gerilim kaynağına bağlanırsa bir  $I_D$  akımı üretir, bu akım diyot akımı veya karanlık akımı olarak bilinir [26].

Bir güneş hücresinin I-V karakteristik eğrisi Shockley diyot eşitliği ile Eşitlik 1'deki gibi ifade edilir.

$$I_D = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Burada  $I_s$  karanlık doyum akımı,  $q$  elektron yükü,  $V$  diyot gerilimi,  $k$  Boltzmann sabiti,  $T$  güneş pilinin sıcaklığıdır.



Şekil 3. (a) İdeal diyot modeli, (b) Basitleştirilmiş eşdeğer devre modeli ((a) *Ideal diode model*, (b) *simplified equivalent circuit model*) [6]

Net akım ( $I$ ), fotoakım ( $I_L$ ) ile diyot akımı ( $I_D$ ) arasındaki farka eşittir ve net akımın ifadesi Eşitlik 2'deki gibidir. Burada  $n$  ideallik faktörü ve  $R_s$  seri direnç olup güneş pilinin özelliğine göre bu parametreler değişmektedir. Eşitlik 3,  $V_t$  termal gerilimini ifade etmektedir.

$$I = I_L - I_D = I_L - I_s \left[ \exp\left(\frac{(q(V + R_s \cdot I))}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

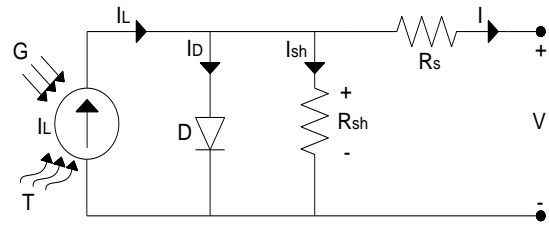
$$V_t = \frac{n \cdot k \cdot T}{q} \quad (3)$$

$I_s$  karanlık doyum akımı olup sıcaklığa bağlı ifadesi verilecek olursa [27];

$$I_s = I_{s(T_1)} \cdot \left(\frac{T}{T_1}\right)^{\frac{3}{n}} \cdot e^{-qE_g/nk(1/T-1/T_1)} \quad (4)$$

$$I_{s(T_1)} = I_{SC(T_1)} / (e^{qV_{OC(T_1)}/nkT_1} - 1) \quad (5)$$

Kullanılan model güneş ışınımı ve sıcaklık değişimi gibi güneş pilinin verimini etkileyecek parametreleri de içeren genel güneş pili eşdeğer devre modelidir. Bu model Şekil 4'te gösterildiği gibi bir akım kaynağı ( $I_L$ ), buna paralel bağlı bir diyot ve direnç ( $R_{sh}$ ) ve bir seri dirençten ( $R_s$ ) oluşmaktadır.



Şekil 4. Güneş pili eşdeğer devre modeli (*Solar cell equivalent circuit model*) [6]

Eşitlik 4 ve 5'te T1 güneş pilinin referans hücresel çalışma sıcaklığıdır. Şekil 4'teki güneş pili eşdeğer devre modeline göre net akım ifadesi verilecek olursa:

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (6)$$

$$I_D = I_s \left[ \exp\left(\frac{(q(V + R_s \cdot I))}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (7)$$

$$I_{sh} = \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (8)$$

$$I = I_L - I_s \left[ \exp\left(\frac{(q(V + R_s \cdot I))}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (9)$$

Burada  $R_{sh}$  paralel direnç olup güneş pilinin özelliğine göre değişen bir parametredir. Güneş pilinin gerilim ifadesi Eşitlik 9 kullanılarak gerekli matematiksel işlemler yapırsa Eşitlik 10'daki gibi yazılabilir. Burada paralel direnç ( $R_{sh}$ ) ihmal edilmiştir.

$$V = \frac{n \cdot k \cdot T}{q} \ln \left[ \frac{I_L + I_s - I}{I_s} \right] - R_s \cdot I \quad (10)$$

Güneş pili eşdeğer devre modelindeki seri direnç ( $R_s$ ) yüke aktarılan akımdan kaynaklı güneş pilinin kayıplarını ifade eder ve maksimum güç üretimi için küçük olmalıdır. Bu diyota paralel bağlı ( $R_{sh}$ ) direnci ise toprağa aktarılan kaçak akımlardan kaynaklı güç kayıplarını gösterir ve çok küçük değerli olduğundan dolayı genelde ihmal edilir [20]. Maksimum güç ( $P_{max}$ ) Eşitlik 11'deki gibi yazılabilir.

$$P_{max} = V_{opt} \cdot I_{opt} \quad (11)$$

Güneş pilinin verimi ise güneş piline aktarılan güç ile güneşten soğrulan ışık gücü arasındaki oran olup ve Eşitlik 12'de gibi verilmiştir. Bu eşitlikte  $G$  ışınım şiddeti,  $A$  ise hücrenin kesit alanıdır.

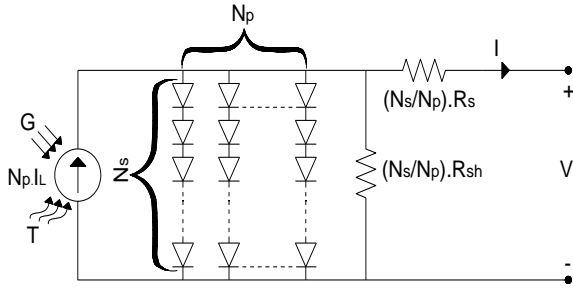
$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{opt} \cdot I_{opt}}{G \cdot A} \quad (12)$$

Diğer bir parametre ise doldurma faktörüdür ve Eşitlik 13'teki gibi yazılabilir.

$$DF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_{opt} \cdot I_{opt}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (13)$$

Eşitlik 14'de güneş pilinin hücrese çalışma sıcaklığı ( $T$ ) ve güneş ışığı soğrulması ( $G$ ) ye bağlı akım ifadesi verilmiştir Burada  $K_1$  kısa devre akımı için sıcaklık katsayıdır. Bir diğer parametre ise rüzgâr hızı olup daha önce yapılan çalışmalarda 1-3 m/s aralığında seçilmiş olup ihmal edilebilir değerdedir [20, 28].

$$I_L = [I_{sc} + K_1(T - T_{ref})] \cdot G \quad (14)$$



Şekil 5. Güneş pili modülünün genel eşdeğer devre modeli (General equivalent circuit model for solar cell module).

Eşdeğer devre modelinde yer alan seri hücre sayısı ( $N_s$ ) ve paralel hücre sayısı ( $N_p$ ) olarak alınıp Eşitlik 9'a uyarlanırsa oluşan bu model için toplam akım ifadesi Eşitlik 15'teki gibi elde edilir [29].

$$I = N_p \cdot I_L - N_p \cdot I_s \left[ \exp \left( q \cdot \frac{\left( \frac{V}{N_s} + \frac{I \cdot R_s}{N_p} \right)}{k \cdot T_C \cdot A} \right) - 1 \right] - \frac{\left( \frac{N_p \cdot V}{N_s} + I \cdot R_s \right)}{R_{SH}} \quad (15)$$

Güneş pili eşdeğer devresindeki  $R_s$  direnci  $R_{sh}$  direncine göre çok daha küçük değerli olduğu için  $R_{sh}$  direnci  $R_s$  direnci yanında çok büyük ( $\infty$ ) yani açık devre gibi düşünülerek ve toplam modül akımı ( $I$ ) Eşitlik 16'daki gibi yazılabilir.

$$I = N_p \cdot I_L - N_p \cdot I_s \left[ \exp \left( q \cdot \frac{\left( \frac{V}{N_s} + \frac{I \cdot R_s}{N_p} \right)}{k \cdot T_C \cdot A} \right) - 1 \right] \quad (16)$$

Eşitlik 16'da  $V = V_{FV}$ ,  $I = I_{FV}$ ,  $A = n$  ve  $T_C = T$  ifadeleri yerine yazılarak toplam modül için çıkış gerilimi ( $V_{FV}$ ) Eşitlik 17'deki gibi olur.

$$V_{FV} = \frac{N_s \cdot n \cdot k \cdot T}{q} \ln \left[ \frac{(I_L + I_s) N_p - I_{FV}}{I_s \cdot N_p} \right] - \frac{N_s}{N_p} R_s \cdot I_{FV} \quad (17)$$

Eşitlik 14'teki ifade, Eşitlik 17'de yerine yazılacak olursa güneş pili modülünün gerilim ifadesi Eşitlik 18'deki gibi olur.

$$V_{FV} = \frac{N_s \cdot n \cdot k \cdot T}{q} \ln \left[ \frac{\left( (I_{sc} + K_1(T - T_{ref})) G + I_s \right) N_p - I_{FV}}{I_s \cdot N_p} \right] - \frac{N_s}{N_p} R_s \cdot I_{FV} \quad (18)$$

### 3. FV HÜCRE ÇIKIŞ AKIMININ NEWTON-RAPHSON YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI (CALCULATION OF PV CELL OUTPUT CURRENT BY NEWTON-RAPHSON METHOD)

Newton-Raphson yöntemi lineer olmayan denklem sistemlerinin çözümü için kullanılır. Bu yöntem denklemlerin nümerik analizi için kullanılan en güçlü yöntemlerden birisidir. Güneş pilinin standart test koşulları altında I-V eğrisinin benzetimini elde etmek için verilen her bir gerilim değeri için akımının hesaplanması gerekir [21]. Güneş pilinin akım ve gerilimi arasındaki bağıntı Eşitlik 19'daki gibi lineer olmayan bir denklemle tanımlanır. Bu denklemin çözümü için Newton-Raphson yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin kullanılmasıyla hem pozitif hem de negatif akımların hızlı bir şekilde hesaplanması sağlanmıştır.

$$f(V, I) = N_p \cdot I_L - N_p \cdot I_s \left[ \exp \left( q \cdot \frac{\left( \frac{V}{N_s} + \frac{I \cdot R_s}{N_p} \right)}{k \cdot T_C \cdot A} \right) - 1 \right] - I = 0 \quad (19)$$

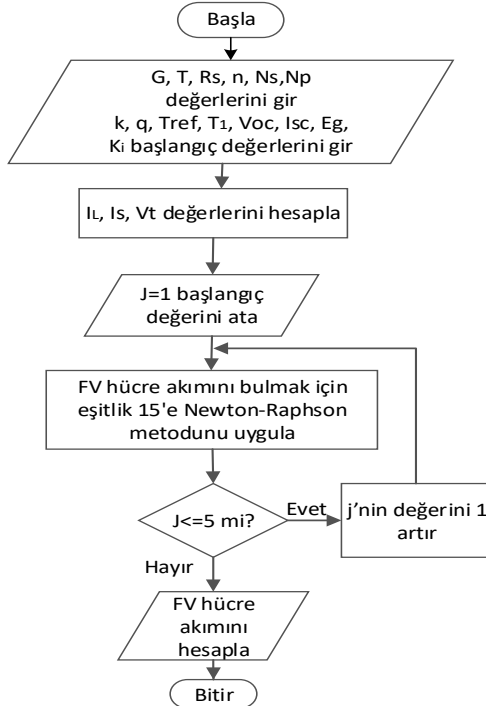
Eşitlik 19'daki denklem çözümü için aşağıda verilen iterasyon işlemi uygulanırsa:

$$I_{n+1} = I_n - \frac{f(V, I_n)}{\frac{df(V, I_n)}{dI}} \quad (20)$$

Eşitlik 16 kullanılarak, verilen hücre gerilimine karşılık gelen akım değeri Eşitlik 20'deki iterasyon işlemi ile bulunabilir

$$I_{FV(j)} = I_{FV} - \frac{N_p \cdot I_L - I_{FV} - N_p \cdot I_s \left[ \exp \left( q \cdot \frac{\left( \frac{V_{FV}}{N_s} + \frac{I_{FV} \cdot R_s}{N_p} \right)}{k \cdot T_c \cdot A} \right) - 1 \right]}{-1 - \frac{N_p \cdot I_s \cdot R_s \cdot q}{k \cdot T_c \cdot A} \left[ \exp \left( q \cdot \frac{\left( \frac{V_{FV}}{N_s} + \frac{I_{FV} \cdot R_s}{N_p} \right)}{k \cdot T_c \cdot A} \right) \right]} \quad (21)$$

FV hücre çıkış akımının Newton-Raphson tekniğiyle hesaplanışının akış diyagramı Şekil 6'da verilmiştir. Akış diyagramında görüldüğü üzere ilk olarak FV sistem sabitleri ve değişkenleri programa girilir ve programda fotoakım ( $I_L$ ), karanlık doyum akımı ( $I_s$ ) ve termal gerilim ( $V_T$ ) hesaplanır. FV hücre akımını hesaplamak için Eşitlik 16'ya for döngüsü içinde Newton Raphson metodu uygulanır ve bu işlem  $j=5$  olana kadar devam eder,  $j=5$  olunca hesaplanan FV hücre çıkış akım değeri simülasyon ekranında gösterilir. Burada literatüre yapılan farklı çalışmalar dikkate alınarak döngü sayısı beş olarak seçilmiştir [27, 30, 31].



Şekil 6. Hücre akımı hesaplaması için Newton Raphson yöntemi akış diyagramı (Newton Raphson method flow chart for cell current calculation).

### 3. MATLAB/GUI ORTAMINDA OLUŞTURULAN FV SİSTEM SİMÜLATÖRÜ (PV SYSTEM SIMULATOR CREATED IN MATLAB / GUI ENVIRONMENT)

#### 3.1. Güneş Pilinin MATLAB/GUI Arayüz Tasarımı (MATLAB/GUI Interface Design of Solar Cell)

Açılımı “Graphical User Interface” (GUI) olan ve içeriğinde yer alan nesnelerin kullanılması ile kullanıcıya etkileşim sağlayan ve bir programın oluşturulmasını sağlayan grafiksel bir program arayüzüdür. GUI nesneleri menüler, araç çubukları, butonlar, liste kutuları veya kaydırıcılar olabilir ve bunların yanında GUI arayüz ile MATLAB' in sunduğu hesaplama imkânları kullanılarak da veri alımı ve grafik çizimi gibi pek çok işlem gerçekleştirilebilir. Her bir nesne GUI için tanımlanan programlama dosyasında *callback* diye adlandırılan ayrı alt rutin programlama parçalarına sahiptir. Bu şekilde her bir nesnede oluşan olaylar için, GUI o olaya ait *callback* rutinlerini icra ettirir. Yani, GUI hem bir arayüz hem de bir program çağrılarını icra ettirme mekanizması olarak çalışır MATLAB GUI tasarımları iki ayrı yöntem kullanılarak yapılabilir:

- MATLAB GUIDE aracı kullanılarak,
- M-File programlama yöntemi kullanılarak.

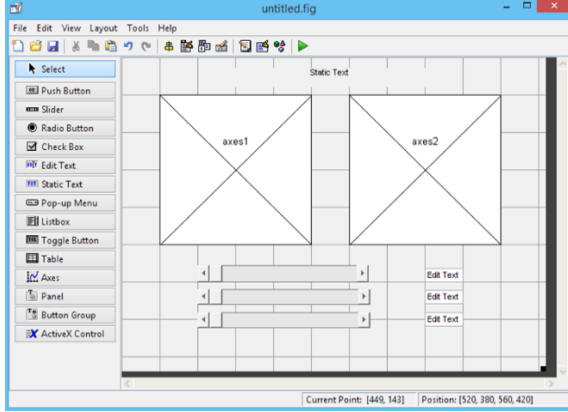
Özellikle GUI tasarımında hızlı ara yüzler tasarlamak için MATLAB GUIDE aracının kullanılması büyük bir kolaylık sağlar ve sürükle bırak olarak çalışır. M-File programlama yönteminde ise tüm GUI tasarımları ve *callback* program parçalarının yazılması programlama kodları kullanılarak yapılır. Burada tasarımcı her şeye egemendir ve bu teknik uzman bir programlama bilgisi gerektirir ancak programcı her türlü değişikliği yapabilir.

GUIDE MATLAB'ın GUI tasarımcılarına sunduğu içerisinde çeşitli araçlar içeren ve kolaylık sağlayan bir grafiksel GUI geliştirme ortamıdır. GUIDE kullanılarak tıklama ve sürükle-bırak tekniği ile GUI arayüzüne; butonlar, metin kutuları, liste kutuları, grafikler gibi nesneler kolaylıkla eklenebilir. MATLAB GUIDE aracını çalıştırmak için ya MATLAB komut satırından GUIDE komutu girilir ya da Start düğmesi tıklanarak MATLAB/GUIDE komutu verilir ve *Guide Quick Start* penceresi açılır. Bu pencereden eğer yeni bir GUI tasarımı yapılacak ise Blank GUI seçeneği seçilir. Şayet önceden yapılmış bir tasarımı açmak isteniliyorsa *Open Existing GUI* sekmesinden sonra istenilen dosya seçilir. Bundan sonra GUIDE LAYOUT Editor (GUIDE Çalışma Alanı) penceresine ulaşılır. Eleman eklemek için sol tarafta bulunan nesne butonlarından istenilen nesneye ait buton tıklanır ve çalışma alanında uygun görülen bir noktaya tıkladığında Şekil 7 deki gibi elemanlar eklenecektir.

Bir GUI arayüzünün programlanması demek o çalışmanın kaydedildiği isimle aynı zamanla oluşturulan .m uzantılı dosya içerisine kodlama satırlarının eklenmesi demektir. Bu dosyanın içine görebilmek, değişiklik yapabilmek için GUIDE



çalışma ekranı penceresinden View/M-File Editor komutu işletilebilir. Burada pek çok kodun hazır MATLAB GUIDE tarafından eklenmiş olduğu görülür. Burada ilgili butonlara ve liste kutularına ya da istenilen bir nesneye ait callback isimli alt program parçalarına ilgili kodlar yazılacaktır.



Şekil 7. GUIDE çalışma alanı ve elaman ekleme (GUIDE workspace and adding components).

Bir nesneye ait *callback*' in bulunduğu satıra gitmek için araç çubuğunda yer alan *f* simgeli butona tıklanır ve açılan listeden ilgili nesneye ait *callback*' in ismi seçilerek ya da GUIDE çalışma ekranından ilgili nesnenin üzerine sağ tıklanarak da istenilen bir *callback* satırına gidilebilir. Oluşturulan ara yüzde bir nesneye ait *callback* alt program kodu ve oluşturulan fotovoltaik güneş pili modülü matematiksel modeline ait .m dosyasının bir kısmı aşağıda verilmiştir.

a) Oluşturulan ara yüzde bir nesneye ait *callback* alt program kodu:

```
% --- Executes on slider movement.
function slider1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to slider1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
NumSliderVal=get(hObject,'Value'); % Get the irradiance value
of the slider
StrSliderVal=num2str(NumSliderVal); % Transform it to string
set(handles.edit1,'String',StrSliderVal); % Put it the
correspondent Edit Text
DrawIV
% ReDraw I-V, P-V curves after updating the parameters
% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
% get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine
range of slider
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

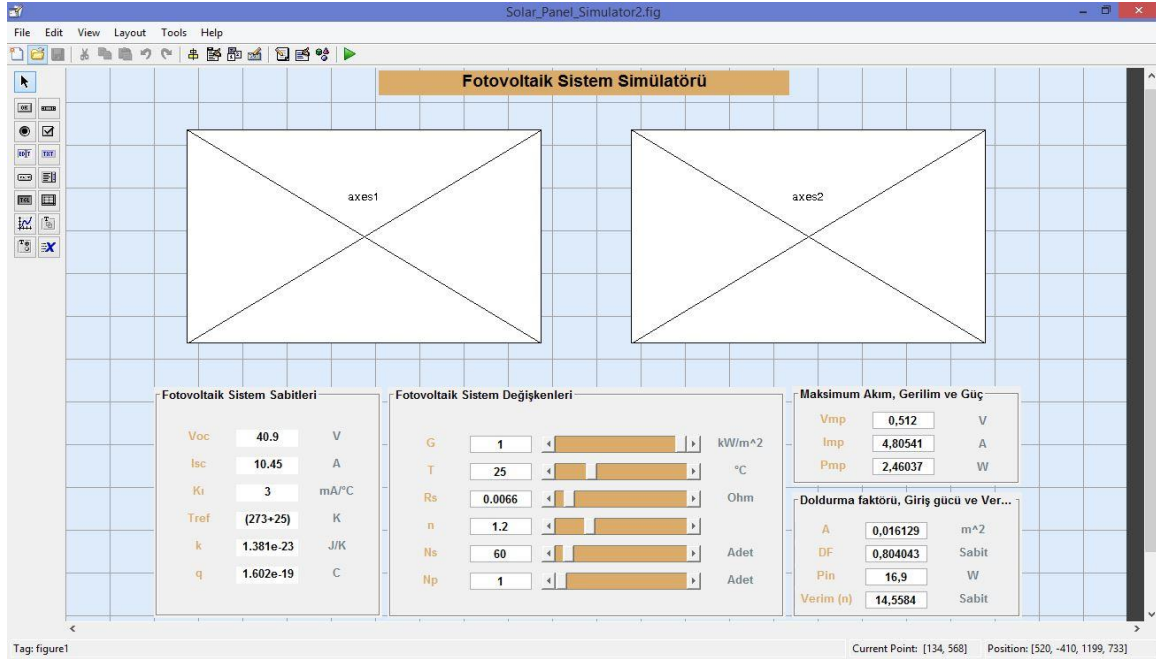
b) Güneş pili modülü matematiksel modeline ait .m dosyasının bir kısmı:

```
Global G;
% G: the value of the irradiance
G=(get(handles.slider1,'Value'));
% Drawing the I-V Curve
axes(handles.axes1)
% Choosing the axes 1
plot(V,I,'LineWidth',2,'Color','red')
set(handles.axes1,'Color',[0.306 0.396 0.58])
% change background
title(' Fotovoltaik Hücre I-V Grafiği')
legend('I-V eğrisi'); % show legend
xlabel('Gerilim(V)'); % x label
ylabel('Akım(I)'); % y label
axis auto; % automatic scale of the axis
grid on
% Area of the PV Cell
A=0.0169;
set(handles.edit1,'string',A);
% Set the value in the edit text 1
```

Bölüm iki ve üçte verilen denklemler kullanılarak FV güneş pili modeli MATLAB programına uyarlandı. Bu programın analizi için MATLAB/GUI ortamında Şekil 8'deki gibi bir arayüz tasarlandı. Kullanıcı bu ara yüzü kullanmaya başlamadan önce FV sistem sabitlerini MATLAB programına girmelidir. Daha sonra tasarlanan arayüz ile güneş ışınımı, panel sıcaklığı, seri iç direnç, ideallik faktörü, seri ve paralel hücre sayıları gibi parametreleri değiştirilecektir. Bu parametrelerin *I-V*, *P-V* karakteristik eğrilerine, maksimum akıma ( $I_{mp}$ ), maksimum gerilime ( $V_{mp}$ ), maksimum güce ( $P_{mp}$ ), giriş gücüne ( $P_{in}$ ), doldurma faktörüne ( $DF$ ) ve verime ( $\eta$ ) olan etkisi incelenebilir.

### 3.1. MATLAB/GUI Ara Yüzünde Gerçekleştirilen Simülasyonlar (Simulations Performed in MATLAB/GUI Interface)

Genelde, güneş paneli üreticileri açık devre, kısa devre ve maksimum noktadaki akım ve gerilim gibi değerleri paylaşırken, fotoakım, doyum akımı, ideallik faktörü, seri ve paralel direnç gibi değerleri paylaşmaz [32]. Modellemede Panasonic marka VBHN330SJ47 model ve LG marka NeON® 2 model 330 W'lık güneş panelleri kullanılmıştır. Güneş panellerine ait veriler Tablo 1 ve Tablo 2'de ayrı ayrı verilmiştir [33, 34].



Şekil 8. Tasarlanan kullanıcı ara yüzü (Designed user interface)

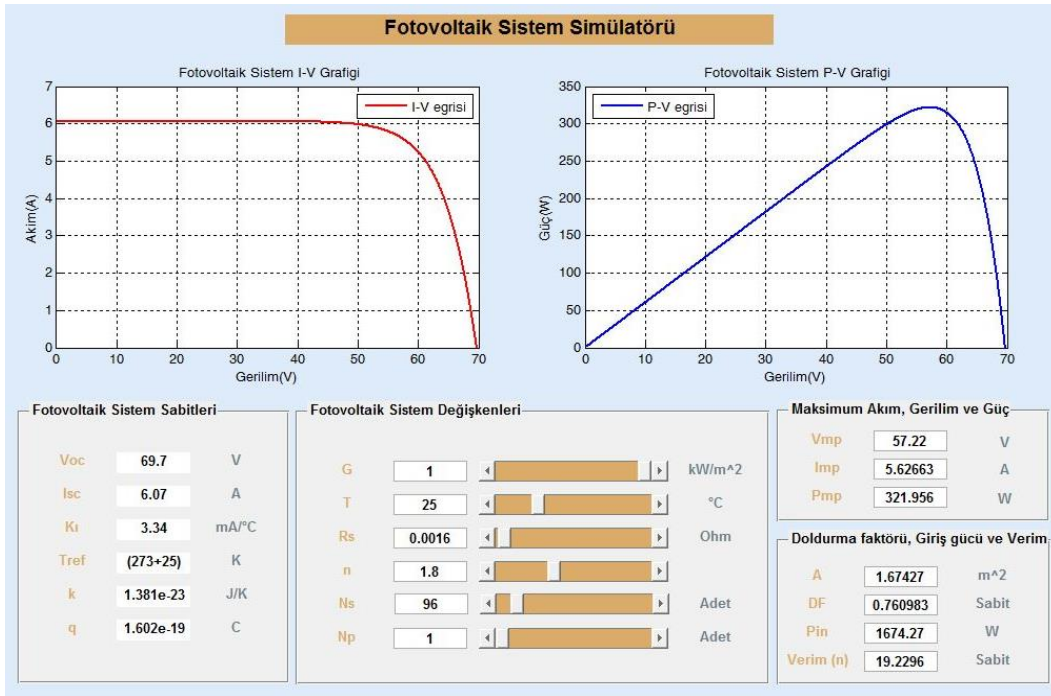
Tablo 1. Panasonic VBHN330SJ47 güneş panelinin standart test koşullarındaki verileri (Data of Panasonic VBHN330SJ47 solar panel under standard test conditions) (1000 W/m<sup>2</sup>, 25°C) [33].

Güneş Panelinin Özellikleri	Sayısal Değerler
Maksimum panel gücü (P <sub>m</sub> )	330 W
Maksimum güç akımı (I <sub>m</sub> )	5.70 A
Maksimum güç voltajı (V <sub>m</sub> )	58.0 V
Açık devre gerilimi (V <sub>oc</sub> )	69.7 V
Kısa devre akımı (I <sub>sc</sub> )	6.07 A
Güneş panel verimi (%)	19.7
Hücre tipi (HIT) boyutları	127x127 mm
Hücre sayısı	96(8x12) Adet
Çalışma sıcaklık aralığı	-40,+85 °C
Kısa devre akımı sıcaklık	3.34 mA/°C

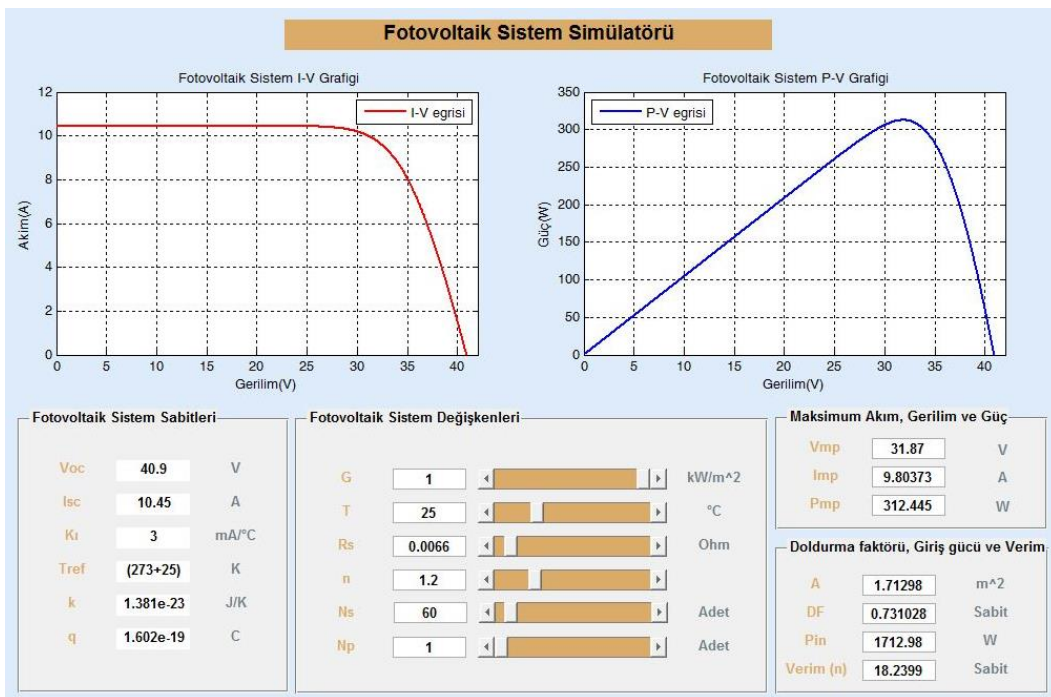
Tablo 2. LG NeON® 2 güneş panelinin standart test koşullarındaki verileri (Data of LG NeON® 2 solar panel under standard test conditions) (1000 W/m<sup>2</sup>, 25°C) [34].

Güneş Panelinin Özellikleri	Sayısal Değerler
Maksimum panel gücü (P <sub>m</sub> )	330 W
Maksimum güç akımı (I <sub>m</sub> )	9.8 A
Maksimum güç voltajı (V <sub>m</sub> )	33.7 V
Açık devre gerilimi (V <sub>oc</sub> )	40.9 V
Kısa devre akımı (I <sub>sc</sub> )	10.45 A
Güneş panel verimi (%)	19.3
Hücre tipi (tek kristal)	161.7x161.7 mm
Hücre sayısı	60(6x10) Adet
Çalışma sıcaklık aralığı	-40,+90 °C
Kısa devre akımı sıcaklık	3 mA/°C

Panasonic VBHN330SJ47 ve LG NeON® 2 model güneş panellerine ait parametreler ürün kataloglarından alınarak MATLAB programına girilmiş ve oluşturulan arayüz ile güneş paneline ait akım-gerilim ( $I$ - $V$ ) ve güç-gerilim ( $P$ - $V$ ) eğrileri, maksimum güç, maksimum akım ve maksimum gerilim, doldurma faktörü, giriş gücü ve verim değerleri sırasıyla Şekil 9(a) ve Şekil 9(b)'de elde edilmiştir.



(a)

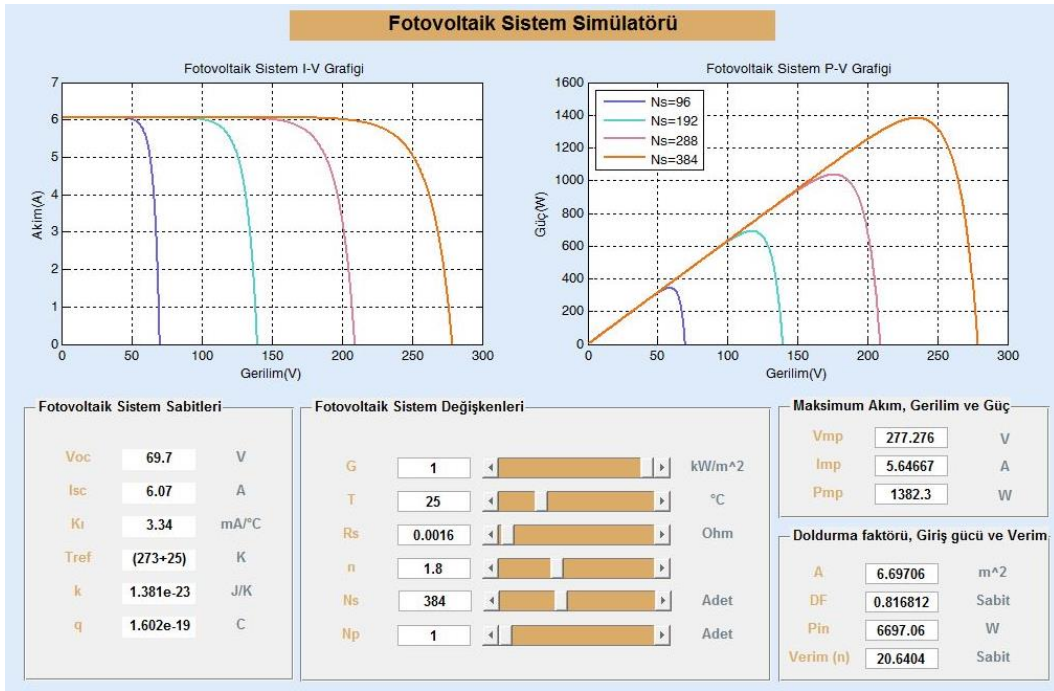


(b)

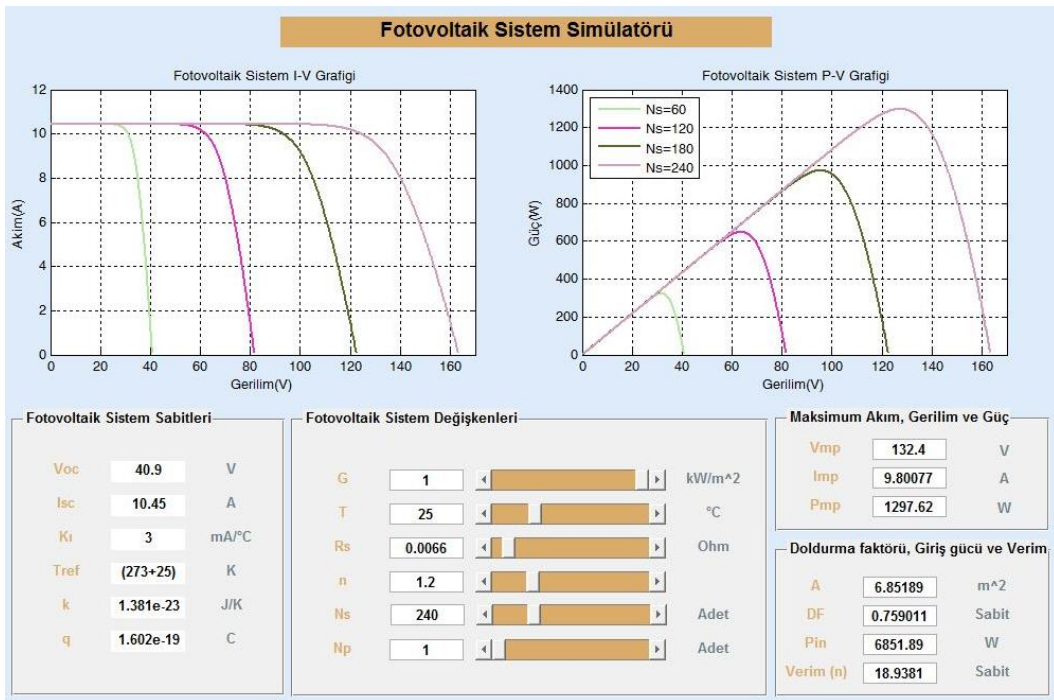
Şekil 9. (a) Panasonic VBHN330SJ47 güneş paneli için, (b) LG NeON® 2 güneş paneli için simülasyonda I-V ve P-V eğrisi çizimi (I-V and P-V curve drawing for Panasonic VBHN330SJ47 (a), for LG NeON® 2 (b) solar panel in simulator).

Dört adet Panasonic VBHN330SJ47 ve LG NeON® 2 güneş paneli seri bağlanmış ve akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristikleri sırasıyla Şekil 10 (a) ve

Şekil 10 (b)'de çizdirilmiştir. Şekil 10 (a) ve Şekil 10 (b)'de görüldüğü gibi seri hücre sayısı artarken açık devre gerilimi artmakta kısa devre akımı ise sabit kalmaktadır.

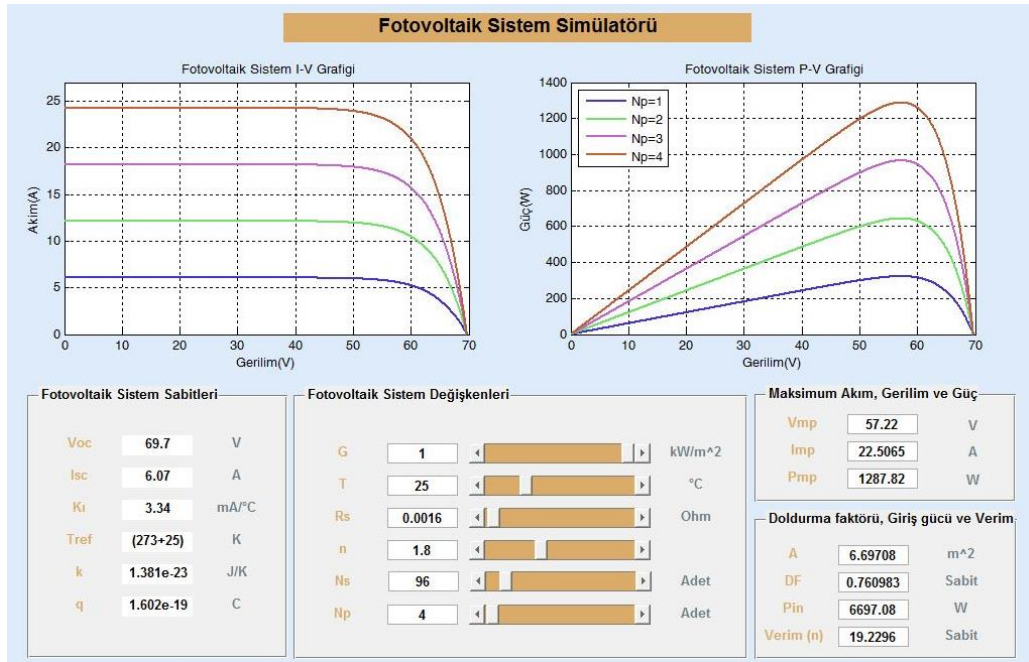


(a)

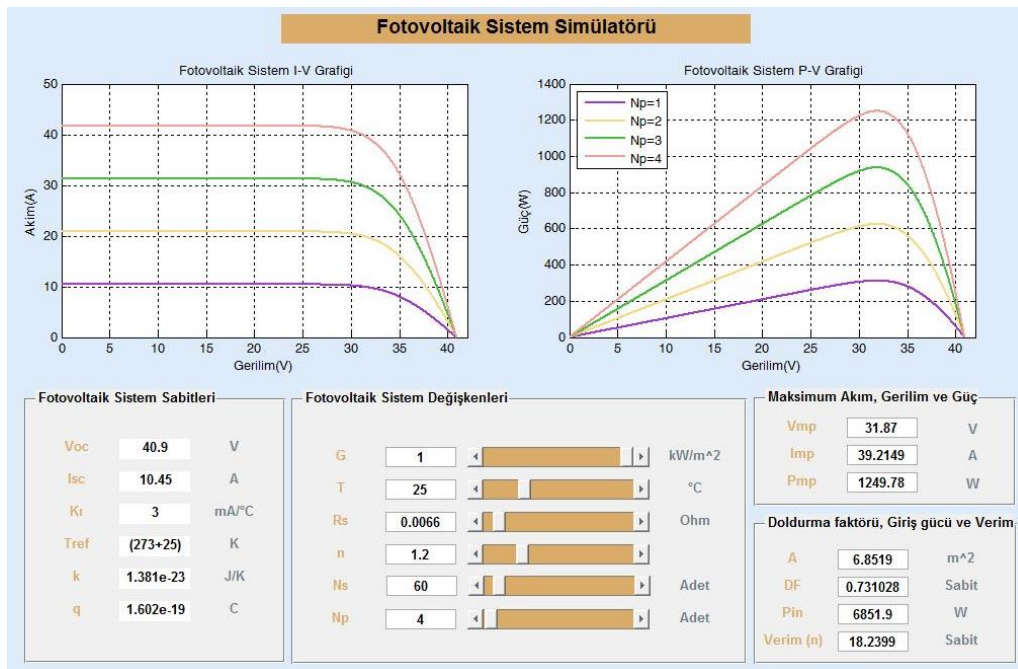


(b)

Şekil 10. (a) Panasonic VBHN330SJ47 güneş paneli için, (b) LG NeON® 2 güneş paneli için seri bağlantı I-V ve P-V eğrisi çizimi (Serial connection I-V and P-V curve drawing for Panasonic VBHN330SJ47 (a), LG NeON® 2 (b) solar panel).



(a)

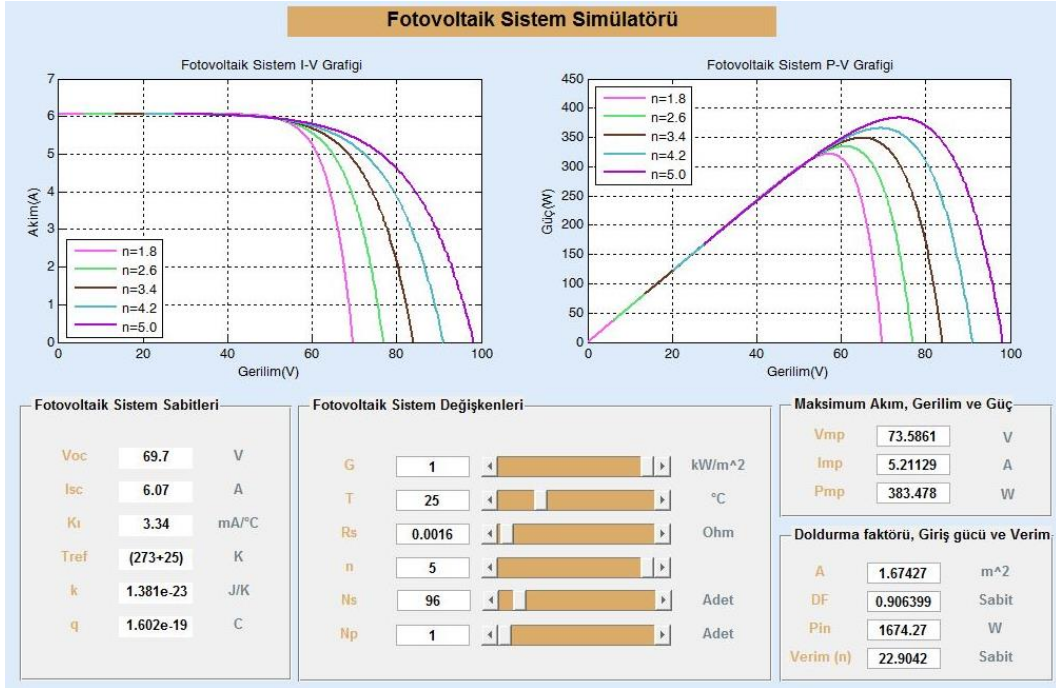


(b)

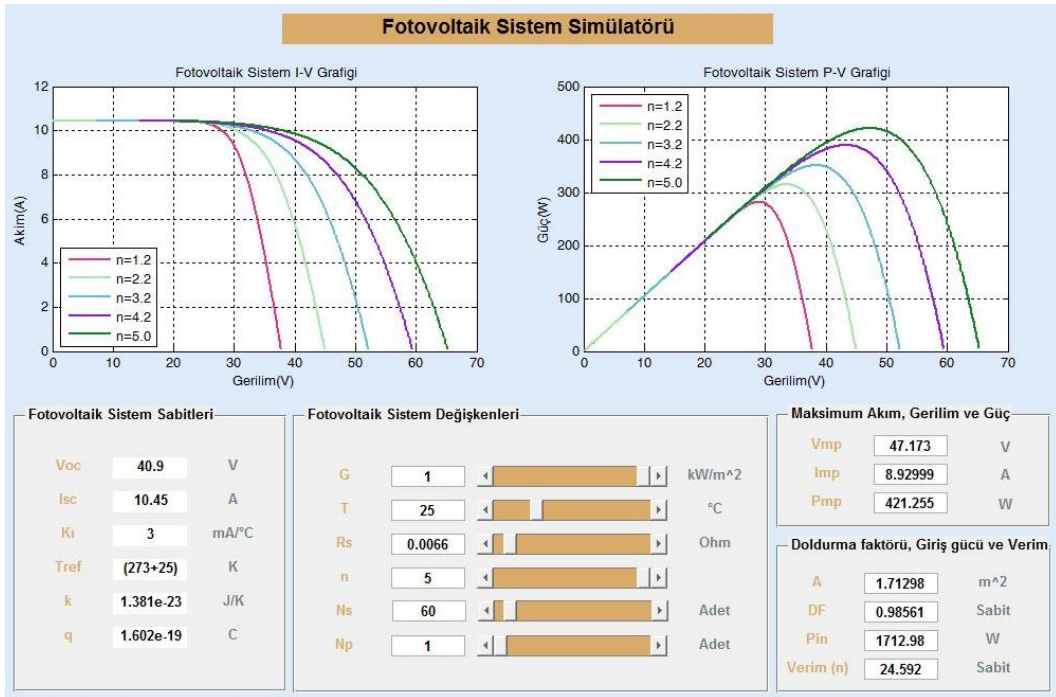
Şekil 11 (a) Panasonic VBHN330SJ47 güneş paneli için, (b) LG NeON® 2 güneş paneli için paralel bağlantı I-V ve P-V eğrisi çizimi (Parallel connection I-V and P-V curve drawing for Panasonic VBHN330SJ47 (a), LG NeON® 2 (b) solar panel).

Şekil 11(a) ve Şekil 11(b)'de sırasıyla dört adet Panasonic VBHN330SJ47 ve LG NeON® 2 güneş panel paralel bağlanmış ve akım ile gerilim (I-V) ve güç ile gerilim (P-V) karakteristikleri çizdirilmiştir. Şekil 11 (a) ve Şekil 11 (b)'de paralel hücre sayıları arttığında akımın arttığı açık devre geriliminin ise değişmediği görülmektedir. Güneş pillerinin modellenmesindeki diğer bir parametre de ideallik faktörü olup 1,2 ile 5 aralığında

değişir. Farklı ideallik faktörlerinde Panasonic VBHN330SJ47 ve LG NeON® 2 güneş panelleri için I-V ve P-V karakteristik eğrileri Şekil 12(a) ve Şekil 12(b)'de gibi elde edilmiştir. İdeallik faktörüne bağlı olarak kısa devre akımı (Isc) ve açık devre gerilimi (Voc) değerleri de değişir. Bu artışa göre de maksimum güç aktarımı da Şekil 12(a) ve Şekil 12(b)'de ki gibi artmaktadır.



(a)

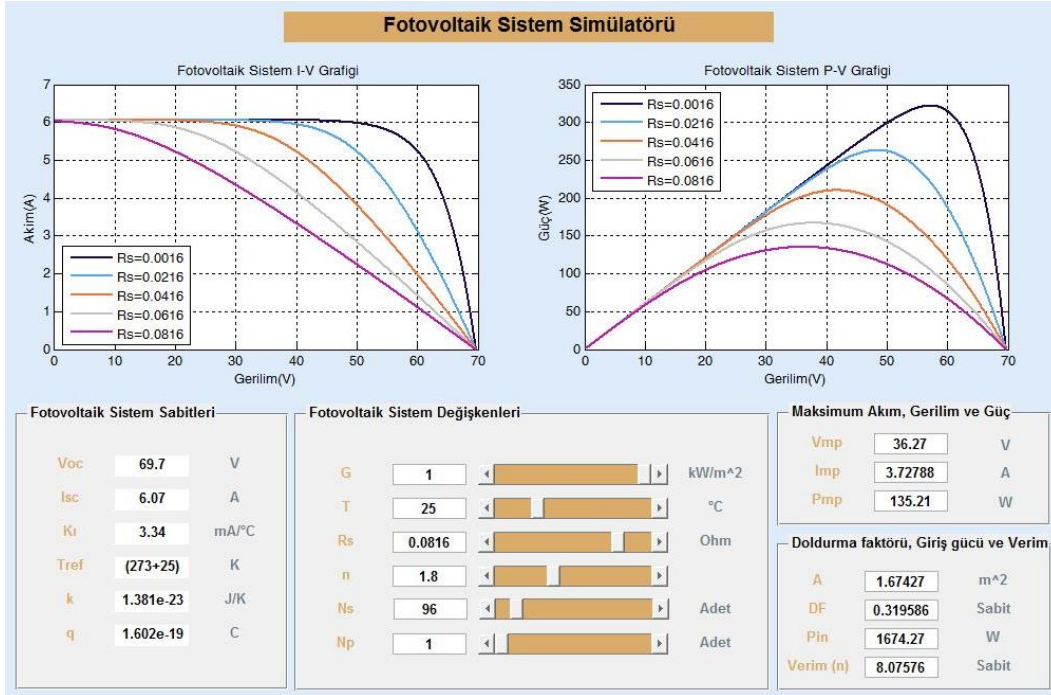


(b)

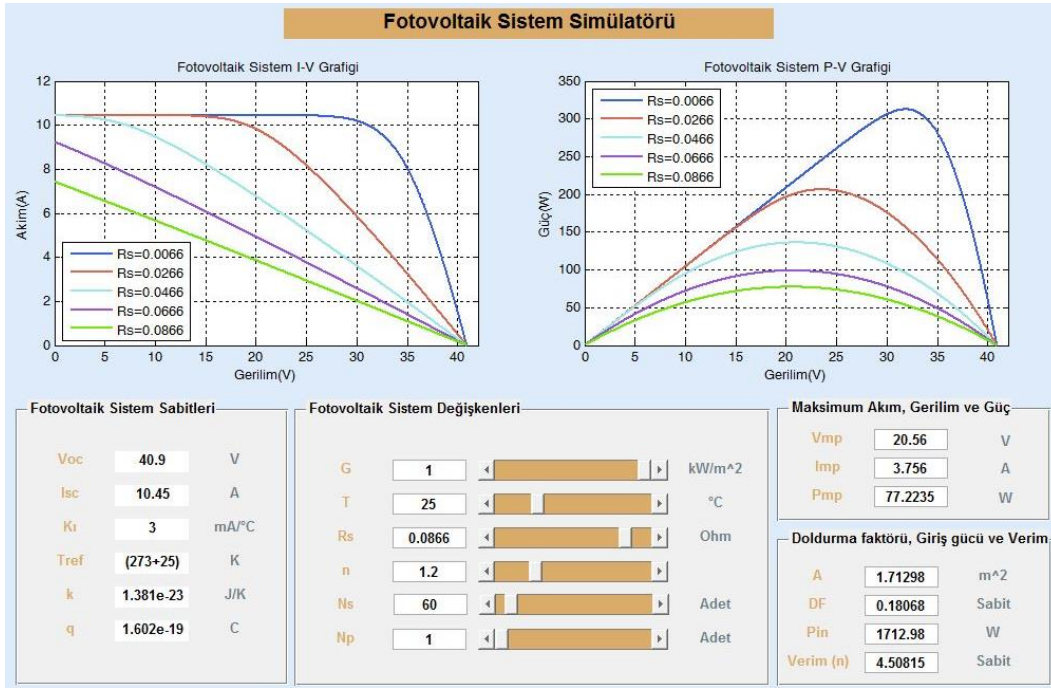
Şekil 12 (a) Panasonic VBHN330SJ47, (b) LG NeON® 2 güneş paneli için farklı ideallik faktöründe I-V ve P-V eğrisi (I-V and P-V curve plotting at different ideality factor for Panasonic VBHN330SJ47 (a), and LG NeON® 2 (b) solar panel).

Panasonic VBHN330SJ47 ve LG NeON® 2 güneş panellerinin I-V ve P-V eğrileri farklı seri iç dirençleri için Şekil 13(a) ve Şekil 13(b)'de sırasıyla çizilmiştir. Şekil 13(a) ve Şekil 13(b)'de görüldüğü gibi seri iç direnç ( $R_s$ ) değeri ne kadar küçültülürse I-V karakteristiğinin

maksimum güç noktası açık devre gelimi ( $V_{oc}$ ) ve kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) değerlerine yaklaşmakta ve doldurma faktörü de büyümektedir. P-V eğrisinde de  $R_s$ 'nin değerinin azalması ile de maksimum güç noktası değeri de artmaktadır.



(a)

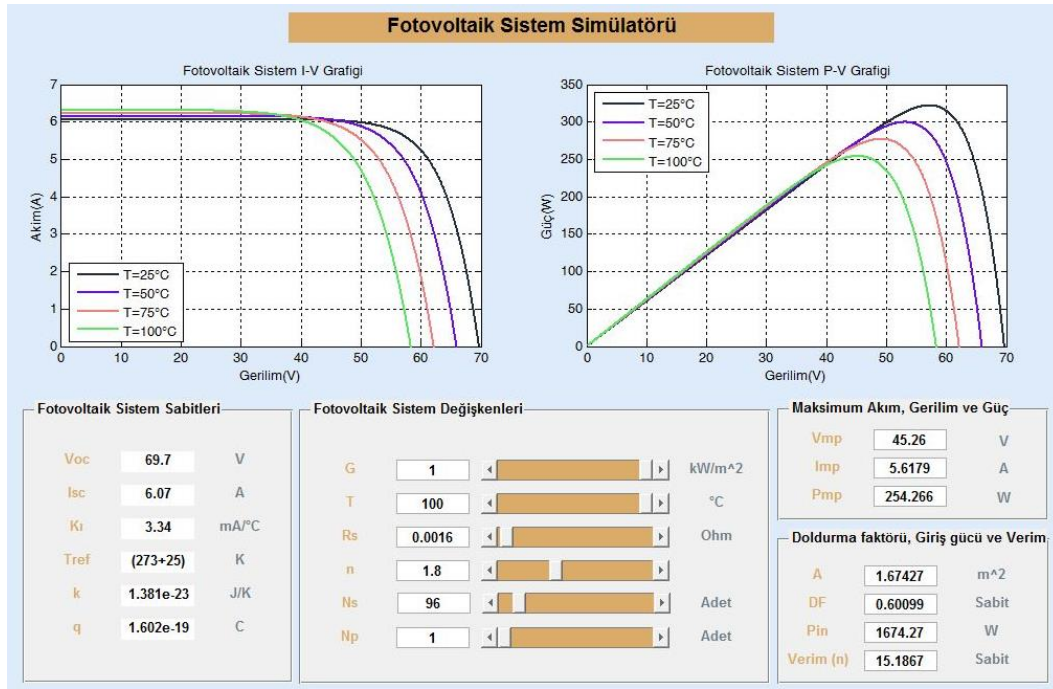


(b)

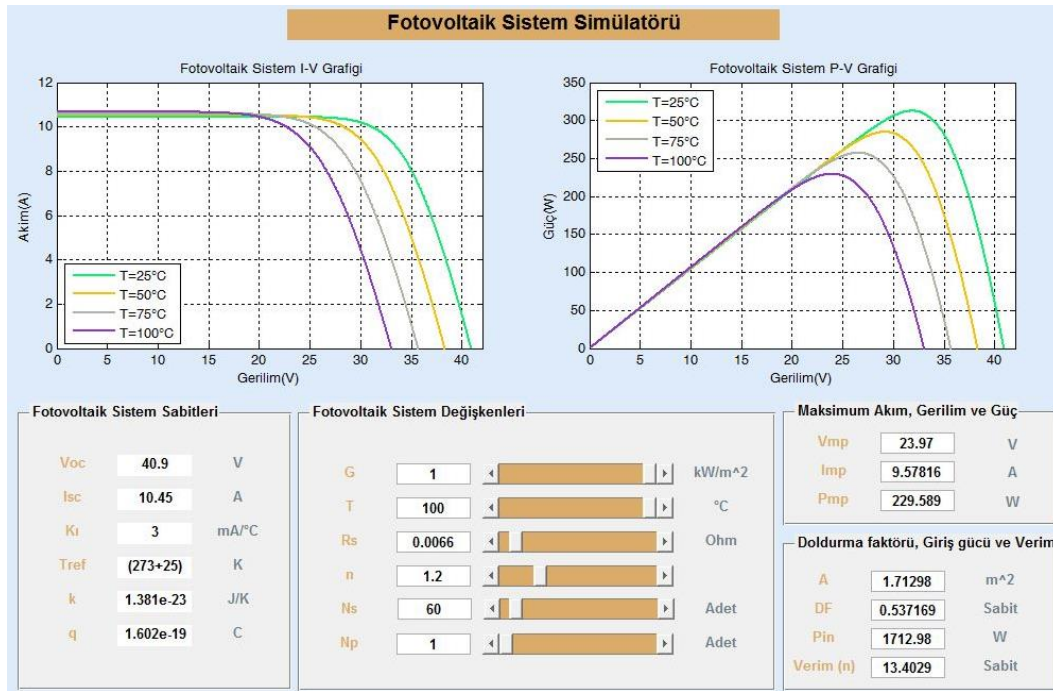
Şekil 13 (a) Panasonic VBHN330SJ47, (b) LG NeON® 2 güneş paneli için farklı iç direnç I-V ve P-V eğrisi çizimi (Different internal resistance I-V and P-V curve drawing for Panasonic VBHN330SJ47 (a), LG NeON® 2 (b) solar panel).

Şekil 14(a) ve Şekil 14(b)'de sırasıyla Panasonic VBHN330SJ47 ve LG NeON® 2 güneş panellerinin farklı sıcaklık değerleri için akım gerilim (I-V) ve güç gerilim (P-V) eğrileri gözükmemektedir. Şekil 14(a) ve Şekil

14(b)'de güneş panellerinde sıcaklık artışının az miktarda da olsa açık devre gerilimi (Voc) nin değerini düşürdüğü kısa devre akımı (Isc) nin değerini ise artırdığı gözükmemektedir.



(a)



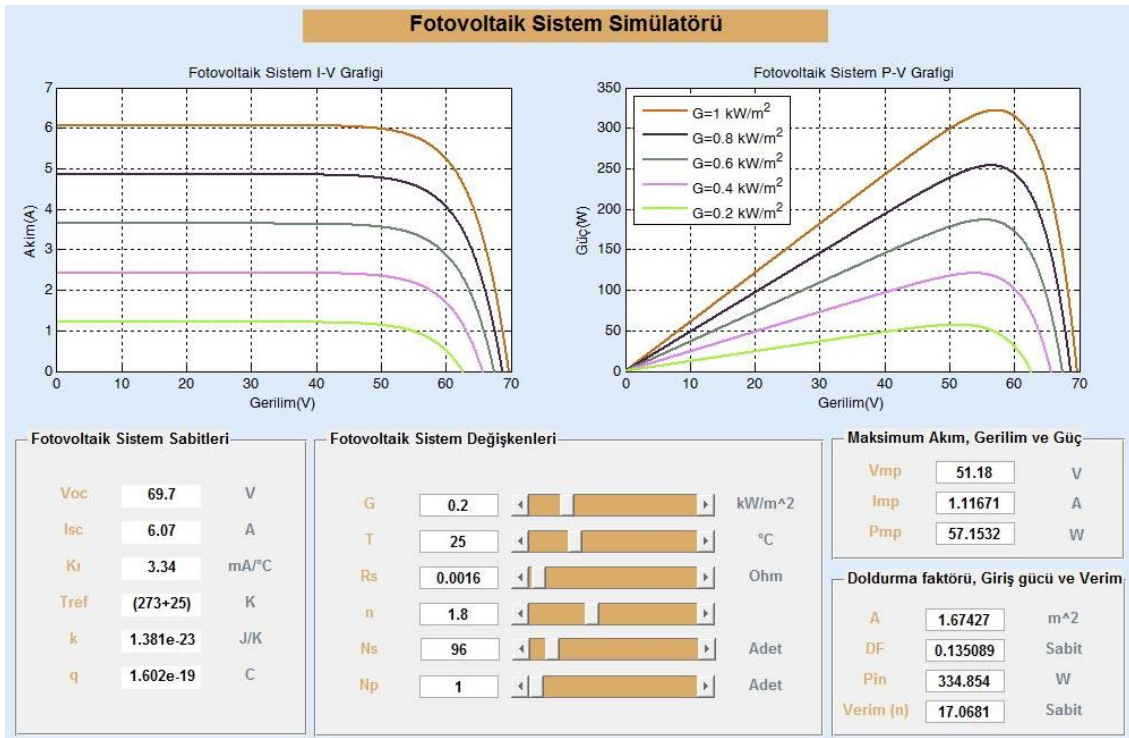
(b)

Şekil 14 (a) Panasonic VBHN330SJ47, (b) LG NeON® 2 güneş paneli için farklı sıcaklıklarda I-V ve P-V eğrisi çizimi (I-V and P-V curve plotting for Panasonic VBHN330SJ47 (a), LG NeON® 2 (b) solar panel at different temperatures).

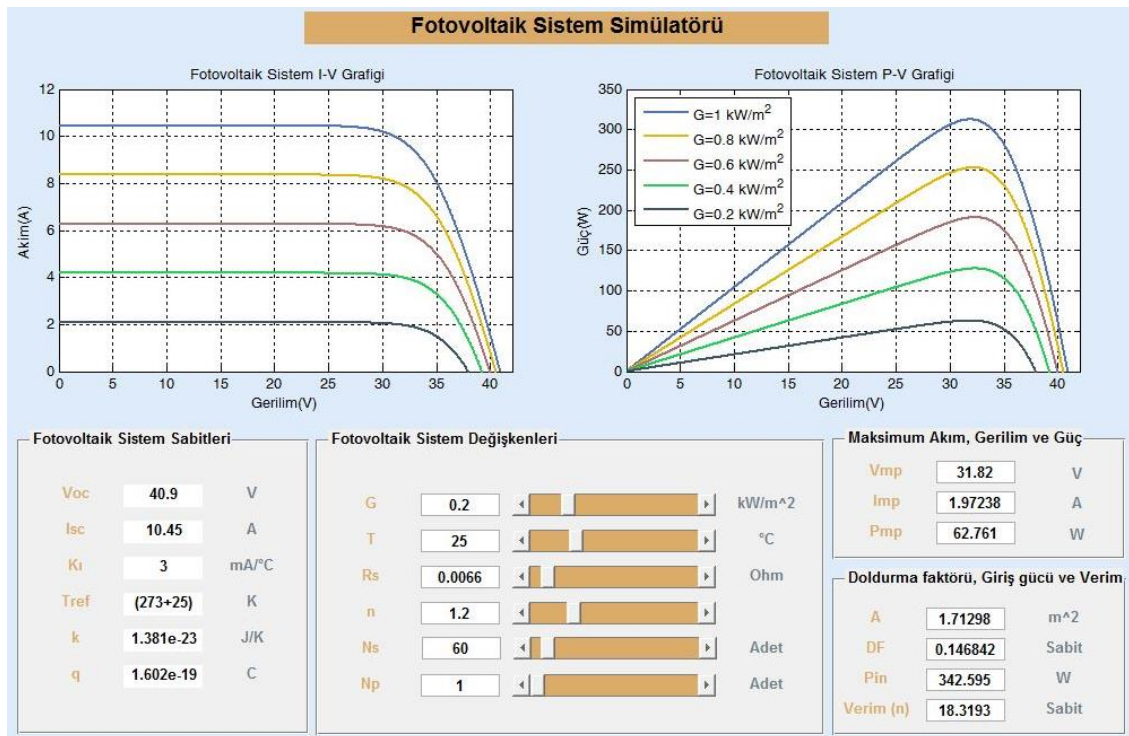
Panasonic VBHN330SJ47 ve LG NeON® 2 güneş panellerinin farklı güneş ışınım değerleri için I-V ve P-V eğrileri Şekil 15(a) ve Şekil 15(b)'de sırasıyla çizilmiştir. Güneş ışınım değerleri  $G=0,2 \text{ kW/m}^2$  ile  $G=1 \text{ kW/m}^2$  arasındaki değerler kullanılmıştır. Şekillerde

görüldüğü üzere ışınlım değeri arttıkça akım ve gerilim artmaktadır, fakat gerilim değerindeki artış akım değerine göre çok daha azdır. Akım ve gerilime artışı ile güç aktarımının da arttığı görülmektedir.





(a)



(b)

Şekil 15 (a) Panasonic VBHN330SJ47, (b) LG NeON® 2 güneş paneli için farklı ışınımlarda I-V ve P-V eğrisi çizimi (I-V and P-V curve drawing at different irradiances for Panasonic VBHN330SJ47 (a), LG NeON® 2 (b) solar panel).

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, fotovoltaik güneş pillerine ait basitleştirilmiş eşdeğer devre modeli ele alınmış, güneş

pilinin akım denklemi çözümü için Newton-Raphson yöntemi kullanılarak MATLAB/GUI ortamında bir ara yüz oluşturulmuştur. Oluşturulan arayüz ile ışınım, sıcaklık, seri direnç, ideallik faktörü ve seri, paralel hücre

sayıları gibi parametreler değiştirilerek akım ile gerilim ( $I-V$ ), güç ile gerilim ( $P-V$ ) eğrileri, maksimum akım ( $I_{mp}$ ), maksimum gerilim ( $V_{mp}$ ), maksimum güç ( $P_{mp}$ ), giriş gücü ( $P_{in}$ ), doldurma faktörü (DF) ve verim ( $\eta$ ) değerleri kolayca elde edilmiştir. MATLAB/GUI ara yüzü ile elde edilen sonuçlar ile FV güneş paneli üreticilerinin katalog verilerinin örtüştüğü görülmüştür. Bu sayede FV panel üreticileri ve araştırmacılar ile öğrenci laboratuvarları farklı parametrelerin değiştirilmesiyle FV sistem çıkış parametrelerinin nasıl değiştiğini anlayıp yorumlayabilecek ve sistemlerini buna göre tasarlayabileceklerdir. Ayrıca bu çalışmanın bu alandaki bilimsel araştırmalara da katkı sağlaması beklenmektedir.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Koç, H. Yağlı, Y. Koç and İ. Uğurlu, "Dünyada ve Türkiye'de enerji görünümünün genel değerlendirilmesi" *Mühendis ve Makina*, vol. 59, no. 692, pp. 86-114, 2018.
- [2] S. Ağırlioğlu, & N. Ağırlioğlu, "Türkiye'de enerji ve politikaları" *Takvim-i Vekayi*, vol. 8, no. 2, pp.166-198, 2020.
- [3] U. Gürsoy, "Enerjide toplumsal maliyet ve temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları" *Türk Tabipleri Birliği Yayınları*, Ankara, 2004.
- [4] A. N. Akpolat, E. Dursun, A. E. Kuzucuoğlu, Y. Yang, F. Blaabjerg and A. F. Baba, "Performance analysis of a grid-connected rooftop solar photovoltaic system" *Electronics*, vol.8, no.8, pp. 905, 2019.
- [5] M. E. Şahin and H. İ. Okumuş, "Modelling and simulation of solar cell module in MATLAB/Simulink" *The Journal of Electrical, Electronics, Computer and Biomedical Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 17-25, 2013.
- [6] A. N. Akpolat, Y. Yang, F. Blaabjerg, E. Dursun and A. E. Kuzucuoğlu, "Modeling photovoltaic string in PLECS under partial shading" *In 2019 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET)*, August 2019, pp. 1-6.
- [7] J. Patel, G. Sharma, "Modeling and Simulation of Solar Photovoltaic Module Using MATLAB/Simulink" *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 225-228, 2013.
- [8] N. Belhaouas, M. A. Cheikh, A. Malek, C. Larbes, "Matlab-Simulink of photovoltaic system based on a two-diode model simulator with shaded solar cells", *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 16, no. 65, pp.73, 2013.
- [9] A. Pandey, S. Devdas, "To study maximum power point tracking in photovoltaic cells" *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 4, no. 6, 2013.
- [10] E. Cuce, P. M. Cuce, I. H. Karakas and T. Bali, "An accurate model for photovoltaic (PV) modules to determine electrical characteristics and thermodynamic performance parameters" *Energy Conversion and Management*, vol. 146, pp. 205-216, 2017.
- [11] I. H. Altas, A. M. Sharaf, "A photovoltaic array simulation model for Matlab-Simulink GUI environment" *In 2007 IEEE International Conference on Clean Electrical Power*, May 2007, pp. 341-345.
- [12] V. Türkmenoğlu, F. Güngör, "MATLAB Simulink & GUI with PV Cell Simulation" *ELECO 2014*, Bursa, Turkey, 27-29 November 2014, pp. 402-406.
- [13] G. R. Walker, P.C. Sernia, "Cascaded DC-DC converter connection of photovoltaic modules" *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 4, pp.1130-1140, July 2004.
- [14] V. Ouaschnig, R. Hanitsch, "Numerical simulation of photovoltaic generators with shaded cells" *Universities Power Engineering Conference*, vol. 30, pp. 583-589, 1995.
- [15] T. Tafticht, K. Agbossou, M. L. Doumbia, A. Chériti, "An improved maximum power point tracking method for photovoltaic systems" *Renewable Energy*, vol. 33, no. 7, pp. 1508-16. 2008.
- [16] M. Benghanem, "Low cost management for photovoltaic system in isolated site with new IV characterization model proposed" *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 48-55, 2009.
- [17] R. Bayindir, I. Colak, O. Kaplan, C. Can, "MATLAB/GUI based simulation for photovoltaic systems", *In 2011 IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, pp. 1-4, May. 2011.
- [18] I. Issam Houssamo, F. Locment and M. Sechilariu, "Maximum power tracking for photovoltaic power system Development and experimental comparison of two algorithms" *Renewable Energy*, vol. 35, no.10, pp.2381-87, 2010.

- [19] G. Dzimano, "Modeling of photovoltaic systems" Master Thesis, Ohio State University, 2008.
- [20] M. E. Şahin, H. İ. Okumuş, "Physical structure, electrical design, mathematical modeling and simulation of solar cells and modules" *Turkish Journal of Electromechanics and Energy*, vol. 1, no.1, 2016.
- [21] M. B. Eteiba, E. T. El Shenawy, J. H. Shazly, A. Z. Hafez, "A photovoltaic (cell, module, array) simulation and monitoring model using MATLAB/GUI interface" *International Journal of Computer Applications*, vol. 69, no. 6, pp.14-28, 2013.
- [22] S. Strong, W. Scheller, "The solar electric house" Sustainability Press, Massachusetts, 1993.
- [23] G. Çelebi, "Using Principles of photovoltaic panels on vertical building envelope," *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.* vol.17, no. 3, 2002.
- [24] D. Erdoğan, "Research on building integrated photovoltaic systems and their performance evaluation" Master Thesis, İstanbul Technical University, 2009.
- [25] O. Bingöl, and B. Özkaya, "Analysis and comparison of different PV array configurations under partial shading conditions" *Solar Energy*, vol.160, pp. 336-343, 2018.
- [26] A. D. Hansen, P. Sørensen, L. H. Hansen, H. Bindner, "Models for a stand-alone PV system", Risø National Laboratory, Roskilde, December 2000.
- [27] E. Lorenzo, "Solar electricity engineering of photovoltaic systems" *Artes Graficas Gala*, S. L., Spain, 1994.
- [28] M. E. Şahin, "Energy Management and Measurement of Computer Controlled Solar House Model for Rize City" *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 10, no. 2, pp. 404-414, 2020.
- [29] M. E. Şahin and F. Blaabjerg, "A hybrid PV-battery/supercapacitor system and a basic active power control proposal in MATLAB/Simulink" *Electronics*, vol. 9, no.1, pp. 129, 2020.
- [30] S. Koohi-Kamali, N. A. Rahim, H. Mokhlis, and V. V. Tyagi, "Photovoltaic electricity generator dynamic modeling methods for smart grid applications: A review" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 131-172, 2016.
- [31] A. O. Awodugba, Y. K. Sanusi, and J. O. Ajayi, "Photovoltaic solar cell simulation of Shockley diode parameters in Matlab" *International Journal of Physical Sciences*, vol. 8, no. 22, pp. 1193-1200, 2013.
- [32] A. K. Ryad, A. M. Atallah, A. Zekry, "Photovoltaic parameters estimation using hybrid flower pollination with clonal selection algorithm" *Turkish Journal of Electromechanics Energy*, vol. 3, no. 2, pp. 15-21, 2018.
- [33] Panasonic VBHN330SJ47, Available: <https://www.europe-solarstore.com/panasonic-vbhn330sj47.html>. [Accessed: 22.05.2021].
- [34] LG Neon 2 Black LG330N1K-V5, Available: [https://www.lg.com/global/business/download/resources/solar/NeON\\_2\\_60\\_BF\\_90214.pdf](https://www.lg.com/global/business/download/resources/solar/NeON_2_60_BF_90214.pdf), [Accessed: 22.05.2021].

This is an open access article under the CC-BY license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



# Elektrokimyasal Jet İşleme (EJİ) Parametrelerinin İşlenen Kanal Geometrilerine Etkisi

Emre AYHAN<sup>\*a</sup>, Mustafa YURDAKUL<sup>b</sup>, Can ÇOĞUN<sup>c</sup>

<sup>a\*</sup> Gazi Üniversitesi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, 06560, Ankara, Türkiye

<sup>b</sup> Gazi Üniversitesi Üniversitesi Makina Mühendisliği, 06570, Ankara, Türkiye

<sup>c</sup> Çankaya Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği, 06790, Ankara, Türkiye

## MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 17.05.2021  
Kabul: 22.10.2021

### Anahtar Kelimeler:

Elektrokimyasal  
işleme,  
Elektrokimyasal jet  
işleme, Alışılmamış  
imal usulleri

## ÖZ

Bu çalışmada alışılmamış imal usullerinden elektrokimyasal jet işleme yöntemi (EJİ) kullanılarak YHÇ malzeme üzerine kanallar oluşturularak, işleme parametrelerinin kanal kesit geometrisine etkileri incelenmiştir. Çalışmada, işleme parametreleri olarak takım ilerleme hızı, işleme gerilimi, elektrolit sıvı basıncı ve elektrolit tuz derişimi ele alınmıştır. Her deneye ait kanal kesit geometrileri için profil tamlık değerleri, ortalama kanal derinliği ve genel uyum değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan genel uyum değerlerinde en iyi sonuçların işleme geriliminin 20 V olduğu deneylerde elde edildiği görülmüştür. Takım ilerleme hızının 0,5 mm/dak olduğu deneylerde genel uyum değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.04>

# The Effect of Electrochemical Jet Machining (EJI) Parameters on Processed Channel Geometries

## ARTICLE INFO

Received: 17.05.2021  
Accepted: 22.10.2021

### Keywords:

Electrochemical  
machining,  
Electrochemical jet  
machining, Non-  
traditional  
manufacturing  
methods

## ABSTRACT

In this study, channels were formed on the HSS material by using the electrochemical jet machining method, which is one of the unconventional manufacturing methods. Then, the effect of machining parameters on the channel cross section geometry was investigated. In the study, experiments were carried out in which the effects of electrochemical machining parameters such as tool feed rate, machining voltage, electrolyte pressure and electrolyte concentration were observed. Profile precision values, average channel depth values and overall fit values were calculated for the channel section geometries of each experiment. When the overall fit value were examined, the results of the processing parameters were obtained. Based on the overall fit values obtained, it was seen that the best results were obtained at 20 V for the processing voltage. In the experiments where the tool feed rate was 0.5 mm/min, it was seen that the overall fit values were the higher.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.04>

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alışılmamış imalat yöntemlerinden biri olan elektrokimyasal işleme yöntemi, geleneksel imalat yöntemleriyle işlenebilmesi zor olan iletken

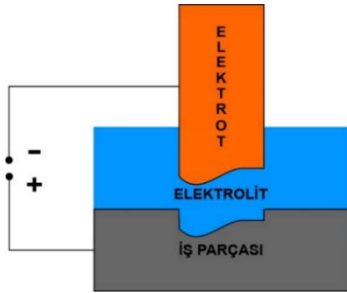
malzemelerin sertlik, dayanım ve kırılgenlik gibi mekanik özelliklerinden etkilenmeden işlenebilmesine imkân sağlamaktadır [1]. Ayrıca düşük enerji tüketimi, iyi yüzey kalitesi ve hassasiyet sağlaması yöntemin öne çıkan yönleri olarak

\*Sorumlu yazar: [ayhanemre@gazi.edu.tr](mailto:ayhanemre@gazi.edu.tr)

To cite this article: E. Ayhan, M. Yurdakul and C. Çoğun "The Effect of Electrochemical Jet Machining (EJI) Parameters on Processed Channel Geometries", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 213-221, 2021.  
doi:10.30855/gmbd.2021.03.04

sayılabilir [2]. Özellikle otomotiv, havacılık ve savunma sanayisinin ihtiyaçları doğrultusunda geliştirilen üstün özelliklere sahip malzemelerin işlenmesinde elektrokimyasal işleme yöntemi ön plana çıkmaktadır.

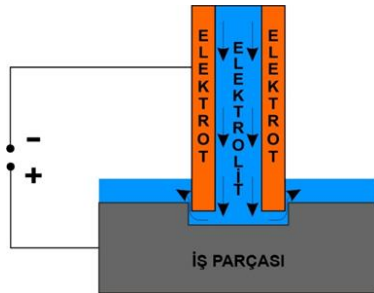
Elektrokimyasal işleme yöntemi Faraday kanunu ve elektroliz prensibine dayanarak kontrollü bir şekilde iş parçası üzerinden elektronların uzaklaştırılmasıyla gerçekleşmektedir [3]. Elektrokimyasal işleme mekanizması, doğru akım güç kaynağının pozitif kutbuna iş parçasının (anot), negatif kutbuna ise takımın (katot) bağlanması ve takım ile iş parçası arasındaki boşluğun elektrolit sıvıyla doldurulmasıyla sağlanmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Elektrokimyasal işleme yöntemi  
(Electrochemical machining)

Literatürde, yönteminin öne sürüldüğü tarihten günümüze elektrokimyasal işleme üzerine çok sayıda çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmaları iki grup altında toplamak mümkündür. Birinci grup, yöntemi geliştirmek adına ortaya çıkan yeni ve hibrit yöntemleri konu alan makalelerdir. İkincisi ise yöntemin kullanımı sonucunda uygun işleme parametrelerini tespit etmeyi hedefleyen makalelerdir.

Yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan yöntemlerden biri elektrokimyasal jet işleme (EJİ) yöntemidir [4]. EJİ yönteminin, elektrokimyasal işleme yönteminden farkı elektrolitin elektrot (takım) içerisinde basınç ile işleme ortamına gönderilmesidir (Şekil 2). Böylece, iş parçasının yalnızca basınçlı elektrolitle temas halinde olan yüzeylerinde elektrokimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu durum bölgesel ve kontrollü malzeme kaldırımı sağlar [5].



Şekil 2. EJİ yöntemi (EJM method)

Konu ile ilgili yapılmış çalışmalardan birinde, EJİ yöntemi kullanılarak kanal açılmış ve işleme geriliminin sürekli veya darbeleri olarak uygulanmasının malzeme kaldırmaya, hassasiyete ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi incelenmiştir [6]. Başka bir çalışmada elektrolit püskürtme başlığının iş parçasına göre farklı açılarla konumlandırılmasının kanal geometrisine olan etkisi incelenmiş ve elektrolitin yüzeye çarpma açısının etkili bir parametre olduğu ifade edilmiştir [7]. Bir diğer çalışmada, eş zamanlı olarak çoklu kanalların işlenebilmesi ve işleme yapılmayacak bölgelerdeki korozyonun önlenmesi için yapılan yalıtımın etkisi incelenmiştir [8]. Başka bir çalışmada, paslanmaz çelik numune üzerine derin kanalların elde edilmesine yönelik deneyler ile deneylerin çoklu fizik simülasyonu yapılarak optimum parametreler tespit edilmiştir [9]. Başka bir çalışmada, takım uç geometrisinde yapılan değişikliklerin kanal geometrisine olan etkisi incelenmiştir [10]. Bir diğer çalışmada ise, elektrokimyasal jet işleme yönteminde farklı elektrolit akışı yönlendirmelerinin kanal geometrisine olan etkisi incelenmiştir [11]. Literatür incelendiğinde EJİ yöntemi kullanılarak kanal açılması ve açılan kanalın geometrisinin incelenmesi konularının gelişmeye açık olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada EJİ yöntemi kullanılarak YHÇ malzeme üzerine kanal açılmış ve elektrokimyasal işleme parametrelerinin kanal kesit geometrisi üzerine olan etkisi incelenmiştir.

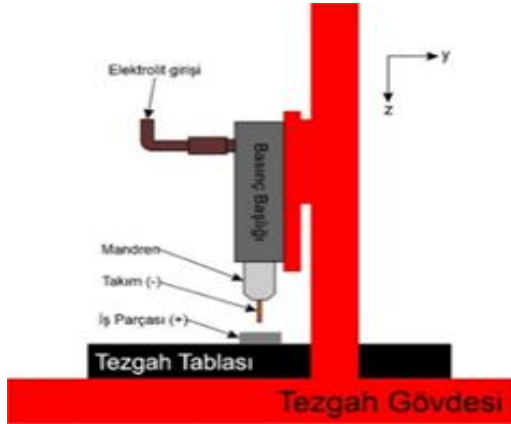
## 2. EJİ TEZGAHI (EJM MACHINE)

Deneylerde bu çalışma kapsamında tasarlanarak üretilen prototip masaüstü tezgah kullanılmıştır (Şekil 3). Tezgah, ana gövde, kontrol birimi, elektrolit basınçlandırma ünitesi ve doğru akım güç kaynağından meydana gelmektedir.



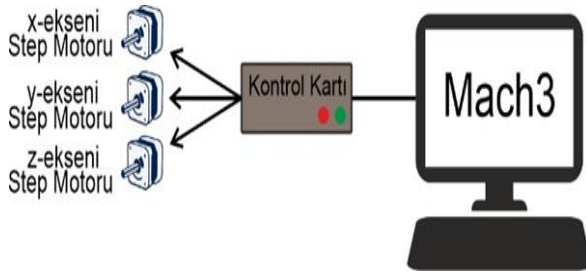
Şekil 3. EJİ tezgahı (EJM machine)

Tezgha ana gövdesi x, y, z eksenlerinde hareketi sağlayan motorlar, vidalı miller ve basınç başlığı kısımlarından oluşmaktadır. Step motorların ucuna bağlanmış vidalı miller sayesinde takımın hareketi sağlanmaktadır. Basınç başlığının giriş kısmına pompadan gelen elektrolit hortumu, çıkış kısmına ise tüp takım (elektrot) mandren aracılığıyla bağlanmıştır. Bu sayede yüksek basınçlı elektrolit işleme ortamına püskürtülmektedir (Şekil 4).



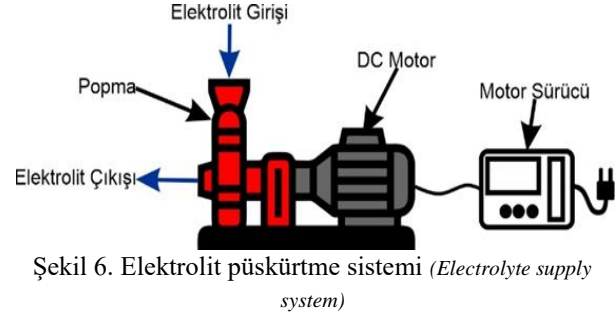
Şekil 4. Tezgha ana gövdesi şeması (Main body schema of the machine)

Tezghanın kontrol birimi 3 adet step motor, Mach3 kontrol kartı ve bilgisayardan oluşmaktadır (Şekil 5). Bilgisayarda bulunan kontrol yazılımı aracılığıyla kontrol kartı üzerinden takımın pozisyon kontrolü sağlanmaktadır. Kontrol biriminde işleme ortamındaki anlık akım ve gerilim değerlerini bilgisayarda kayıt altına alınmasını sağlayan sensör ve mikroişlemci bulunmaktadır.



Şekil 5. Tezgha kontrol sistemi şeması (Control system schema of the machine)

Elektrolit püskürtme sistemi; pompa, elektrik motoru ve elektrik motor sürücüsünden oluşmaktadır (Şekil 6). Motor sürücüsü ile pompayı çalıştıran motorun devri kontrol edilmektedir. Motor sürücüsü pompa çıkışında stabil elektrolit basıncı elde edilmesini sağlamaktadır. İşleme ortamına verilen elektrolit basıncı pompa çıkışındaki manometre ile tespit edilmektedir.



Şekil 6. Elektrolit püskürtme sistemi (Electrolyte supply system)

Elektrokimyasal işleme tezghasında 0 – 30 V gerilim aralığında ayarlanabilen doğru akım güç kaynağı mevcuttur. Güç kaynağının teknik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. DA güç kaynağının teknik özellikleri (Specifications of the DC power supply)

Gerilim	0-30 V
Akım	0-5 A
Gerilim kararlılığı	$\leq 0,01 + 2 \text{ mV}$
Yük stabilitesi	$\leq 0,01 + 2 \text{ mV}$

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

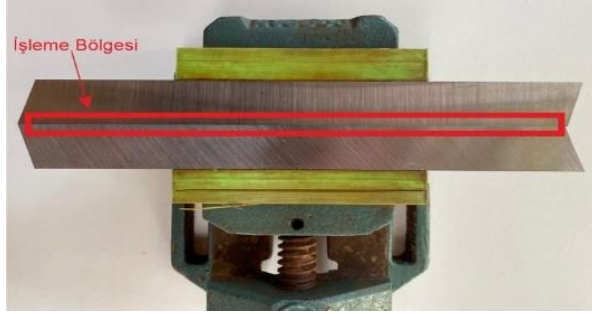
Yapılan deneysel çalışmanın amacı iş parçasına Eİ yöntemi ile kanalların açılması ve oluşturulan kanalların kesitine işleme parametrelerinin etkisini incelemektir. Elektrokimyasal işleme yönteminin geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor olan malzemelerin şekillendirilmesinde başarılı olduğu bilinmektedir [3]. Bu nedenle, deney numunesi olarak yüksek dayanıma sahip olması, takım malzemesi olarak yaygın kullanılması ve geleneksel yöntemlerle şekillendirilmesinin zor ve maliyetli olması sebebiyle HSS olarak bilinen yüksek hız çeliği (YHÇ) seçilmiştir. Deney numunesinin kompozisyonu Tablo 2’de verilmiştir. Deney numunesi 20 mm eninde, 200 mm boyunda ve 4 mm kalınlığındadır.

Tablo 2. YHÇ numunenin bileşenleri (%) (Components of HSS sample (%))

C	Si	Cr	W	Mo	V	Co
1,08	0,45	3,85	1,50	9,50	1,20	8,00

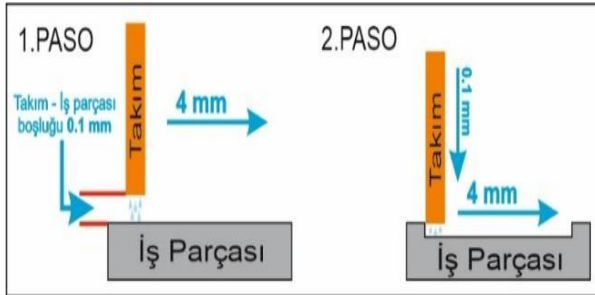
YHÇ numune üzerine açılacak kanalların kesit geometrilerini inceleyebilmek için, numunenin deneyler sonunda hassas bir şekilde kesilmesi gerekeceği öngörüldüğü için, iki farklı deney numunesi mengene yardımıyla birbirine bitleştirilmiş ve deneyler bu iki numunenin ayırma yüzeyinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 7). Daha sonra numuneler birbirinden ayrılarak kesme işlemine ihtiyaç

duyulmadan kanalların kesit görüntüleri elde edilmiştir.



Şekil 7. Mengenede bir araya getirilmiş deney numunelerinin görüntüsü (View of test specimens brought together in a vise)

Deneylerde 1,5 mm dış çapa sahip olan pirinç malzemeden imal edilmiş tüp elektrotlar takım olarak kullanılmıştır. Kanal geometrisini oluşturabilmek için takım hareketi G kodları ile oluşturulmuş, iki pasodan oluşan bir takım yolu tercih edilmiştir. 1. pasoda takım y-ekseninde 4 mm hareket etmekte, ardından 50 mm/dak ilerleme hızı ile başlangıç noktasına geri dönmektedir (Şekil 8). 2. pasoda ise takım numuneye (z-ekseninde) 0.1 mm'lik bir dalma gerçekleştirdikten sonra y-ekseninde 4 mm ilerleyerek işleme çevrimini tamamlamaktadır. Oluşturulan G kodu ile bu işlem 3 farklı ilerleme hızı aynı numune üzerinde 5 mm aralılarla tekrar edilmektedir.



Şekil 8. Takım yolu şeması (Shema of the tool path)

Deneylerde işleme gerilimi, elektrolit basıncı, elektrolit derişimi ve takım ilerleme hızı parametrelerinin kanal kesit geometrisine etkisini incelemek için her parametre için üç farklı değer belirlenmiştir (Tablo 3 ve 4).

Tablo 3. Deney parametreleri (Experiment parameters)

İşleme Gerilimi (V)	15, 20, 25
Elektrolit Basıncı (Bar)	30, 40, 50
Elektrolit Derişimi (g/L)	50, 100, 150
Takım İlerleme Hızı (mm/dak)	0,5, 0,75, 1
Elektrolit Bileşenleri	Su ve NaCl
Takım-İş Parçası Boşluğu (mm)	0,1

Tablo 4. Deney tasarımı (Experiment design)

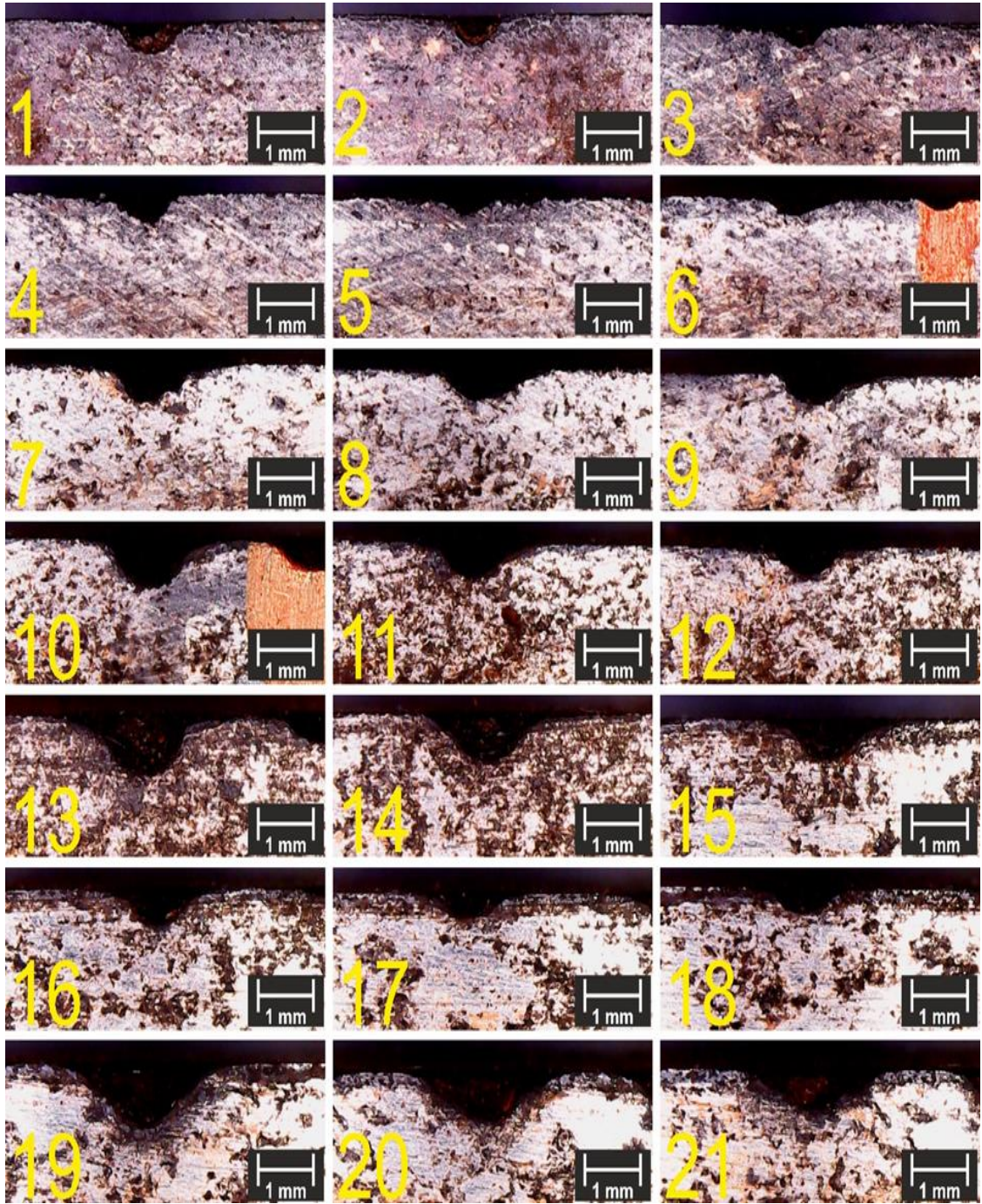
Deney Numarası	Deney Parametreleri			
	İşleme Gerilimi (Volt)	Elektrolit Basıncı (Bar)	Elektrolit Derişimi (g/L)	Takım İlerleme Hızı (mm/dak)
1	20	40	100	0,50
2	20	40	100	0,75
3	20	40	100	1,00
4	15	40	100	0,50
5	15	40	100	0,75
6	15	40	100	1,00
7	25	40	100	0,50
8	25	40	100	0,75
9	25	40	100	1,00
10	20	30	100	0,50
11	20	30	100	0,75
12	20	30	100	1,00
13	20	50	100	0,50
14	20	50	100	0,75
15	20	50	100	1,00
16	20	40	50	0,50
17	20	40	50	0,75
18	20	40	50	1,00
19	20	40	150	0,50
20	20	40	150	0,75
21	20	40	150	1,00

#### 4. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Yapılan deneyler sonrası kanalların üstten görüntüsü Şekil 9'da verilmiştir. Deneyler tamamlandıktan sonra mengene ile bir araya getirilmiş olan numuneler birbirinden ayrılmıştır. Çalışmada, oluşan kanal kesit geometrilerinin mikroskop fotoğrafları Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 9. Deney numunesinin görünüşü (View of test specimens)

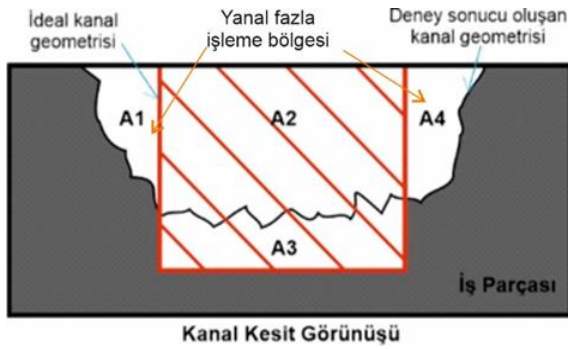


Şekil 10. Kanalların kesit görünüşü (Section view of the channels)



Bu çalışmada, işleme parametrelerinin işlenmiş kanal geometrisine etkisini somut olarak ortaya koymak için profil tamlık (PT) yaklaşımı kullanılmıştır [12]. Bu yaklaşımda PT değeri deney sonucunda elde edilen kesit alanında teorik oluşması gereken kanal kesit alanına göre alan sapmalarının ( $A_1$ ,  $A_3$  ve  $A_4$  alanları) teorik kesit alanına ( $A_{elektrot}$ ) bölünmesiyle bulunmaktadır (Eşitlik 1).  $A_1$  ve  $A_4$  alanları yanal fazla işleme bölgelerini ifade etmektedir (Şekil 11).

$$PT = \frac{A_{elektrot} - (A_1 + A_3 + A_4)}{A_{elektrot}}, \quad A_{elektrot} = A_2 + A_3 \quad (1)$$

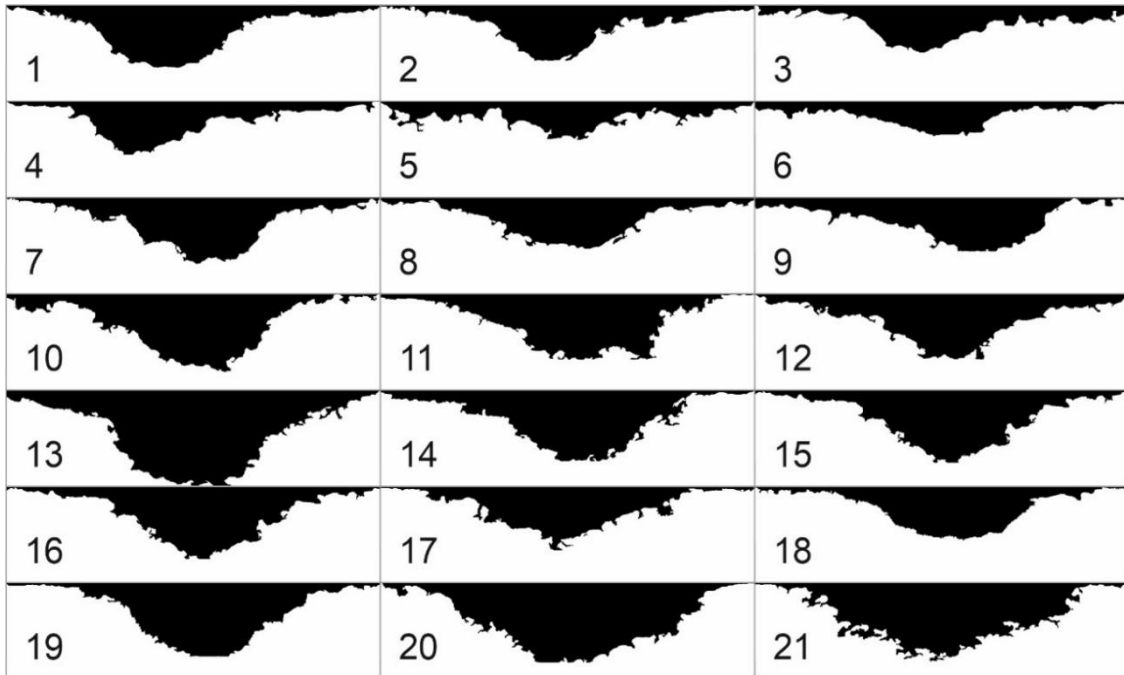


Şekil 11. Profil tamlık hesabı (Calculation of the profile precision)

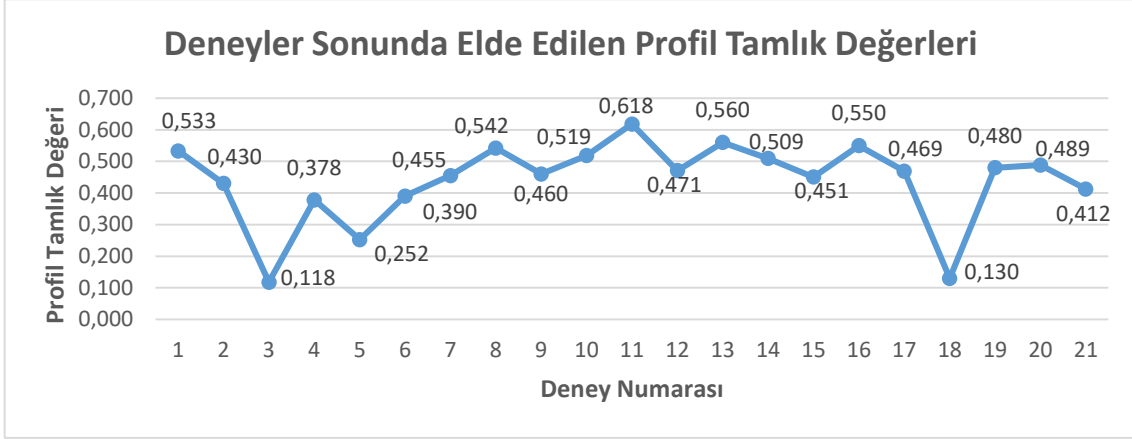
PT değerini hesaplamak için mikroskop görüntüleri görüntü işleme editörü olarak çalışan ImageJ programına aktarılmıştır. ImageJ yazılımı piksel boyutlarından alan hesabı yapılmasına ve aynı zamanda yüzey geometrisinin oluşturulmasına imkân vermektedir (Şekil 12). Ayrıca, ImageJ programı

aracılığıyla kanalların kesit alanları hesaplanmış ve bu değerler kullanılarak PT değerleri elde edilmiştir.

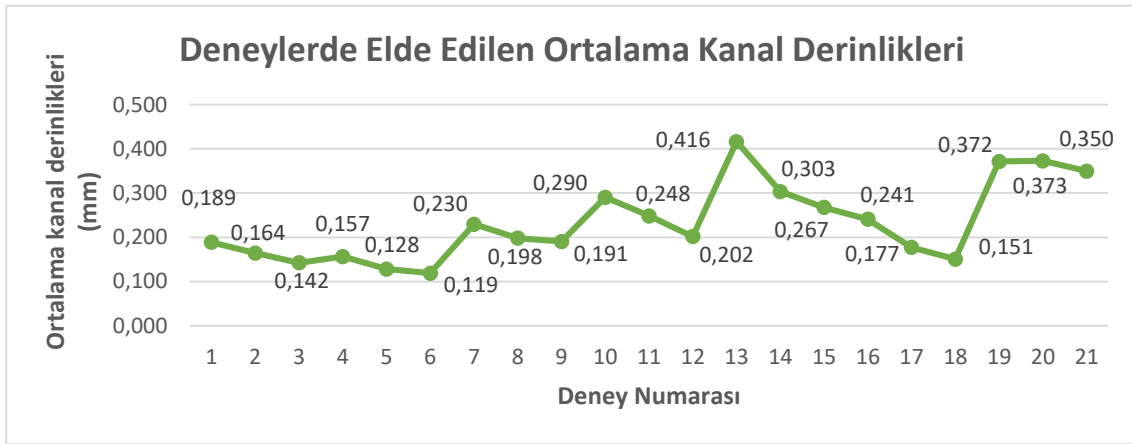
Şekil 13'te verilen grafikte en yüksek PT değerinin (0,618) 11 numaralı deneyde elde edildiği görülmektedir. Takip eden büyük PT değerleri (0,56 ve 0,55) ise 13 ve 16 numaralı deneylere aittir. Sonuç olarak yüksek PT değerlerinin 20 V'luk işleme gerilimi parametresinde elde edildiği tespit edilmiştir. En düşük PT değerlerinin ise 3 ve 18 numaralı deneylerde (0,118 ve 0,13) elde edildiği görülmektedir. Bu PT değerleri yüksek takım ilerleme hızı değerinde (1,0 mm/dak) elde edilmiştir. Bu çalışmada PT yaklaşımı tek başına kanal geometrileri hakkında tam bir bilgi veremeyeceği için bunun yanında kanal görüntülerinden kanal derinlikleri de (KD) hesaplanmıştır (Şekil 14). En yüksek ortalama KD 0,416 mm ile 13 numaralı deneyde elde edilmiştir. 13 numaralı deneyde 0,560 değeri ile en yüksek ikinci PT değeri elde edilmişti. Buna karşın, en yüksek PT değerinin elde edildiği 11 numaralı deneyde ait ortalama KD değeri 0,290 mm idi. Buradan da anlaşılacağı üzere, en yüksek PT ve KD değerleri aynı işleme koşulunda elde edilmemiştir. Bu durumda, "en iyi işlenmiş kanal geometrisi" kararı işleme sonucunda elde edilecek kanal kesitinin alan uyumluluğunun mu (Yani PT değeri) yoksa kanalın derinliğinin mi önemli olduğu ile ilgilidir. Bu nedenle, işleme parametrelerinin PT ve KD üzerine olan etkisini bir arada ortaya koymak için Genel Uyum (GU) değeri tanımı yapılmıştır. GU değeri Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 12. ImageJ programında oluşturulan kanal kesit geometrileri (Channel section geometries created in ImageJ program)



Şekil 13. PT değerleri (PT values)



Şekil 14. Ortalama KD değerleri (Average KD values)

$$GU = 0,5PT + 0,5(KD/NK) \quad (2)$$

**NK: Numune kalınlığı (mm)**

Bu alışmada, GU değerinin hesaplanmasında PT ve KD değerlerinin etkisinin eşit önemde olduğu kabul edilmiştir. Bu sebeple önem katsayıları eşit alınmıştır. KD veya PT değerinin daha kritik olduğu

uygulamalarda önem faktörleri farklı katsayılarla tanımlanabilir. Elde edilen kanal geometrileri için GU değerleri hesaplanmış ve Tablo 5'te sunulmuştur.

Hesaplanan GU değerlerine bakıldığında en yüksek değerlerin 11 ve 13 numaralı deneylerde elde edildiği görülmektedir. Ayrıca en yüksek GU

Tablo 5. GU değerleri (GU values)

Deney Numarası	PT	KD (mm)	GU
1	0,533	0,189	0,290
2	0,430	0,164	0,236
3	0,118	0,142	0,077
4	0,378	0,157	0,209
5	0,252	0,128	0,142
6	0,390	0,119	0,210
7	0,455	0,230	0,256
8	0,542	0,198	0,296
9	0,460	0,191	0,254
10	0,519	0,290	0,296
11	0,618	0,248	0,340
12	0,471	0,202	0,261
13	0,560	0,416	0,332
14	0,509	0,303	0,293
15	0,451	0,267	0,259
16	0,550	0,241	0,305
17	0,469	0,177	0,257
18	0,130	0,151	0,084
19	0,480	0,372	0,286
20	0,489	0,373	0,291
21	0,412	0,350	0,250

değerlerinin elde edildiği 14 deneyin ortak parametresinin 20 V'luk işleme gerilimidir. Ayrıca, 0,5 mm/dak'lık ilerleme hızında işlenen kanal geometrilerinin GU değerlerinin daha yüksek olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Elde edilen kanal geometrileri literatür çalışmaları ile benzerlik göstermektedir. Bununla beraber EJİ yöntemine etki eden parametre sayısının fazla olması ve yapılan çalışmalarda direkt olarak PT ve GU değerleri yaklaşımının kullanılmamış olması deney sonuçlarının literatür ile nicel olarak kıyaslanmasına imkân vermemektedir. Ancak, literatür çalışmalarının birçoğunda ortaya çıkan yanal fazla işleme problemiyle bu çalışmada da karşılaşmıştır. Yanal fazla işleme numune yüzeyinde elektrolit birikmesinden kaynaklanmaktadır. Yanal fazla işlemenin oluşması hesaplanan PT ve GU değerlerini azaltmaktadır.

## 5. DEĞERLENDİRME (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada EJİ yöntemiyle geleneksel yöntemlerle işlenebilmesi zor olan YHÇ malzeme üzerine kanallar açılmış ve işleme parametrelerinin kanal kesit geometrisine olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Çalışmada, işleme parametrelerinin profil tamlık (PT) değeri üzerindeki etkisi hakkında kesin bir yargıya varılamasa da PT yaklaşımının oluşan kanal geometrisi ile teorik kanal geometrisi alanları arasında karşılaştırma için oldukça uygun olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, İlerleme hızının artışıyla ve işleme geriliminin düşüşüyle ortalama kanal derinliğinin (KD) azaldığı tespit edilmiştir.
- Hesaplanan genel uyum (GU) değerleri incelendiğinde, 20 V'luk işleme geriliminde oluşturulan kanalların en yüksek değere sahip olduğu tespit görülmüştür. Ayrıca, düşük takım ilerleme hızı kullanılarak oluşturulan kanalların GU değerlerinin yüksek olduğu anlaşılmıştır.
- İleride yapılacak çalışmalarda, deney sayısının artırılmasının ve deney parametrelerinin elde edilen bulgular ışığında yeniden belirlenmesinin gerektiği düşünülmektedir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] H. Özerkan ve C. Coğun, "Döner Tüp Takım Kullanarak Elektrokimyasal Delme Yönteminin Deneysel İncelenmesi Ve Geliştirilmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 28, sayı. 4, ss. 885-895, Mar. 2014.
- [2] S. Önel, "Otomatik Kontrollü Elektrokimyasal İşlemenin (Eki) İncelenmesi Ve Uygulaması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 29, sayı. 1, ss. 1-8, Mar. 2014. doi:10.17341/gummfd.41007
- [3] H. Demirtaş, O. Yılmaz ve B. Kamber, "Makro ve Mikro Boyutlarda Üretim Yapabilen Elektrokimyasal İşleme Tezgahında İşlem Parametreleri Etkilerinin İncelenmesi", *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, c. 15, sayı. 1, ss 11-18, May. 2017.
- [4] R. Ippolito, S. Tornincasa, G. Capello ve G.F. Micheletti, "Electron-Jet Drilling — Basic Involved Phenomena", *CIRP Annals*, vol. 30, no. 1, pp 87-90, 1981. doi: 10.1016/S0007-8506(07)60901-9
- [5] Kendall T., Bartolo, P., Gillen, D. ve diğerleri, "A review of physical experimental research in jet electrochemical machining", *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 105, pp 651-667, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04099-x
- [6] W. Vanderauwera, M. Vanloffelt, R. Perez, B. Lauwers, "Investigation on the Performance of Macro Electrochemical Milling", *Procedia CIRP*, vol. 6, pp. 356-361, 2013. doi: 10.1016/j.procir.2013.03.025
- [7] J. Mitchell-Smith, A. Speidel, A.T. Clare, "Advancing electrochemical jet methods through manipulation of the angle of address", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 255, pp. 364-372, 2018. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.12.026
- [8] Jinxing Luo, Xiaolong Fang, Di Zhu, "Jet electrochemical machining of multi-grooves by using tube electrodes in a row", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 283, no. 116705, 2020. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116705

[9] C. Zhanga, J. Yaob, C. Zhangc, X. Chena, J. Liua, Y. Zhanga, “Electrochemical milling of narrow grooves with high aspect ratio using a tube electrode”, *Journal of Materials Processing Tech.* vol. 282, no. 116695, 2020. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116695

[10] J. Mitchell-Smith, A. Speidel, J. Gaskell, A. T. Clare, “Energy distribution modulation by mechanical design for electrochemical jet processing techniques”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 122, pp. 32-46, 2017. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2017.05.005



[11] X. Wanga, N. Qua, X. Fang, “Reducing stray corrosion in jet electrochemical milling by adjusting the jet shape”, *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 264, pp. 240-248, 2019. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.09.017

[12] C. oğun, T.C. Deniz, G. Küçüktürk, “A geometrical approach for reduction of tool shape degeneration in electric discharge machining (EDM)”, *Machining Science and Technology: An International Journal*, vol. 16, pp. 445-458, 2012. doi: 10.1080/10910344.2012.699369

This is an open access article under the CC-BY license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



## Covid-19 Salgın Sürecinde Hava Kalitesi Tahmini: Zonguldak Örneği

Büşra Duygu ÇELİK<sup>\*,a</sup> , Nursal ARICI<sup>a</sup> 

<sup>a,\*</sup> Gazi Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Fakültesi Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, 06010, Ankara, Türkiye.

### MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 07.06.2021  
Kabul: 13.08.2021

**Anahtar Kelimeler:**  
Covid-19,hava  
kirliliği,hava kalitesi  
tahmini,makine  
öğrenmesi

### ÖZ

Hava kirleticilerinin insan sağlığı üzerinde basit etkilerden erken ölüme kadar ciddi etkilere neden olduğu bilinmektedir. Özellikle solunum problemleri, akciğer rahatsızlıkları ve zatürre gibi birçok rahatsızlığa sebep olmaktadır. 30 Aralık 2019 itibarıyla dünyayı etkisi altına alan Covid-19 salgını bir solunum yolu hastalığıdır ve hava yoluyla bulaşmaktadır. Günümüzde devam eden salgın sürecinde hava kalitesinin tahmin edilmesi ve buna yönelik tedbirlerin alınması Covid-19 gibi hava yoluyla bulaşan hastalıkların yayılma hızını etkilemesi açısından önem taşımaktadır. Çalışma, Covid-19 salgını öncesi ve Covid-19 salgın sürecinde ölçülen çeşitli kirletici konsantrasyonlarını ele alarak makine öğrenmesi yöntemleriyle hava kalitesini tahmin etmektedir. Çalışmada kullanılan veri seti, hava kirliliğinin yüksek olduğu, gelişmiş sanayiye sahip Zonguldak iline ait kirletici konsantrasyonlarından oluşmaktadır. Veriler, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇSB) Hava İzleme İstasyonları web sitesinden sağlanmıştır. Tahmin başarısı yüksek beş farklı makine öğrenmesi yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda en iyi başarı 0.016 (2019 veri seti) ve 0.021 (2020 veri seti) RMSE değerleri ile Karar Ağacı algoritmasında elde edilmiştir. Çalışmada Naive Bayes algoritması en düşük başarıya sahiptir. Deneysel sonuçlar, önerilen modelin hava kalitesini tespit etmek için verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.05>

## Air Quality Forecast in the Covid-19 Outbreak Process: Zonguldak Case

### ARTICLE INFO

Received: 07.06.2021  
Accepted: 13.08.2021

**Keywords:**  
Covid-19,air  
pollution,air quality  
prediction,machine  
learning

### ABSTRACT

Air pollutants are known to cause severe effects on human health, from simple effects to premature death. It causes many ailments, especially respiratory problems, lung diseases, and pneumonia. As of December 30, 2019, the covid-19 outbreak affecting the world is a respiratory disease and is transmitted by air. In the current epidemic process, it is essential to predict air quality and take measures to affect the rate of spread of air-borne diseases such as Covid-19. The study predicts air quality through machine learning methods, considering the various concentrations of pollutants measured before the covid-19 outbreak and during the covid-19 outbreak. The data set used in the study consists of the pollutant concentrations of Zonguldak province, which has high air pollution and developed industry. The data was obtained from the Ministry of Environment and Urban Planning (MoLS) weather monitoring stations website. Five different machine learning methods with high predictive success were used. As a result of the study, the best hit was achieved in the decision tree algorithm with Rmse values of 0.016 (2019 dataset) and 0.021 (2020 dataset). The Naive Bayesian algorithm has the lowest success in the study. Experimental results suggest that the proposed model could be used efficiently to detect air quality.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.05>

\*Sorumlu yazar: [nursal@gazi.edu.tr](mailto:nursal@gazi.edu.tr)

**To cite this article:** B.D Çelik ve N. Arıcı, "Air Quality Forecast in the Covid-19 Outbreak Process: Zonguldak Case", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 222-232, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.03.05

## 1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bu Hava kirliliği; atmosferdeki gaz, su buharı, duman, toz şeklindeki kirleticilerin, bütün canlılara zarar verecek seviyeye erişmesidir [1]. Özellikle sanayinin gelişmiş olduğu bölgelerde, hava kirliliği yaşam kalitesi için önemli bir etkidir. Hızla büyüyerek gelişen sanayi, çoğalan nüfus ve bunların sonucunda artan kentleşme hava kirliliğini arttırmıştır. Havada bulunan kirleticiler astım, zatürre, kalp krizi, bronşit ve diğer solunum problemleri gibi kronik hastalıkları tetikler veya kötüleştirir [2].

2019 yılının aralık ayında Çin'in Wuhan şehrinde ilk defa görülen Covid-19 vakasından sonra dünyaya yayılan salgının Türkiye'deki ilk vakası 11 Mart'ta tespit edilmiştir. Covid-19 tespit edilen vakada en sık solunum problemleri, akciğerlerde yoğun hasar ve hastalığın ilerlemesi durumunda zatürre görülmektedir. Ayrıca kronik rahatsızlığı olan vakalarda kalp krizi ve ölüm riski daha da artmaktadır. Bilim insanları hava kalitesinin düşük olduğu bölgelerde yaşayan insanlarda Covid-19 vakalarının hastalığı daha şiddetli geçirip geçirmeyeceğini araştırmaya başlamışlardır [3]. Hava kirliliği yoğun olan bölgelerde yaşayanların diğer insanlara göre hastalanmaya daha müsait olduğunu ve kirletici partiküllerin virüsün bulaşmasında kolaylaştırıcı etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir [4]. Ayrıca, hava kirliliğinin yüksek olduğu şehirlerde Covid-19 vakalarının olması durumunda alınan önlemlerin artırılması gerektiği, aksi takdirde yüksek ölüm oranları ile karşılaşılacağı bildirilmiştir [3]. Ülkemizde alınan pandemi tedbirleri kapsamında 4 Nisan 2020'den itibaren otuz büyük şehir ve Zonguldak'a seyahat ve sokağa çıkma kısıtlamasına başlanmıştır. Zonguldak büyük şehir olmamakla birlikte kısıtlama kapsamına alınmasının nedeni hava kirliliğinin en yoğun olduğu bölgelerden biri olup vaka sayısı bakımından da riskli grubunda yer almasıdır. Bu gerekçeyle çalışmamızda Zonguldak ili hava kalitesi değerlendirilmesi ele alınmıştır.

Bu çalışmanın amacı, Zonguldak ilindeki Covid-19 salgını öncesi ve esnasındaki hava kalitesi değişimlerini incelemek ve bu amaç doğrultusunda kirletici parametreleri makine öğrenmesi yöntemleriyle tahmin etmektir. Zonguldak ilinde gözlemlenen PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> ve CO hava kirleticilerinin konsantrasyonları alınarak [5] salgın öncesi ve salgın süreci olmak üzere iki ayrı veri seti oluşturulmuştur. Bu veri setleri üzerinde tahmin başarısı yüksek olan Destek Vektör Makinesi (SVM), K-En Yakın Komşu (KNN), Karar Ağacı (DT), Rastgele Orman (RF), ve Naive Bayes (NB) makine

öğrenmesi algoritmaları uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan verileri bölme işleminde öncelikle %80 eğitim ve %20 test, ardından %70 eğitim ve %30 test verisi alınarak model ayrı ayrı denenmiştir. En son aşırı öğrenmeyi engellemek ve daha yüksek başarı için %67'si eğitim ve %33'ü test verisi olarak kullanılmıştır. Her bir yöntemin tahmin başarı performansı doğruluk, RMSE ve R<sup>2</sup> kriterlerine göre kıyaslanmıştır. Çalışmanın sonraki bölümleri şu şekilde yapılandırılmıştır.

İkinci bölümünde, literatürdeki Covid-19 salgını ile hava kirliliği arasındaki ilişkiyi ve hava kalitesi tahmini için kullanılan makine öğrenmesi yöntemlerini konu alan çalışmalar incelenmiştir. Üçüncü bölümde çalışmada kullanılan veri seti ile tahminleme modelinde kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde Covid-19 öncesi ve Covid-19 sürecindeki veriler değerlendirilmiş ve uygulanan modelin doğruluk değerleri karşılaştırılmıştır. Son bölümde ise, tahminleme sonucu elde edilen çıktılar yorumlanmıştır.

## 2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR (PREVIOUS STUDIES)

İnsan sağlığını ciddi anlamda tehdit eden ve birçok hükümeti önlem alamaya iten Covid-19 salgını, bulaştığı kişilerde bağışıklık sisteminin zayıf olması durumunda kişi, hastalığı daha ağır atatabilmektedir. Hava kalitesinin düşük olması kişilerde bağışıklık sisteminin zayıflatacak birçok hastalığa neden olabilmektedir. Bu yüzden birçok araştırmacı, hava kalitesini tahmin edebilmek amacıyla yaptıkları çalışmaların yanında Covid-19'un hava kalitesiyle ilişkisini de incelemektedirler.

Zhu ve ark., Çin'de bulunan 120 şehirdeki PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub> ve O<sub>3</sub> hava kirletici parametreleri ile günlük tespit edilen Covid-19 vakalarını değerlendirmeye almış ve bu veriler üzerinde genelleştirilmiş katkı modeli uygulayarak Covid-19 ile hava kirliliği arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda hava kirliliği ve Covid-19 salgını arasında anlamlı pozitif güçlü bir ilişki olduğu saptanmıştır [6].

Rodríguez-Urrego ve Rodríguez-Urrego, karantina başlangıcından önce ve sonra ölçülen, Dünya Sağlık Örgütü'ne göre dünyanın en kirlili 50 başkentindeki PM<sub>2.5</sub> partikül maddesinin emisyon davranışını ele almış ve Covid-19 sürecinde hava kalitesi incelemiştir. Çalışmanın sonucuna göre karantina boyunca çoğu şehrin kirletici konsantrasyonlarında ciddi bir düşüş olduğu görülmüştür. Ayrıca seçilen

şehirlerden çoğunun hava kalitesi olumlu etkilenmiştir [7].

Başka bir çalışmada Brandt ve arkadaşları, Covid-19 ölümleri üzerinde hava kirliliğinin etkisini incelemişler ve nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu yerleşim yerlerinde hava kirliliğinin daha yoğun olduğunu ve bu yerlerdeki hava kirliliğinin Covid-19 ölümlerinin üzerinde etkili olduğunu vurgulamıştır [8].

Hava kalitesinin değişimini izleme, tahmin etme ve gerekli tedbirlerin erken alınması konuları Covid-19 salgın sürecinde daha da önem taşımaktadır. Özellikle hava kalitesinin doğru tahmin edilmesi, ekolojik denge ve insan sağlığı üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Son yıllarda araştırmacılar klasik istatistik yöntemlerin dışında tahmin başarısı yüksek olan makine öğrenmesi yöntemleri ile hava kalitesini tahmin etmeye çalışmışlardır.

Doreswamy ve arkadaşları, havadaki PM<sub>10</sub> ve PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonunu tahmin etmeye yönelik makine öğrenmesi tahmin modellerini kullanmış ve bu modelleri mevcut geleneksel modellerle karşılaştırılmıştır. Elde ettikleri 0,9336 R<sup>2</sup> ve 0.1302 RMSE performans değerleriyle, makine öğrenmesi modelleri tahmin performansında geleneksel modellere göre daha iyi performans göstermiştir [9].

Başka bir çalışmada Kang ve arkadaşları, Çin'in Shenzhen şehrinden alınan veriler kullanılarak hava kalitesi haritası görselleştirilmiştir. Ayrıca Yapay Sinir Ağı, Genetik Algoritma, Rastgele Orman, Karar Ağacı, Derin İnanç Ağı (Deep Belief Network) ve Destek Vektör Makinesi kullanılan çalışmalarda oluşturulan modellerin çeşitli avantajları ve dezavantajları anlatılmıştır. Karşılaştırılan çalışmalardan en başarılı olan Karar Ağacı Algoritması, %89,46 doğruluk oranına sahiptir [10].

Masood ve arkadaşları, 2016-2018 arasındaki iki yıllık döneme karşılık gelen çeşitli meteorolojik ve kirletici parametrelerin girdileri üzerine SVM ve YSA gibi farklı modeller oluşturulmuştur. PM<sub>2.5</sub> tahmini için modellerin performans değerlendirmesi yapılmış ve sonuçlar tartışılmıştır. YSA ve SVM için ortalama hata karesi değerleri sırasıyla 0.0191 ve 0.0314 bulunmuştur [11].

Deters ve arkadaşları, araştırma makalelerinde ince partikül madde veya PM<sub>2.5</sub> nedeniyle milyonlarca erken ölüme neden olan dış mekân kirliliği araştırmasını önermişlerdir. PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonunu tahmin etmek için altı yıllık meteorolojik ve kirlilik

veri analizine dayalı bir makine öğrenmesi yaklaşımı geliştirmişlerdir [12].

Bali çalışmasında, Hindistan hava kalitesinin tahmin ve analizini makine öğrenmesi algoritmalarından SVM, RF, NB kullanarak modellemiştir. En yüksek başarıyı %99,1 ile rastgele orman algoritmasında elde etmiştir [13].

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

#### 3.1. Zonguldak İli Hava Kalitesi (Air Quality of Zonguldak City)

Son yıllarda hava kalitesi oldukça kötüleşen illerimizden biri de Zonguldak'tır [5]. Türkiye Çevre Sorunları ve Öncelikleri Envanteri Değerlendirme Raporu'nda Zonguldak ilinin en önemli çevre sorununun hava kirliliği olduğu belirtilmiştir. Ayrıca Zonguldak, Türkiye İstatistik Kurumu'nun Çevre İstatistiklerine bakıldığında partikül madde kirliliği bakımından Türkiye'nin havası en kirli şehirleri arasındadır [14]. Zonguldak'ta hava kirliliğine neden olan başlıca kirleticiler genellikle sanayileşme, soğuk havadaki evsel ısınma ve trafik kaynaklıdır. Özellikle sanayileşmenin oldukça yoğun olduğu Batı Karadeniz bölgesinde bulunan ilimiz, taş kömürü madenciliği, enerji ve metalürji sektörü sanayisinin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Enerji sektöründe yer alan Çatalağzı Termik Santrali ülkemizdeki ilk termik santral olup katı yakıt olarak taş kömürü kullanmaktadır [5].

Zonguldak'ta görülen hava kirleticiler partiküller ve gazlar şeklinde iki alt gruba ayrılır. Partikül maddelerden PM<sub>10</sub>, çoğunlukla fabrika faaliyetleri, inşaatlar, trafik, termik santraller ve evsel ısınma kaynaklıdır. Hava yoluyla taşınan bu kirletici türü öncelikle astım gibi solunum rahatsızlıkları, kalp damar hastalıkları, akciğer rahatsızlıklarına sebep olarak erken ölüm riski taşımaktadır. PM<sub>10</sub>'nun yanı sıra izleme istasyonunda ölçülen hava kirletici parametreleri kısaca açıklanmıştır [15]:

Renksiz, yanıcı olmayan ve gaz halde bulunan kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>), genellikle ısınma, endüstriyel faaliyetler ve trafik bölgelerinde oluşan bir kirletici türüdür. Diğer kirleticilerle birleştiğinde damlalar veya katı partiküller halinde uzun mesafeler taşınabilir. Uzun süre maruz kalınması halinde solunum yolu rahatsızlıklarına, kalp krizi riskinin artmasına neden olmaktadır [15].

Azot oksit (NO<sub>x</sub>) emisyonları insanların sağlığı üzerinde yarattığı etki bakımından en zararlı kirletici

olup trafik ve endüstriyel tesisler başlıca kaynağıdır. Kısa süre maruz kalındığında bile solunum sistemi üzerinde ağır hasarlara yol açan NO<sub>x</sub> emisyonları kronik hastalarda daha da büyük tahribatlara sebep olmaktadır. Uzun süreli maruz kalınması halinde ise bölgedeki solunum yolu rahatsızlıklarının arttığı gözlemlenmiştir [15].

Karbon monoksit (CO) gazı tam yanmamış olan yakıtlar sonucu ortaya çıkan kokusuz ve renksiz bir gazdır. Kış mevsiminde en yüksek değere ulaşan CO' in ana kaynağı trafikte oluşan egzoz gazları ve sigara dumanıdır. Kandaki hemoglobine bağlanarak hücrelere giden oksijen miktarının azalmasına sebep olur. CO gazına maruz kalan insanlarda kalp ve solunum rahatsızlıkları görülebilir [15].

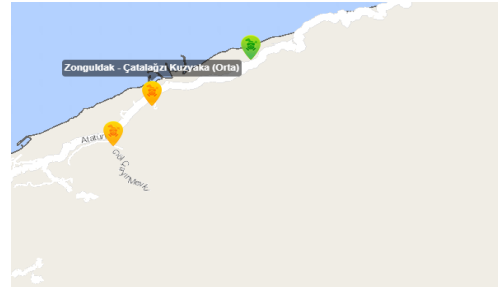
Ozon (O<sub>3</sub>), doğrudan ortam havasına karışmayan, renksiz ve kokusuz bir gaz olup karmaşık kimyasal tepkimeler sonucunda oluşur. Maruz kalma süresine göre tahribat oranı artar ve en yüksek risk grubu çocuklar ve kronik hastalardır [15].

### 3.2. Veri Seti (Dataset)

Veri seti, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇŞB) Hava İzleme İstasyonları web sitesinden sağlanmıştır [16]. Bu web sitesinde Türkiye'deki tüm illerin çeşitli bölgelerinden 7x24 ölçülen SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> ve PM<sub>2,5</sub> kirletici parametrelere ait veri setleri yayımlanmaktadır. Bu çalışmada veriler, Zonguldak ili Çatalağzı beldesinde yer alan hava izleme istasyonundan alınmıştır (Şekil 1).

Termik santralin yer aldığı Çatalağzı-Kuzyaka izleme istasyonundan, salgın öncesi 01.01.2019-31.12.2019 ve salgın sürecine ait 11.03.2020-

31.12.2020 tarih aralığına ait yapılan ölçüm verileri alınmıştır. Çalışmada kullanılan veri seti, 15.578 veriden oluşmaktadır. 8.737 veri 2019 yılına, 6841 veri de 2020 yılına aittir. Türkiye'de resmi kayıtlarda salgın başlangıcı mart ayı kabul edildiğinden 2020 yılına ait ocak ve şubat ayları değerlendirmeye dahil edilmemiştir. Seçilen istasyonda SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO ve PM<sub>10</sub> kirletici parametreleri ölçülmektedir.



Şekil 1. Zonguldak-Çatalağzı Kuzyaka Hava İzleme İstasyonu (Zonguldak-Çatalağzı Kuzyaka Weather Monitoring Station)

Çalışmada tahmin edilmek istenen bağımlı değişken Hava Kalite İndeksi (HKİ), çevremizdeki hava kalitesinin sağlığımız üzerindeki etkisinin ne olduğunu anlamamıza yarayan ölçektir. Bu indeks, havadaki kirleticilerin konsantrasyonlarına göre hava kalitesini iyi, orta, hassas, sağlıklı, kötü ve tehlikeli olmak üzere beş farklı seviyede ortaya koymaktadır. Ulusal Hava Kalite İndeksi kesme noktaları Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca hava kirliliğine karşı hassas olan insanların sağlıklarını korumaya yardımcı olan bir faktördür. HKİ, çevresel faktörlerin insan sağlığına hangi oranda etki yaptığını göstererek, sağlık açısından tehdit oluşturan durumları önlemek için kullanılmaktadır.

Tablo 1. Ulusal hava kalite indeksi kesme noktaları (National air quality index breakpoints) [5]

İndeks	HKİ	SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	CO[µg/m <sup>3</sup> ]	O <sub>3</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	PM <sub>10</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]
		1 Sa. Ort.	1 Sa. Ort.	8 Sa. Ort.	8 Sa. Ort.	24 Sa. Ort.
İyi	0- 50	0-100	0-100	0-5500	0-120	0-50
Orta	51- 100	101-250	101-200	5501-10000	121-160	51-100
Hassas	101- 150	251-500	201-500	10001-16000	161-180	101-260
Sağlıksız	151- 200	501-850	501-1000	16001-24000	181-240	261-400
Kötü	201 - 300	851-1100	1001-2000	24001-32000	241-700	401-520
Tehlikeli	301- 500	>1101	>2001	>32001	>701	>521

Çalışmamızda hava kirliliği parametreleri SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>) giriş parametreleri olarak ele alınmıştır ve bağımlı değişken olan HKİ değeri tahmin edilmiştir. Veri ön işleme aşamasında, öncelikle aykırı değerler tespit edilerek yerine ortalama değer atanmıştır. Ardından eksik veriler tespit edilmiştir. 2020 yılı temmuz ayına ait

ölçümlerde veri bulunmadığından temmuz ayı değerlendirmeye dahil edilmemiştir. Eksik veri olan diğer aylarda kirleticilerin ortalama değerleri kullanılarak tamamlanmıştır. Bir sonraki aşamada verilerin ortak bir ölçekte değerlendirilebilmesi için (1) nolu eşitlikteki min-max normalizasyonu kullanılmıştır.



$$x' = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (1)$$

$x'$  = Normalize edilmiş veri

$x_i$  = Girdi değeri

$x_{min}$  = Girdi seti içerisinde yer alan en küçük sayı

$x_{max}$  = Girdi seti içerisinde yer alan en büyük sayı

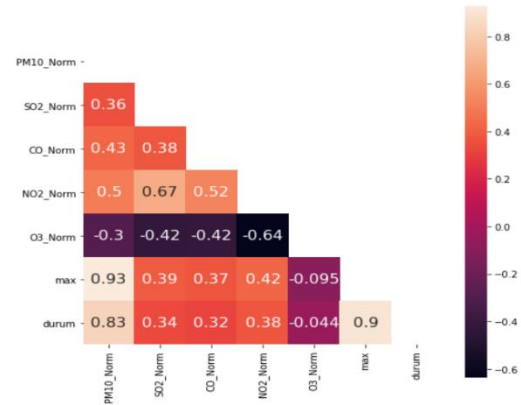
Normalize edilen veriler günlük olarak kıyaslandığında en yüksek ölçülen değer 'max' değeri ile belirtilmiştir. 'max' değeri ölçüm yapılan günün HKİ' sine eşittir. HKİ değeri için 1'den 6'ya kadar 'Durum' etiketi oluşturulmuştur. İlgili etiketlerin değer aralıkları tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. HKİ aralığına göre durum etiketi dağılımı  
(Status label distribution by AQI range)

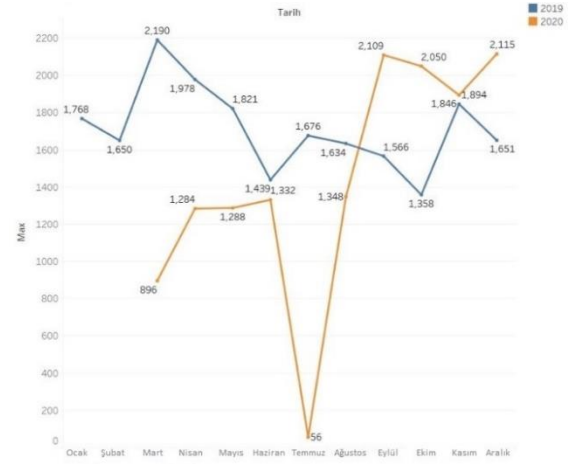
İndeks	HKİ	Durum
İyi	0 – 50	1
Orta	51 – 100	2
Hassas	101 – 150	3
Sağlıksız	151 – 200	4
Kötü	201 – 300	5
Tehlikeli	301 – 500	6

Daha sonra normalize edilmiş parametreler kullanılarak korelasyon matrisi oluşturulmuş ve parametreler arasındaki ilişki incelenmiştir. Şekil 2'de havayı kirleten ve veri setinde yer alan parametreler ile hava kalitesi arasındaki ilişki güçleri [0,0, 1,0] aralığında gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde PM<sub>10</sub> parametresinin hava kalitesi indeksi ile 0,93'lük pozitif güçlü bir korelasyona sahip olduğu görülmektedir. Hava Kalite İndeksi ile PM<sub>10</sub> haricindeki diğer parametreler arasındaki ilişki güçleri sırasıyla NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO ve O<sub>3</sub>'a aittir.

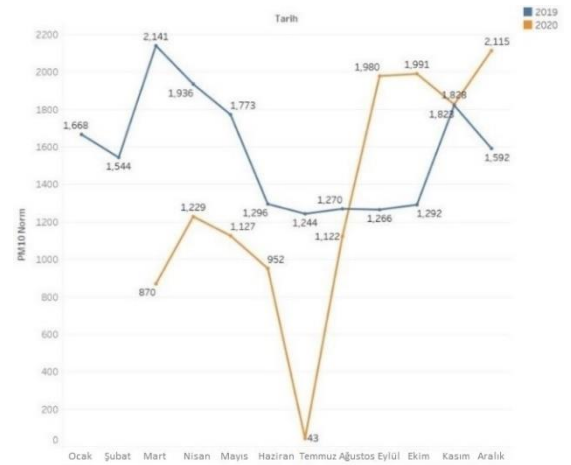
2019-2020 günlük ölçümlenen kirletici konsantrasyonlarından oluşan veri seti incelendiğinde PM<sub>10</sub> ve Hava Kalite İndeksi arasındaki ilişki Şekil 3 ve Şekil 4'teki gibidir. Grafiklerde görüldüğü üzere PM<sub>10</sub> artış azalış eğrisi hava kalite eğrisi ile birçok noktada paralellik göstermektedir. Bundan dolayı PM<sub>10</sub> parametresiyle hava kalitesi arasında pozitif güçlü bir ilişki olduğu çıkarımı yapılabilir.



Şekil 2. Hava Kirleticilerin Korelasyon Matrisi  
(Correlation Matrix of Air Pollutants)



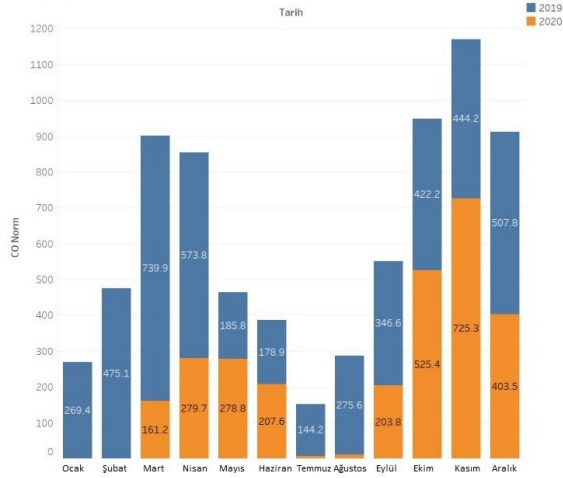
Şekil 3. HKİ artış azalış eğrisi  
(AQI increase and decrease curve)



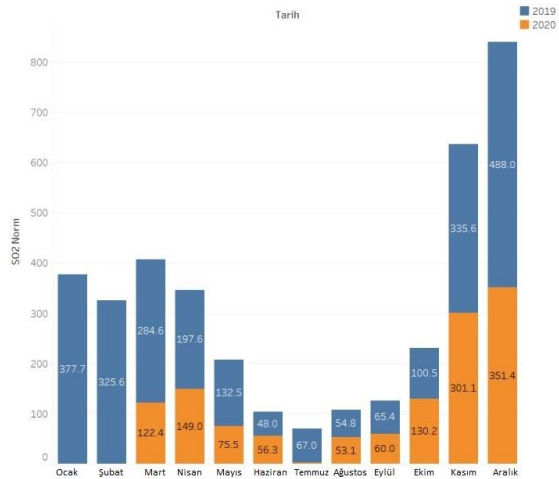
Şekil 4. PM<sub>10</sub> artış azalış eğrisi  
(PM<sub>10</sub> increase and decrease curve)

Covid-19 salgını öncesi ve süresince ölçülen kirletici konsantrasyonlarının aylık dağılımı Şekil 5 ve Şekil 6'da görselleştirilip kıyaslanmıştır. Çalışmada

2020 yılına ait salgın süreci ele alındığından Ocak ve Şubat ayları değerlendirmeye dahil edilmemiştir.



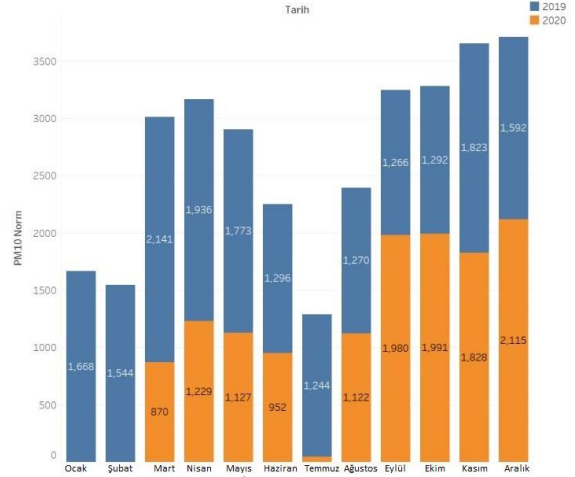
Şekil 5. CO Parametresinin Yıl Bazlı Dağılımı  
(Year-Based Distribution of CO Parameter)



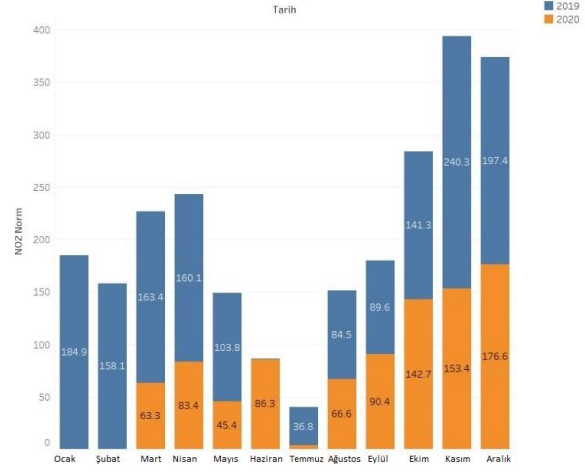
Şekil 6. SO2 Parametresinin Yıl Bazlı Dağılımı  
(Year-Based Distribution of SO<sub>2</sub> Parameter)

Şekil 5 ve Şekil 6'daki grafikler incelendiğinde, Mart ayında başlayan karantina ile CO ve SO<sub>2</sub> kirleticilerinin ölçümlenen değerlerinde ciddi bir düşüş görülmektedir ve bu düşüşler DSÖ'nün çalışmalarıyla da desteklenmektedir [17][18].

Şekil 7 ve Şekil 8'de PM10 ve NO<sub>2</sub> hava kirletici parametrelerinin yıllara göre dağılımları görselleştirilmiştir. Bu grafiklerde de CO ve SO<sub>2</sub> parametrelerinde görüldüğü gibi 2020 yılında ciddi düşüşler görülmektedir.

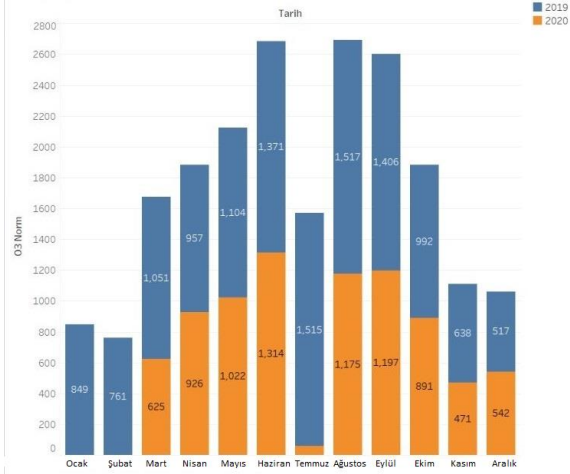


Şekil 7. PM<sub>10</sub> Parametresinin Yıl Bazlı Dağılımı  
(Year-Based Distribution of PM<sub>10</sub> Parameter)



Şekil 8. NO<sub>2</sub> Parametresinin Yıl Bazlı Dağılımı  
(Year-Based Distribution of NO<sub>2</sub> Parameter)

Son olarak Şekil 9'da O<sub>3</sub> hava kirletici parametresi yıllara göre dağılımı görselleştirilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere O<sub>3</sub> hava kirletici parametresinde de düşüş olduğu gözlemlenmiş fakat düşüşün önceki dört parametrede olduğu kadar kesin olmadığı görülmektedir. Karantina sürecinde genel olarak tüm kirletici parametrelerde azalma tespit edilmiştir. Ayrıca haziran ayında tekrar normalleşme sürecine girilmesi ile kirletici konsantrasyonlarının arttığı görülmektedir.



Şekil 9. O<sub>3</sub> Parametresinin Yıl Bazlı Dağılımı  
(Year-Based Distribution of O<sub>3</sub> Parameter)

Modelin kurulması ve değerlendirilmesi aşamasında Python temelli bir kütüphane olan Scikit-learn kütüphanesi kullanılmıştır. Makine öğrenmesi yöntemlerinden KNN, SVM, RF, KA ve NB ile hava kalitesi modellenmiş ve başarı oranları karşılaştırılmıştır.

### 3.3. Makine Öğrenmesi Algoritmaları (Machine Learning Algorithms)

Günümüzde gelişen teknolojiyle beraber verinin elle işlenmesi ve analizinin yapılması daha zor hale gelmiştir. Yapısal olarak öğrenebilen yapay zekâ algoritmalarının bir alt alanı olan makine öğrenmesinin temel amacı veriler üzerinde başarılı tahminler elde etmektir. Makine öğrenmesi algoritmalarıyla hava kalitesi tahmin sistemi için kullanılan algoritmanın seçimi çok önemlidir. Yapılan sistematik inceleme, 2017'den bu yana, atmosfer kirliliğini tahmin etmek için makine öğrenmesi tekniklerinin uygulanmasının önemli ölçüde arttığını ortaya koymaktadır [19]. Çalışmada, başarı oranlarının yüksek olması sebebiyle kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri aşağıda açıklanmıştır. Ayrıca her yonteme ait 2019 ve 2020 yılları hata matrisleri ve doğruluk oranları da ek olarak verilmiştir.

#### 3.3.1. Destek vektör makinesi (Support Vector Machine-SVM)

İki ve daha fazla boyuttaki verileri doğru, düzlem veya hiper düzlem yardımıyla birbirinden ayırarak sınıflandırma ve regresyon analizi yapan makine öğrenmesi algoritmasıdır. Bu algoritmanın amacı verilen veri noktalarını olabildiğince en iyi şekilde ayırmaktır. Küçük ve orta ölçekli verilerde daha başarılı olduğu gözlemlenen SVM algoritması, hafızayı verimli kılan karar fonksiyonunda eğitim noktalarının alt kümesini kullanır [20]. 2019 ve 2020

yıllarına ait veri setlerine uygulanan SVM algoritması sonucunda elde edilen hata matrisleri Şekil 10 ve Şekil 11' de verilmiştir.

```
[[1202  13  0  0  0  0]
 [  6 1432  3  0  0  0]
 [  0  1 189  0  0  0]
 [  0  0  8 19  2  0]
 [  0  0  0  0  8  0]
 [  0  0  0  0  0  1]]
```

Support-Vector-Machine Accuracy 0.9885575589459085  
Support-Vector-Machine Rmse: 0.1069693463291776  
Support-Vector-Machine R2: 0.9746791055795522

Şekil 10. 2019 hata matrisi (confusion matrix-2019)

```
[[1286  0  0  0  0  0]
 [ 23 802  2  0  0  0]
 [  0  4 106  0  0  0]
 [  0  0  3 24  1  0]
 [  0  0  0  1  5  0]
 [  0  0  0  0  0  1]]
```

Support-Vector-Machine Accuracy 0.9849424269264836  
Support-Vector-Machine Rmse: 0.12270930312537998  
Support-Vector-Machine R2: 0.9674352709627065

Şekil 11. 2020 hata matrisi (confusion matrix-2020)

#### 3.3.2. Rastgele orman (Random forest -RF)

Hem sınıflandırma hem de regresyon amaçlı kullanılabilen denetimli bir makine öğrenme algoritmasıdır. Genellikle sınıflandırma görevleri için tercih edilir. Birden çok karar ağacından oluşan Rastgele orman algoritması veri ögeleri üzerinde rastgele bir orman oluşturur ve her biri için tahmin yapar. En son olarak da aralarındaki en iyi çözümü seçer. Bu sayede Rastgele orman, sonuçların ortalamasını alarak aşırı öğrenmeyi azaltır ve birbirinden bağımsız parametrelerle farklı karar ağaçları üzerinden değerlendirmeye aldığı için başarısı oldukça yüksektir [20]. 2019 ve 2020 yıllarına ait veri setlerine uygulanan RF algoritması sonucunda elde edilen hata matrisleri Şekil 12 ve Şekil 13' te verilmiştir.

```
[[1215  0  0  0  0  0]
 [  0 1440  1  0  0  0]
 [  0  0 190  0  0  0]
 [  0  0  5 24  0  0]
 [  0  0  1  0  7  0]
 [  0  0  0  0  0  1]]
```

Random-Forest Accuracy: 0.9975728155339806  
Random-Forest Rmse: 0.0588846871438385  
Random-Forest R2: 0.9923270016907734

Şekil 12. 2019 hata matrisi (confusion matrix-2019)

```
[[1286  0  0  0  0  0]
 [  1 825  1  0  0  0]
 [  0  0 110  0  0  0]
 [  0  0  0 28  0  0]
 [  0  0  0  1  5  0]
 [  0  0  0  0  1  0]]
Random-Forest Accuracy: 0.9982285208148804
Random-Forest Rmse: 0.04208894373965181
Random-Forest R2: 0.9961688554073772
```

Şekil 13. 2020 hata matrisi (*confusion matrix-2020*)

### 3.3.3. K en yakın komşu (*K-nearest neighbour*)

K En Yakın Komşu algoritması, sınıflandırma ve regresyon problemlerinin çözümünde kullanılan basit, oldukça yaygın ve denetlenen bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. KNN algoritmasında ilk aşamada veriler etiketlenir ve etiketlenen bu verilerden bir eğitim kümesi hazırlanır. Ardından k adet sınıf merkezi tanımlandıktan sonra bir uzaklık fonksiyonu belirlenir. Daha önce karşılaşılmamış bir veri ile yüz yüze gelindiğinde belirlenen uzaklık algoritması kullanılarak karşılaşılan verinin eğitim kümesindeki verilerle olan mesafesi ölçülür ve aralarında uzaklığı en kısa olan k adet veri eğitim kümesinden seçilerek sınıflama kümesi oluşturulur. En son aşamada, seçilen yeni verinin sınıfı, sınıflama kümesinin en sık içerdiği sınıf olarak tanımlanır ve oluşturulan model sona erdirilir [21]. 2019 ve 2020 yıllarına ait veri setlerine uygulanan KNN algoritması sonucunda elde edilen hata matrisleri Şekil 14 ve Şekil 15' te verilmiştir.

```
[8737 rows x 6 columns]
[[1191  24  0  0  0  0]
 [ 19 1418  4  0  0  0]
 [  0  8 182  0  0  0]
 [  0  0  8 21  0  0]
 [  0  0  1  2  5  0]
 [  0  0  0  0  1  0]]
KNN Accuracy: 0.9767683772538142
KNN Rmse: 0.15579423821243896
KNN R2: 0.9462890118354137
```

Şekil 14. 2019 hata matrisi (*confusion matrix-2019*)

```
[6841 rows x 6 columns]
[[1282  4  0  0  0  0]
 [ 20 804  3  0  0  0]
 [  0  2 108  0  0  0]
 [  0  0  3 23  2  0]
 [  0  0  0  0  6  0]
 [  0  0  0  0  1  0]]
KNN Accuracy: 0.9844995571302038
KNN Rmse: 0.1245007745750856
KNN R2: 0.9664774848145509
```

Şekil 15. 2020 hata matrisi (*confusion matrix-2020*)

### 3.3.4. Karar ağacı (*Decision tree-DT*)

Karar Ağacı algoritması, popüler ve en basit makine öğrenmesi algoritması olup bir ağaç yapısı türünde sınıflandırma ve regresyon modelleri oluşturur. Algoritmanın amacı, önceki eğitim verilerinden çıkarılan karar kurallarını öğrenerek nihai sonuç değişkeninin sınıfını tahmin etmek için bir model oluşturmaktır. Karar Ağacı, düğüm ve dallardan meydana gelmektedir. Her bir düğüm bir özelliği temsil etmektedir ve her dal ise bir kararı temsil etmektedir [22]. 2019 ve 2020 yıllarına ait veri setlerine uygulanan DT algoritması sonucunda elde edilen hata matrisleri Şekil 16 ve Şekil 17' de verilmiştir.

```
[8737 rows x 6 columns]
[[1215  0  0  0  0  0]
 [  0 1440  1  0  0  0]
 [  0  0 190  0  0  0]
 [  0  0  0 29  0  0]
 [  0  0  0  0  8  0]
 [  0  0  0  0  0  1]]
Decision-Tree Accuracy: 0.9996532593619972
Decision-Tree Rmse: 0.018620973068096465
Decision-Tree R2: 0.9992327001690774
```

Şekil 16. 2019 hata matrisi (*confusion matrix-2019*)

```
[6841 rows x 6 columns]
[[1286  0  0  0  0  0]
 [  0 826  1  0  0  0]
 [  0  0 110  0  0  0]
 [  0  0  0 28  0  0]
 [  0  0  0  0  6  0]
 [  0  0  0  0  0  1]]
Decision-Tree Accuracy: 0.9995571302037201
Decision-Tree Rmse: 0.021044471869825904
Decision-Tree R2: 0.9990422138518443
```

Şekil 17. 2020 hata matrisi (*confusion matrix-2020*)

### 3.3.5. Naif bayes (*Naive bayes-NB*)

Bayes teoreminde bulunan giriş değişkenlerinin birbirinden bağımsız olduğu bir denetimli bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. Tahmin yapmak için her sınıfa ait her bir özelliğin olasılıklarını kullanarak tahmine dayalı analiz için basit ve güçlü bir algoritmadır. NB sınıflandırıcısının oluşturulması kolaydır ve büyük veri kümeleri içinde kullanışlıdır. NB sınıflandırıcısının çalışma mantığı; sisteme belirli miktarda eğitim verisi girilmesi ile başlar. Eğitim verilerinin bir sınıfa ait olması gerekmektedir. Eğitim verileri üzerinde gerçekleştirilen olasılık işlemleri ile sisteme girilen test verileri işlenir. Bu işlem daha önce elde edilen olasılık değerlerine göre yapılır ve daha sonra verilen test verilerinin sınıfı tespit edilir. Eğitim verisi sayısı ne kadar fazlaysa, test verilerinin gerçek kategorisini tespit etmek o kadar doğru olur [22]. 2019

ve 2020 yıllarına ait veri setlerine uygulanan NB algoritması sonucunda elde edilen hata matrisleri Şekil 18 ve Şekil 19' da verilmiştir.

```
[8737 rows x 6 columns]
[[1151  64  0  0  0  0]
 [ 93 1285  62  0  1  0]
 [  0  5 182  3  0  0]
 [  0  0  2 26  1  0]
 [  0  0  0  2  6  0]
 [  0  0  0  0  0  1]]
Naive-Bayes Accuracy: 0.9192094313453537
Naive Bayes Rmse: 0.2890752389234825
Naive Bayes R2: 0.8150807407476385
```

Şekil 18. 2019 hata matrisi (*confusion matrix-2019*)

```
[6841 rows x 6 columns]
[[1229  57  0  0  0  0]
 [ 107 690  30  0  0  0]
 [  0  1 106  3  0  0]
 [  0  0  3 20  5  0]
 [  0  0  0  0  6  0]
 [  0  0  0  0  0  1]]
Naive-Bayes Accuracy: 0.9087688219663419
Naive Bayes Rmse: 0.3020449933928025
Naive Bayes R2: 0.8026960534799281
```

Şekil 19. 2020 hata matrisi (*confusion matrix-2020*)

#### 4. TARTIŞMA VE BULGULAR (*DISCUSSION AND FINDINGS*)

Çalışmada verilerin %67'si eğitim, %33'ü test verisi olarak kullanılmıştır. Oluşturulan tahmin modeli iki veri setine de uygulanmış, modelin performans değerlendirmesinde doğruluk, RMSE ve  $R^2$  kullanılmıştır [23], [24]. Sonuçlar detaylı bir şekilde Tablo 4 ve Tablo 5 de verilmiştir.

Tablo 4. Doğruluk değerlerinin kıyaslanması-2019(*Comparison of accuracy values-2019*)

Yöntemler	KNN	NB	RF	DT	SVM
Doğruluk	0.976	0.919	0.997	0.999	0.988
RMSE	0.155	0.289	0.047	0.016	0.106
$R^2$	0.946	0.815	0.994	0.994	0.974

Çalışmada kullanılan 2019 yılı veri setine ait doğruluk değerlerinin kıyaslamasına bakıldığında en düşük RMSE(0,016) ve en yüksek doğruluk oranıyla(%99,9) en başarılı algoritma Karar Ağacı'dır. Karar Ağacı'nı RMSE=0,047 ve %99,7 doğruluk oranıyla Rastgele Orman algoritması takip etmektedir. En düşük başarı ise RMSE=0,289 ve %91,9 başarı oranıyla Naif Bayes algoritmasına aittir.

Tablo 5. Doğruluk değerlerinin kıyaslanması-2020 (*Comparison of accuracy values-2020*)

Yöntemler	KNN	NB	RF	DT	SVM
Doğruluk	0.996	0.908	0.998	0.999	0.984
RMSE	0.124	0.302	0.042	0.021	0.122
$R^2$	0.966	0.802	0.996	0.999	0.974

Çalışmada kullanılan 2020 yılı veri setine ait doğruluk değerlerinin kıyaslamasına bakıldığında yine en düşük RMSE (0,021) ve en yüksek doğruluk oranıyla(%99,9) en başarılı algoritma Karar Ağacı olmuştur. Karar Ağacı'nı sırasıyla RF, KNN, SVM, NB takip etmektedir. En başarısız algoritma ise RMSE=0,302 ve %90,8 başarı oranıyla Naif Bayes algoritması olmuştur.

İki farklı veri seti üzerinde makine öğrenmesi algoritmalarından KNN, SVM, RF, NB ve DT uygulanmış ve sonuçlar kıyaslandığında Karar Ağaçları ve Rastgele orman algoritmaları yüksek başarı oranına sahiptir. Literatürde yapılan çalışmalar ile oluşturulan modelin sonuçları Tablo 6'da kıyaslanmıştır.

Tablo 6. Çalışmaların doğruluk değerlerinin kıyaslanması (*Comparison of accuracy values of studies*)

Kaynak	Kullanılan Model	Değerlendirme Kriteri ve Performansı
[9]	Gradient Boosting Regressor, RF, KNN, DT	$GBR_{RMSE}=0,9336$ $GBR_{R2}=0,1302$
[10]	DT	$DT_{Doğruluk}=\%89,46$
[11]	YSA, SVM	$YSA_{MAE}=0,0191$ $SVM_{MAE}=0,0314$
[13]	RF, NB, SVM	$RF_{Doğruluk}=\%99,1$
Çalışmada	KNN, NB, RF, DT, SVM	$DT_{Doğruluk}=\%99,9$

Tablo 6 incelendiğinde Karar Ağacı ve Rastgele Orman ile gerçekleştirilen modellerin diğer modellere göre daha başarılı sonuçlar ortaya koyduğu görülmektedir.

#### 5.SONUÇ (*RESULTS*)

Hava kirliliği akciğer kanseri, astım, solunum yetmezliği gibi birçok hastalığın yayılmasında önemli bir çevresel risk faktörüdür. Günümüzde devam eden salgın sürecinde hava kalitesinin tahmin edilmesi ve buna yönelik tedbirlerin alınması hastalıkların yayılma hızını etkilemesi açısından önem taşımaktadır. Bu çalışma, geçmiş hava kalitesi verileri ve Covid-19 salgın sürecindeki günlerde ölçümlenen  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $O_3$  ve  $NO_2$  kirletici

konsantrasyonlarını ele almış ve başarılı bir tahmin için hava kalitesini makine öğrenme modelleriyle analiz etmiştir. Uygulanan algoritmalar arasında 0,289(2020 veri seti) ve 0,302(2020 veri seti) RMSE değerleri ile başarısı en düşük olan Naive Bayes algoritmasıdır. En yüksek başarı 0,016(2019 veri seti) ve 0,021(2020 veri seti) RMSE değeriyle Karar Ağacı algoritmasında elde edilmiştir.

Tüm dünyada hava kirlenmeye uzun süre maruz kalma solunum yolu hastalıklarında olduğu gibi Covid-19 virüsünün yayılmasında ve ölümlerle sonuçlanmasında önemli bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Hava kalitesinin doğru tahmini ve iyileştirilmesi salgın sürecinin uzamamasında ve hastalığı hafif geçirmede önemli bir rol oynayabileceği üzerinde durulmuştur. Bütün dünya ülkeleri için Covid-19 salgını, kriz anında ve sonrasında insan sağlığını korumak adına yeniden hava kirliliği ile mücadelenin gözden geçirilmesinin önemini ortaya çıkarmıştır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 2210-A Yurt İçi Genel Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] İ. Atacak, N. Arıcı, and D. Güner, “Modelling and evaluating air quality with fuzzy logic algorithm-Ankara- Cebeci sample”, *Int. J. Intell. Syst. Appl. Eng.*, vol. 5, no. 4, pp. 263–268, 2018. doi: 10.1039/b000000x.
- [2] P. Samani, C. García-Velásquez, P. Fleury, ve Y. Van Der Meer, “The impact of the covid-19 outbreak on climate change and air quality: four country case studies”, *Glob. Sustain.*, vol. 4, pp. 1–43, Oca. 2021. doi: 10.1017/sus.2021.4.
- [3] T. Şimşek ve V. Yılmaz, “Hava kalitesi ile covid-19 arasındaki ilişki: G-7 ülkeleri üzerine bir uygulama”, *J. Turkish Stud.*, vol. 15, no. 4, pp. 1353–1366, 2020. doi: 10.7827/turkishstudies.43883.
- [4] E. Conticini, B. Frediani, ve D. Caro, “Can atmospheric pollution be considered a co-factor in extremely high level of SARS-CoV-2 lethality in northern Italy?”, *Environ. Pollut.*, vol. 261, no. 114465, 2020. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114465.
- [5] Zonguldak Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, “Zonguldak ili 2018 yılı çevre durum raporu”, 2019. [Çevrimiçi]. Available at: [https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/zongudak\\_2018-cdr\\_son-20190926093732.pdf](https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/zongudak_2018-cdr_son-20190926093732.pdf). [Accessed: Jun. 12, 2021]
- [6] Y. Zhu, J. Xie, F. Huang, ve L. Cao, “Association between short-term exposure to air pollution and covid-19 infection: evidence from China”, *Sci. Total Environ.*, vol. 727, no. 138704, 2020. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138704.
- [7] D. Rodríguez-Urrego ve L. Rodríguez-Urrego, “Air quality during the covid-19: PM2.5 analysis in the 50 most polluted capital cities in the world”, *Environmental Pollution*, vol. 266. Elsevier Ltd, Kas. 01, 2020. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115042.
- [8] E. B. Brandt, A. F. Beck, ve T. B. Mersha, “Air pollution, racial disparities, and covid-19 mortality”, *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, vol. 146, no. 1, pp. 61–63, 2020. doi: 10.1016/j.jaci.2020.04.035.
- [9] H. Doreswamy, K. Harishkumar, Y. Km, ve İ. M. Gad, “Forecasting air pollution particulate matter (PM2.5) using machine learning regression models”, *Procedia Computer Science*, vol. 171, pp. 2057–2066, 2020. doi: 10.1016/j.procs.2020.04.221.
- [10] G. K. Kang, J. Z. Gao, S. Chiao, S. Lu, ve G. Xie, “Air quality prediction: big data and machine learning approaches”, *Int. J. Environ. Sci. Dev.*, vol. 9, no. 1, pp. 8–16, 2018. doi: 10.18178/ijesd.2018.9.1.1066.
- [11] A. Masood ve K. Ahmad, “A model for particulate matter (PM2.5) prediction for Delhi based on machine learning approaches”, *Procedia Computer Science*, vol. 167, pp. 2101–2110, 2020. doi: 10.1016/j.procs.2020.03.258.
- [12] J. K. Deters, R. Zalakeviciute, M. Gonzalez, ve Y. Rybarczyk, “Modeling PM2.5 urban pollution using machine learning and selected meteorological parameters”, *J. Electr. Comput. Eng.*, pp. 1–14, Haz. 2017. doi: 10.1155/2017/5106045.

[13] S. Bali ve M. N. Sengar, “Indian air quality prediction and analysis using machine learning”, *J. Eng. Sci.*, vol. 11, no. 5, pp. 554–557, 2020.

[14] Y. Yıldırım, Ö. Zeydan, ve E. Karakavuz, “Kentleşme ve hava kalitesi açısından ilimiz Zonguldak”, Zonguldak Kent Sempozyumu, ss. 81–89, 2011.

[15] Zonguldak Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, “Zonguldak 2019 yılı çevre durum raporu”, 2020. [Çevrimiçi]. Available at: [https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/2019\\_zonguldak\\_cdr-20200914150210.pdf](https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/2019_zonguldak_cdr-20200914150210.pdf) [Erişim tarihi: May. 21, 2021].

[16] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı(ÇŞB), “Hava kalitesi istasyon veri indirme T.C. çevre ve şehircilik bakanlığı”, 2021. [Çevrimiçi].[https://sim.csb.gov.tr/STN/STN\\_Report/StationDataDownloadNew](https://sim.csb.gov.tr/STN/STN_Report/StationDataDownloadNew) [Erişim tarihi: Mar. 10, 2021].

[17] DSÖ, “Science in 5 - episode 9 - hava kirliliği ve covid-19”, 2021. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/media-resources/science-in-5/episode-9---air-pollution-covid-19> [Accessed: Jan. 01, 2021].

[18] DSÖ, “Koronavirüs hastalığı (covid-19): iklim değişikliği”, 2021. [Çevrimiçi]. <https://www.who.int/news-room/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19-climate-change> [Erişim tarihi: Ocak 01, 2021].

[19] A. Masih, “Machine learning algorithms in air quality modeling”, *Glob. J. Environ. Sci. Manag.*, vol. 5, no. 4, pp. 515–534, 2019. doi: 10.22034/gjesm.2019.04.10.

[20] J. Huo, T. Shi, ve J. Chang, “Comparison of random forest and SVM for electrical short-term load forecast with different data sources”, in *7th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science, Beijing, China, Jul. 2016*, pp. 1077–1080. doi: 10.1109/ICSESS.2016.7883252.

[21] Z. Yao ve W. L. Ruzzo, “A regression-based k nearest neighbor algorithm for gene function prediction from heterogenous data”, *BMC Bioinformatics*, vol. 7, no. 1, pp. 1–11, Mar. 2006. doi: 10.1186/1471-2105-7-s1-s11.

[22] A. Dey, “Machine learning algorithms: a review”, *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 1174–1179, 2016.

[23] S. Çınaroğlu, “Sağlık harcamasının tahmininde makine öğrenmesi regresyon yöntemlerinin karşılaştırılması”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Derg.*, c. 22, sayı 2, ss. 179–199, 2017. doi: 10.17482/uumfd.338805.

[24] S. Karasu, A. Altan, Z. Sarac, ve R. Hacıoğlu, “Prediction of bitcoin prices with machine learning methods using time series data”, in *26th IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Izmir, Turkey, Jul. 2018*, pp. 1–4. doi: 10.1109/SIU.2018.8404760.

This is an open access article under the CC-BY license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



# Üretim Parametrelerinin Termoplastik Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi

Uğur Görkem ÇAKICI<sup>a,\*</sup>, Osman Selim TÜRKBAŞ<sup>b</sup>, Bora YILDIRIM<sup>c</sup>

<sup>a,\*</sup> Turkish Aerospace Industries, Department of Helicopter Rotor Design, 06980, Ankara, Turkey

<sup>b</sup> Gazi University, Department of Mechanical Engineering, 06570, Ankara, Turkey

<sup>c</sup> Hacettepe University, Department of Mechanical Engineering, 06800, Ankara, Turkey

## MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 13.06.2021  
Kabul : 15.10.2021

### Anahtar Kelimeler:

Termoplastik  
Kompozit,  
PEKK/CF, Mekanik  
Özellikler, Kürlenme  
Sıcaklığı

## ÖZ

Üretim parametreleri, özellikle havacılık sınıfı polieter keton keton (PEKK)/karbon fiber (CF) kompozitlerde termoplastik kompozitlerin mekanik özelliklerinde önemli bir rol oynamaktadır. Sunulan bu çalışmada, farklı sıcaklık değerlerinde konsolide edilen PEKK/CF kompozitlerinin mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Benzer bir basınç profiliyle, kür sıcaklığının PEKK/CF kompozit laminatın gerilme, laminalar arası kesme dayanımı (ILSS) ve düzlem içi kesme dayanımı (IPSS) üzerindeki etkisini belirlemek için çeşitli kür sıcaklıkları uygulandı. Kompozit laminatlardaki gözeneklilik, delaminasyon ve boşluk içeriği, Ultrasonik Test yoluyla NDT yöntemi kullanılarak karakterize edildi. Bu makale, bir polieter keton keton (PEKK)/karbon fiber (CF) kompozitleri kullanılarak otoklav işlemiyle farklı kürlenme sıcaklığı numunelerinin karşılaştırılması için üretim kupon test numunelerinin bazı güncel sonuçlarını sunmaktadır. PEKK/CF'nin gerilme ve laminalar arası kayma mukavemeti özellikleri, sırasıyla 350°C, 375°C ve 400°C'de farklı kürlenme sıcaklık geçmişleri ile hazırlanacak şekilde çalışılmıştır. Yapılan testler ideal kürlenme sıcaklığını 400°C derece olarak belirlemiştir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.06>

## An Investigate of the Effect of Manufacturing Parameters on the Mechanical Properties of Thermoplastic Composites

## ARTICLE INFO

Received: 13.06.2021  
Accepted: 15.10.2021

### Keywords:

Thermoplastic  
Composites,  
PEKK/CF, Mechanical  
Properties, Cure  
Temperature

## ABSTRACT

Manufacturing parameters play an essential role in the mechanical properties of thermoplastic composites, especially in aerospace grade polyether ketone ketone (PEKK) / carbon fibre (CF) composites. In this presented study, the mechanical properties of PEKK/CF composites consolidated at different temperature values have been evaluated. Various cure temperatures were applied with an identical pressure profile to determine the effect of cure temperature on tensile, interlaminar shear strength (ILSS) and in-plane shear strength (IPSS) of PEKK/CF composite laminate. Porosity, delamination and void content within the composite laminates were characterized using the NDT method via Ultrasonic Testing. This paper presents some current manufacturing coupon test specimens for comparing different cure temperature specimens by autoclave process using polyether ketone ketone (PEKK) / carbon fibre (CF) composites. Effects of curing temperature on the mechanical properties and consolidation grade of PEKK/CF composite are studied. Tensile and interlaminar shear strength properties of PEKK/CF have been studied to prepared with different curing temperature histories at 350°C, 377°C, and 400°C, respectively. The tests were carried out have determined the ideal curing temperature as 400°C degrees.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.06>

\*Corresponding author: gorkemcakici@gmail.com

To cite this article: U.G. Çakıcı, O.S. Türkbaş and B. Yıldırım, "An Investigate of the Effect of Manufacturing Parameters on the Mechanical Properties of Thermoplastic Composites", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 233-242, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.03.06



## 1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The aviation industry's rapid growth necessitates the quick advancement of new aircraft materials. The major goal is to save costs by reducing weight and extending the service life of aircraft parts. With the engineering materials with improved mechanical properties, lighter designs can be made in the frame and engines of the aircraft, thus increasing the efficiency of the aircraft and reducing the operating costs [1]. Therefore, the use of composite material in the field of engineering materials is overgrowing. The main reason for the spread of composite materials in the aviation field is that the material provides a combination of important properties such as hardness, toughness, lightness and corrosion resistance [2-6]. With the increasing interest in thermoplastic fibre composite materials in aviation, the investigation of the processing and production of these materials has increased [7].

High-performance thermoplastic composites, which is carbon fibre/ Polyether-ketone-ketone (CF/PEKK), are recently studied with great interest by the aerospace industry for reinforced structural parts. PEKK matrix materials may also be consolidated out of the autoclave since they have a lower processing temperature than PEEK matrix materials [8]. Processing properties have an essential place in the mechanical properties of thermoplastic composite parts. The matrix properties and the bond between the matrix and carbon fibres can be regulated depending on the heat treatment cycle. PEKK composites are consolidated under high temperature (around 360°C), and in this way, the viscosity of the matrix will be decreased to the porosity is lowered. During this process, changes may occur in the molecular structure of the PEKK matrix owing to the chemical change of the macromolecular chains. With this change, the chemical and mechanical properties of the matrix material can change, and this change may ultimately affect the mechanical properties of the composite part [9-10].

There are significant differences between the processing of thermoplastic composites and thermoset composites. The main reason for this difference is; The processing of thermoplastic composites is based on the matrix melting and solidification. Which is generally based on energy transfer as heat [11-14]. The production of thermoplastic composites; offers the opportunity to combine the laying, melting and consolidation steps in a continuous process. Thus, manufacturing can be made without the need for the curing process required by thermosetting materials. In

addition, while the production of thick sectioned parts is limited in thermoset composites due to limits of exothermic reaction and heat diffusion, there is no conceptual thickness limitation in a consolidated thermoplastic composite [15].

Recently, many methods are used for the production of thermoplastic composites. One of these production techniques is an autoclave. Production of large and complex parts with autoclaves is more suitable than other production methods. There is a fundamental difference in the production of thermoplastic composites and thermoset composites. While a physical change occurs only in the matrix material in thermoplastic composites, a chemical reaction occurs in the matrix material of thermoset composites. Despite this fundamental difference, the experience gained from the production of thermoset composites is used in the autoclave production process. In the production of thermoplastic composites by autoclave, there is usually a need for processing above 300°C. Therefore, an autoclave that can reach high temperatures is required for production with this method [16].

The procedure comprises melting and softening the bonding area by heating the layer interface while applying pressure to achieve interfacial contact between the two surfaces. Thermoplastic composites go through a multitude of microstructural changes during processing that affect their characteristics [17-20]. Melting, degradation, crystallization, bonding, residual strain generation, and consolidation are examples of these changes, which must account for void consolidation and void expansion. The process parameters have a direct impact on all of these modifications.

The adhesion of thermoplastics, particularly thermoplastic composites, has been studied for many years. The composite surfaces are squeezed together for a period of time above the polymer matrix's processing temperature to permit adhesion. A construct of strength at the interface is then caused by a number of processes [21,23,24]. The adhesion process, according to Wool and O'Connor [22], consists of five steps: (1) surface reconfiguration, (2) surface approach, (3) wetting, (4) diffusion, and (5) randomization. The assembly has no mechanical strength during the first two phases because the initial interface is still there. To ensure contact at the microscopic scale, deformation of the surface roughness is required, which is driven by contact pressure and wetness. This is the so-called physical contact, which has been investigated and modelled in

a variety of industrial processes by different authors. Once intimate contact is established, the interface gradually fades away due to a healing process (steps (4) and (5)), and the mechanical strength of the interface develops to eventually match that of the bulk.

This article aims to determine the effect of autoclave cycle temperature in the production of CF/PEKK composite materials. For this purpose, plates were produced at three different consolidation temperatures, and these temperatures are 350°C, 377°C, 400°C, respectively. It is aimed to determine the effect of the temperature parameter on the mechanical properties of the material during production by performing Tensile, ILSS and IPSS tests on samples in different sequences.

## 2. MATERIAL AND METHODS (YÖNTEM VE TEKNİKLERİ)

The thermoplastic composite material used in this study was a unidirectional carbon fibre reinforced PEKK based polymer APC/AS4D 12K produced by Solvey S.A. Company. 305 mm wide UD tape was used for plate production in the autoclave. The tape is shown in Figure 1. The nominal prepreg fibre areal weight (FAW) and the initial prepreg matrix weight fractions were 145 g/m<sup>2</sup>(gsm) and 34% respectively according to product datasheet [25].

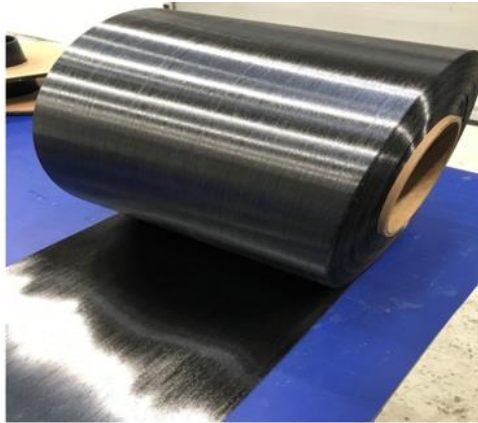


Figure 1. UD PEKK/CF Tape (*Tek yönlü karbon fiber PEKK kompozit bant*)

For this study, 12 symmetrical laminate plates in four different configurations were produced at three different curing temperatures.



Figure 2. Welding Process (*Kaynak process*)

The stacking sequence and number of plies are given in Table 1 according to the curing temperatures of all laminates manufactured. All autoclave consolidated laminates were hand-laid, with each ply ensured a welding point of a tiny size utilizing handbuilt welding. The welding process is given in Figure 2.

### 2.1 Specimen Manufacturing (*Test Kuponu Üretimi*)

Composite structures prepared with four different laying directions were produced using the autoclave process. Each sample was given a reference number for the distinction of sample sets and is shown in Table 2. In the cycle used in the autoclave, the same pressure value was used for all samples, and while all variables were kept the same, only the curing temperature (dwell temperature) was changed. The autoclave cycle is given in Figure 3.

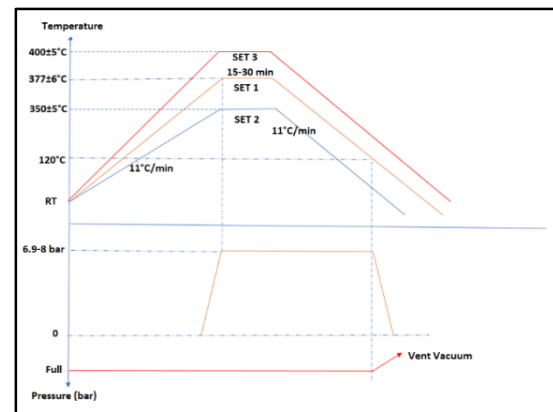


Figure 3. Autoclave Cycle (*Otoklav Döngüsü*)

After processing, the data from the autoclave cycle was analyzed to ensure that the production requirements were met.



Figure 4. NDT Control (NDT kontrolü)

## 2.2 Ultrasonic NDT (Ultrasonik Tahribatsız Numune)

Using automated Doppler Type Phascan devices, ultrasonic scanning using through-transmission was used to examine all of the laminates. NDI was performed by wetting the plate surface with water. A-scans, B-scans, and C-scans for all of the laminates were evaluated and the results via Visual Scan software, which enables processing with attenuation and amplitude modes. For the examination of all specimens, a standard frequency of 10 MHz was selected. Using PAUT image analysis software, the mean ultrasonic attenuation (in dB) values of each

CF/ PEKK laminate were computed. NDT control is shown in Figure 4.

## 2.3 Void Content (Boşluk İçeriği)

The void content of the CF/PEKK specimens was estimated using methodologies immersion for this analysis. For void content analysis, a minimum of three 20\*10 mm coupons from each plate were utilized. The samples are kept in 23°C and 50% humidity for at least 2 hours before testing. The test sample is stored under these conditions or conditioned before testing.

The densities of the cut plates are then determined using the "TS EN ISO 1183 Standard, Plastics-Non-porous Plastics- Density. Determination Methods - Part 3: Gas Pyknometer Process" standard. Then, using the "ASTM D792 Standard, Test Method for Determining Density and Specific Weight of Plastics by Displacement," the densities of the same plates are determined. By substituting the measured density data in the formula is given Eq.1, the void ratios of the plates can be determined.

$$V_0 = \frac{\rho_{pyc} - \rho_{immerson}}{\rho_{pyc}} * 100 \quad (1)$$

$V_0$  = Voit Content

Table 1. Laminate specification (Laminat özellikleri)

Laminates	Plate Code	Size (mm)	Stacking Sequence	Plies	Test Specimen Size (mm)
CT 350 °C	B1	200x200x5,2	[(0)2 (+/-45)16S (0)2]	36	250x15x1
	B2	210x265x2,3	[90]16	16	175*25*2,3
	B3	310x215x2,3	[(+/-45)16]s	16	200*25*2,3
	B4	330x180x1	[0]8	8	30*10*5,2
CT 377 °C	A1	200x200x5,2	[(0)2 (+/-45)16S (0)2]	36	250x15x1
	A2	210x265x2,3	[90]16	16	175*25*2,3
	A3	310x215x2,3	[(+/-45)16]s	16	200*25*2,3
	A4	330x180x1	[0]8	8	30*10*5,2
CT 400 °C	C1	200x200x5,2	[(0)2 (+/-45)16S (0)2]	36	250x15x1
	C2	210x265x2,3	[90]16	16	175*25*2,3
	C3	310x215x2,3	[(+/-45)16]s	16	200*25*2,3
	C4	330x180x1	[0]8	8	30*10*5,2

Table 2. Specimens reference numbers (Test kupon referans numaraları)

Stacking Sequence	Specimens					Cure Temperature	SET	Specimen Size (mm)
	1	2	3	4	5			
[0] <sub>8</sub>	1a	2a	3a	4a	5a	377°C	SET 1 (Varyant A)	250x15x1
[90] <sub>16</sub>	6a	7a	8a	9a	10a			175*25*2,3
[+/-45] <sub>16</sub> s	11a	12a	13a	14a	15a			200*25*2,3
[(0) <sub>2</sub> (+/-45) <sub>16</sub> s (0) <sub>2</sub> ]	16a	17a	18a	19a	20a			30*10*5,2
[0] <sub>8</sub>	1b	2b	3b	4b	5b	350°C	SET 2 (Varyant B)	250x15x1
[90] <sub>16</sub>	6b	7b	8b	9b	10b			175*25*2,3
[+/-45] <sub>16</sub> s	11b	12b	13b	14b	15b			200*25*2,3
[(0) <sub>2</sub> (+/-45) <sub>16</sub> s (0) <sub>2</sub> ]	16b	17b	18b	19b	20b			30*10*5,2
[0] <sub>8</sub>	1c	2c	3c	4c	5c	400°C	SET 3 (Varyant C)	250x15x1
[90] <sub>16</sub>	6c	7c	8c	9c	10c			175*25*2,3
[+/-45] <sub>16</sub> s	11c	12c	13c	14c	15c			200*25*2,3
[(0) <sub>2</sub> (+/-45) <sub>16</sub> s (0) <sub>2</sub> ]	16c	17c	18c	19c	20c			30*10*5,2

### 3. RESULTS (SONUÇLAR)

#### 3.1. NDT Results (NDT Sonuçları)

Figure 5 displays ultrasonic C-scans corresponding to laminates made with an autoclave. C-scans are shown on a colour scale that indicates various degrees of attenuation (in dB).

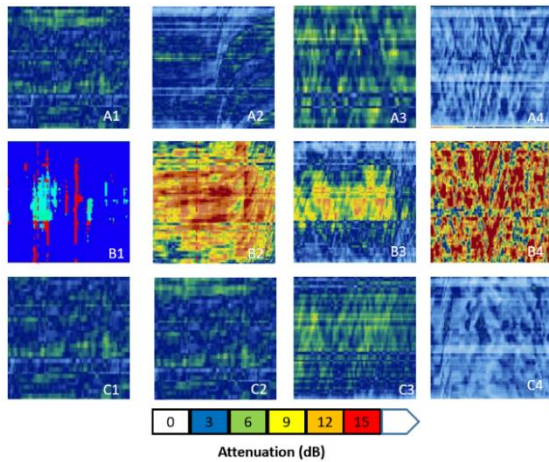


Figure 5. Ultrasonic C-Scan Result of Variant A,B and C plates (A,B ve C varyant plakaları için ultrasonik C-tarama sonuçları)

Because to defects in the laminate, such as voids, dispersed porosity, or poor layer consolidation, an ultrasonic beam traveling because of a plate can be attenuated. Attenuated areas are located in specimens with the most undesirable manufacturing conditions, suggesting that entrapped air was not adequately extracted and the plate's degree of consolidation might not be sufficient for industrial applications. In C-scan analysis, laminates with attenuation values less than 6 dB are deemed homogeneous and defect free.

Anomalies, defined as areas with attenuation larger than 6 dB, must be studied. A 6 dB threshold is applied to thin laminates [26-27]. Variant A and Variant C plates display no discernible signal attenuation above 6 dB. As a result, keeping the autoclave processing temperature at 377°C and 400°C for 15-30 minutes had no impact on the NDI of CF/PEKK laminates. The curing temperature of 350°C was insufficient for the adhesion of the layers on the variant B plates.

#### 3.2. Void Content Results (Boşluk İçeriği Sonuçları)

Figure 6 summarizes the findings of the void material study. It includes average void content values for each laminate tested using the pycnometer and immersion methodology. It was possible to obtain a porosity range of 0.99% to 3.11%. The horizontal dotted line is set to 2% void material, a standard threshold in engineering applications. In the pycnometer and immersion method, the void ratio is mainly determined by calculating the density difference. As a result, the density approach is a quick way to evaluate something that needs prior knowledge of specific theoretical material properties and can result in slightly inaccurate porosity values [28]. Despite these minor errors, the process is widely used and accepted.

According to the NDI results, there is no problem with consolidation in the plates produced as Variant A and Variant C, so laminates cured at 377°C and 400°C have less than 2% void content. On the other hand, low temperatures significantly impact the presence of cavities during autoclave production. The curing temperature parameter tends to obey a strict sufficient degree of consolidation in autoclave manufacturing. Only Variant A and Variant C laminates have a void

content of less than 2%. The highest void content value (2.61%) was obtained at 350°C, as expected by C-scans of laminate B4, and these degradation effects suggest discontinuities in the matrix. Based on these observations, autoclave curing of CF / PEKK laminates necessitates processing temperatures near 400°C to drain the voids inherent in the prepreg raw material. The B1 laminate, on the other hand, has a void content of less than 2% in the tests conducted, which is due to its thin thickness.

The effect of temperature on the void ratio was investigated due to this study by holding the pressure constant in all cycles among the pressure and temperature parameters, which are the two most crucial output parameters in autoclave production. In laminates manufactured between 1mm and 5mm, the effect of the curing temperature on the void ratio tends to be more dominant as the thickness increases.

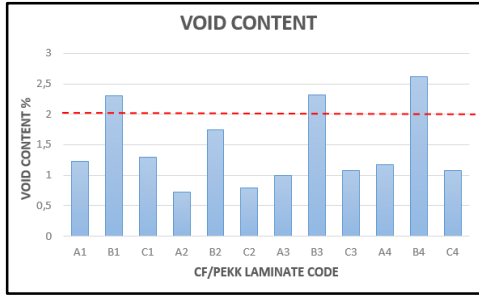


Figure 6. Void Content (Boşluk sonuçları)

The defects in the coupons were studied using electron microscope (SEM) images (100X) of the created plates. Figure 7 shows how SEM images of Variant A3, B3, and C3 coupons correlated well with ultrasonic performance. In the autoclave production process, it has been observed that a curing temperature of 350°C is insufficient to achieve layer adhesion (Figure 7).

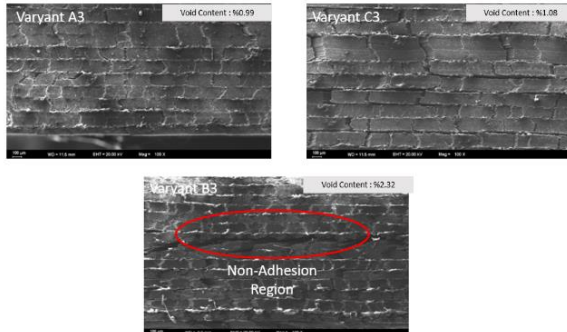


Figure 7. 100X SEM Images (100X Elektron mikroskobu görüntüsü)

### 3.3. Mechanical Testing Results (Mekanik Test Sonuçları)

Many authors have stated that the void content of material harms CFRP mechanical properties controlled by the matrix [29,30,31]. Similarly, the void quality of composite structures is directly related to manufacturing parameters. The results of tensile tests at 0 and 90 degrees and In-plane shear strength (IPSS) and Interlaminar shear strength (ILSS) mechanical tests on CF/PEEK laminates are discussed in this section. Test specimens detail is given Figure 8.

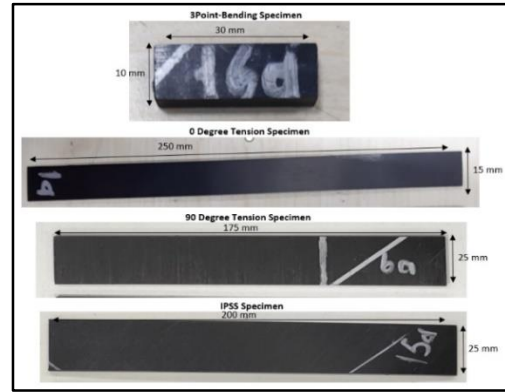


Figure 8. Test specimen details (Test numunelerin detayları)

#### 3.3.1. IPSS test result (IPSS test sonuçları)

ASTM 3518 standard was used to research test coupons made with three different curing temperature variations. Table 3 shows the mechanical properties calculated based on the test results for all variants. The comparison of IPSS test results according to in-plane shear strength values is given in Figure 9. According to this comparison, the weakness of the fibre-matrix bond in low-temperature curing was confirmed by the test results. Figure 2 shows SEM images magnified 500 times. Low temperature cured B variant plates displayed voids and matrix-fibre adhesion weakness, as seen in SEM images. According to test results, the material's mechanical properties are affected by this void and bond weakness.

Table 3. IPSS test result (IPSS test sonuçları)

TEST COMPONENT	In-Plane Shear Strength (MPa)	In-Plane Shear Modulus (GPa)	Poisson Ratio
A3-IPSS Test	103	5,13	0,633
B3-IPSS Test	98,9	3,76	0,719
C3-IPSS Test	154	5,05	0,656

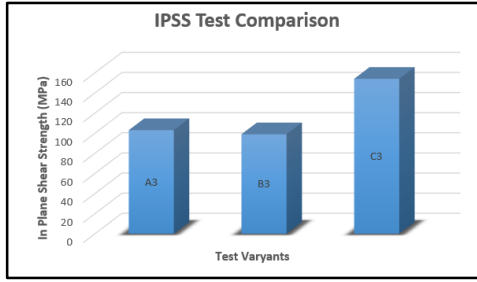


Figure 9. In-plane shear strength comparison (*Düzlem içi kesme dayanımı karşılaştırması*)

The highest mechanical strengths were observed in C variant plates cured at 400°C. However, the lowest void ratio in the C variant and the success in matrix-fibre adhesion confirms the reason for their high mechanical strength.

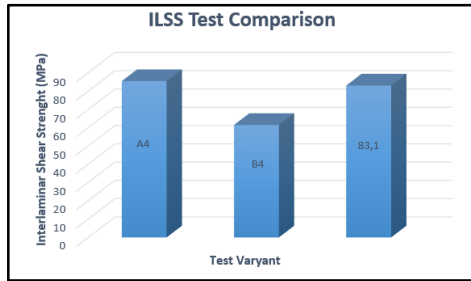


Figure 10. IPSS test plates SEM Images 500X (*500X IPSS test plakası elektron mikroskobu görüntüsü*)

### 3.3.2. ILSS test result (*ILSS test sonuçları*)

Three-point bending tests were used to assess interlaminar shear strength. All of the coupon tests were completed in compliance with ASTM D 2344. Tests were carried out with 20 mm between two support points and 6 mm contact point radius according to ASTM 2344. Table 4 shows the mechanical test results of coupons made with three different variants. The mechanical values of the Variant B coupons are significantly lower than the others, as shown in the test results. The main explanation for this is that in Variant B, the curing temperature is too close to the material's melting temperature, preventing a sufficient fibre-matrix bond.

Table 4. ILSS test result (*ILSS test sonuçları*)

Test Component	Interlaminar Shear Strength (MPa)	Interlaminar Shear Peak Load (kN)
A4-ILSS Test	85,5	6163
B4-ILSS Test	61,5	4442,7
C4-ILSS Test	83,1	6010,6

The comparison of interlaminar shear strength of test coupons produced with three different variants is shown in Figure 11. The highest void ratio was detected in ILSS test coupons delivered with Variant B. One reason for this can be predicted as the high pressure and temperature conditions in the autoclave production method, which becomes difficult to control by increasing the thickness of the part. SEM images for all variants are given in Figure 12.

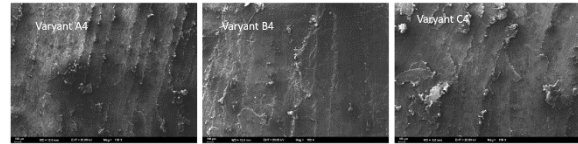


Figure 11. Interlaminar shear strength comparison (*Tabaka içi kayma dayanımı karşılaştırması*)

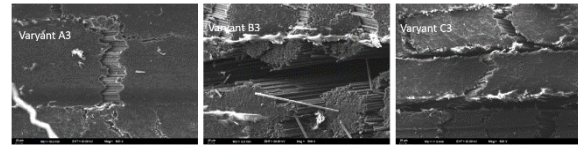


Figure 12. ILSS test plates SEM Images 100X (*100X ILSS test plakası elektron mikroskobu görüntüsü*)

### 3.3.3. 0 degree tensile test result (*0 derece çekme testi sonuçları*)

Tensile strengths for 0-degree tensile test specimens are given in Table 5, and tests were carried out according to ASTM D 3039 standards. In these results, it is seen that the B variant, which has the lowest mechanical strength in general, shows higher strength than the A variant. This can be predicted as the expected lack of adhesion between the bonds due to a vacuum loss during the autoclave cycle. Furthermore, since the tensile direction is applied as the UD band's 0 direction, the primary strength factor occurs in the fibres' orientation. In this case, fibre strength is the primary determinant of mechanical strength value, with the matrix acting as secondary support. SEM representations of the fracture surfaces are shown in Figure 13. The stripping of the fibers from the matrix in the A variant test coupons, as seen in the SEM photos, explains the reduction in mechanical strength. 0-degree test results comparison diagram is given in Figure 14.

### 3.3.4. 90 degree tensile test result (*90 derece çekme testi sonuçları*)

Tests were carried out according to ASTM D 3039 standards. Table 6 tests revealed a linear relationship between void ratios, and it was seen that the B version test coupons had the lowest tensile strength and the highest void ratio.

Table 5. 0 degree tensile test result (0 derece çekme test sonuçları)

Test Component	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Poisson Ratio
A1-0 Degree Tensile Test	1950	132	0,355
B1-0 Degree Tensile Test	2130	128	0,324
C1-0 Degree Tensile Test	2260	132	0,34

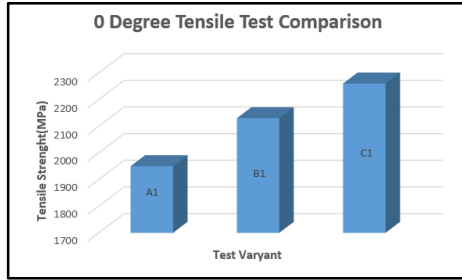


Figure 13. 0 degree tensile test specimen SEM Images 1500X (1500X 0 derece çekme test numunesi elektron mikroskobu görüntüsü)

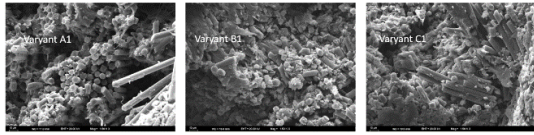


Figure 14. 0 degree tensile test results comparison (0 derece çekme testi sonuçları karşılaştırması)

Table 6. 90 degree tensile test result (90 derece çekme test sonuçları)

Test Component	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Poisson Ratio
A2-90 Degree Tensile Test	62,6	9,50	0,0321
B2-90 Degree Tensile Test	34,6	8,07	0,0374
C2-90 Degree Tensile Test	72,5	9,58	0,0330

SEM images of the tests are given in Figure 15. According to SEM visuals, the B variant test coupons had the weakest fiber-matrix bond of the three variants.

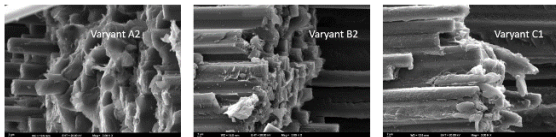


Figure 15. 90 degree tensile test specimen SEM Images 3000X (3000X 90 derece çekme test numunesi elektron mikroskobu görüntüsü)

The comparison of the tensile strength tests performed for the three variants is given in Figure 16.

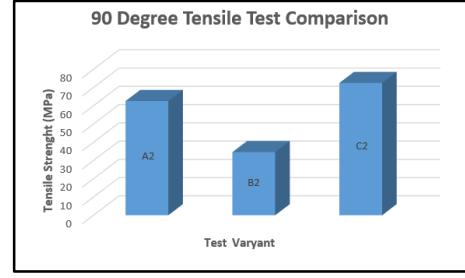


Figure 16. 90 degree tensile test results comparison (90 derece çekme testi sonuçları karşılaştırması)

#### 4. CONCLUSION (SONUÇ)

In this work, 12 thermoplastic CF/PEKK composite laminate plates were produced at three different curing temperatures. While the pressure and dwell time were kept constant on the autoclave cycle, a controlled production was realized by changing only the temperature parameter. All of the experiments have been carried out in compliance with the ASTM standard. The void ratios and mechanical strengths in the plates are inversely proportional to the test results. Generally, the lowest void ratios and the highest mechanical forces were seen in Variant C plates produced at 400°C. The curing temperature is very close to the melting temperature of the matrix material, which results in high void ratios and low mechanical strengths, particularly in plates produced at 350°C (Variant B). Due to its proximity to the melting point, the fibre-matrix adhesion was not achieved at the desired degree, resulting in low strength.

According to SEM images, the adhesion between fiber and matrix was greater in plates produced at 377 degrees and 400 degrees than in plates produced at 350 degrees. Due to the proximity of the prepreg material to the melting temperature of 343 degrees, complete adhesion could not be created, particularly in the plate generated at 350 degrees. During the experiments, the fibre began to peel away from the matrix due to this condition. The SEM images also revealed that pressure was not the sole cause of the material's void ratio. Although all plates are made under the same pressure and vacuum, plates with a low-temperature curing value have higher void ratios than plates with a higher temperature curing value. The temperature needed for the matrix to melt and warp the fibres is the key reasons for this. Since this matrix melted at low temperatures and did not display a sufficiently and homogeneous distribution, the void ratios of the plates formed at 350 degrees were higher than the others. The increased void ratios are one of the factors that directly cause the decrease in mechanical strength. While the strength of the

samples produced at 377°C is close to that of the samples produced at 400°C in some tests, the resistance of the samples produced at 400°C is higher. Another finding of these experiments is that manufacturing at temperatures very similar to the melting temperature of the matrix harms mechanical strength. As a result of the experimental study, the ideal production temperature was determined as 400°C.

#### ACKNOWLEDGEMENT (TEŞEKKÜRLER)

This study was supported by Turkish Aerospace Industries Inc.'s 1515 - The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) Frontier R&D Laboratory Support Programme, Project # 5189901.

#### CONFLICT OF INTEREST STATEMENT (ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ)

The authors declare that no potential conflict of interest.

#### REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Zhang, X., Chen, Y., & Hu, J. "Recent advances in the development of aerospace materials," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 97, pp. 22-34, 2018. doi: 10.1016/j.paerosci.2018.01.001
- [2] Rajak, D. K., Pagar, D. D., Kumar, R., & Pruncu, C. I. , "Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials," *Journal of Materials Research and Technology*, vol.8 no.6, pp. 6354-6374, 2019. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.09.068
- [3] Hale, D. K. "The physical properties of composite materials," *Journal of Materials Science*, vol.11, no.11, pp. 2105-2141, 1976. doi: 10.1007/PL00020339
- [4] Hunain, M. B., Alnomani, S. N., & Razzaq, Q, "An Investigation of Tensile and Thermal Properties of Epoxy Polymer Modified by Activated Carbon Particle" *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1094, No. 1, p. 012164, 2021.
- [5] Yan, D. X., Ren, P. G., Pang, H., Fu, Q., Yang, M. B., & Li, Z. M. "Efficient electromagnetic interference shielding of lightweight graphene/polystyrene composite" *Journal of Materials Chemistry*, vol. 22 no. 36, pp. 18772-18774, 2012. doi: 10.1039/C2JM32692B
- [6] Šavija, B., Luković, M., Hosseini, S. A. S., Pacheco, J., & Schlangen, E. "Corrosion induced cover cracking studied by X-ray computed tomography, nanoindentation, and energy dispersive X-ray spectrometry (EDS)," *Materials and Structures*, vol. 48, no. 7, pp. 2043-2062, 2015. doi: 10.1617/s11527-014-0292-9
- [7] Lystrup, A., & Andersen, T. L. "Autoclave consolidation of fibre composites with a high temperature thermoplastic matrix," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 77 no.1-3, pp. 80-85, 1998. doi: 10.1016/S0924-0136(97)00398-1
- [8] Choupin, T., Fayolle, B., Regnier, G., Paris, C., Cinquin, J., & Brulé, B. "Macromolecular modifications of poly (etherketoneketone)(PEKK) copolymer at the melting state," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 155, pp.103-110, 2018. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2018.07.005
- [9] Chan, C. M., & Venkatraman, S. "Crosslinking of poly (arylene ether ketone) s 1. Rheological behavior of the melt and mechanical properties of cured resin," *Journal of Applied Polymer Science*, vol.32 no.7, pp. 5933-5943, 1986. doi: 10.1002/app.1986.070320722
- [10] Chan, C. M., & Venkatraman, S. "Crosslinking of poly (arylene ether ketones). II. Crystallization kinetics," *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, vol. 25 no.8, pp. 1655-1665, 1987. doi: 10.1002/polb.1987.090250808
- [11] Chang, I. Y., & Lees, J. K. "Recent development in thermoplastic composites: a review of matrix systems and processing methods," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 1, no. 3, pp. 277-296, 1988. doi: 10.1177/089270578800100305
- [12] Hou, M. "Stamp forming of continuous glass fibre reinforced polypropylene," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 28, no. 8, pp. 695-702, 1997. doi: 10.1016/S1359-835X(97)00013-4
- [13] Beyeler, E., Phillips, W., & Güçeri, S. I. "Experimental investigation of laser-assisted thermoplastic tape consolidation," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 1 no. 1, pp. 107-121, 1988. doi: 10.1177/089270578800100109
- [14] Gilmore, S. D, "Thermal and residual stress analysis in process of thermoplastic composites," Ph.D.dissertation, Delaware University, Newark, DE (United States), 1991.



- [15] Ghasemi Nejhad, M. N., Cope, R. D., & Güçeri, S. I. "Thermal analysis of in-situ thermoplastic composite tape laying," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 4, no. 1, pp. 20-45, 1991. doi: 10.1177/089270579100400102
- [16] Fernández, I., Blas, F., & Frövel, M. "Autoclave forming of thermoplastic composite parts," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 143, pp. 266-269, 2003. doi:10.1016/S0924-0136(03)00309-1
- [17] Beyeler, E. P., & Güçeri, S. I. "Thermal analysis of laser-assisted thermoplastic-matrix composite tape consolidation," *Journal of Heat Transfer*, vol. 110, no. 2, pp. 424-430, 1988. doi:10.1115/1.3250502
- [18] Seferis, J. C., & Velisaris, C. N. "Modeling-processing-structure relationships of polyetheretherketone (PEEK) based composites," *In 31st International SAMPE Symposium, Los Angeles, California, April 1986, Vol. 7, No. 10*, pp. 1236-1252.
- [19] Gao, S. L., & Kim, J. K. "Cooling rate influences in carbon fibre/PEEK composites. Part 1. Crystallinity and interface adhesion" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, no. 6, pp. 517-530, 2000. doi: 10.1016/S1359-835X(00)00009-9
- [20] Mazumdar, S. K., & Hoa, S. V. "Determination of manufacturing conditions for hot-gas-aided thermoplastic tape winding," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 9, no. 1, pp. 35-53, 1996. doi: 10.1177/089270579600900104
- [21] Avenet, J., Levy, A., Bailleul, J. L., Le Corre, S., & Delmas, J. "Adhesion of high performance thermoplastic composites: Development of a bench and procedure for kinetics identification," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 138, 106054, 2020. doi:10.1016/j.compositesa.2020.106054
- [22] Wool, R., & O'Connor, K. M. "A theory crack healing in polymers," *Journal of Applied Physics*, vol. 52, no. 10, pp. 5953-5963, 1981. doi: 10.1063/1.328526
- [23] Stokes, V. K., & Hobbs, S. Y. "Strength and bonding mechanisms in vibration-welded polycarbonate to polyetherimide joints," *Polymer Engineering & Science*, vol. 29, no. 23, pp. 1667-1676, 1989. doi:10.1002/pen.760292308
- [24] Grewell, D. A., Benatar, A., & Park, J. B., *Plastics and composites welding handbook*, Vol. 10, München, Hanser Publications, 2003.
- [25] Solvay Company, "Solvay APC (PEKK-FC)" solvay.com. 1-5, Jan. 21, 2021. [Online]. Available: [https://www.solvay.com/en/product/apc-pekk-thermoplastic-composite-tapes/APC-PEKK-FC\\_CM\\_EN.pdf](https://www.solvay.com/en/product/apc-pekk-thermoplastic-composite-tapes/APC-PEKK-FC_CM_EN.pdf) [Accessed: Sept. 04, 2021]
- [26] Ibrahim, M. E., Smith, R. A., & Wang, C. H. "Ultrasonic detection and sizing of compressed cracks in glass-and carbon-fibre reinforced plastic composites," *NDT & E International*, vol. 92, pp 111-121, 2017. doi: 10.1016/j.ndteint.2017.08.004
- [27] Rus, J., Gustschin, A., Mooshofer, H., Grager, J. C., Bente, K., Gaal, M., ... & Grosse, C. U. "Qualitative comparison of non-destructive methods for inspection of carbon fiber-reinforced polymer laminates," *Journal of Composite Materials*, vol. 54 no. 27, pp. 4325-4337, 2020. doi: 10.1177/0021998320931162
- [28] Saenz-Castillo, D., Martín, M. I., Calvo, S., Rodriguez-Lence, F., & Güemes, A. "Effect of processing parameters and void content on mechanical properties and NDI of thermoplastic composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 121, pp. 308-320, 2019. doi: 10.1016/j.compositesa.2019.03.035
- [29] Guo, Z. S., Liu, L., Zhang, B. M., & Du, S. "Critical void content for thermoset composite laminates," *Journal of Composite Materials*, vol. 43, no. 17, pp. 1775-1790, 2009. doi: 10.1177/0021998306065289
- [30] Wisnom, M. R., Reynolds, T., & Gwilliam, N. "Reduction in interlaminar shear strength by discrete and distributed voids," *Composites Science and Technology*, vol. 56, no. 1, pp. 93-101, 1996. doi: 10.1016/0266-3538(95)00128-X
- [31] Costa, M. L., De Almeida, S. F. M., & Rezende, M. C. "The influence of porosity on the interlaminar shear strength of carbon/epoxy and carbon/bismaleimide fabric laminates," *Composites Science and Technology*, vol. 61, no. 14, pp. 2101-2108, 2001. doi: 10.1016/S0266-3538(01)00157-9

This is an open access article under the CC-BY license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



## İşin Olsun Platformu İlanlarında İçerik Kontrolü

İşilay TUNCER<sup>\*a</sup> , Şeref KESKİN<sup>b</sup> , Mehmet APAYDIN<sup>c</sup> 

<sup>a,\*</sup> Kariyer.net A.Ş., Araştırma Geliştirme Departmanı, Veri Sistemleri, İstanbul, Türkiye

<sup>b</sup> Kariyer.net A.Ş., Araştırma Geliştirme Departmanı, Veri Sistemleri, İstanbul, Türkiye

<sup>c</sup> İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü., Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 25.06.2021  
Kabul: 10.10.2021

#### Anahtar Kelimeler:

Dil modelleri,  
Bert,  
Transformers,  
Doğal dil işleme,  
Yapay zekâ,  
Derin öğrenme

### ÖZ

Bu makalede mavi yakalı iş arama ve bulma platformu olan İşin Olsun sitesindeki ilanların içerik yönetimi ve otomatik içerik kontrolü hakkında geliştirilen yaklaşımlar açıklanacaktır. Bu amaçla denetimli makine öğrenmesi modelleri ve Bert transformer mimarisi yöntemleri ile deneyler gerçekleştirilerek sonuçları gözlemlenmiştir. Çalışma sonunda, dizi sınıflandırma için Bert (Bert for sequence classification) kullanılarak ilan içeriklerinin otomatik olarak sınıflandırıldığı bir sistem geliştirilmiş ve bu sistem iş arama platformuna entegre edilmiştir. İşin Olsun ilan metinlerinin kontrolör görevindeki kişiler tarafından uygun veya uygun olmayan içerik şeklinde iki farklı sınıfta etiketlenmesinden başlayarak, veri kümesinin hazırlanma aşamalarından, sınıflandırma modelinin sisteme entegrasyonuna kadar olan çalışmalar bu makalede özetlenmektedir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.07>

## Content Control in İşin Olsun Platform Job Texts

### ARTICLE INFO

Received: 25.06.2021  
Accepted: 10.10.2021

#### Keywords:

Language models,  
Bert,  
Transformers,  
Natural language  
processing,  
Artificial intelligence,  
Deep learning

### ABSTRACT

In this paper, the approaches developed for content management and automatic content control of the job postings on the İşin Olsun website, which is a blue-collar job search and finding platform, will be explained. For this purpose, experiments were carried out with supervised machine learning models and Bert transformer architecture methods, and the results were observed. At the end of the study, a system was developed in which the contents of the job texts are automatically classified using Bert for sequence classification, and this system was integrated into the job search platform. Starting from labeling the job texts in two different classes as appropriate or unsuitable content by the controllers, from the preparation stages of the dataset to the integration of the classification model into the system, the studies are summarized in this paper.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.07>

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İşin Olsun platformu 2017'de kurulmuş olan tezgâhtar, garson, kurye gibi mavi yakalı iş ve işçi bulma fonksiyonu icra eden çevrimiçi bir platformdur [1]. Zaman içerisinde bu platforma verilen ilanlar içerisinde uygun olmayan içeriklere sahip ilanların da sistem üzerinden yayına alındığı tespit edilmiştir. Uygun olmayan metinler, müstehcen resim veya

dolandırıcılık amaçlı içerik gibi istenmeyen senaryoların yer aldığı ilanlar olabilmektedir.

İlanların uygun ya da uygunsuz olduğunun tespiti hali hazırda İşin Olsun platformu içerisinde manuel işlemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu ilanlar bir kontrol mekanizmasının önüne düşmekte, sistem içerisinde kontrolör görevindeki kişi de ilanı değerlendirerek uygun görmesi halinde ilanı sisteme otomatik olarak

\*Sorumlu yazar: [isilay.tuncer@kariyer.net](mailto:isilay.tuncer@kariyer.net)

To cite this article: I. Tuncer, Ş. Keskin and M. Apaydın, "Content Control in İşin Olsun Platform Job Texts", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 243-252, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.03.07

dahil etmektedir. İlan iş saatleri dışında verildiği takdirde, ilanın kabul süreci daha da uzun sürebilmektedir. Özetlenen bu problemin çözümünde doğal dil işleme temelli yöntemlerin kullanılabilmesi tespit edilmiştir. Doğal dil işleme, metinden anlam çıkarılmasını amaçlayan yapay zekânın alt alanlarından birisidir. Makine öğrenmesi yöntemlerinin bu alana uygulanması 1990'lı yıllarda ivme kazanmıştır. Derin öğrenme yaklaşımlarının doğal dil işleme çalışmalarında uygulanması ise 2010'lı yıllardan sonra artmıştır.

Metin sınıflandırma ve duygu analizi çalışmalarında sıklıkla doğal dil işleme yöntemleri kullanılmaktadır [2], [3], [4]. E-posta kutusundaki yaramaz (spam) postaların elenmesi veya kütüphanede kitapların kategorilere ayrılması gibi problemlerde metin sınıflandırma uygulamalarından yararlanılmaktadır. Metin sınıflandırma, doğal dil işleme metodolojilerinin kullanıldığı en bilinen uygulamalarından birisidir. Bu uygulamada verilen bir cümle için hangi kategoriye ait olduğunun makineler tarafından tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Metin sınıflandırmanın gerçekleştirilebilmesi için bir eğitim veri kümesi ile modelin eğitilmesi, sonrasında da ortaya çıkartılan modelin test veri kümesi ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla kelime torbası, tekrarlayan sinir ağları ve son olarak 2017 itibarı ile transformer tabanlı yaklaşımlar geliştirilmiştir [5]. Bu yaklaşımların problemleri ele alış şekilleri kısaca şöyle özetlenebilir:

**Kelime Torbası (Bag-of-words):** Cümledeki kelimelerin sırasını dikkate almayan bir yöntemdir [6].

**Tekrarlayan Sinir Ağları (Recurrent Neural Networks):** Cümledeki kelimelerin sırasını dikkate alan ama kelimelerin değişik kontekstlerde anlam farkına dikkat etmeyen, bir opsiyonel dikkat mekanizması ile tahminlerde cümle için spesifik kısımlarına dikkat edebilmektedir.

**Transformer:** Kelimelerin sırasına dikkat eder, dikkat mekanizmasının da tekrarlayan sinir ağlarından farklı olarak çok yönlü olarak sisteme her zaman dahil olduğu, hem girdi kelimeler arasında hem de girdi-çıkış kelimeler arasındaki ilişkiyi öğrenen, dikkat mekanizması içeren, kelimelerin kontekste bağlı anlam farklarının farkında olan, 8-12-24 tabakalı derin mimari kullanan bir metodolojiye sahiptir.

Gerçekleştirilen araştırmalar sonucunda Transformer mimarilerinin ilan metinlerinde yer alan

uygun olmayan içerikleri tespit etmede daha avantajlı konumda olduğu tespit edilmiştir. Transformer mimarilerinin bir diğer avantajı ise bu mimariler kullanılarak araştırmacılar tarafından oluşturulan pretrained modellerin huggingface üzerinden kullanıma sunulmuş olmasıdır [7]. Kullanıma sunulan bu pretrained modeller içerisinde Türkçe dil desteğine sahip modeller de bulunmaktadır [8], [9].

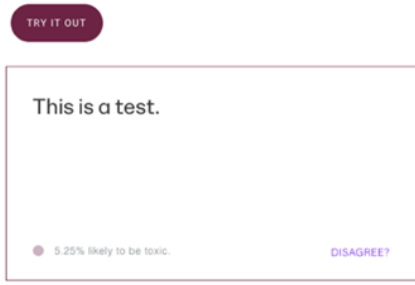
Bu makalede ilan kontrol sürecinin, doğal dil işleme konuları içerisinde günümüz en popüler yaklaşım olan transformer mimarilerine dayalı bert dil modelleri ile otomatik olarak gerçekleştirilmesi hakkında yaptığımız çalışmalar ve içerik kontrolü hakkında günümüze kadar gelen çalışmalar açıklanarak özetlenecektir. Sonrasında kullanılan teknikler ve metodolojiler anlatılacaktır. Elde edilen sonuçlar paylaşılacak ve yorumlanacaktır. Tartışma bölümü ile makale son bulacaktır.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR (PREVIOUS STUDIES)

### 2.1. İçerik Yönetimi Hakkında Özet (Summary About Content Management)

İçerik yönetimi, günümüzde popüler hâle gelmeye başlayan, içeriklerin zararlı kısımlarının otomatik yakalanmasını amaçlayan bir süreçtir. Amaç metnin içeriğinde bulunan küfür, hakaret, saldırgan ifadeler gibi olumsuz içerikleri otomatik olarak filtrelemektir. Bu çalışma ile birlikte işin olsun platformunun daha güvenilir bir yer olması amaçlanmaktadır. Metinde geçen olumsuz kelimeleri filtrelemek zararlı içerik tespiti yapmanın en kolay yoludur, lakin bu yöntem yüksek seviyede olumlu anlama gelebilen cümlelerin olumsuz olarak etiketlenmesine yani “yanlış pozitif” durumuna yol açabilmektedir.

Dil modelleri ile içerik yönetimi, İngilizce başta olmak üzere daha sık kullanılan dillerde önceden geliştirilmiştir. Google şirketi, perspective.ai isimli bir şirket ile bu içerik yönetimini otomatik hâle getirmiştir, Şekil 1’de test ekranının görüntüsü yer almaktadır [10]. 2017’den itibaren bahsedilen içerik yönetimi hizmet vermeye devam etmektedir. New York Times gibi gazetelerin yorumlarının da benzer içerik yönetim sistemleri ile denetlendikten sonra sonra sistemde görünür olması söz konusudur. Türkçe doğal dil işleme çalışmaları içerisinde duygu analizi, isimli varlık tanıma, metin sınıflandırma konularında literatürde yer alan çalışmalar bulunmaktadır, yalnız içerik yönetimi üzerine bilginiz dahilinde yapılan bir çalışma yoktur [2], [3], [11]. Kara liste yaklaşımları ile bir nebze de olsa çözüm üretebilen yaklaşımlar kullanılmaktadır.



Şekil 1. Perspective API test ekranı [10]  
(Perspective API test screen)

Kara liste ile içerik yönetiminde bazı yasaklı kelimelerin tutulduğu bir liste bulunmaktadır, bu listede geçen bir kelimenin içerikte yer alması durumunda içerik doğrudan yasaklanabilmektedir. Bu kara listedeki kelimelerin içerikte varlığını kontrol etmek için bilgisayar mühendisliğinde iyi bilinen regular expression olarak isimlendirilen regex ile bu işlemler yapılabilmektedir. Bu yöntemin kullanılması sonucunda problemlerle durumlar ile karşılaşılabilir. Örneğin, İngilizcede "Scunthorpe problem" olarak isimlendirilen [12] ve sonucunda yanlış pozitiflere neden olan bir durum söz konusu olabilmektedir. Scunthorpe şehrinden bir sitede hesap açmak isteyenlerin başvurusu otomatik olarak sistem tarafından reddedilebilmektedir. Çünkü "Scunthorpe" kelimesi içerisinde İngilizce dilinde müstahcen olarak nitelendirilen bir kelime yer almaktadır. Kara liste yaklaşımı ile filtrelenen bu kelime içerisindeki müstahcen metinden dolayı kara liste filtrelerine yakalanmaktadır.

Bunun yanında daha karmaşık, anlama dayalı içerik yönetimi daha zordur. Burada içeriğin ne anlama geldiğini anlamak gerekmektedir. İşin olsun platformunun özelliği sadece işverenlerin ilan verebildiği bir platform olmasıdır. Adayların işin olsun platformunu amacı dışında kullandığı durumda, ilan veren işveren değil de iş arayan olarak sisteme yapılan girişlerin de bloklanması gerekmektedir. Bu tip girdilerin bloklanması kara liste metodolojisi ile mümkün değildir. Bu sebepten dolayı anlama da dayalı bir sistem kurulması gerekmektedir.

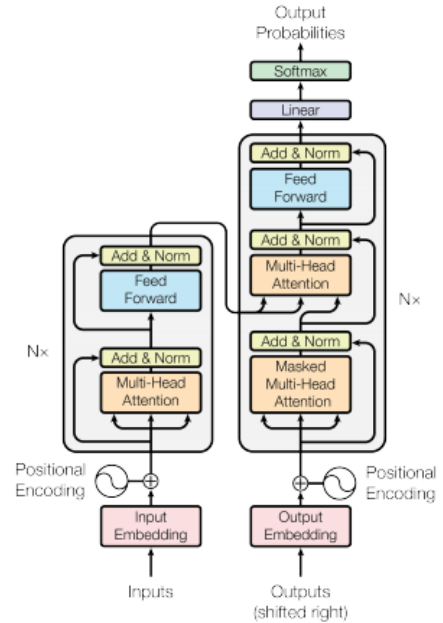
### 3. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

Bu bölümde transformer mimarileri, Bert, kullanılan denetimli makine öğrenimi algoritmaları hakkında detaylı bilgiler verilmektedir.

#### 3.1. Transformer Mimarileri ve Bert (Transformer Architectures and Bert)

Transformer mimarileri, Bert ile 2017 yılında literatürde yerini almıştır [13]. Bu yaklaşımda girdi

ve çıktı için kodlayıcı (encoder) ve kod çözücü (decoder) mimarileri kullanılmaktadır. Kodlayıcı ve kod çözücü mimarilerinin her ikisi de derin mimari olarak tasarlanmıştır, aralarında dikkat mekanizmaları da (attention) vardır. Girdi olarak verilen kelimelerin kodlayıcıları daha sonraki katmana girdi olarak verilmekte, bu esnada bu kelimelerin diğer kelimeler ile olan etkileşimi de dikkat mekanizmaları içinde değerlendirilmektedir. En son katmanda kodlayıcının çıktısı kod çözücüye girdi olarak verilmektedir. Kod çözücü de hem girdideki hücreler ile olan dikkat mekanizmaları (Şekil 2'de görüldüğü üzere), girdi kodlayıcıda ayrı, kodlayıcı ile çıktı kodlayıcı arasında ayrı, hem de çıktı kodlayıcı içinde de ayrı dikkat mekanizmaları mevcuttur. Bu yaklaşım ile Şekil 3'te görüldüğü üzere her bir kelime bir 768 boyutlu vektör ile temsil edilmektedir.



Şekil 2. Transformer model mimarisi [13]  
(Transformer model architecture)

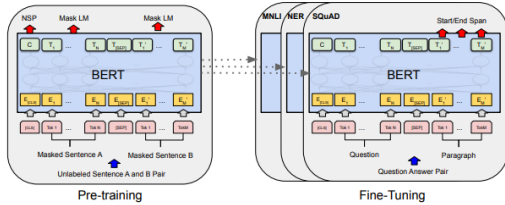
Bert, Google'un 2017 yılında sunduğu bir yöntemdir [5]. Bu yaklaşımda cümlelerin farklı kısımlarına önem veren bir dil modeli eğitilmesi söz konusudur. Bu dil modeli maskelenmiş dil modeli olarak tanımlanmaktadır. Eğitim işlemi denetimsiz bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Eğitim kümesinde bulunan cümlelerden rasgele bir kelime maskelenmekte ve kelimenin doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi amacıyla dil modeli eğitilmektedir. Bunun yanında ardışık cümle çiftleri ve ardışık olmayan cümle çiftleri de girdi olarak Bert'e verilmektedir ve Bert'in ardışık kelime çiftlerini ardışık olmayanlardan ayırt etmesi de mümkündür. Bir cümle, daha sonra

sınıflandırılması gibi bir alt görevde transfer öğrenme ile sınıflandırma yapılması mümkündür [14].

Huggingface bu tip transformer mimarilerini implement etmiş New York tabanlı bir şirkettir. Bu şirketin uygulaması kullanarak Bert dil modeli Türkçe veri kümeleri üzerinde de eğitilmiştir [8]. Eğitimde kullanılan 35 GB boyuta sahip eğitim korpusu 44.04.976.662 küçük metin parçasından (token) oluşmaktadır. Bunlardan birisi Dbmdz isimli Almanya tabanlı bir Münih kütüphanesinin modelidir ve çalışma kapsamında bu modele transfer öğrenme (fine tuning) uygulanarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Bert'in kodlayıcı mimarisi mevcuttur. Kodlayıcı mimarisinde girdi aşamasında köklerine ayrılan kelimeler daha sonra derin bir mimari ağından geçmekte, burada word2vec yaklaşımlarından farklı olarak kelimelerin bulunduğu kontekste de bağlı olarak temsil edilmesi söz konusu olmaktadır.

Bert-Transfer Öğrenme sürecinde bert mimarisinin kelimeleri kodlamak kısmında bir değişiklik söz konusu değildir. Sekans sınıflandırma işleminde pytorch ile kodlanan metnin çıktısı bir İleri Beslemeli Sinir Ağına (Feedforward Neural Network (FFNN)) girdi olarak verilmekte, bu ağınlıklar etiketli veri ile eğitilmektedir. Böylece bir dil modelini sıfırdan eğitmek söz konusu değildir.



Şekil 3. Bert transfer öğrenme mimarisi örneği [5]  
(Bert transfer learning architecture example)

### 3.2. Denetimli Makine Öğrenimi Algoritmaları (Supervised Machine Learning Algorithms)

Bu bölümde, çalışma içerisinde kullanılan denetimli makine öğrenimi algoritmaları hakkında kısaca bilgi verilmektedir.

Lojistik Regresyon, ikili sınıflandırma problemlerinde, bağımlı değişkenin iki farklı değer aldığı durumlarda yüksek başarımlı gösteren bir algoritmadır [15]. Doğrusal sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bağımlı değişkenin; ilan içeriğinin uygun ya da uygunsuz olarak alabileceği değerlerin gerçekleşme olasılığını tespit eder. Algoritmanın matematiksel

gösterimi Formül (1)'de gösterilmiştir, p başarı olasılığını temsil etmektedir.

$$\text{logit}(y) = \log\left(\frac{p}{1-p}\right) \quad (1)$$

Destek Vektör Makinesi, düzlem üzerine yerleştirilmiş iki farklı sınıfı ayırmak için uygun karar sınırını bulan doğrusal ve doğrusal olmayan verileri sınıflandırabilen algoritmadır [16]. Doğrusal olarak sınıflandırılabilen verilerde, düzlem üzerindeki noktaları ayırmak için bir doğru çizer ve çizilen doğrunun iki sınıfın noktalarına da maksimum uzaklıkta olmasını hedefler. Doğrusal olarak sınıflandırılmayan doğrusal olmayan verilerde ise, yeni 3. bir boyut oluşturarak sınıflandırma işlemini gerçekleştirmeye çalışır [17]. Çalışma içerisinde 4 farklı kernel modu ile denemeler gerçekleştirilmiştir: Rbf kernel, Sigmoid kernel, Polynomial kernel ve Linear kernel. En başarılı sonuç ise Formül (2)'de matematiksel gösterimi yer alan Rbf kernel ile elde edilmiştir.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i g(x - x_i). \quad (2)$$

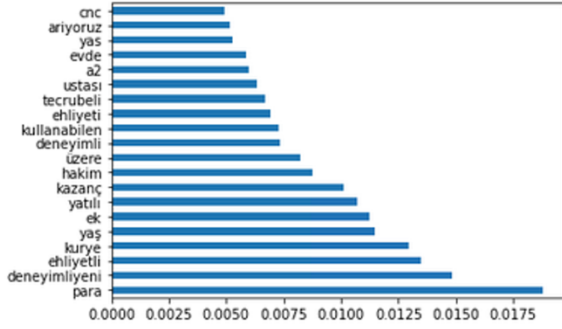
Rastgele Orman, hem sınıflandırma hem regresyon problemleri için kullanılabilen, birden fazla karar ağacı oluşturarak doğru bir tahmin yapabilmek için bu karar ağaçlarını birleştiren denetimli öğrenme algoritmasıdır [18].

Xgboost Sınıflandırıcı, temeli karar ağacına dayanan gradyan arttırma çerçevesini kullanan hibrit bir algoritmadır [19]. Xgboost'un gelişimi, karar ağaçlarından başlayarak torbalama, rasgele orman, arttırma ve gradyan arttırma olarak devam edip en son şeklini almıştır.

K-En Yakın Komşu (KNN), temeli uzaklık ve komşuluk sayısı olarak iki değer üzerine kurulu olan, tahmin edilecek olan vektörün en yakınında bulunan komşu vektörlerin sınıfına göre tahmin üreten sınıflandırma algoritmasıdır [20]. Verilen optimum k parametresi ile en yakın k komşu vektör üzerinden hesaplama yapmaktadır. Verilen k değeri çok az olduğu durumda aşırı öğrenme (overfit) oluşabilir, çok fazla olduğu durumda da çok genel tahminler üretmektedir. K komşuluk sayısı optimum seçilerek ideal tahmin sonuçlarına ulaşılmaktadır.



temsili gösteren istatistiksel bir ağırlık faktörüdür. Tf-Idf ile metin verileri kullanılarak oluşturulan vektörlerden bir matris inşa edilir. Oluşturulan matris üzerinden Xgboost algoritması ile öznelik önemi analizi yapılmıştır ve Şekil 7'deki grafik incelendiğinde metinler içinde tahminde en çok dikkat edilen kelimenin 'para' olduğu görülmektedir, ardından 'deneyimli', 'yeni', 'ehliyetli', 'kurye' ve 'yaş' kelimeleri önem sırasını takip etmektedir.



Şekil 7. Modellerin tahmin sırasında en çok dikkat ettiği kelimeler (The words that the models paid the most attention during the prediction)

Deneylerde kullanılan veri setinin makine öğrenimi metodolojisine uygun hale getirilmesi amacıyla veri farklı kesitlere ayrıldı. Tüm veri eğitim seti, doğrulama seti ve test seti olmak üzere 3 parçaya ayrıldı. Bu çalışmada kullanılan oranlar:

- 70 % eğitim seti,
- 15 % test seti,
- 15 % doğrulama seti.

Veri Ön İşleme Adımları: Makine öğrenimi çalışmalarında veri temizliği problemlere göre farklılık göstermektedir. Çalışma içerisinde veri üzerinde gerçekleştirilen ön işleme aşamaları aşağıda sıralı bir şekilde verilmiştir:

- Metin temizleme aşamasında beautifulsoup kütüphanesi kullanıldı,
- Metnin içeriğinin dili textpipe isimli kütüphane ile tespit edildi,
- Dili Türkçe olmayan içerikler eğitime dahil edilmedi,
- Beautifulsoup kütüphanesi ile html etiketlerini ortadan kaldırıldı,
- Kelimelerin hepsi küçük harflerle temsil edilir hale getirildi.

## 4.2. Sonuçlar (Results)

Gerçekleştirilen deneylerde Python programlama dili kullanıldı. Denetimli makine öğrenimi çalışmalarında Scikit-learn kütüphanesi, Bert çalışmalarında ise PyTorch-Transformers kütüphanesi tercih edildi.

Makine öğrenimi çalışmalarında gerçekleştirilen deneylerin, çalışma metodolojisine uygun başarı ölçüm metrikleri ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada sonuçların gözlemlenmesi için birden fazla metrik kullanıldı. Bu metrikler doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F puanıdır.

**Doğruluk:** Yapılan tahminler içerisindeki doğru cevapların, tüm cevaplara oranını temsil eder. En yaygın kullanılan değerlendirme yöntemidir. Formül 3'te gösterilmektedir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{\text{DoğruPozitif} + \text{DoğruNegatif}}{\text{ToplamTahmin}} \quad (3)$$

**Duyarlılık:** Tahminlerin içerisinde doğru tespit edilen pozitif sınıfların, tüm pozitiflere oranıdır. Formül 4'te gösterilmektedir.

$$\text{Duyarlılık} = \frac{\text{DoğruPozitif}}{\text{YanlışNegatif} + \text{DoğruPozitif}} \quad (4)$$

**Kesinlik:** Pozitif olarak tahmin edilen değerlerin gerçekten kaç adedinin pozitif olduğunu temsil eder. Formül 5'te gösterilmektedir.

$$\text{Kesinlik} = \frac{\text{DoğruPozitif}}{\text{YanlışPozitif} + \text{DoğruPozitif}} \quad (5)$$

**F Puanı:** Kesinlik ve Duyarlılık değerlerinin harmonik ortalamasıdır. Metriğin hesaplanması Formül 6'da gösterilmektedir.

$$FPuanı = 2 \times \left( \frac{\text{Duyarlılık} \times \text{Kesinlik}}{\text{Duyarlılık} + \text{Kesinlik}} \right) \quad (6)$$

### 4.2.1. Denetimli makine öğrenimi algoritmaları sonuçları (Supervised machine learning algorithms results)

İlan içeriklerinden oluşan veri kümesi kullanılarak denetimli makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneylerde XGboost sınıflandırıcı, rastgele orman, farklı kernel modlarında destek vektör makinesi ve KNN algoritmaları kullanılmıştır. En başarılı sonuç 'rbf' kernel'i ile destek vektör makinesi algoritmasında elde edilmiştir. Modellerin test verisi üzerinde verdiği sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Denetimli makine öğrenimi algoritmaları sonuçları (*Supervised machine learning algorithms results*)

Algoritma	Test Doğruluk	F Puanı	Duyarlılık	Kesinlik
Destek Vektör Makinesi(kernel='rbf')	75%	75%	75%	76%
Lojistik Regresyon	75%	75%	75%	75%
Destek Vektör Makinesi(kernel='sigmoid')	74%	74%	74%	74%
XGboost Sınıflandırıcı	74%	74%	74%	74%
Destek Vektör Makinesi(kernel='linear')	74%	74%	74%	74%
Destek Vektör Makinesi(kernel='poly')	73%	73%	73%	73%
Rastgele Orman	68%	68%	68%	68%
KNN (k=8)	65%	63%	65%	67%

Çalışmanın ilk aşamasında ilan metinlerini vektörler ile temsil edilerek sınıflandırma algoritmalarına eğitim ve test işlemleri için girdi olarak verilmiştir. Metinleri vektörize etmek için farklı farklı metodolojiler kullanılmıştır, en başarılı sonuç ise TF-IDF ile elde edilmiştir. Metinleri sayılarla temsil edilebilir hale, vektörler temsillerin elde edilmesini sağlayan TF-IDF en sık tercih edilen algoritmaların başında gelmektedir.

**TF-Idf**, metnin içerisindeki her bir farklı kelimeyi bir sayı ile temsil eder. Her bir cümle de bu sayıların ağırlıklarından oluşan bir vektördür. TF, terimin bir belgede görünme sayısının, belgedeki toplam kelime sayısına bölümü ile hesaplanır. IDF, terimin görüldüğü belge sayısının toplam belge sayısına bölümünün logaritması alınarak hesaplanır. TF-IDF ağırlıklandırması, TF ve IDF değerlerinin çarpılarak hesaplanması sonucunda hesaplanır [21]. Matematiksel gösterimi Formül 7'de yer almaktadır/

$$w_{i,j} = t f_{i,j} \times \log\left(\frac{N}{d f_i}\right) \quad (7)$$

#### 4.2.2. Bert sonuçları (*Bert results*)

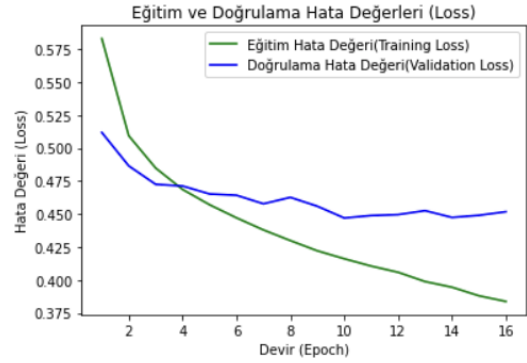
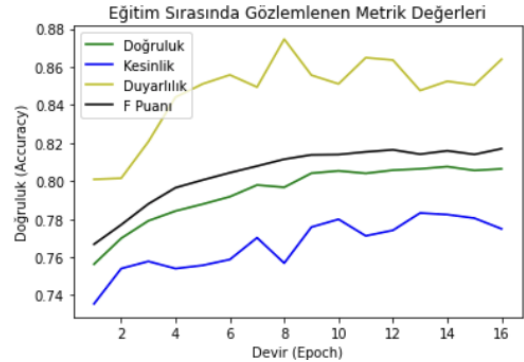
Çalışma içerisinde Bert'in huggingface'te bulunan "bert-base-turkish-uncased" modeli ve tokenizer'i kullanılmıştır [9]. Elimizde bulunan veri üzerinde gerçekleştirdiğimiz keşifsel veri analizi sonucunda, metinlerin kelime sayısının 350'yi geçmediği tespit edilmiştir. Bundan dolayı modelin girdi uzunluğu 350 olarak seçilmiştir. Optimize edici olarak "Adam Optimizer" seçilmiş olup, batch size değeri 16 olarak ayarlanmıştır.

Eğitim işlemi sırasında, 10 devirden (epoch) sonra modelin eğitim ve doğrulama hata değerleri (loss) arasındaki farkın giderek artarak modeli aşırı öğrenmeye götürdüğü tespit edilmiştir. Çalışma içerisinde 10 devir boyunca eğitilen Bert modeli kullanılmıştır. Tablo 2'de 16 devir boyunca eğitilen modelin hata değerleri toplamı (loss) ve metrik değerleri yer almaktadır.

Tablo 2. Bert modelinin eğitim sırasında verdiği çıktılar (*Outputs of the Bert model during training*)

Devir	Eğitim Hata Değerleri (Training Loss)	Doğrulama Hata Değerleri (Validation Loss)	Eğitim Süresi	F Puanı	Kesinlik	Duyarlılık	Doğruluk
1	0.53090	0.51183	0.26104	0.76620	0.75502	0.80947	0.76311
2	0.50978	0.48514	0.26104	0.77043	0.75403	0.80164	0.76958
3	0.48461	0.47516	0.26104	0.78017	0.75914	0.82077	0.79125
4	0.46627	0.47126	0.26104	0.78650	0.76403	0.84129	0.78421
5	0.47906	0.46370	0.26103	0.80079	0.78572	0.81093	0.78704
6	0.44710	0.46479	0.26104	0.80499	0.78800	0.85830	0.79106
7	0.47926	0.45756	0.26103	0.80766	0.79024	0.84822	0.79918
8	0.42955	0.45243	0.26103	0.81182	0.78601	0.87424	0.79753
9	0.42104	0.45918	0.26104	0.81304	0.79527	0.85590	0.80119
10	0.41682	0.44891	0.26106	0.81361	0.79934	0.85193	0.80593
11	0.41031	0.44857	0.26106	0.81564	0.79129	0.86484	0.80609
12	0.40500	0.44949	0.26106	0.81644	0.79412	0.86300	0.80711
13	0.38771	0.45256	0.26104	0.81456	0.78824	0.87011	0.80648
14	0.39478	0.44743	0.26103	0.81594	0.78209	0.85246	0.80763
15	0.38792	0.44916	0.26103	0.81402	0.78019	0.85036	0.80662
16	0.38309	0.45175	0.26105	0.81704	0.77491	0.86448	0.80643

Tablo 2'de yer alan hata değerlerinin ve metriklerin görselleştirilmiş sonuçları sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9'da yer almaktadır.

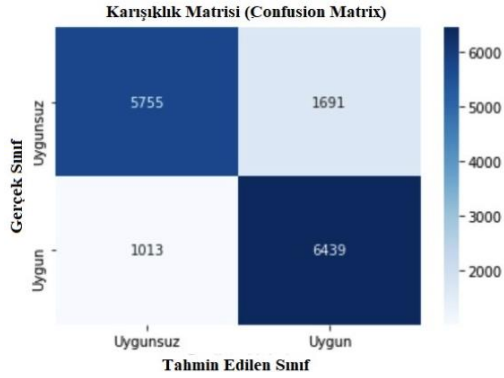
Şekil 8. Eğitim ve doğrulama loss değerleri (*Training and validation loss values*)Şekil 9. Eğitim sırasında gözlemlenen metrik değerleri (*Metric values observed during training*)

Eğitim işleminin sonlandırılması sonucunda, transfer öğrenme ile elde edilen en ideal Bert modeli üzerinde test verisi kullanılarak modelin uygun ve uygunsuz etiketler üzerindeki başarısı Tablo 3'te gösterilmiştir. Karışıklık matrisi Şekil 10'da verilmiştir.

Tablo 3. Bert modelinin test verisi üzerindeki çıktıları (*Outputs of the Bert model on the test data*)

	Kesinlik	Duyarlılık	F Puanı
Uygunsuz İlan	0.850325	0.772898	0.809765
Uygun İçerikli İlanlar	0.792005	0.864063	0.826466





Şekil 10. Karışıklık matrisi değerleri (Confusion matrix values)

Doğal dil işleme problemlerinde sıklıkla kullanılan ve türkçe dilinde de eğitilmiş Electra ve DistilBert modelleri ile Bert modelinin karşılaştırılması yapılmıştır [22], [23]. Türkçe dil desteğine sahip Electra ve DistilBert modelleri huggingface üzerinden kullanıma sunulmuş durumdadır [24], [25]. Çalışmada transfer öğrenme ile bu modeller eğitilerek performansları gözlemlenmiştir. Bert, Electra ve DistilBert'e göre daha başarılı sonuç vermiştir, bu sonuçlar Tablo 4'te yer almaktadır.

Tablo 4. Bert, electra ve distilbert modellerinin test verisi üzerindeki çıktıları (Outputs of bert, electra and distilbert models on test data)

	Kesinlik	Duyarlılık	F Puanı	Doğruluk
Bert	0.803455	0.802580	0.802446	0.802591
DistilBert	0.709462	0.693662	0.687774	0.693662
Electra	0.719607	0.707746	0.703747	0.707746

## 5. TARTIŞMALAR VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Çalışma ile İşin Olsun platformunda yayına alınacak ilanlarının uygun veya uygunuz olduğunun tespitinin kontrolör kişilerce manuel olarak yapılması yerine derin öğrenme tabanlı bir metodoloji ile kontrolün sağlanması hedeflenmiştir. İşin olsun platformunda her gün ortalama 1500 ilan yayımlanmaktadır. Gerçekleştirilen çalışma ile her gün kontrol edilen ilan sayısının artırılması ve uygunuz içeriğe sahip ilanların yayında kalma süresinin kısaltılması hedeflenmektedir.

Tf-Idf kelimelerin cümleler içindeki sıklığı ile ilgilenirken, transformer dil modelleri kelimenin bağlamına da önem vermektedir. Birden fazla anlama gelen kelimelerin vektörlerini birbirinden ayırmak için kelimenin bağlamını dikkate almaktadır. Bu nedenle çalışmada cümlelerin vektörize edilmesi aşamasında Bert tercih edilmiştir. Bert ile vektörize

edilen cümleler Bert For Sequence Classification model ile eğitilmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği farklı farklı yöntemler içerisinde en başarılı sonuçlar Bert ile elde edilmiştir.

Eğitilen Bert model İşin Olsun ilanlarının, yayına alınmadan denetlenmesi amacıyla sistem içerisinde gerçek zamanlı olarak çalışmaktadır. Model her yayınlanan ilan için bir risk skoru üretmektedir. 80-100 arası bir skor almış ilan yüksek riskli içeriğe sahip olarak kabul edilmektedir. Risk skorları, ilan bilgileri ile kontrolörün önüne düşmekte ve risk skorlarına göre ilanın yayınlanıp, yayınlanmayacağına karar verilmektedir.

Çalışma içerisinde kullanılan veri setinde uygunuz kategorileri içerisinde ayrı ayrı etiketlere sahip veriler, tek bir olumsuz etiket altında birleştirilerek ikili sınıflandırma metodolojisine uygun bir hale getirilmiştir. Ancak her uygunuz kategori içerisindeki ilan metinleri ayrı özellikler taşımaktadır. Çalışmanın devamında uygunuz kategorisinde yer alan her bir etikete ait veri sayısının artırılarak dengeli bir veri seti elde edilmesi ve bu veri seti ile çoklu sınıflandırma yapabilen bir modelin oluşturulması planlanmaktadır. Ek olarak transformer modeller denetimli/denetimsiz öğrenme algoritmaları ile kıyaslandığında oldukça fazla boyuta sahiptir. Eğitilen yüksek boyutlu modelleri canlı ortamda kullanmak kaynakların fazla tüketimine neden olmaktadır. Hafif (lightweight) çözümlerle, hem dosya okuma ve ara işlemlerin hızlandırılması hem de modellerin boyutlarının azaltılarak kaynak tüketiminin minimuma indirilmesi hedeflenmektedir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] [Online]. Available: <https://isinolsun.com>. [Accessed: Haz. 23, 2021].
- [2] A. C. Tantuğ, "Metin sınıflandırma (text classification)" *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, vol. 5, no. 2, pp. 1-3, Haziran 2012.
- [3] A. Köksal and A. Özgür, "Twitter dataset and evaluation of transformers for turkish sentiment analysis" in *2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*,

Haziran 9-11, 2021, İstanbul, Türkiye. IEEE, 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/SIU53274.2021.9477814

[4] U. U. Acikalin, B. Bardak, and M. Kutlu, “Turkish sentiment analysis using bert” in *2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2020, Gaziantep, Türkiye*. 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/SIU49456.2020.9302492

[5] J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, and K. Toutanova, “Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding,” *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, June 2019, Minneapolis, Minnesota, USA, 2019*, Association for Computational Linguistics, 2019. pp. 1-9. doi:10.18653/v1/N19-1423

[6] Y. Zhang, R. Jin, and Z.-H. Zhou, “Understanding bag-of-words model: A statistical framework” *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, vol. 1, pp. 43–52, Aralık 2010. doi: 10.1007/s13042-010-0001-0

[7] [Online]. Available: [https://huggingface.co/transformers/model\\_doc/bert](https://huggingface.co/transformers/model_doc/bert). [Accessed: May, 20, 2021].

[8] S. Schweter, “Berturk - Bert Models for Turkish” Nisan 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3770924>. [Accessed: May, 20, 2021].

[9] [Online]. Available: <https://huggingface.co/dbmdz/bert-base-turkish-cased>. [Accessed: May, 20, 2021].

[10] [Online]. Available: <https://www.perspectiveapi.com>. [Accessed: May, 21, 2021].

[11] K. Dilek, et al. “Named entity recognition experiments on Turkish texts” in *International Conference on Flexible Query Answering Systems, 2009, Roskilde, Denmark, October 26-28, 2009*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. pp. 524-535. doi:10.1007/978-3-642-04957-6\_45

[12] [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Scunthorpe\\_problem](https://en.wikipedia.org/wiki/Scunthorpe_problem). [Accessed: Haz. 17, 2021].

[13] A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A. N. Gomez, L. Kaiser, and I. Polosukhin,

“Attention is all you need,” *arxiv.org*, 2017. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1706.03762.pdf>. [Accessed: May, 23, 2021].

[14] C. Sun, X. Qiu, Y. Xu, and X. Huang, “How to fine-tune bert for text classification?”, *Chinese Computational Linguistics*, pp. 194-206, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-32381-3\_16

[15] C. Y. Peng, K. L. Lee, and G. Ingersoll, “An introduction to logistic regression analysis and reporting” *The Journal of Educational Research*, vol. 96, pp. 14 – 3, 2002.

doi: 10.1080/00220670209598786

[16] C. Cortes and V. Vapnik, “Support-vector networks,” *Machine Learning*, vol. 20, pp. 273–297, 2004. doi: 10.1007/BF00994018

[17] G. Dogan, N. Alotaibi, E. Sahin, S. S. Ertas, I. Cay, R. Keskin, M. J. H. Heijnen, and K. Ricanek, “Using artificial intelligence to predict fall-risk during adaptive locomotion in humans” in *2020 International Conference on Artificial Intelligence Modern Assistive Technology (ICAEMAT), Riyadh, Saudi Arabia, Nov. 24-26, 2020*. IEEE 2020. pp. 1-7. doi: 10.1109/ICAEMAT51101.2020.9308007

[18] L. Breiman, “Random forests,” *Machine Learning*, vol. 45, pp. 5–32, 2004. doi: 10.1023/A:1010933404324

[19] T. Chen and C. Guestrin, “Xgboost: A Scalable Tree Boosting System” in *KDD '16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Ağustos 13-17, 2016, San Francisco, CA, USA*. 2016. pp. 785-794. doi: 10.1145/2939672.2939785

[20] P. Soucy and G. Mineau, “A simple knn algorithm for text categorization” in *Proceedings 2001 IEEE International Conference on Data Mining, 29 Nov-2 Dec. 2001, San Jose, CA, USA*, IEEE, 2002. pp. 647–648. doi: 10.1109/ICDM.2001.989592

[21] G. M. Demirci, R. Keskin, and G. Doğan, “Sentiment analysis in turkish with deep learning” in *2019 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), 9-12 Dec. 2019, Los Angeles, CA, USA*. IEEE, 2019. pp. 2215–2221. doi: 10.1109/BigData47090.2019.9006066

[22] V. Sanh, L. Debut, J. Chaumond, and T. Wolf, “Distilbert, a distilled version of bert: smaller, faster,

cheaper and lighter”, Ekim 2019. doi: arxiv-1910.01108.

[23] K. Clark, M.-T. Luong, Q. V. Le, and C. D. Manning, “Electra: Pre-training text encoders as discriminators rather than generators”, *Arxiv* 2020. doi: arxiv-2003.10555.




[24] [Online]. Available: [https://huggingface.co/docs/transformers/model\\_doc/electra](https://huggingface.co/docs/transformers/model_doc/electra). [Accessed: May. 27, 2021].

[25] [Online]. Available: [https://huggingface.co/docs/transformers/model\\_doc/distilbert](https://huggingface.co/docs/transformers/model_doc/distilbert). [Accessed: May. 27, 2021].

This is an open access article under the CC-BY license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



## Güneş Bacası Güç Santrallerinde Kule Çapının Çıkış Gücüne Etkisi

Pinar Mert CUCE<sup>a,b</sup> , Harun SEN<sup>b,c</sup> , Erdem CUCE<sup>b,c</sup> 

<sup>a,\*</sup> Department of Architecture, Faculty of Engineering and Architecture, Recep Tayyip Erdogan University, Zihni Derin Campus, 53100, Rize, Turkey

<sup>b</sup> Low/Zero Carbon Energy Technologies Laboratory (L/ZCarE), Faculty of Engineering and Architecture, Recep Tayyip Erdogan University, Zihni Derin Campus, 53100, Rize, Turkey

<sup>c</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Recep Tayyip Erdogan University, Zihni Derin Campus, 53100, Rize, Turkey

### MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 18.06.2021  
Kabul: 25.09.2021

#### Anahtar Kelimeler:

Güneş bacası  
Kule çapı  
Çıkış gücü  
Enerji analizi

### ÖZ

Güneş bacası güç santralleri düşük bakım maliyetleri ve sıfır CO<sub>2</sub> salınımları ile çok cazip güneş enerjisi sistemleridir. İlk uygulaması olan Manzanares tesisinden sonra geometrik ve iklimsel parametrelerin sisteme etkisi ile ilgili sayısız çalışma yapıldı. Bu çalışmada literatürde yeterince irdelenmeyen baca çapı değişiminin sisteme etkisi detaylı olarak incelendi. ANSYS ticari yazılımı ile oluşturulan 3 boyutlu CFD modelinde güneş ışın izleme algoritması ve DO (ayrık koordinatlar) modeli ile RNG k-ε türbülans modelleri kullanılarak simülasyonlar yapıldı. Diğer geometrik parametreler için referans tesis örnek alınarak baca çapı 4.865-64.866 m arasında değiştirilmek suretiyle sistem davranışı araştırıldı. Baca çapı değişiminin ilk olarak sistem içerisindeki basınç ve hız dağılımına etkisi referans durumla karşılaştırılarak analiz edildi. Ayrıca baca çapı değişiminin sistemin güç çıkışı, kütleli debisi, verimi ve türbin konumunda ortalama basınç farkına etkisi değerlendirildi. Manzanares pilot tesisi için maksimum performans veren baca çapı değerinin 24.325 m olduğu sonucuna varıldı. Baca çapı 24.325 m yapıldığında referans duruma göre güç çıkışının % 85.9 artarak 101 kW olacağı tespit edildi. Benzer şekilde verim de referans duruma göre % 94 artış göstererek % 0.194 olarak hesaplandı.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.08>

## Impact of Tower Diameter on Power Output in Solar Chimney Power Plants

### ARTICLE INFO

Received: 18.06.2021  
Accepted: 25.09.2021

#### Keywords:

Solar chimney  
Tower diameter  
Power output  
Energy analysis

### ABSTRACT

Solar chimney power plants (SCPPs) are very attractive solar energy systems with low maintenance costs and zero CO<sub>2</sub> emissions. After its first application, the Manzanares facility, numerous studies were conducted related to the impact of geometric and climatic parameters on the system. In this study, the impact of chimney diameter change on the system, which has not been adequately examined in literature, has been investigated in detail. In the 3D CFD model created with ANSYS commercial software, simulations have been conducted by using the solar ray tracing algorithm and DO (discrete ordinates) model along with RNG k-ε turbulence model. By referencing the Manzanares facility for the other geometric parameters, system behaviour has been assessed by changing the chimney diameter between 4.865-64.866 m. The impact of the change in tower diameter on the pressure and velocity distribution in the system has been analysed first in comparison with the reference situation. In addition, the influence of diameter change on the power output, mass flow rate, efficiency of the system and the average pressure difference at the turbine position has been evaluated. It has been concluded that the chimney diameter value that gives maximum performance for the Manzanares pilot plant is 24.325 m. When the chimney diameter has been configured as 24.325 m, it has been seen that the power output will improve by 85.9% compared to the reference situation and will be 101 kW. Similarly, the efficiency rises by 94% in comparison with the reference case, and becomes 0.194%.

\*Sorumlu yazar: [pinar.mertcuce@erdogan.edu.tr](mailto:pinar.mertcuce@erdogan.edu.tr)

To cite this article: P.M. Cuce, H. Sen and E. Cuce, "Impact of tower diameter on power output in solar chimney power plants", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 253-263, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.03.08

## 1. INTRODUCTION (*GİRİŞ*)

Increasing living comfort with technological developments has pushed people to consume more energy. With the notable rise in world population, this situation has increased the energy demand significantly. The need for more energy has revealed the importance of the terms like efficient use of energy resources and environmental consciousness. Despite the widespread use of high-efficiency technological products in recent years, energy consumption is increasing day by day. This situation causes serious environmental issues due to the fact that energy sources are mostly fossil fuels. One of the best ways to combat environmental pollution is to use renewable energy sources instead of fossil fuels. The most common renewable energy source is the sun. The sun, which can be reached from any point in the world, is an attractive renewable energy source with its high potential. Although there are different ways of harnessing energy from the sun, the most common solar energy technology can be asserted as photovoltaic (PV) systems. PV systems provide direct conversion of photons into electrical energy through semiconductor devices [1]. The most outstanding handicap of PV based electricity production is the high investment cost and perspicuous dependence on climatic conditions notably solar intensity potential. Besides direct conversion of sunlight into electricity through PV technology, it is also possible to generate electricity through some other systems [2].

One of these systems is solar chimney power plants (SCPPs). SCPP systems, which are not as popular as PV systems, attract the attention of researchers due to their zero CO<sub>2</sub> emissions and low maintenance costs. Its first application was the Manzanares facility established in the Spanish countryside in the 1980s [3]. This facility with a chimney height of 194.6 m, a collector radius of 122 m and a chimney diameter of 10.16 m gives a power output of 50 kW at noon in September, with an efficiency of 0.1% [4]. After the first installation, researchers show intense interest in SCPP systems. Based on experimental data, Mullet [5] analyses SCPP systems with a mathematical model he developed. The proposed model claims that the efficiency of the system to be designed at 1000 m chimney height will be 1%. Three factors that affect the performance of SCPP systems in general can be listed as climatic parameters, geometric parameters and design parameters. Climatic parameters are ambient temperature and solar intensity. Cuce et al. [6] analyse the effect of climatic parameters on the performance of the Manzanares pilot plant with the

3D CFD model they developed. They emphasise that solar intensity has a positive impact on power output. They report that the power output, which is 7.16 kW for the solar intensity of 200 W/m<sup>2</sup> at the ambient temperature of 293.15 K in the reference geometry, will approach 6 times and becomes 49 kW when the solar intensity is 1000 W/m<sup>2</sup>. They also indicate that an increase in ambient temperature will have the opposite effect, reducing the power output. Similarly, researchers argue in their studies that solar radiation increases the power output since it enhances the energy entering the system, but the increase in ambient temperature has an opposite impact [7-9]. Since the climatic parameters may vary, it may be difficult to predict their influence on system performance in advance, but by analysing the geometric parameters in advance, an idea about the system performance can be obtained. Since the chimney is the driving force of the system, the increase in the height of the chimney directly increases the performance of the system [10]. Researchers emphasise in their works referencing the Manzanares pilot plant that increasing the height of the chimney will increase the power output and efficiency of the system [10-14].

The reason why SCPPs are called as a solar energy system is that they transfer the solar radiation to the air inside with the collector in its structure. For this reason, the increase in the collector area increases the energy entering the system, thus increasing the performance characteristics of the system. Ikhlef and Larbi [15] analyse the effects of the use of the energy storage unit and the change in geometric parameters on the system in their study that references the Manzanares pilot plant. They claim that the system with a collector radius of 120 m in the reference geometry gives a power output of 50 kW, while the power output will be 200 kW if the collector radius is modified as 240 m. Different researchers also present studies supporting that increasing the collector radius will increase the performance of the system [11,12].

Some researchers, on the other hand, claim that increasing the collector radius will increase the system performance up to 300 m when the geometric and material properties of the Manzanares pilot plant are taken into consideration, and after the collector radius of 300 m, it is reported that the system will be adversely affected [7]. The chimney is the driving force of the system and its diameter as well as its height is a critical parameter for the SCPP. Since the increase in the diameter of the chimney will evacuate more air from the system and increase the mass flow

rate, it increases the performance of the system up to a certain point, but after this point it has a negative effect on the system [11,15].

Besides the geometric parameters, the design aspects are also effective in the performance of the system. Design parameters generally include the convergent-divergent structure of the collector and chimney. Hassan et al. [16] carry out a 3D CFD research with reference to the Manzanares pilot plant. In order to analyse the influence of divergent chimney structure and collector slope on the performance of the SCPP system, they adopt solar load approach, DO (discrete ordinates) technique, and RNG  $k-\epsilon$  turbulence model (TM). When they examine the performance of the divergent chimney degree between  $1^\circ-3^\circ$ , they claim that the maximum power output is 108% higher in  $1^\circ$  divergent chimney compared to the reference situation. When they evaluate the collector slope for 4, 6, 8 and  $10^\circ$ , they observe that the mass flow rate, temperature and air velocity figures of the system increase with the collector slope. For divergent and convergent chimney structure, researchers define the ratio of chimney outlet area to chimney entrance area as AR (area ratio) [17-19]. Cuce et al. [19] investigate the effect of chimney design on the performance of the system with a 3D CFD model. When they evaluate the outputs of the system for the AR range of 0.5-10, they achieve that the divergent chimney design gives higher performance than the convergent chimney design. They claim that while the power output for AR=1 in the reference case is 54.1 kW, for the ideal AR range (4-6), the power output will increase about 3 times to 168.5 kW. Another design parameter that affects the performance of the system as much as the collector and the chimney is the floor. Since the slope to be given to the floor of the system will support the upward air movement under the collector, it increases the performance of the system [20,21].

When the existing literature is examined, it is seen that the chimney height and collector radius have been analysed many times by researchers as geometric parameters, but the chimney diameter has not been adequately interpreted. In this study, simulations are conducted at a solar intensity of  $1000 \text{ W/m}^2$ , and a constant ambient temperature of 293.15 K, based on the geometric dimensions of the Manzanares pilot plant. By keeping the chimney height and collector radius constant, the effect of the chimney diameter on the system is interpreted for values ranging from 4.865 to 64.86 m. In the study, the expression of slenderness, which has been previously addressed in the literature, is adopted. Slenderness represents the ratio of

chimney height to chimney diameter in SCPP systems. Within the scope of this research, the slenderness is represented by  $\theta$  ( $H_{ch} / D_{ch}$ ).

## 2. WORKING PRINCIPLE AND GOVERNING EQUATIONS (ÇALIŞMA PRENSİBİ VE KORUNUM DENKLEMLERİ)

Although SCPP systems take up a lot of structural space, there are basically 3 system elements. These are the glazing cover, the tower/chimney and the turbine. Thanks to its semi-permeable structure, the collector is the starting element that ensures the transfer of solar radiation to the system during the day. The solar radiation transferred from the collector to the system and reaching the ground from here causes an increase in the temperature of both the system air and the ground. The density of the system air with increasing temperature decreases and starts to move upwards. Heat transfer occurs from the ground with an increased temperature to the system air. The air moving upwards is directed towards the chimney in the centre of the collector. Due to its high structure, the chimney creates a constant pressure difference. In addition, the chimney supports the upward movement of the air, whose temperature has increased under the collector, and allows it to leave the system. In this way, the system is in a continuous loop. The kinetic energy of the air moving upwards in the chimney is converted into electrical energy by the turbine placed at a certain height from the ground.

This study is carried out based on the structural dimensions of the Manzanares pilot plant, which is the first application of SCPP systems. The chimney diameter is changed between 4.865-64.86 m while keeping other geometric parameters constant. With this change, the effect of the slenderness ( $\theta$ ) value on the change of the mass flow rate, power output, efficiency and average pressure difference in the turbine location is analysed. In all CFD analyses, the ambient temperature and solar intensity are kept constant. In addition, continuity, momentum, energy, and turbulence equations are solved simultaneously with the following assumptions in terms of convenience and economy in the analyses:

- There is a 3D, constant and turbulent flow regime
- There is no change in environmental conditions throughout the analyses
- System air is considered incompressible
- For density calculations, Boussinesq model is adopted

The governing equations of the present work are listed below [22]:

1. Continuity equation:

$$\nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

2. Energy equation:

$$\nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - h\vec{j} + \left( \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \cdot \vec{v} \right) \right) \quad (2)$$

3. Momentum equation

$$\nabla(\rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{v}) = -\nabla p + \left( \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \right) + \rho \{ \vec{g} \} \quad (3)$$

The air under the collector in the system is exposed to convection effects only by solar radiation and the temperature increase on the ground. In this case, there is natural convection and the Ra number for the natural convection can be calculated with the following equation [19]:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TH_{coll}^3}{\alpha\nu} \quad (4)$$

In the equation,  $\alpha$  represents the thermal diffusion coefficient,  $\nu$  the kinematic viscosity, and  $H_{coll}$  the collector height. 109 is the critical value for the Ra number, since the Ra value is about  $8.5 \times 10^9$  in the conducted study, the flow can be taken as turbulent [23]. The RNG k- $\epsilon$  TM, which is one of the 3 different TMs available in the ANSYS FLUENT software, is used in the study. The equation of the model is given as [22]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (6)$$

Haaf [4] states that there is not much increase in the temperature of the air in the system through the experimental measurements on the pilot plant. In this case, the Boussinesq model, which was accepted in previous studies, is used for the density in the CFD study [19-21,24]. The equation of the model is as follows [19]:

$$(\rho - \rho_a)g \approx -\rho_a \beta (T - T_a)g \quad (7)$$

In the equation,  $\rho_a$  and  $T_a$  are the initial density and initial temperature,  $\beta$  is the thermal expansion coefficient and  $g$  is the gravitational acceleration, respectively. The turbine pressure drop ( $\Delta P_t$ ) is used to calculate the power output of the system. The power output ( $P_o$ ) can be obtained from the following equation:

$$P_o = \eta_t \Delta P_t Q_v \quad (8)$$

$Q_v$  stands for volumetric flow rate.  $\eta_t$  is efficiency of turbine-generator system and is assumed to be 0.8 [19-21]. The most common use for calculating the turbine pressure drop is to exploit the pressure difference in the chimney [3]. In this study, pressure drop across the turbine is calculated by taking the average pressure difference ( $P_t$ ) at the turbine location from the CFD results. The equation is as follows:

$$\Delta P_t = r_t P_t \quad (9)$$

$r_t$  in the equation is the turbine pressure drop ratio and is taken as 2/3 [4,10]. The efficiency of the system ( $\eta$ ) expresses how much of the energy entering the system is converted into electrical energy, and its equation is as follows:

$$\eta = \frac{P_o}{A_{coll}G} \quad (10)$$

Here,  $A_{coll}$  denotes the collector area and  $G$  refers to solar intensity.

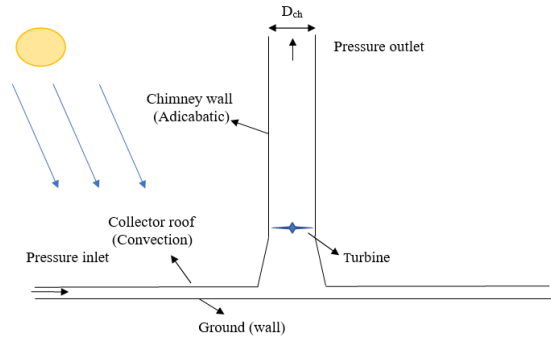
### 3. SYSTEM PROPERTIES AND CFD MODEL (SİSTEM ÖZELLİKLERİ VE HAD MODELİ)

The parameters affecting the performance of SCPP systems are repeatedly analysed in the literature. In particular, the effect of chimney height and collector radius changes on the system is assessed in many studies. This study aims to examine in detail the effect of chimney diameter variation on the performance of the system based on the Manzanares pilot plant. The geometric details of the pilot plant referenced in the study are given in Table 1.

The effect of different chimney diameters is evaluated with ANSYS FLUENT commercial software. First, a 3D model is created for CFD work and two planes of symmetry (XZ and YZ planes) are used for economy. Since the temperature does not change after 0.5 m in the experimental data, this ground thickness is considered sufficient [4].

**Table 1.** Characteristic system details of Manzanares facility [3] (*Manzanares tesisinin karakteristik sistem detayları*)

Parameter	Value
Glazed cover height ( $H_{coll}$ )	1.85 m
Glazed cover radius ( $R_{coll}$ )	122 m
Chimney height ( $H_{tow}$ )	194.6 m
Ground thickness	0.5 m
Chimney diameter ( $D_{ch}$ )	4.865 – 64.86 m
Slenderness ( $\theta$ )	3 – 40

**Figure 1.** The model for SCPP system and relevant boundary conditions(*SCPP sistem modeli ve ilgili sınır koşulları*)

Provided that other geometric parameters are kept constant, the diameter of the chimney is increased from 4.865 m to 64.86 m at different intervals. Since

the pressure differences at the collector inlet and chimney outlet are very small, they are neglected. The schematic and boundary conditions of the system are given in Figure 1. There is convection between the system air and the collector and  $10 \text{ W/m}^2\text{K}$  is taken as the convective heat transfer coefficient. In addition, since the chimney and the ground wall are considered adiabatic, the convective heat transfer coefficient is taken as  $0 \text{ W/m}^2\text{K}$  for the aforesaid surfaces. The materials used in the system are given in Table 2 with reference to the Manzanares pilot plant. The simulations carried out in the study are conducted with the ANSYS FLUENT software, which is based on finite volume method. RNG  $k-\epsilon$  TM is preferred in the analyses, which is compatible with the nature of the problem. The SIMPLE algorithm is adopted for the relationship between air velocity and pressure, and the PRESTO technique is adopted for pressure interpolation. DO (discrete ordinates) radiation method is applied to the system with solar ray tracing algorithm (SRTA). The quadratic UPWIND discretisation method is implemented in all of the governing equations. The Boussinesq method is considered appropriate for the change in the density of the system air.  $10^{-6}$  is accepted as convergence criterion in all analyses. CFD solver parameters and climatic figures are given in Table 3.

**Table 2.** Physical properties of materials adopted in CFD calculations (*HAD hesaplamalarında benimsenen malzemelerin fiziksel özellikleri*)

Mater. prop. (unit)	Collector	Ground	Tower
Dens. ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	$2.5 \times 10^3$	$2.16 \times 10^3$	$2.719 \times 10^3$
Ther. Cond. ( $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	$1150 \times 10^{-3}$	$1830 \times 10^{-3}$	$2024 \times 10^{-1}$
Spec. heat cap. ( $\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	$7.5 \times 10^2$	$7.1 \times 10^2$	$8.71 \times 10^2$
Transmis. coeff.	$9 \times 10^{-1}$	Opaq.	Opaq.
Abs. coeff.	$3 \times 10^{-2}$	$9 \times 10^{-1}$	0
Refrac. index	1.526	1	1
Emiss. coeff.	$1 \times 10^{-1}$	$9 \times 10^{-1}$	1
Thickness (m)	$4 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-1}$	$1.25 \times 10^{-3}$

**Table 3.** CFD model values and environmental data (*HAD model değerleri ve çevresel veriler*)

Sol. Intensity ( $\text{W.m}^{-2}$ )	$1 \times 10^3$
Atmosp. pressu. (Pa)	$101.325 \times 10^3$
Amb. temp. (K)	$2.9315 \times 10^2$
Amb. air dens. ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	$1204 \times 10^{-3}$
Gravita. acceler. ( $\text{m.s}^{-2}$ )	9.81
Air cond. ( $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	$2.59 \times 10^{-2}$
Ideal gas const. ( $\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	$2.87 \times 10^2$
Kinem. visc. ( $\text{m.s}^{-2}$ )	$14.8 \times 10^{-6}$
Air heat cap. ( $\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	$1.006 \times 10^3$
Turb. pressu. drop ratio	0,6666
Stefan-Boltzmann const. ( $\text{W.m}^{-2}\text{K}^{-4}$ )	$5.67 \times 10^{-8}$



#### 4. RESULTS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

In this study, a mesh independent solution is first implemented to examine the effect of chimney diameter variation on the system behaviour of the Manzanares facility. For the mesh independent solution, three different mesh structures are examined for the maximum air velocity ( $V_{max}$ ) in the plant. The number of cells, maximum air velocity and percent change values for the mesh independent solution are given in Table 4. A change of 1.5% is observed for  $V_{max}$  between the solutions with a cell number of 386k ( $k=1000$ ) and 305k. This value is considered sufficient; thus the rest of the analyses are carried out for the cell number of 386k. The model and the mesh image used in CFD analysis are given in Figure 2.

Table 4. Mesh-free analysis for  $V_{max}$  ( $V_{max}$  için ağ bağımsız analiz)

Cell num.	$V_{max}$ (m/s)	% diff.
259k	14.42	-
305k	13.99	2.98
386k	14.20	1.5

Experimental findings are used to determine the accuracy of the model created without changing the diameter of the chimney. The experimental results for the power output of the Manzanares pilot plant at different solar intensities and the findings of the present study are given in Figure 3 [25]. It is seen that the CFD results are in agreement with the experimental data.

The main parameters affecting the power output of SCPP systems are air flow volume per second and pressure drop across the turbine. The volumetric flow rate and turbine pressure drop are directly related to the air flow rate and pressure in the system. Therefore, in principle, the effect of the change in the diameter of the chimney on the air velocity and pressure distribution in the system is interpreted. The pressure distributions in the system for the reference situation and the chimney diameter of 24.325 m are given in Figure 4. It is seen that the increase in the slenderness value decreases the maximum pressure difference in the system.

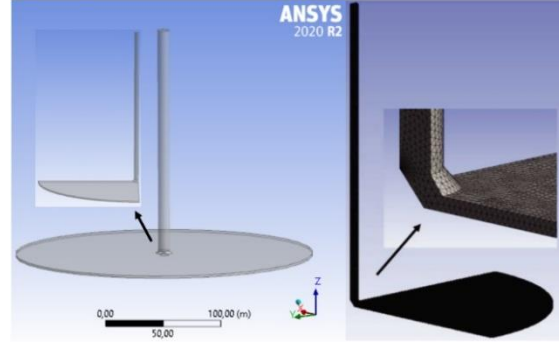


Figure 2. Model and mesh visuals  
(Model ve ağ görselleri)

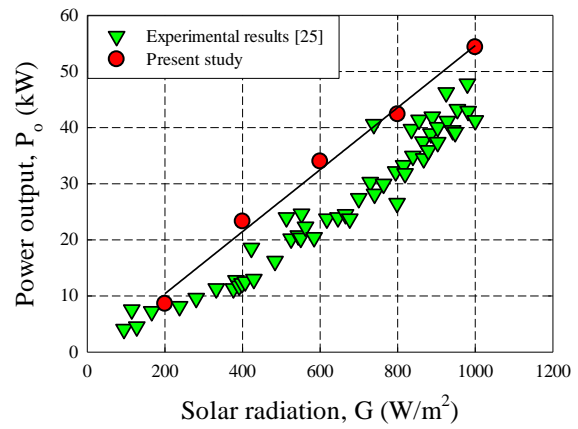


Figure 3. Verification of the CFD model via the power output ( $P_o$ )  
(HAD modelinin çıkış gücü ( $P_o$ ) yardımıyla doğrulanması)

While the maximum pressure difference is approximately 154 Pa in the reference case, when the chimney diameter is 24.325 m ( $\theta=8$ ), it is seen to decrease by 35% to 100 Pa. It is obtained that the maximum difference in pressure is reached around the chimney inlet in the reference geometry. In the pilot plant, the turbine is fixed at 9 m height above the ground. This location is the region where the difference in pressure in the plant is the highest. When looking at the end of collector, it is noticed that the pressure difference is more pronounced for  $D_{ch} = 24.325$  m ( $\theta=8$ ) compared to the reference geometry. The reason for this is the sudden expansion of the system air due to the increase in the diameter of the chimney. When the diameter of the chimney is increased, it is seen that the pressure distribution in the chimney changes significantly. In this case, it can be said that the point where the difference in pressure is highest may change according to the reference situation. Since the maximum pressure difference will mean maximum power output, the pressure difference should be well analysed when designing in different geometries. It is seen in Figure 5 that the change in

chimney diameter also affects the air velocity in the system. It is understood that the air velocity at the collector outlet in the reference state exceeds

approximately 8 m/s. For  $D_{ch} = 24.325$  m ( $\theta=8$ ), it is found that it cannot reach 2 m/s at the collector output.

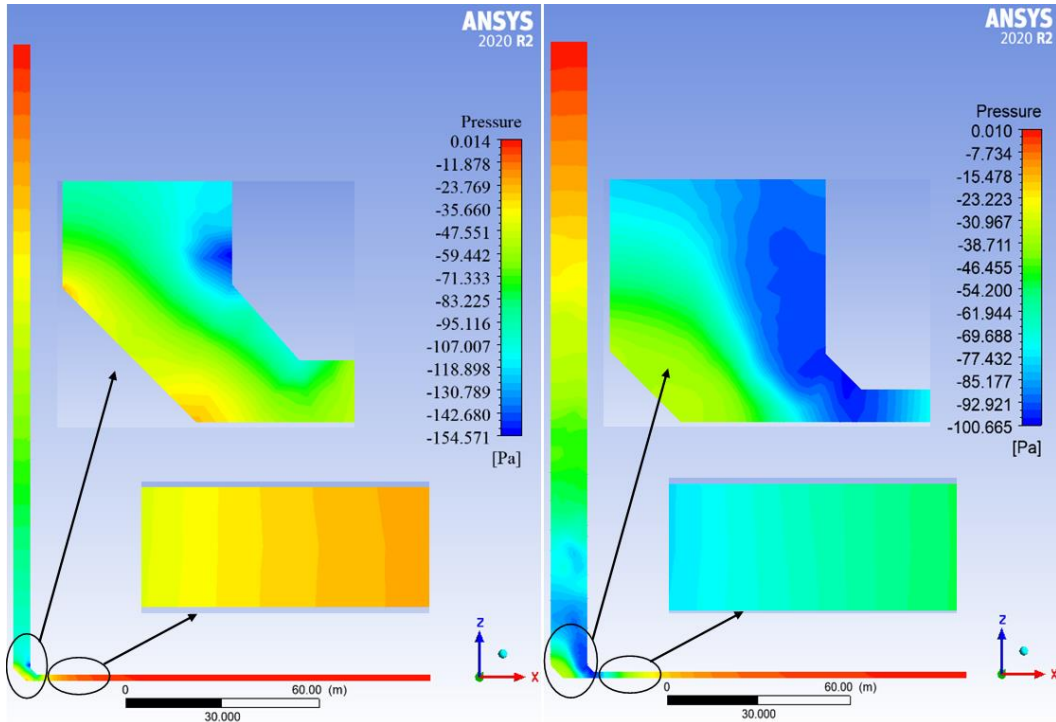


Figure 4. Pressure distributions for references geometry and  $\theta=8$   
(Referans geometri ve  $\theta=8$  için basınç dağılımları)

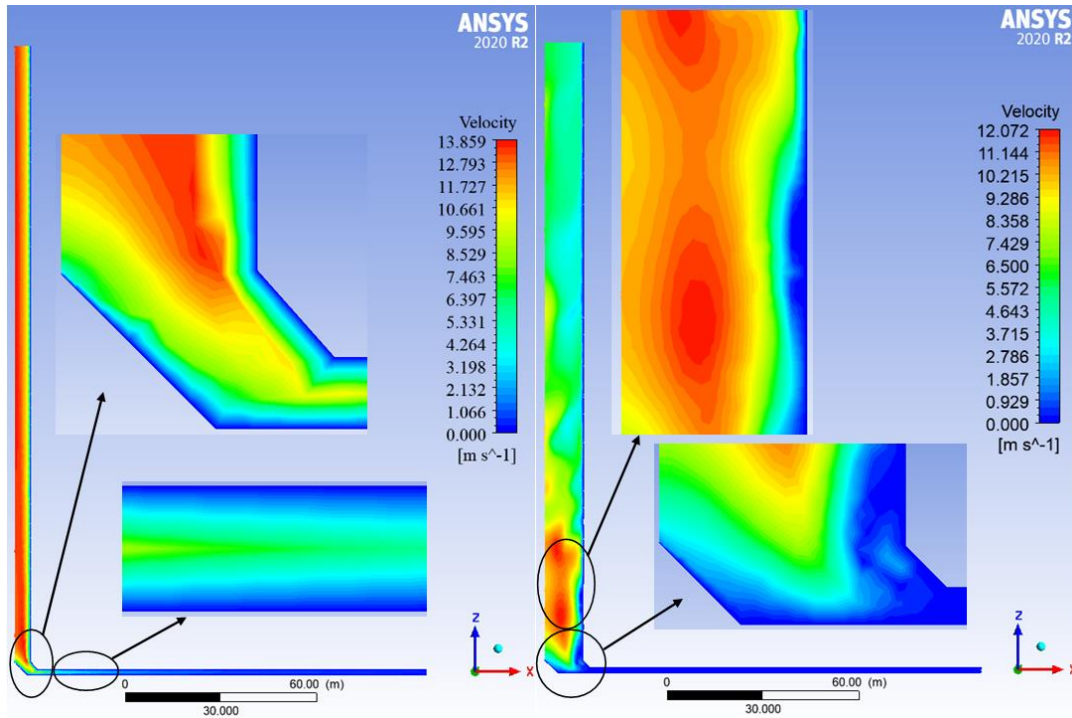


Figure 5. Velocity distributions for references geometry and  $\theta=8$

(Referans geometri ve  $\theta=8$  için hız dağılımları)

The reason for this is that the mass flow rate of the system increases with the increase in the diameter of the chimney. When the mass flow rate increases, the increase in the temperature of the air under the collector decreases as the energy entering the system remains constant. This leads to a decrease in the kinetic energy and velocity of the system air. In addition, with the increase in the diameter of the chimney, the air velocity in the chimney decreases rapidly in the upward direction.

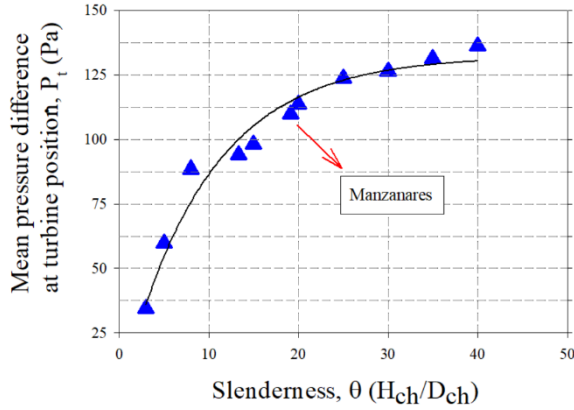


Figure 6. Effect of slenderness to mass flow rate  
(Narinliğin kütleli debiye etkisi)

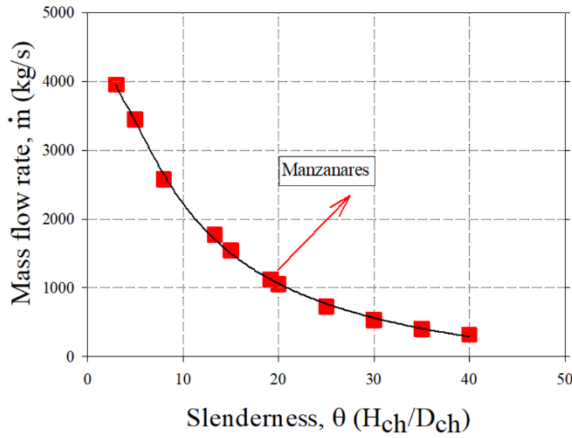


Figure 7. Effect of slenderness on mean pressure difference at turbine position  
(Narinliğin türbin pozisyonundaki ortalama basınç farkına etkisi)

The increase in chimney diameter causes more air to enter and to discharge the system. This is due to the increased cross-sectional area and high flow even at low air velocities. The relationship between the slenderness value and the mass flow rate of the system is given in Figure 6. The mass flow rate of the system, which is approximately 1120 kg/s in the reference case, becomes 2580 kg/s by exceeding its double when the diameter of the chimney is 24.325 m ( $\theta=8$ ).

After the slenderness value of 20, the increase in the mass flow rate decreases and a convergence trend is observed. Increasing the mass flow rate increase the power output of the system. However, an increase in mass flow rate means that more air passes through the system. This reduces the temperature rise and causes the air velocity to decrease. The decrease in air velocity reduces the pressure difference in the plant and negatively affects the power output. In this case, the mass flow rate and the pressure difference are inversely proportional. The effect of the slenderness value on the mean pressure difference at the turbine position is given in Figure 7. It is noticed that the average difference in pressure in turbine position increases with the slenderness value.

It is understood that the pressure difference for  $\theta=8$  has decreased from 110 kPa to 88.5 Pa compared to the reference situation. The mass flow rate increases with the diameter of the chimney, and the average pressure difference decreases at the turbine position. Since the increase in mass flow rate is much higher, the performance of the system increases with the diameter of the chimney. However, this is valid up to a certain point. The relationship between slenderness and power output is given in Figure 8. The Manzanares pilot plant for  $\theta=8$  gives maximum power output. The chimney diameter corresponding to this value is 24.325 m. It is understood that this chimney diameter is the peak point for power output.

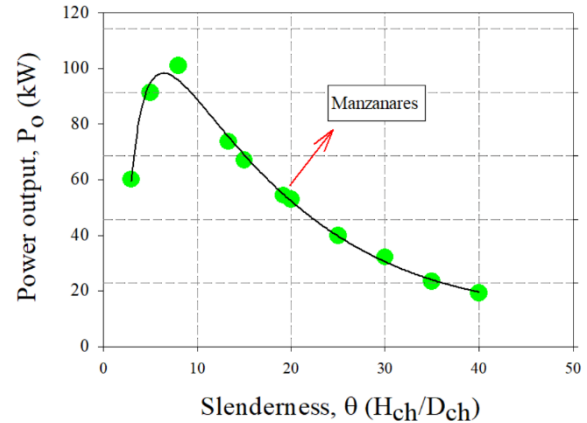


Figure 8. Effect of slenderness on power output  
(Narinliğin çıkış gücüne etkisi)

The efficiency of the system tends to be similar to the power output. The relationship between the slenderness value and the efficiency is given in Figure 9. This study, which references the Manzanares pilot plant, shows that the diameter of the chimney is an important parameter for the plant to be built in the range where the system is most efficient will give much more power output than the reference situation.

In future studies, numerical analyses will be carried out to increase the power output by changing more than one of the geometric parameters at the same time.

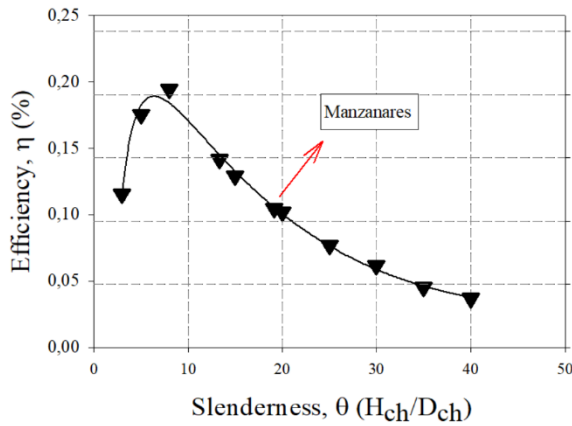


Figure 9. Effect of slenderness on system efficiency  
(Narinliğin sistem verimine etkisi)

## 5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In the present study, a numerical analysis with experimental validation is presented to investigate the impact of chimney diameter on performance figures of SCPP systems through the actual dimensions of the Manzanares facility. In the study with the 3D CFD model, DO is simulated using the SRTA and the RNG k-e TM. The ratio of chimney height to chimney diameter is defined as slenderness ( $\theta$ ). The following conclusions can be drawn from the study:

- Chimney diameter is an important parameter for SCPP systems.
- The DO SRTA and the RNG k-e TM offer the ideal methodology for the numerical analysis of SCPP systems.
- The slenderness value, which gives the maximum power output for the Manzanares pilot plant, is 8.
- In turbine position, the mean pressure difference decreases with the diameter of the chimney.
- At  $\theta=8$  where maximum power output is achieved, the average pressure difference in turbine position is 88.5 Pa. This pressure difference is 19.5% less than the value in the reference geometry.
- At the maximum performance range, the efficiency of the system is 0.194% by showing 94% rise compared to the reference case.

- SCPPs have shown a perspicuous progress over the last four decades [26]. In further works, optimum design and operation conditions are expected to be analysed for further improvement in the performance figures of this renewable and eco-friendly energy technology.

- Although limit values in efficiency figures of PV systems have almost been reached [27,28], SCPPs can be integrated with the thin film PV cells as some part of the collector area. Continuous natural flow of air under the collector enables passive cooling of PV cells, which yields to notable enhancements in PV cell parameters [29]. This can also help to reduce payback period of SCPPs.

## CONFLICT OF INTEREST STATEMENT (ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ)

The authors declare that there is no conflict of interest.

## REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] E. Cuce and P. M. Cuce, "Optimised performance of a thermally resistive PV glazing technology: An experimental validation," *Energy Reports*, vol. 5, pp. 1185-1195, November 2019.  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.046>
- [2] H. Sen and E. Cuce, "Dynamic pressure distributions in solar chimney power plants: A numerical research for the pilot plant in Manzanares, Spain," *WSSET Newsletter*, vol. 12, no. 1, pp. 2-2, 2020.
- [3] W. Haaf, K. Friedrich, G. Mayr and J. Schlaich, "Solar chimneys part I: principle and construction of the pilot plant in Manzanares," *International Journal of Solar Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 3-20, 1983.  
doi: <https://doi.org/10.1080/01425918308909911>
- [4] W. Haaf, "Solar chimneys: part ii: preliminary test results from the Manzanares pilot plant," *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 2, no.2, pp. 141-161, 1984.  
doi: <https://doi.org/10.1080/01425918408909921>
- [5] L. B. Mullett, "The solar chimney—overall efficiency, design and performance," *International journal of ambient energy*, vol. 8, no. 1, pp. 35-40, January 1987.  
doi: <https://doi.org/10.1080/01430750.1987.9675512>
- [6] E. Cuce, P. M. Cuce and H. Sen, "A thorough performance assessment of solar chimney power plants: Case study for Manzanares," *Cleaner*

*Engineering and Technology*, vol. 1, 100026, December 2020.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100026>

[7] J. Y. Li, P. H. Guo and Y. Wang, "Effects of collector radius and chimney height on power output of a solar chimney power plant with turbines," *Renewable Energy*, vol. 47, pp. 21-28, November 2012.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.03.018>

[8] U. E. Ayli, E. Özgirgin and M. Tareq, "Solar Chimney Power Plant Performance for Different Seasons Under Varying Solar Irradiance and Temperature Distribution," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 143, no. 6, 2021.

doi: <https://doi.org/10.1115/1.4048533>

[9] A. Dhahri, A. Omri and J. Orfi, "Numerical study of a solar chimney power plant," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 8, no. 18, pp. 1953-1965, November 2014.

[10] E. Cuce, H. Sen and P. M. Cuce, "Numerical performance modelling of solar chimney power plants: Influence of chimney height for a pilot plant in Manzanares, Spain," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 39, 100704, June 2020.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100704>

[11] P. Karimipour Fard and H. Beheshti, "Performance enhancement and environmental impact analysis of a solar chimney power plant: Twenty-four-hour simulation in climate condition of isfahan province, iran," *International Journal of Engineering*, vol. 30, no. 8, pp. 1260-1269, August 2017.

[12] A. Koonsrisuk, S. Lorente and A. Bejan, "Constructal solar chimney configuration," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, no. 1-3, pp. 327-333, January 2010.

doi:

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.026>

[13] E. Cuce and P. M. Cuce, "Performance assessment of solar chimneys: Part 1 – Impact of chimney height on power output," *Energy Research Journal*, vol. 10, pp. 11-19, June 2019.

doi: <https://doi.org/10.3844/erjsp.2019.11.19>

[14] E. Cuce and P. M. Cuce, "Performance assessment Energy Research Journal of solar chimneys: Part 2 – Impacts of slenderness value and collector slope on power output," *Energy Research Journal*, vol. 10, pp. 20-26, July 2019.

doi: <https://doi.org/10.3844/erjsp.2019.20.26>

[15] K. Ikhlef and S. Larbi, "Energy Performance Analysis of a Solar Chimney Power Plant with and without Thermal Storage System," 6th International Conference on Automation, Control, Engineering and Computer Science ACECS-2019, İstanbul, Turkey, October 21-23, 2019.

[16] A. Hassan, M. Ali, and A. Waqas, "Numerical investigation on performance of solar chimney power plant by varying collector slope and chimney diverging angle," *Energy*, vol. 142, pp. 411-425, January 2018.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.047>

[17] A. Koonsrisuk and T. Chitsomboon, "Effects of flow area changes on the potential of solar chimney power plants," *Energy*, vol. 51, pp. 400-406, March 2013.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.12.051>

[18] S. Hu, D. Y. Leung and J. C. Chan, "Impact of the geometry of divergent chimneys on the power output of a solar chimney power plant," *Energy*, vol. 120, pp. 1-11, February 2017.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.098>

[19] E. Cuce, A. Saxena, P. M. Cuce, H. Sen, S. Guo and K. Sudhakar, "Performance assessment of solar chimney power plants with the impacts of divergent and convergent chimney geometry," *International Journal of Low-Carbon Technologies*. January 2021.

doi: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa097>

[20] E. Cuce, P. M. Cuce, H. Sen, K. Sudhakar, U. Berardi and U. Serencam, "Impacts of Ground Slope on Main Performance Figures of Solar Chimney Power Plants: A Comprehensive CFD Research with Experimental Validation," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2021, no. 2021, pp. 6612222, May 2021.

doi: <https://doi.org/10.1155/2021/6612222>

[21] P. M. Cuce, E. Cuce and H. Sen, "Improving electricity production in solar chimney power plants with sloping ground design: an extensive CFD research," *Journal of Solar Energy Research Updates*, vol. 7, no. 1, pp. 122-131, December 2020.

doi: <http://dx.doi.org/10.31875/2410-2199.2020.07.9>

[22] ANSYS FLUENT, “Users Theory Guide, ANSYS, Inc.”, USA, November 2013. [Online]. Available: <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf> [Accessed: June. 01, 2021].

[23] E. Cuce, “Güneş nacası güç santrallerinde toplayıcı eğiminin çıkış gücüne ve sistemverimine etkisi,” *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 1025-1038, June 2020. doi: 10.17482/uumfd.732862

[24] P. H. Guo, J. Y. Li and Y. Wang, “Numerical simulations of solar chimney power plant with radiation model,” *Renewable Energy*, vol. 62, pp. 24-30, February 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.039>

[25] J. R. Schlaich, R. Bergemann, W. Schiel and G. Weinrebe, “Design of commercial solar updraft tower systems—utilization of solar induced convective flows for power generation,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 127, no. 1, pp. 117-124, February 2005. doi: <https://doi.org/10.1115/1.1823493>

[26] E. Cuce and H. Sen, “Solar chimney power plants from past to present: Performance parameters affecting system power output,” *Euro Asia 7th International Congress on Applied Sciences*, 21-22 August, 2020, Trabzon, Turkey. pp. 256-262.

[27] S. B. Riffat and E. Cuce, “A review on performance analysis of photovoltaic/thermal collectors,” *Tenth International Conference on Sustainable Energy Technologies*, 4-7 September 2011, Istanbul, Turkey.



[28] E. Cuce, E. K. Oztekin and P. M. Cuce, “Hybrid photovoltaic/thermal (HPV/T) systems: From theory to applications,” *Energy Research Journal*, vol. 9, pp. 1-71, June 2018. doi: <https://doi.org/10.3844/erjsp.2018.1.71>

[29] E. Cuce and T. Bali, “Variation of cell parameters of a p-Si PV cell with different solar irradiances and cell temperatures in humid climates,” *Fourth International Exergy, Energy and Environment Symposium*, 19-23 April 2009, Sharjah, United Arab Emirates.

This is an open access article under the CC-BY license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



## Web Tabanlı Sürücü Davranışları Analiz Uygulaması

Nesrin AYDIN ATASOY<sup>\*a</sup> , Furkan ÇAKMAK<sup>b</sup> ,

<sup>a,\*</sup> Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük, Türkiye.

<sup>b</sup> Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük, Türkiye.

### MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 29.05.2021  
Kabul: 21.09.2021

#### **Anahtar Kelimeler:**

Sürücü davranış sınıflandırma, Sürüş olayları görselleştirme, Web tabanlı sürüş analizi

### ÖZ

İnsan faktörü, trafik kazalarına neden olan sebepler arasında ilk sırada yer almaktadır. Özellikle büyük şehirlerde sürücü ve taşıt sayılarının fazla olması trafikte risk oranını artırmaktadır. Günlük hayatta, sürücü davranışları denetlenen sürürlere göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle, trafik kazalarının önlenmesinde sürücülerin sürüş esnasındaki davranışlarını tespit etmek önemli bir konu haline gelmiştir. Sürücülerin davranışlarını tespit etmek için akıllı telefon, kamera, ivme ölçer, jiroskop, kontrol alan ağı, ışın algılama mesafe ölçümü, inersiyel ölçme ünitesi gibi cihaz ve sensör yardımıyla sürüş verileri toplanabilir. Sürüşleri tanımlamak ve değerlendirmek için sürücü psikolojisi, çevresel faktörler, yol durumu, araç kinematiği gibi farklı biyolojik ve fizyolojik faktörlerin dikkate alınması gereklidir. Bu çalışmada gerçek trafik ortamlarında kaydedilmiş iki farklı veri setine ait sürüş verileri kullanılmıştır. Her iki veri seti üzerinde ABD Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresine göre sert hızlanma-yavaşlama ve manevra olayları tespit edilmiş ve sürücü davranışı tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen web tabanlı yazılım ile araçtan elde edilen verilere göre çıkarılan özellikler grafiksel ve istatistiksel olarak sunulmuştur. Ayrıca, yolculukla ilgili rota, hız, durma ve duraklama gibi olaylar harita üzerinde kullanıcı dostu arayüz ile sürücü davranışlarının tanımlanması için görselleştirilmiştir. Sürüş sonunda sürücünün puan grafiği ve sürüş raporu sonuçları oluşturulmaktadır.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.09>

## Web Based Driver Behaviors Analysis Application

### ARTICLE INFO

Received: 29.05.2021  
Accepted: 21.09.2021

#### **Keywords:**

Driver behavior classification, Driving events visualization, Web-based driving analysis

### ABSTRACT

The human factor ranks first among the causes of traffic accidents. Especially in big cities, the high number of drivers and vehicles increases the risk ratio in traffic. In daily life, driver behavior differs according to supervised driving. For this reason, it has become an important issue to determine the behavior of drivers while driving in the prevention of traffic accidents. In order to detect the behavior of the drivers, driving data can be collected with the help of devices and sensors such as smart phone, camera, accelerometer, gyroscope, control area network, beam detection distance measurement, inertial measurement unit. It is necessary to consider different biological and physiological factors such as driver psychology, environmental factors, road condition, vehicle kinematics in order to define and evaluate drives. In this study, driving data belonging to two different data sets recorded in real traffic environments are used. On both data sets, according to the US National Highway Traffic Safety Administration, severe acceleration-deceleration and maneuvering incidents were detected and driver behavior was defined. With the developed web-based software, the features extracted according to the data obtained from the tool are presented graphically and statistically. In addition, events such as route, speed, stop and stop related to the journey are visualized on the map with a user-friendly interface to define driver behaviors. At the end of the ride, the driver's score graph and driving report results are created.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.09>

\*Sorumlu yazar: nesrinaydin@karabuk.edu.tr

To cite this article: N.A. Atasoy and F. Çakmak, "Web Based Driver Behaviours Analysis Applications", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, 264-276, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.03.09

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Trafik kazaları ülkelerin ve toplumların başlıca sorunlarından biridir. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) verilerine göre dünyada her yıl yaklaşık 1,35 milyon kişi trafik kazaları nedeniyle hayatını kaybetmektedir [1]. Trafik kazalarının meydana gelmesinde araç yapısı, yol, hava koşulları ve insan faktörü gibi birçok etken vardır. Bu etkenler incelendiğinde ilk sırada insan faktörü yer almaktadır [2]. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Ulaştırma Bakanlığı Federal Karayolu İdaresi 2019 yılı verilerine göre ABD’ de 276 milyon 491 bin 174 kayıtlı araç vardır [3]. Avrupa Otomobil Üreticileri Birliği verilerine göre Avrupa Birliğinde 308 milyon 392 bin 804 kayıtlı araç bulunmaktadır [4]. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre 2020 Aralık ayı sonu itibariyle ülkemizde trafiğe kayıtlı 24 milyon 64 bin 532 taşıt bulunmaktadır [5]. Sürücü belgesine sahip kişi sayısı ise 30 milyon 541 bin 611 kişiye ulaşmıştır [6]. Özellikle büyük şehirlerde bulunan sürücü ve taşıtların sayılarına bakıldığında trafikte risk oranı hayli yüksektir. Aynı zamanda sürücülerin, sürücü belgesi alma esnasındaki denetlenen sürüşleri ile günlük hayattaki denetlenmeyen sürüşleri birbirinden oldukça farklılık gösterebilmektedir. Bu bakımdan sürücülerin günlük sürüş davranışlarının incelenmesi ve sürüşlerin denetlenmesi kazaların azalmasında çok önemli bir etkidir. Bu sebeple denetim için yasalarla belirlenmiş bazı ticari araçlarda, araç kullanım süresi, mesafe ve hız bilgilerinin kayıt altına alınması amacıyla takograf adı verilen cihazlar kullanılmaktadır. Ancak diğer araçlar için böyle bir zorunluluk ve denetim mekanizması bulunmamaktadır. Denetlenen parametreler ise insani temel gereksinimlerin sağlanmasına yöneliktir.

Sürücü davranışlarının tanımlanması, sürücü ve trafik durumlarının çeşitli özelliklerine bağlı olmasından dolayı karmaşık bir konu olarak kabul edilir [7]. Sürücü davranışlarının doğru tanımlanması için araçların sürüşle ilgili bilgiler sağlayacak sensör ve donanımlara sahip olmaları gerekir. Sürüş davranışlarını tanımlamak ve değerlendirmek için sürücü psikolojisi, çevresel faktörler, yol durumu, araç kinematiği gibi farklı biyolojik ve fizyolojik faktörlerin dikkate alınması gereklidir [8]. Tüm bu faktörlere dayalı doğru ve eksiksiz bir model oluşturmak oldukça zordur. Sürüş davranışlarının modellenmesi kaza riskinin azaltılmasıyla birlikte enerji verimliliği ve risk analizi gibi çözümler üretilmesine katkı sağlar.

Filolar, araç kiralama şirketleri ve sigorta şirketleri sürücülerin kaza risklerini istatistiksel olarak belirlenmiş parametrelere göre değerlendirmekte ve bu değerlendirmelere göre fiyatlandırma yapmaktadır. Kamusal ve kurumsal araç filo yönetiminde, taşıt temininin ve kullanımının, sürücülerin ve taşıtların verimlilik gibi süreçlerinin planlanması oldukça önemli bir gerekliliktir. Sürücülerin bireysel araç kullanım davranışları takip edilerek güvenlik, verimlilik ve risk oranları belirlenebilir. Gelecekte taşıt kullanımı sırasında maddi ve manevi hasara neden olacak sürücü davranışları azaltılabilir ya da kontrol edilebilir. Literatürde, anketler ve yapay zekâ yöntemleriyle bu problemlere çözüm arandığı görülmektedir.

Bu çalışmada, sürücü davranışlarının belirlenmesi için sensörlerden alınan veriler ve bu verilerden elde edilen özelliklerle sürücü davranışının sınıflandırması için web tabanlı, kullanıcı dostu grafiksel ve istatistiksel bilgiler sunan bir arayüz geliştirmiştir. Geliştirilen arayüz, sürücü davranışlarını Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi (National Highway Traffic Safety Administration – NHTSA) yönergelerinde belirtilen kurallara göre sınıflandırmaktadır [9]. Bu belge ABD Ulaştırma Bakanlığı tarafından oluşturulmuştur.

Çalışmanın diğer bölümlerinde, literatürde yapılan çalışmalar, kullanılan veri seti ve yöntemlerin incelenmesi, geliştirilen uygulama ve sonuçların tartışılması sunulmuştur.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE REVIEW)

Literatürde sürücü davranışlarını farklı yaklaşımlarla ve boyutlarla değerlendiren çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Sürücü davranışlarının tespitinde yapılan ilk çalışma bir anket çalışmasıdır. Bilinen ilk sürücü davranışı tanımlama anket çalışması Reason ve arkadaşları tarafından 520 sürücünün katılımıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Sürücü Davranışları Anketi (SDA) ile sürücü davranışı tanımlaması yapılmaktadır. Çalışmada sürücünün davranışları kasıtlı ihlaller, dikkatsizlik sonucu yapılan hatalar ve tehlikeli hatalar olarak üç farklı kategoride sınıflandırılmıştır [10]. Lawton ve arkadaşları SDA’ ya yeni maddeler ekleyerek 830 sürücünün katılımıyla yaptıkları anket çalışmasında ihlallerin iki boyutta değerlendirilmesi gerektiğini öne sürmüşlerdir. İhlalleri, saldırgan ihlal ve sıradan ihlal olarak iki boyutta sınıflandırmışlardır [11]. Taubman ve arkadaşları günümüzde halen popüler olan Çok Boyutlu Sürüş Stili değerlendirme anketini



geliştirmişlerdir. Çalışmalarında daha önceki anketlerin sorularına kendi yaklaşımlarını ekleyerek 44 anket sorusu hazırlamışlardır. Anket yanıtları sayesinde sürücünün dikkatsiz, endişeli, kızgın ve sabırlı sürücü davranışından birine sınıflandırılabilceğini iddia etmişler ve halen kullanılmakta olan dört sürücü davranışının temelini oluşturmuşlardır. Yazarlar aynı zamanda bilinçli karar verme, demografik altyapı, karakter, cinsiyet, yaş, eğitim, sürüş deneyimi, araç ve çevreye aşinalık gibi parametrelerin sürücü davranışlarının tespit edilmesindeki etkisine dikkat çekmiştir. [12]. Daha sonraki yıllarda Newnam ve arkadaşları tarafından oluşturulan Kurumsal Sürücü Davranışları Ölçeği [13], Harris ve arkadaşları tarafından geliştirilen Pro-sosyal ve Agresif Sürüş Envanteri [14] yapılan diğer popüler anket çalışmalarıdır. Yapılan tüm anket çalışmaları sürücü davranışı tanımlama kriterleri ve bu kriter seçimlerinin neden yapıldığına genel bir bakış sağlamaktadır.

Tüm anket çalışmalarının ortak özelliği sürücü davranışlarının tanımlanması için çeşitli kriterlerin değerlendirilmesidir. SDA' dan yola çıkarak geliştirilen diğer ölçekler sürücülerin farklı koşullarda farklı davranış örnekleri sergilediklerine işaret etmektedir. SDA ile benzer kriterlere sahip olan ölçeklerde dahi sürücü davranışlarının, trafikte güvenle ilgili konularda daha derinlemesine değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır [12–14]. Aynı zamanda sadece bir anket yardımıyla değerlendirilme yapılması, sürücünün kendine ait profili olumsuz değerlendirmeye amacı taşıyabilir. Bu nedenle sürüş verileriyle desteklenmeyen bu yaklaşım tek başına tutarlı olmamaktadır.

Literatürde diğer yaklaşımlar sürücü davranışlarını yakıt tüketimi, hız, manevra, ivme veya takip mesafesi gibi rakamlarla ifade edilen parametrelerle tanımlamaya odaklanmaktadır. Son yıllarda teknolojinin de gelişmesiyle birlikte sürücü davranışını analiz etmek ve sürücü performansını değerlendirmek için çeşitli ticari ve araştırma amaçlı sistemler önerilmiştir. Geliştirilen sistemlerde Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System – GPS) konumları, Kontrol Alan Ağı (Control Area Network – CAN) verileri, kamera, ses, video, akıllı telefon ve araba simülatörü verileri kullanılmaktadır.

Qingwen ve arkadaşları yaptıkları çalışmada arkadan çarpma kaza risklerine dikkat çekmişlerdir. Köprülere yerleştirilmiş kameralardan alınan görüntülerden oluşan veri setine, video analizi sayesinde sınıflandırma yöntemleri uygulayarak sürüş tarzı tanıma ve sürücü destek sistemleri tasarlamının

mümkün olabileceğini önermişlerdir. Önerilen çalışmaya göre video kayıtlarındaki araçların güzergahları tespit edilir ve daha sonra aracın önünde veya arkasında bulunan araçla mesafesine bağlı olarak çarpışma riski seviyesi hesaplanır. Ancak yapılan çalışmanın sonucunda sürüş tarzının yol koşulları ve trafik akışından da etkilenebileceği dolayısıyla sürüş tarzını daha doğru tespit edilebilmesi için diğer özelliklerin de eklenmesi gerektiği bildirilmiştir [15]. Fugiglando ve arkadaşları sürücü ve araç arasındaki etkileşimin sürücü davranışlarının sınıflandırılmasında daha başarılı olacağını önermişlerdir. Pedallardan ve direksiyon simidinden alınan verilerin “doğrudan” sürücü hareketlerini ve eylemlerini yansıtırken, hız, motor devri ve ivmesel hareketliliğin hissedilen sürücü hareketlerini temsil ettiğini düşünmüşlerdir. Çalışmada bu fikri desteklemek için 64 sürücüyle araçtaki CAN veri yolu sensörüyle kaydedilen fren pedalı basıncı, gaz pedalı konumu, dakikada devir sayısı, hız, direksiyon simidi açısı, direksiyon simidi momentumu, yanal hızlanma, boylamsal hızlanma verilerini kullanmışlardır. Temel Bileşen Analizi (Principal Component Analysis – PCA) kullanılarak seçilen yedi farklı özellikle sürücü davranışlarını sınıflandırma yöntemi önerilmiştir. Ayrıca, alt örnekleme stratejisinin doğru seçilmesiyle, kümeleme performansını bozmadan toplam veri setinin boyutunu %99' a kadar azaltmanın mümkün olduğu bildirilmiştir. Araştırmacılar ümit verici sonuçlar elde etse de çevresel bilgilerin eksikliğinde, insan davranışının doğallığı ve öngörülemezliği arasındaki ilişkiye dikkat çekerek sürücü davranışı tanımlamanın güçlüğünden bahsetmişlerdir. Bu nedenle sürücü davranışlarının sınıflandırılması için veri setinin daha fazla özellikle zenginleştirilmesi tavsiye edilmiştir [16]. Literatürdeki birçok çalışma daha doğru sınıflandırma için daha çok sensör verisi kullanılmasının faydalı olacağını önermektedir [15–17]. Son yıllarda hızla ilerleyen teknoloji sayesinde mobil cihazlar ile elde edilen veriler üzerinde çalışmalar artmaktadır. Siami ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, sigorta şirketinde poliçe sahibi kişilerin kaza risklerini tahmin edilmesi için derin öğrenme yöntemi ile bir model önermişlerdir. Tahmin modelinde giriş verileri olarak, sigorta şirketi tarafından yayınlanan 2011 ve 2015 yılları arasında akıllı telefonla kaydedilmiş 2.500 sürücüye ait 50.000 sehayat içeren veri seti kullanılmıştır [18].

Literatürdeki çalışmalarda kamuya açık birçok veri seti sürücü davranışı analizinde kullanılmak üzere sunulmuştur. Barreto ve arkadaşları tarafından yayınlanan veri setinde bütünleşik tanı sistemi (On Board Diagnostics – OBD) arabirimi kullanılarak sürücü davranışı analizi için veriler kaydedilmiştir

{Formatting Citation}. Ancak yayınlanan veri setinde kayıp veri miktarının çok olması analiz sonuçları üzerinde önemli bir etki oluşturmaktadır. Bunun sebebi sürücü davranışı analizinde, sürüş olayını temsil edemeyen önemli verilerin olmaması veya çeşitli tekniklerle yeri doldurulamayan verilerin analiz sonuçlarının doğru değerlendirilmesinde olumsuz etkiye sahip olmasıdır. Çalışmada eksik verilerin tamamlanma sürecinde nasıl bir teknik uygulandığı açıklanmamıştır. Bu nedenle veri setinin kullanılması sonucunda başarının güvenilirliği tartışmalıdır. Romera ve arkadaşları tarafından yayınlanan veri seti akıllı telefon sensörleri kullanılarak Madrid' in farklı bölgelerinde toplam 82 km rotada 500 dakika kaydedilmiştir. Veri kaydetme işlemine başlamadan önce farklı yaş gruplarında 5 erkek ve 1 kadın olmak üzere 6 farklı sürücüdün yol boyunca araçlarını agresif, uykulu ve normal davranışlarla sürmeleri ayrıca uykulu sınıflandırma için sürücülerden, yol boyunca ara sıra hafif uykuluymuş gibi davranılması istenmektedir. Araca sabitlenmiş akıllı telefonda bulunan ivme ölçer, jiroskop, GPS sensörleri sayesinde ivme, açısal hız ve konum verileri kaydedilmiştir [20]. Fakat paylaşılan sürüş verileri 50 km/s hız ve üzerindeki hızlar içindir. Bu hız altındaki başlangıç ve bitiş gibi önemli sürüş olaylarını temsil eden veriler bulunmamaktadır. Bu nedenle gerçek trafik koşullarında bu değerlerin eksikliği tutarlı tespit yapılmasına engel olmaktadır. Ayrıca şehir içi hız limitleri dikkate alındığında veri setinin kullanılabilirliği de tartışmalıdır.

Honda Sürüş Veri Seti (Honda Driving Dataset – HDD), Honda Araştırma Enstitüsü tarafından oluşturulmuş ve araştırmacılarla ücretsiz olarak paylaşılmaktadır [21]. Bu veri seti, kamera ve CAN, GPS, Işın Algılama, Mesafe Ölçümü (Light Detection and Ranging – LIDAR), İnersiyal Ölçme Ünitesi (Inertial Measurement Units – IMU) sensörleri yerleştirilmiş bir araçla ABD' nin San Francisco bölgesinde 104 saatlik sürüş verisinden oluşmaktadır. Sürüşler farklı zaman dilimlerinde, farklı trafik sahneleri, hava koşulları, şehir içi yollar, banliyö ve otoyollar üzerinde gerçekleştirilmiştir. HDD, kurumsal bir araştırma enstitüsü tarafından oluşturulmuş ve güvenilir sürüş bilgileri içeren bir veri seti olması sebebiyle araştırmacılar için önemlidir. Sürücü davranışı analizinde kullanılacak çeşitli veri özelliklerine sahip çok sayıda kamuya açık ve ücretsiz veri seti bulunmaktadır [20–29].

Daha önceki çalışmalar incelendiğinde sürücü davranışlarının analiz edilmesinde kullanılan modeller ve sınıflandırmalar, sürüş detaylarını içeren görsel bir arayüz sunmamaktadır. Bu çalışmada

gerçek sürüş sırasında kaydedilen konum, gaz-fren pedali, direksiyon açısı-hızı, jiroskop ve ivme ölçer verileri kullanılarak tespit edilen hızlanma, yavaşlama, dönme vb. olayların istatistik, grafik ve harita üzerinde gösterimi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yazılım NHTSA tarafından tanımlanmış kurallara göre sürüş hakkında istatistiksel bilgiler vermekte ve bu istatistiklere göre sınıflandırma yapmaktadır. Böylece sürücü davranışlarının yol ve zamana bağlı analizini kolaylaştıracak, kullanıcı dostu web tabanlı bir arayüz geliştirilmiştir.

### 3. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

#### 3.1. Veri Seti (Dataset)

Çalışmada, HDD veri seti ile gerçek trafik ortamında Android işletim sistemine sahip akıllı telefonla oluşturduğumuz veriler kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde parametre açısından daha zengin veri setleri ile sınıflandırma başarısının artacağı vurgulanmıştır. Ancak çalışmalar incelendiğinde araç ve araç-sürücü etkileşimi ile ilgili en çok parametre içeren veri setinin HDD olduğu görülmektedir. Bu sebeple HDD veri seti çalışmada tercih edilmiştir. Tablo 1' de çalışmada kullanılan veri setlerine ait sensör çeşitleri, yol tipi, sürüş süreleri ve sürüş sınıflandırma özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan veri seti parametreleri (Dataset parameters used in the study)

Özellikler	HDD	Oluşturulan Veri Seti
GPS	✓	✓
CAN	✓	X
IMU	✓	İvme Ölçer, Jiroskop
LIDAR	✓	X
Kamera	✓	X
Yol Tipi	Şehir içi, Şehir dışı Otoyol, Banliyö	Şehir içi, Şehir dışı, Otoyol
Farklı Sürüş Kaydı	136	20
Sürüş Süresi	104 saat	6 saat
Tarafsız Sürüş Puanlaması	X	✓

#### 3.1.1. Honda sürüş veri seti (Honda driving dataset)

Kamera ve çeşitli sensörler ile (LIDAR, GPS, IMU, CAN) donatılmış bir araçla, gerçek trafik ortamında, farklı hava koşulları ve yol tiplerinde 1 sürücü tarafından toplanan veri setidir. Bu nedenle sürüş olaylarının doğallığını temsil eden farklı senaryolar bulunmaktadır. 27 Şubat 2017-6 Ekim 2017 tarihleri arasında ABD' nin San Francisco bölgesinde şehir içi-dışı, banliyö ve otoyollarda farklı zamanlarda toplam 104 saat ve 136 farklı sürüş kaydedilmiştir. Veri seti içerisinde sürüş zamanı,

araba hızı, gaz pedalı açısı, fren pedalı basıncı, enlem, boylam, direksiyon simidi açısı, direksiyon simidi dönüş hızı ve arabanın yalpalama oranı verileri yer almaktadır. Toplanan ham veriler .csv formatına çevrilerek yayınlanmıştır. Aynı zamanda veri seti, sürüş verilerinin doğruluğunun ve güvenilirliğinin kontrol edilebilmesine olanak sağlayan araç içi kamerayla kaydedilmiş sürüş videolarına sahiptir. Kamuya açık çok sayıda veri seti olmasına rağmen, bu çalışmada en güncel ve gerçek trafik koşullarında kaydedilen HDD veri setinin kullanılması tercih edilmiştir. Ayrıca veri seti, sürücü davranışının sınıflandırılmasını, sürücünün bir sonraki hareketinin tahmin edilmesini, otonom sürüş araştırmaları ve akıllı sürüş sistemlerinin geliştirilmesini hedefleyen araştırmacılar için ölçeklenebilir yaklaşımla hazırlanmıştır [21].

### 3.1.2. Oluşturulan veri seti (Created dataset)

Çalışma için oluşturulan mobil uygulama ile gerçek trafik ortamında Karabük ili sınırları içerisinde şehir içi-dışı ve otoyol üzerinde, farklı hava koşullarında ve farklı saat dilimlerinde 1 sürücü tarafından kaydedilmiştir. 2020 Model 1.5 TSI motor ve DSG şanzımanlı Škoda Superb araçla Android 10 Q işletim sistemli Xiaomi Redmi Note 9 4GB RAM ve 128GB hafızaya sahip akıllı telefonda bulunan GPS, ivme ölçer ve jiroskop sensörleriyle toplam 6 saat ve 20 farklı sürüş verisi toplanmıştır. Veri seti içerisinde hız, enlem-boylam, rakım, 3 eksenli ivme, 3 eksenli jiroskop ve sürücü puanlaması özellikleri bulunmaktadır. Veri seti oluşturmak için farklı zamanlarda bilinçli olarak farklı tipte sürüşler gerçekleştirilmiştir. Mobil uygulamayla kaydedilen sürüş kayıtları daha sonra SQLite (DB browser) uygulamasıyla bilgisayarın işleyebileceği .csv formatına dönüştürülmüştür.

### 3.2. Veri Ön İşleme (Data Pre-Processing)

Veri ön işleme süreci, veri analizindeki kritik süreçlerden biridir. Kullanılacak verilerin analiz edilmeden önce kaliteli, tutarlı, güncel, eksiksiz, güvenilir ve yorumlanabilir olması gerekmektedir. Toplanan ham verilerin işlenmeden önce eksik ve gürültülü verilerden temizlenmesi, farklı kaynaklardan alınan verilerin birleştirilmesi, dönüştürülmesi analiz sonuçlarının başarısını arttırmada doğrudan etkilidir [30–32]. Bu nedenle çalışmada Şekil 1’ de gösterilen veri ön işleme adımları takip edilmiştir.



Şekil 1. Veri ön işleme adımları (Data pre-processing steps)

#### 3.2.1. Veri temizleme (Data cleaning)

Kaydedilen veriler her zaman anlamlı olmamaktadır. Veriler ölçüm hatası, alet, bilgisayar ya da insan hatasından kaynaklı bazen gürültülü, tutarsız, tekrar eden, eksik veya hatalı olarak kaydedilebilir. Veri temizleme adımı bu veriler düzeltilebilir, veri kümesinden atılabilir, eksik değerlerin yerine sabit, ortalama, tahmini değerler eklenebilir. Bu verilerin analiz edilmeden önce çıkarılması ya da düzeltilmesi analiz sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği açısından oldukça önemlidir [33].

#### 3.2.2. Veri birleştirme (Data integration)

Farklı kaynaklardan alınan verilerin birlikte değerlendirilmesi için uygun formatta birleştirilerek bir bütün haline getirilmesi veri birleştirme işlemidir [31]. Birden fazla veri kümesinin birleştirilmesi sırasında aynı niteliğe sahip fakat farklı isimlerle temsil edilen özellikler olabilmektedir. Birbiriyle yüksek derecede korelasyonu olan iki niteliğin aynı anda kullanılması gereksiz veri oluşturmaktadır. Farklı kaynaklardan gelen verilerin birleştirilmesi, tutarsızlıkları ve gereksiz verileri önlemeye, veri madenciliği hız ve kalitesini iyileştirmeye katkı sağlamaktadır.

#### 3.2.3. Veri dönüşümü (Data transformation)

Veri setlerinde işlenecek değişkenlerin değer aralıkları farklı olabilmektedir. Değişkenlerin, ortalama ve varyansları farklı olduğu durumlarda büyük ortalama veya varyansa sahip değişkenlerin sonuç üzerindeki etkisi daha fazla olmakta ve diğer özelliklerin etkisi önemli ölçüde azalmaktadır. Yapay zekâ uygulamalarında hangi değişkenin etkisinin ne olacağı modelin öğrenme algoritmasıyla ortaya çıktığı için başlangıç koşullarında değişkenlerin etkilerinin benzer olmasını sağlamak gerekmektedir. Bu durum özellikle nümerik veya istatistiksel yöntemlerle korelasyonu, doğrudan tespit edilmemiş veri setlerinde çok daha önemli bir gereklilik haline gelmektedir. Farklı değer aralıklarına sahip değişkenlerin birlikte değerlendirilmesi için normalizasyon, standardizasyon, ondalık ölçekleme gibi yöntemler uygulanabilir [34].

#### 3.3. Özellik Çıkarma (Feature Extraction)

Veri madenciliği, makine öğrenimi, örüntü tanıma ve görüntü işleme alanlarında kullanılan özellik

çıkarma, ham verilerden türetilmiş yeni değerler oluşturulması işlemidir. Ham verilerden türetilen özellik tek başına ham verileri temsil edebiliyorsa, ham veriler yerine türetilen özellik kullanılarak boyut indirilmesi, değilse veri zenginleştirme işlemi gerçekleştirilmiş olur [35].

### 3.4. Veri Görselleştirme (Data Visualization)

Görselleştirme, sayısal veya karmaşık bilgilerin görsel olarak temsil edilmesini ve anlaşılabilirliğini arttıran bir yöntemdir. Veri görselleştirme ise veriyi veya süreci düzenleme, yapılandırma, değerlendirme ve iletişim kurma amacıyla hedeflenen kitleye şekiller, animasyonlar, grafikler vb. görsel materyaller kullanarak anlatma biçimidir [36]. Ayrıca birden fazla verinin birlikte değerlendirilmesine olanak sağlayarak korelasyon gibi ilişkilerin görsel olarak sunulmasını kolaylaştırmaktadır.

## 4. UYGULAMA (APPLICATION)

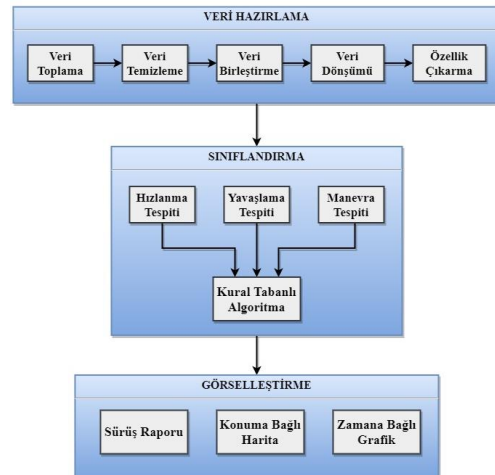
Web tabanlı sürücü davranışı tanımlama sistemi, sürüş olaylarını NHTSA kurallarına göre sınıflandıran, sunduğu görsellerle sürüş olaylarının kolay analiz edilebilir olmasını sağlayan bir ara yüz uygulamasıdır. Uygulama, farklı yazılım dilleri ve kütüphaneler bir arada kullanılarak web tabanlı olarak geliştirilmiştir. Tablo 2’ de kullanılan yazılım dilleri, kütüphaneler ve tercih edilen versiyonları verilmektedir. Uygulama geliştirmede kullanılan teknolojiler ve kütüphaneler açık kaynak kodlu ve ücretsizdir.

Çalışmada CSS ve Bootstrap web sayfası tasarımı düzenlemek amacıyla kullanılmıştır. JS, web ön yüzünde bulunan işlevlerin (buton, animasyon, efekt vb.) web tarayıcılarında çalıştırılmasını sağlar. Chart jquery, leaflet, paparse JS kütüphaneleridir. Chart JS, sürüş verilerinin grafikler üzerinde görselleştirilmesi için kullanılmıştır. Web sayfasında yer alan buton olayları ve görsel efektlerin (animasyon, açılır pencere, kayan görsel) oluşturulması ve dinamik olarak kullanılması için jquery JS kütüphanesi kullanılmıştır. Konum değişkenlerinin haritada gösterilmesi için leaflet kütüphanesi kullanılmıştır. PapaParse, bilgisayar dosya sisteminde .csv formatındaki dosyaları web sayfalarında okumak ve ayrıştırmak için kullanılmıştır. PostgreSQL yazılımı veri tabanı sisteminde veri kayıt, düzenleme ve sorgulama işlemleri için kullanılmıştır. Sunucu taraflı çalışan PHP yazılım diliyle, veri tabanı bağlantısı ve çalıştırılan veri tabanı sorgusu sonuçlarının web sayfasında gösterilmesi sağlanmıştır.

Uygulama 4 kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda veriler ön işleme adımlarından geçer ve özellik çıkarımı yapılır. İkinci kısımda GPS koordinatlarına göre aracın izlediği rota görselleştirilerek hız ve konum bilgisine göre gerçek sürüş simülasyonu gerçekleştirilmektedir. Uygulamanın üçüncü kısmında sürüş esnasında gerçekleşen olaylara ait veriler ve çıkarılan özellikler ile harita görseli oluşturulmaktadır. Uygulamanın son kısmında ise veri ön işleme ve görselleştirme süreçlerinden geçirilmiş sürüş verileri için NHTSA tarafından belirlenmiş kriterlere göre sürüşe puan verilerek sınıflandırma yapılmaktadır. Uygulamanın genel yapısı Şekil 2’ de verilmiştir.

Tablo 2. Uygulamada kullanılan yazılımlar, kütüphaneler ve versiyonları (Software, libraries and versions used in the application)

Yazılım ve Kütüphaneler	Versiyonlar
Android	10.0.0 (Q)
Bootstrap	3.3.7
Cascading Style Sheets (CSS)	3.0.0
Chart	2.8.0
HyperText Markup Language (HTML)	5.2.0
Hypertext Preprocessor (PHP)	7.2.0
Javascript (JS)	ECMA Script 2020
Jquery	3.3.1
Leaflet	1.7.1
PapaParse	5.0.0
PostgreSQL	12.6.0



Şekil 2. Uygulama sistem tasarımı (Application system design)

HDD veri setinden hız, GPS, IMU verileri alınmış ve hız, hızlanma, yavaşlama, enlem, boylam, aracın boyolsal, yanal, dikey (roll, pitch, yaw)

eksenlerindeki hareket değişkenleri seçilmiştir. Çalışmada kullanılan diğer veri setinin oluşturulması için Android işletim sisteminde çalışan mobil bir uygulama geliştirilmiştir. Şekil 3' te veri kaydı için geliştirilen mobil uygulamanın ekran görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 3. Mobil uygulama ekran görüntüleri a) Veri kayıt başlatma ekranı b) Veri tabanı kayıtlarını listeleme ve harici hafızaya kaydetme ekranı (Mobil application screenshots a) Data recording start screen b) List database records and save to external storage screen)

Araçta sabit konumda duran Android işletim sistemine sahip akıllı telefonda bulunan GPS, 3 eksenli ivmeölçer ve 3 eksenli jiroskop sensörleriyle, enlem, boylam, hız, açılma hız ve zaman verileri 1 Hz. frekans aralıklarıyla veri tabanına kaydedilmiştir. Gün içerisinde farklı zaman dilimlerinde gerçekleştirilen her sürüş olayı tarih ve saat verisi sayesinde birbirinden ayrılarak veri tabanında saklanmıştır.

Veri setindeki GPS sensöründen elde edilen enlem ve boylam verilerinden, openstreetmap tarafından sağlanan leaflet JS kütüphanesi kullanılarak rakım bilgisi elde edilmiş bu sayede yol koşulları daha çok detay içerecek şekilde zenginleştirilmiştir. Bu zenginleştirme işlemi hem HDD hem de kendi oluşturduğumuz veri seti için gerçekleştirilmiştir.

Telefon hafızasında tablolar halinde bulunan veri tabanı kayıtları .csv formatına dönüştürülmüştür. Daha sonra PapaParse JS kütüphanesi kullanılarak bu dosyaların web uygulamasına yüklenmesi sağlanmıştır. Zaman değeri ve sürücü bilgilerine göre, gün içerisinde farklı zaman dilimlerinde toplanan ayrı veriler jquery JS kütüphanesi kullanılarak sıralı

verilere dönüştürülmüş ve günlük sürüşler birleştirilmiştir. Birleştirilen sürüş kayıtları veri temizleme ve veri dönüşümü adımları için hazır hale getirilmiştir.

Sürüş sırasında tekrar eden gürültülü veriler ayrıca gelen çağrı vb. nedenlerle kayıt işleminin durması sonucu oluşan hatalı veriler tespit edilmiştir. Tekrar eden veriler veri setinden çıkartılmış, hatalı veriler ise uygun değerlerle (SeksanDart – 84) düzeltilmiştir. Bu sayede ham veriden güvenilir ve doğru sonuç almayı zorlaştırıcı veriler temizlenmiştir.

Değer aralıkları önemli ölçüde farklı olan hız, ivme, jiroskop, eğim, mesafe ve yalpalanma oranı varyans değerlerinin fazla uzak olması nedeniyle ortalama, varyans, standart sapma ve standardizasyon dönüşümleri için Eş. (1), Eş. (2), Eş. (3) ve Eş. (4) kullanılmıştır.

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$X_{var} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n} \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (3)$$

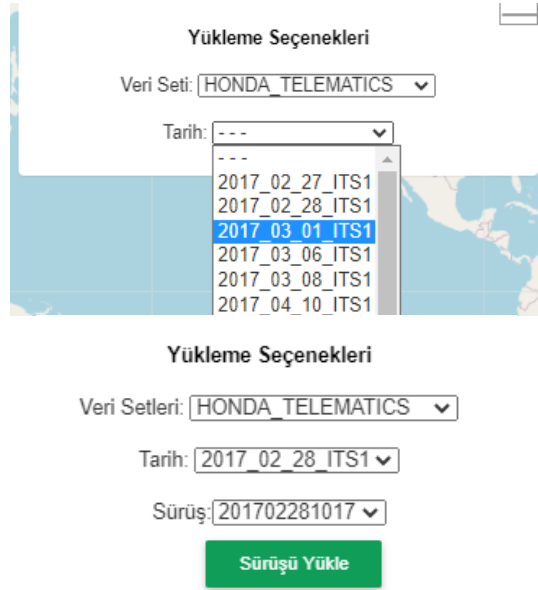
$$X_{std} = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (4)$$

Eşitliklerde,  $x$ ; örnek,  $n$ ; örnek sayısı,  $\mu$ ; ortalama,  $X_{var}$ ; varyans,  $\sigma$ ; standart sapma,  $X_{std}$ ; standardize edilmiş örneği temsil etmektedir.

Veri setinde bulunan enlem, boylam değişkenlerinden mesafe, rakım ve eğim özelliği, hız değişkenlerinden hızlanma ve yavaşlama özellikleri, ivmeölçer ve jiroskop değişkenlerinden yalpalanma (yaw, pitch, roll) özelliği çıkarılmıştır. Özellik çıkarımı sayesinde veri seti zenginleştirilerek harita ve grafik görsellerinde açıklanabilirlik haritası olarak sunulan sürüşe ait bilgiler görselleştirilmiş, aynı zamanda NHTSA yönergelerinde belirtilen hızlanma, yavaşlama ve dönme olaylarının tespiti için gerekli girdiler elde edilmiştir.

Şekil 4' te verilen ekran görüntüsünde, yükleme seçenekleri bölümünden seçilen sürüş bilgileriyle PostgreSQL veri tabanı sorgusu yapılarak seçilen tarihe ait sürüş verileri çağırılmaktadır. Sorgu sonucu ulaşılan enlem-boylam-rakım ve zaman bilgileri leaflet kütüphanesi kullanılarak harita üzerinde görselleştirilmiştir. Aynı zamanda hız, hızlanma, yavaşlama, mesafe, ivme, jiroskop (3 eksenli), enlem, boylam, rakım, eğim ve sürücü puanı değerleriyle

Chart JS kütüphanesi kullanılarak grafikler oluşturulmuştur.

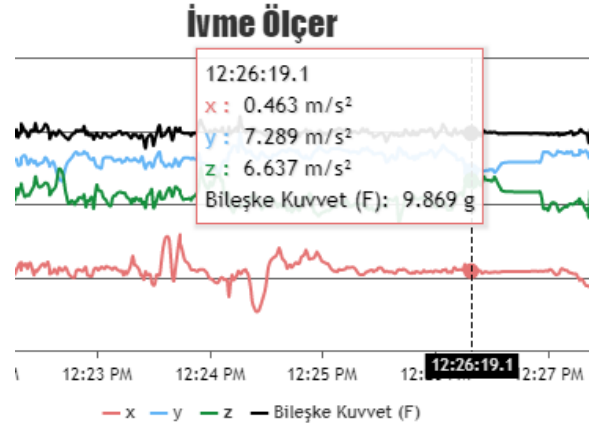


Şekil 4. Sürücülerin sürüş bilgilerinin çağrılması  
(Retrieval drivers' driving informations)

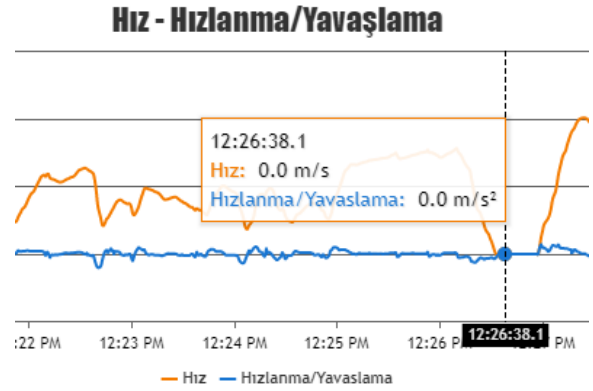
## 5. DENEYSSEL SONUÇLAR (Experimental Results)

İvmenin, X (yanal) eksenindeki değişimi, aracın şerit değiştirmesini ve manevra yapmasını temsil etmektedir. Y (boylamsal) eksenindeki ivme değişiminden hızlanma ve yavaşlama olayları tespit edilmektedir. Z (dikey) eksenindeki ivme değişimi, yokuş (rakım) inişi veya çıkışında gerçekleşen hıza bağlı yer değişimini temsil etmektedir. Tüm bu sürüş verileri uygulama içerisinde grafikler yardımıyla görselleştirilmektedir. Uygulamada, araca ait ivme (X, Y, Z eksen) değerleri Şekil 5' te verilmiştir. Birim zamandaki hız ve bu bilgiden türetilen hızlanma ve yavaşlama değerleri Şekil 6' da verilmiştir.

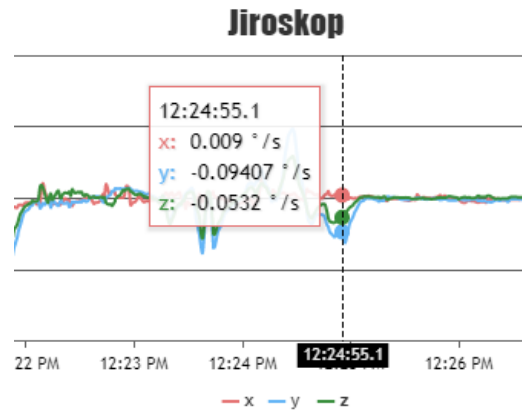
3 eksenli (X- Y- Z) jiroskop sensörüyle toplanan veriler Şekil 7' de gösterilmiştir. Jiroskop verileri, aracın yalpalanma (sert kalkış-duruş) ve sarsılma (sağa-sola dönüş, tümsekten veya çukurdan geçiş) hareketlerini tespit etmek için kullanılmıştır. Boylamsal (X) eksen değerleriyle ani şerit değiştirme ya da tümsek ve çukur geçişlerinde sarsılma olayları, yatay eksen (Y) değerleriyle ani hızlanma-yavaşlama olayları, dikey eksen (Z) değerleriyle ani manevra (dönüş) olayları tespit edilmektedir.



Şekil 5. Aracın ivme (X- Y- Z eksen) grafiği  
(Acceleration (X-Y-Z axis) graph of the vehicle)

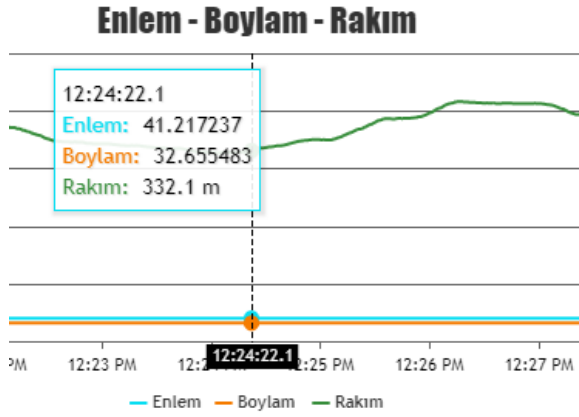


Şekil 6. Aracın hız, hızlanma ve yavaşlama grafiği  
(Speed, acceleration and deceleration graph of the vehicle)



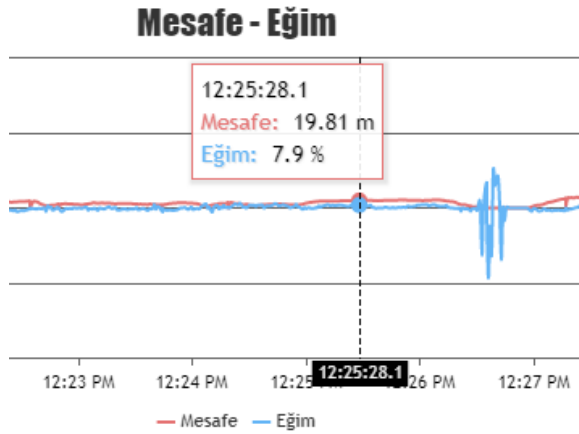
Şekil 7. Jiroskop verileri (X- Y- Z eksen) grafiği  
(Gyroscope data (X-Y-Z axis) graph)

Aracın konum (enlem, boylam, rakım) değerleri Şekil 8' de verilmiştir. Görselleştirmede kullanılan enlem ve boylam değerleriyle şerit değiştirme, dönme, yön bilgileri tespit edilmektedir. Rakım değeriyle tümsek ya da çukur geçişleri ve yokuş inişi ya da çıkış hareketleri tespit edilmektedir.



Şekil 8. Aracın konum (enlem, boylam, rakım) grafiği (Location (latitude, longitude, altitude) graph of the vehicle)

Mesafe ve eğim değerleri Şekil 9’ da verilmiştir. Eğim değerleri, hızlanma, yavaşlama değerleriyle birlikte ele alındığında; rampa yollarda sürücünün iniş veya çıkış sırasındaki davranışının değerlendirilebilmesi için zenginleştirilmiş ek bilgiler sağlamaktadır. Mesafe değerleri kullanılarak sürüşün gerçekleştiği toplam yol uzunluğu ve birim zamandaki mesafe bilgisi elde edilmektedir.

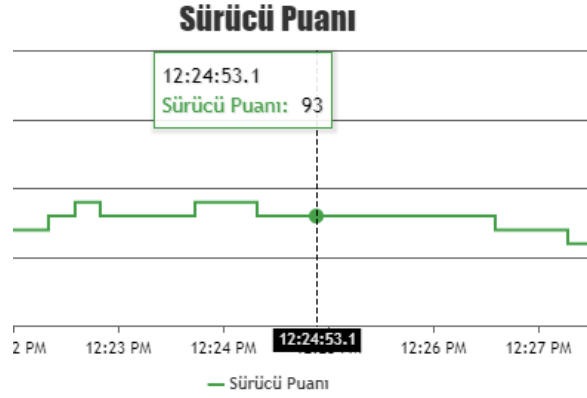


Şekil 9. Aracın aldığı mesafe ve yolun eğim grafiği (Cover a distance by the vehicle and slope graph of the road)

Şekil 10’ da sürücülerin zamana bağlı kümülatif sürüş puanları gösterilmiştir. Verilen kümülatif sürüş puanları aracın ne kadar çevreci kullanıldığını göstermektedir.

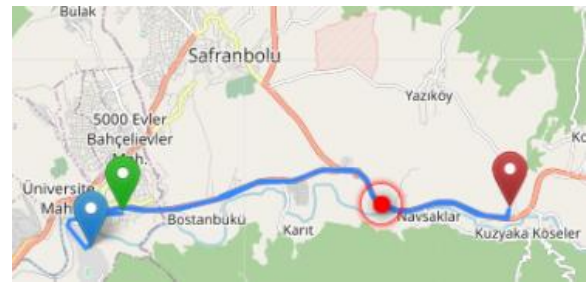
Şekil 11’ de sürüşün gerçekleştiği zamana bağlı rota, başlangıç ve bitiş konumları harita üzerinde işaretlenerek görselleştirilmiştir. Harita üzerinde yer alan araç konumu işaretçisine tıklandığında anlık olarak sürüş zamanı, konumu ve hız bilgileri açılır pencerede gösterilmektedir. Zamana ve konuma bağlı hız bilgisi sayesinde sürücünün yol üzerinde hangi hızla aracı sürdüğü ve hangi konumda olduğu bilgisi

gösterilmektedir. Aynı zamanda harita üzerindeki başlangıç (mavi), duraklama (kırmızı) ve bitiş (yeşil) işaretçilerinin üzerine tıklandığında bu noktaların konum bilgileri bununla birlikte sürücünün nerede ne kadar süre duraklama gerçekleştirdiği ve duraklama zaman aralıkları verilmektedir.



Şekil 10. Sürücü puanları grafiği (Driver scores graph)

Şekil 11’ de sürüşün gerçekleştiği zamana bağlı rota, başlangıç ve bitiş konumları harita üzerinde işaretlenerek görselleştirilmiştir. Harita üzerinde yer alan araç konumu işaretçisine tıklandığında anlık olarak sürüş zamanı, konumu ve hız bilgileri açılır pencerede gösterilmektedir. Zamana ve konuma bağlı hız bilgisi sayesinde sürücünün yol üzerinde hangi hızla aracı sürdüğü ve hangi konumda olduğu bilgisi gösterilmektedir. Aynı zamanda harita üzerindeki başlangıç (mavi), duraklama (kırmızı) ve bitiş (yeşil) işaretçilerinin üzerine tıklandığında bu noktaların konum bilgileri bununla birlikte sürücünün nerede ne kadar süre duraklama gerçekleştirdiği ve duraklama zaman aralıkları verilmektedir.



Şekil 11. Harita işaretçileri ve açılır bilgi pencereleri (Map makers and pop-up information windows)

Tablo 3’te yer alan NHTSA yönergelerine göre, güvenli olmayan sürücülerin 2,7448 m/s<sup>2</sup>’den daha fazla hızlanma yaptıkları, 3,0398 m/s<sup>2</sup>’den daha az yavaşlama yaptıkları, 6,7056 m/s’den yüksek süratle dönüş yaptıkları ve bu olayları sıklıkla tekrar ettikleri istatistiksel yöntemlerle tespit edilmiştir [9].

Çalışmada, NHTSA yönergelerine uygun olarak belirlenen kurallara göre sürüşler sınıflandırılmıştır.

Tablo 3. NHTSA sürüş karakterizasyon kuralları (NHTSA driving characterization rules)

Sürüş Karakteri	Hızlanma	Yavaşlama	Dönüş
Sert	$x > 2,7448$ m/s <sup>2</sup>	$x > 3,0398$ m/s <sup>2</sup>	$x > 6,7056$ m/s <sup>2</sup>
Normal	$x = 2,7448$ m/s <sup>2</sup>	$x = 3,0398$ m/s <sup>2</sup>	$x = 6,7056$ m/s <sup>2</sup>
Sakin	$x < 2,7448$ m/s <sup>2</sup>	$x < 3,0398$ m/s <sup>2</sup>	$x < 6,7056$ m/s <sup>2</sup>

Uygulanan kural tabanlı yöntemle sürüşlerin zaman, hız, hızlanma, yavaşlama, eğim, rakım, mesafe, ivme (X, Y, Z) ve jiroskop (X, Y, Z) değişkenleri birlikte değerlendirilerek sürücülerin sürüş boyunca ortalama hız, en yüksek hız, sert hızlanma, sert yavaşlama, toplam sürüş süresi, toplam alınan yol istatistikleri elde edilmiştir. Şekil 12' de sürücülerin istatistiklere göre hesaplanan sürüş raporu uygulama ekranları gösterilmektedir Harita, grafik ve sürüş raporu sonuçları birlikte değerlendirilerek sürücü davranışları tanımlanması için açıklayıcı bilgiler sağlanmıştır.



Şekil 12. Sürücülerin sürüş raporu sonuçları (Drivers' driving report results)

## 6. SONUÇ ve TARTIŞMA (CONCLUSION and DISCUSSION)

Yapılan çalışmada gerçek trafik koşullarında GPS, IMU, CAN sensörleriyle kaydedilmiş verilerden oluşan kamuya açık veri seti ve mobil uygulama geliştirilerek oluşturulan veri seti ile NHTSA yönergelerine uygun olarak belirlenen kurallara göre sürücü davranışını temsil eden ortak özellikler (hızlanma-yavaşlama, sağa-sola dönüş, rampa iniş-çıkış, durma-duraklama) tespit edilmiştir. Aynı

zamanda mevcut verilerden yeni özellikler türetilerek sürücü davranışı sınıflandırılmıştır. Uygulama sayesinde sürücünün; Anlık hızı, Ortalama ve en yüksek hızı, Anlık hızlanma-yavaşlama, Sert hızlanma-yavaşlama sıklığı, Birim zamanda aldığı yol uzunluğu, Toplamda aldığı yol uzunluğu, Yolun anlık eğimi, Aracının yalpalanma-sarsılma şiddeti, Hareket başlangıç ve bitiş konumları, Duraklama konumu ve süresi, Ortalama sürücü puanı bilgileri elde edilmiştir. Geliştirilen web ara yüzünde, harita ve grafiklerle bu bilgiler görselleştirilmiştir.

Literatürde sürücülerin davranışlarının sınıflandırılması için zengin veri seti kullanmanın sınıflandırma başarısı açısından faydalı olacağı önerilmiştir [15]–[17]. Özellik çıkarımı adımı veri setindeki değişkenlerle türettiğimiz yeni bilgiler sayesinde sürücü davranışını tespit edecek ek bilgiler çıkarılmıştır. Hız değerleriyle hızlanma ve yavaşlama bilgileri, jiroskop ve ivme ölçer değerleriyle yalpalanma-sarsılma bilgileri elde edilmiştir. Literatürden farklı olarak enlem ve boylam değişkenleriyle duraklama, anlık mesafe ve rakım bilgileri elde edilmiştir. Ayrıca rakım özelliği kullanılarak rakım ve yolun eğimi bilgileri elde edilmiş bu sayede tümsek, çukur ve rampa tespiti yapılmıştır. Bu bilgiler ışığında sürücü destek sistemlerinin geliştirilmesi, otonom sürüş kabiliyetlerinin artırılması, filo yönetimi, yol-araç-sürücü denetimi ve sürücü davranışlarının sınıflandırılması alanlarında gelecekte yapılacak çalışmalara katkıda bulunmaktadır. Aynı zamanda istatistiksel bilgilerin ve görsel ara yüzün birlikte kullanımı, karayolu taşımacılığında verimliliğin artırılması, rota optimizasyonun sağlanması, sürücülerin geliştirilmesi gibi çeşitli iyileştirmelere olanak sağlar.

Çalışma, binek otomobiller dikkate alınarak geliştirilmiştir. Motosiklet, kamyon, kamyonet, minibüs, otobüs gibi diğer araçlar için kurallar değişiklik gösterecektir. Değişikliklerin tespiti için veri toplanması ve kuralların oluşturulması gerekmektedir. Ayrıca sürüşün analizi için farklı senaryolara göre farklı araçlarla veri seti oluşturulması, bu alanda yapılacak çalışmalara ışık tutacaktır. Literatürdeki verilerde sürücü-araç etkileşimi çok sınırlı olarak bulunmaktadır. Çalışmada tarafımızdan oluşturulan veri seti de cep telefonu sensörleri ve kullanıcı etkileşimi ile toplanmıştır. Bunun sebebi farklı marka ve model araçlardaki puanlamanın NHTSA yönergelerine göre oluşturulan puanlama ile korelasyonunun yüksek olduğunu göstermektedir.



Gelecek çalışmalarda sürücü davranışını temsil eden bilgilerin farklı coğrafi koşulları [37] dikkate alarak daha fazla zenginleştirilmesi, sürücü davranışlarının yapay zeka ve farklı veri madenciliği algoritmaları analizi [38] ile web uygulamasının daha fazla geliştirilmesi hedeflenmektedir.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Bu çalışmanın yazarları arasında herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] World Health Organization, “Health topics/Road traffic injuries”, *who.int*, 2021. [Online]. Available: <https://www.who.int/health-topics/road-safety>. [Accessed: Jan. 01, 2021].
- [2] Türkiye Emniyet Genel Müdürlüğü, “Trafik İstatistik Bülteni”, *trafik.gov.tr*, 2020. [Online]. Available: <http://trafik.gov.tr/kurumlar/trafik.gov.tr/04-Istatistik/Aylik/aralik20.pdf>. [Accessed: Jan. 01, 2021].
- [3] U.S. Department Of Transportation Federal Highway Administration, “State Motor Vehicle Registrations”, *fhwa.dot.gov*, 2019. [Online]. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/statistics/2019/pdf/mv1.pdf>. [Accessed: Jan. 3, 2021].
- [4] European Automobile Manufacturers’ Association “ACEA Report Vehicles in use Europe 2019”, *acea.auto*, 2019. [Online]. Available: [https://www.acea.auto/files/ACEA\\_Report\\_Vehicles\\_in\\_use-Europe\\_2019.pdf](https://www.acea.auto/files/ACEA_Report_Vehicles_in_use-Europe_2019.pdf). [Accessed: Jan. 3, 2021].
- [5] Türkiye İstatistik Kurumu, “Karayolu Trafik Kazası İstatistikleri”, *data.tuik.gov.tr*, January 26, 2021. [Online]. Available: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Aralik-2020-37410>. [Accessed: Feb. 12, 2021].
- [6] Türkiye Emniyet Genel Müdürlüğü, “Trafik İstatistik Bülteni”, *trafik.gov.tr*, 2021. [Online]. Available: <http://trafik.gov.tr/kurumlar/trafik.gov.tr/04-Istatistik/Aylik/ocak21.pdf>. [Accessed: Feb. 10, 2021].
- [7] R. Vivoli, M. Bergomi, S. Rovesti, P. Bussetti, and G. M. Guaitoli, “Biological and behavioral factors affecting driving safety”, *Journal of Preventive Medicine and Hygiene*, vol. 47, no. 2, pp. 69–73, June 2006, doi: 10.15167/2421-4248/jpmh2006.47.2.47.
- [8] C. D’Agostino, A. Saidi, G. Scouarnec, and L. Chen, “Learning-based driving events classification”, in *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2013, 6-9 October 2013, The Hague, Netherlands*, pp. 1778-1783, doi: 10.1109/ITSC.2013.6728486.
- [9] S. G. Klauer, T. A. Dingus, V. L. Neale, J. D. Sudweeks, and D. J. Ramsey, “Comparing Real-World Behaviors of Drivers with High Versus Low Rates of Crashes and Near Crashes”, *nhtsa.gov*, 2009. [Online]. Available: <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/811091.pdf>. [Accessed: February 10, 2021].
- [10] J. Reason, A. Manstead, S. Stephen, J. Baxter, and K. Campbell, “Errors and violations on the roads: A real distinction?”, *Ergonomics*, vol. 33, no. 10-11, pp. 1315–1332, Oct-Nov 1990, doi: 10.1080/00140139008925335.
- [11] R. Lawton, D. Parker, A. S. R. Manstead, and S. G. Stradling, “The role of affect in predicting social behaviors: The case of road traffic violations”, *Journal of Applied Social Psychology*, vol. 27, no. 14, pp. 1258–1276, July 1997, doi: 10.1111/j.1559-1816.1997.tb01805.x.
- [12] O. Taubman-Ben-Ari, M. Mikulincer, and O. Gillath, “The multidimensional driving style inventory - Scale construct and validation”, *Accident Analysis and Prevention*, vol. 36, no. 3, pp. 323–332, May 2004, doi: 10.1016/S0001-4575(03)00010-1.
- [13] S. Newnam, J. Greenslade, C. Newton, and B. Watson, “Safety in Occupational Driving: Development of a Driver Behavior Scale for the Workplace Context”, *Applied Psychology*, vol. 60, no. 4, pp. 576–599, October 2011, doi: 10.1111/j.1464-0597.2011.00448.x.
- [14] Paul B. Harris, John M. Houston, Jose A. Vazquez, Janan A. Smither, Amanda Harms, Jeffrey A. Dahlke, and Daniel A. Sachau, “The Prosocial and Aggressive Driving Inventory (PADI): A self-report measure of safe and unsafe driving behaviors”, *Accident Analysis and Prevention*, vol. 72, pp. 1–8, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.aap.2014.05.023.
- [15] Q. Xue, K. Wang, J. J. Lu and, Y. Liu, “Rapid Driving Style Recognition in Car-Following Using Machine Learning and Vehicle Trajectory Data”, *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2019, pp. 1–11, January 2019, doi: 10.1155/2019/9085238.

- [16] F. Umberto, M. Emanuele, S. Paolo, M. Sebastiano, A. Kacem, S. Rainer, N. Florian, and R. Carlo, "Driving Behavior Analysis through CAN Bus Data in an Uncontrolled Environment", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 737–748, October 2017, doi: 10.1109/TITS.2018.2836308.
- [17] T. Toledo, O. Musicant, and T. Lotan, "In-vehicle data recorders for monitoring and feedback on drivers' behavior", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 16, no. 3, pp. 320–331, June 2008, doi: 10.1016/j.trc.2008.01.001.
- [18] M. Siami, M. Naderpour, and J. Lu, "A Mobile Telematics Pattern Recognition Framework for Driving Behavior Extraction", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 1459–1472, March 2021. doi: 10.1109/TITS.2020.2971214.
- [19] C. Barreto, J. Xavier-Júnior, A. Canuto, and I. da Silva, "A Machine Learning Approach Based on Automotive Engine Data Clustering for Driver Usage Profiling Classification", in *Proceedings of the XV National Meeting of Artificial and Computational Intelligence, October 2018, São Paulo, Brazil*, 2018, pp. 174–185. doi: <https://doi.org/10.5753/eniac.2018.4414>.
- [20] E. Romera, L. M. Bergasa, and R. Arroyo, "Need data for driver behaviour analysis? Presenting the public UAH-DriveSet", in *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2016, December 2016, Rio de Janeiro, Brazil*, 2016, pp. 387–392, doi: 10.1109/ITSC.2016.7795584.
- [21] V. Ramanishka, Y. T. Chen, T. Misu, and K. Saenko, "Toward Driving Scene Understanding: A Dataset for Learning Driver Behavior and Causal Reasoning", in *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2018, June 2018, Salt Lake City, UT, USA*, 2018, pp. 7699–7707, doi: 10.1109/CVPR.2018.00803.
- [22] Y. Chen, J. Wang, J. Li, C. Lu, Z. Luo, H. Xue, and C. Wang, "LiDAR-Video Driving Dataset: Learning Driving Policies Effectively", in *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2018, June 2018, Salt Lake City, UT, USA*, 2018, pp. 5870–5878, doi: 10.1109/CVPR.2018.00615.
- [23] P. HL Rettore, A. Campolina, A. Guilherme Maia, L. A. Villas, and A. AF Loureiro, "Driver Authentication in VANETs based on Intra-Vehicular Sensor Data", in *IEEE Symposium on Computers and Communications, ISCC 2018, June 2018, Natal, Brazil*, 2018, pp. 78–83. doi: 10.1109/ISCC.2018.8538506.
- [24] J. Bärgrman et al., "The UDRIVE dataset and key analysis results", *erticonetwork.com*, 2017. [Online]. Available: <https://erticonetwork.com/wp-content/uploads/2017/12/UDRIVE-D41.1-UDrive-dataset-and-key-analysis-results-with-annotation-codebook.pdf>. [Accessed: March 12, 2021].
- [25] C. Kaiser, A. Festl, G. Pucher, M. Fellmann, and A. Stocker, "The vehicle data value chain as a lightweight model to describe digital vehicle services", in *15th International Conference on Web Information Systems and Technologies, January 2019, Vienna, Austria*, pp. 68–79, doi: 10.5220/0008113200680079.
- [26] A. Jain, H. S. Koppula, S. Soh, B. Raghavan, A. Singh, and A. Saxena, "Brain4Cars: Car That Knows Before You Do via Sensory-Fusion Deep Learning Architecture", *brain4cars.com*, 2016. [Online]. Available: <http://brain4cars.com/>. [Accessed: Feb. 05, 2021].
- [27] B. II Kwak, J. Y. Woo, and H. K. Kim, "Know your master: Driver profiling-based anti-theft method", in *14th Annual Conference on Privacy, Security and Trust, PST 2016, April 2016, United States*, pp. 211–218, doi: 10.1109/PST.2016.7906929.
- [28] S. Schneegass, B. Pflöging, N. Broy, A. Schmidt, and F. Heinrich, "A data set of real world driving to assess driver workload", in *5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, AutomotiveUI 2013, October 28 – 30, 2013, Eindhoven, Netherlands*, pp. 150–157, doi: 10.1145/2516540.2516561.
- [29] P. Angkititrakul et al., "Getting Start with UTDrive: Driver-Behavior Modeling and Assessment of Distraction for In-Vehicle Speech Systems", in *8th Annual Conference of the International Speech Communication Association, Interspeech 2007, 27-31 August, 2007, Antwerp, Belgium*, pp. 1334–1337, doi: 10.1.1.100.1333.
- [30] S. Mittal, M. Shuja, and M. Zaman, "A Review of Data Mining Literature", *International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS)*, vol. 14, no. 11, pp. 437–442, November 2016.
- [31] S. Ramírez-Gallego, B. Krawczyk, S. García, M. Woźniak, and F. Herrera, "A survey on data preprocessing for data stream mining: Current status and future directions", *Neurocomputing*, vol. 239, pp. 39–57, May 2017. doi: 10.1016/j.neucom.2017.01.078.

[32] S. Alasadi, “Review of Data Preprocessing Techniques in Data Mining”, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 12, no. 16, pp. 4102–4107, September 2017.  
doi: 10.3923/jeasci.2017.4102.4107.

[33] T. Dasu ve T. Johnson, *Exploratory Data Mining and Data Cleaning*, John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. 1–16.

[34] A. Oğuzlar, “Veri Ön İşleme”, *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, cilt 0, sayı 21, ss. 67–76, Ekim 2003.

[35] M. Pechenizkiy, S. Puuronen, and A. Tsymbal, “Feature Extraction For Classification In The Data Mining Process”, *International Journal on Information Theories & Applications*, vol. 10, no.1, pp. 271–278, 2003.

[36] A. Gürler, A. S. Yılmaz, ve M. Tekerek, “Veri Görselleştirme ve İnfografikler”, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 21, sayı 2, ss. 131–148, Haz. 2018.  
doi: 10.17780/ksujes.391274.

[37] Ö. Uyurca ve İ. Atılğan , “Trafik Denetiminde Coğrafi ve İklimsel Koşulların Etkilerinin İncelenmesi”, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 2, sayı. 2, ss. 107-127, Haz. 2016.

[38] G. Doğrul, D. Akay ve M. Kurt , “Trafik Kazalarının Birliktelik Kuralları İle Analizi”, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 1, sayı. 2, ss. 265-283, Haz. 2015.

This is an open access article under the CC-BY license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



# Nokta Direnç Kaynağı ile Birleştirilen Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çeliğin Mekanik Özellikleri Üzerinde Elektrod Uç Tipinin Etkisinin İncelenmesi

Bilge DEMİR<sup>a</sup>, Muhammed ELİTAŞ<sup>b,\*</sup>, Hüseyin KARAKUŞ<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük, Türkiye

<sup>b,\*</sup> Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, 11230, Bilecik, Türkiye

## MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 09.08.2021  
Kabul: 22.10.2021

### Anahtar Kelimeler:

Nokta direnç kaynağı, elektrod uç tipi, kaynak çekirdek çapı, çekme makaslama dayanımı, mikrosertlik.

## ÖZ

Bu çalışmada, nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliğin kaynak çekirdek çapı, çekme makaslama dayanımı ve mikrosertlik özellikleri üzerinde farklı elektrod uç tiplerinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, özellikle otomotiv sektöründe tercih edilen konik yuvarlak, düz R3, düz R6 ve düz konik elektrod uçlar kullanılarak nokta direnç kaynaklı birleşimler gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri, kaynak çekirdeği geometrisi makro-mikro incelemesi, mekanik ve metalürjik incelemelere tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçlar kaynak çekirdek çap değeri, mikro sertlik sonuçları ve çekme makaslama dayanım değerleri arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermiştir. Düz 3 mm yarıçap uçlu elektrotlar ile en yüksek, düz konik uçlu elektrotlar ile en düşük çekme makaslama dayanım değerleri elde edilmiştir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.10>

# Investigation of the Effect of the Electrode Tip Type on the Mechanical Properties of Advanced High Strength Steel Combined with Resistance Spot Welding

## ARTICLE INFO

Received: 09.08.2021  
Accepted: 22.10.2021

### Keywords:

Resistance spot welding, electrode tip type, weld nugget diameter, tensile shear strength, microhardness.

## ABSTRACT

In this study, the effect of different electrode tip types on weld nugget diameter, tensile shear strength and microhardness properties of advanced high strength steel combined with resistance spot welding method was investigated. For this purpose, resistance spot welded joints were performed using conical round, flat R3, flat R6 and flat conical electrode tips, which are preferred especially in the automotive industry. Test samples were subjected to weld nugget geometry macro-micro examination, mechanical and metallurgical investigations. Experimental results showed that there is a linear relationship between weld nugget diameter value, microhardness results and tensile shear strength values. The highest tensile shear strength values were obtained with flat 3 mm radius tip electrodes, and the lowest tensile shear strength values with flat conical tip electrodes.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.10>

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv imalat endüstrisinde, nokta direnç kaynak (NDK) işlemi birincil birleştirme

teknolojisidir [1-3]. Bir araç gövdesi tipik olarak binlerce NDK içerir. Nokta kaynağı (NDK olarak da bilinir) bir direnç kaynağı işlemidir. Bu kaynak işlemi, esas olarak, bir elektrik akımından kaynak alanına

\*Sorumlu yazar: muhammed.elitas@bilecik.edu.tr

To cite this article: B. Demir, M. Elitas, and H. Karakus, "Investigation of the Effect of the Electrode Tip Type on the Mechanical Properties of Advanced High Strength Steel Combined with Resistance Spot Welding", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 277-285, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.03.10

basınç ve ısı uygulayarak iki veya daha fazla metal levhayı birbirine kaynaklamak için kullanılır. Bakır alaşımlı elektrotları sac yüzeylere temas ettirerek çalışır, bu sayede basınç ve elektrik akımı uygulanır ve metal sac (Çelik, Al, Mg) dirençli malzemelerden geçmesiyle üretilen ısı ile metal parçaların bu bölgede sınırlı erime ve katılaşması ile elde edilen kaynaklı birleştirmedir [4,5]. Otomobil endüstrisinin hızlı gelişimi ile otomobilin hafifliği kaçınılmaz bir trend haline geldiğinden, çift fazlı (DP) çelik gibi geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler (AHSS), otomobilin toplam ağırlığını azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır [6–8]. Kaza durumunda yaralanmalara karşı gereken korumayı sağlamakta araç yapısının kabiliyeti olarak belirtilen araç çarpışma dayanımı, NDK bağlantılarının büyük ölçüde bütünlük ve mekanik performansına bağlıdır [9,10]. NDK'nın mekanik davranışlarını değerlendirmek için en sık kullanılan testlerden birisi de çekme makaslama testidir [11]. NDK birleşiminin dayanımı sıklıkla birleşimin kaynak özellikleri ile ilişkilidir. Sac/sac arayüzeyinde uzunlamasına yönde kaynak çekirdeğinin genişliği olarak tanımlanan kaynak çekirdeği boyutu, NDK kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden biridir [12–24]. Kaynak çekirdek boyutu, NDK mekanik özelliklerini belirleyen en önemli parametredir. Kaynak çekirdek boyutu ile çekme makaslama dayanımı arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır [25]. NDK işlemi uygulanan malzemelerin, mekanik özelliklerini değerlendirmede dikkate alınması gereken önemli faktörlerden birisi de sertliktir. Sertlik, malzemelerin uygulanan kuvvetlere karşı dayanım ölçüsüdür. Plastiklik, akma dayanımı, süneklik ve tokluk gibi malzeme özellikleri sertlikle ilişkilidir. Bu yüzden imalat prosesinden sonra sertlik araştırmaları, malzemenin son özellikleri hakkında ipuçları verebilmektedir [26–28].

AHSS çeliklerinin NDK işleminde kaynak parametrelerinin etkisi, proses optimizasyonu, mekanik performansı ve sertlik özellikleri üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Yang vd. [29] dinamik direnç analizi yoluyla DP600 sacının silindirik tüp tek taraflı NDK kaynaklanabilirliğini incelemiştir. Eshraghi vd. [30] gerçekçi bir değer aralığında akım yoğunluğu, kaynak süresi, sac kalınlığı, elektrot yüz yarıçapı ve sıkıştırma kuvvetinin ana etkilerini ve etkileşimlerini analiz etmiştir. Frydman vd. [31] Hardox çeliklerinin kaynaklı birleştirmelerinin yapı

ve sertliğinde meydana gelen değişimi araştırmıştır. Zieman vd. [32] kaynaklı birleştirmelerin çeliğin mikroyapı, sertlik ve çekme özelliklerine olan etkisini araştırmıştır.

Bu çalışmada özellikle otomotiv endüstrisinde AHSS çelikleri içerisinde en sık kullanıma sahip DP (dual-phase) çelikleri arasından DP600 çeliği incelenmiştir. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde DP600 çeliğinin mekanik özellikleri üzerinde kaynak akımı, kaynak süresi, elektrot kuvveti gibi NDK parametrelerinin etkisi ile ilgili çalışmalara rastlanmıştır. Fakat, farklı elektrot uç tiplerinin etkisi ile ilgili oldukça sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmada, kaynak geometrisine kaynak uç tipinin etkisi tespit edilerek endüstrideki üretime katkı sağlamak amaçlanmaktadır. Çalışmada kullanılan bakır NDK elektrod uçları, endüstride üretimde yaygın kullanılan uç tiplerinden seçilmiştir. Bu doğrultuda, çalışmada ulaşılan en iyi geometrinin uygulamada daha çok kullanılmasını sağlamak hedeflenmektedir. Bu çalışmada DP600 çeliğinin NDK işleminde ideal çekme makaslama dayanımı ve sertlik değerini elde etmek için elektrot uç tipi optimizasyonuna odaklanılmıştır.

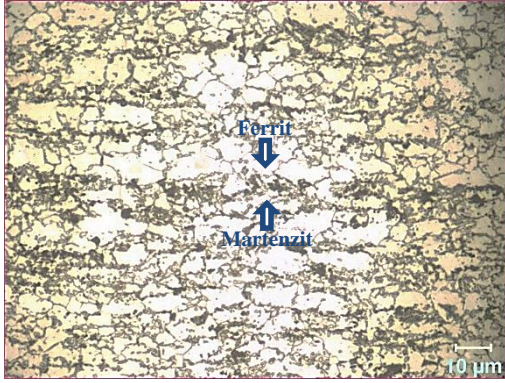
## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

### 2.1. Malzeme Mikroyapı ve Makroyapı (Material Microstructure and Macrostructure)

Bu çalışmada, 1.2 mm kalınlıkta ticari galvanizli DP600 çelik sac kullanılmıştır. Bu çelik sacın kimyasal bileşimi spektral analiz gerçekleştirilerek belirlenmiş ve Tablo 1'de gösterilmiş, mikroyapısı Şekil 1'de verilmiştir. DP600 çeliği, düşük miktarda martenzit (gri) ve ağırlıklı olarak ferrit (beyaz) fazlarından oluşmakta ve yaklaşık olarak 600 MPa çekme dayanımına sahiptir. NDK'lı ve kaynaklı numunelerin görünüm analizlerinde; mikroyapı incelemeleri için, ana malzeme ve NDK'lı numune kesit profili diskaton ile kesilmiş ve kaba zımparalamadan ince zımparaya giden ve parlatma ile bitirilen ve sonrasında %2 nital çözeltisi (%2 nitrik asit + %98 metanol) ile dağlama yapılan, standart metalografi prosedürü kullanılarak, görüntüsel olarak inceleme için hazırlanmıştır. Makroyapı çalışmaları stereo mikroskop ve mikroyapı çalışmaları Nikon Epiphot 200 optik mikroskobu ile yapılmıştır.

Tablo 1. DP600 çeliğinin kimyasal bileşimi (%ağırlık) (Chemical composition of DP600 steel (%weight))

Çelik	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Al	Ti	V	Sn	Fe
DP600	0,077	0,253	1,86	0,006	0,177	0,012	0,127	0,002	0,004	0,006	97,472



Şekil 1. DP600 çeliğinin mikroyapı görüntüsü  
(Microstructure image of DP600 steel)

## 2.2. Nokta Direnç Kaynak İşlemi

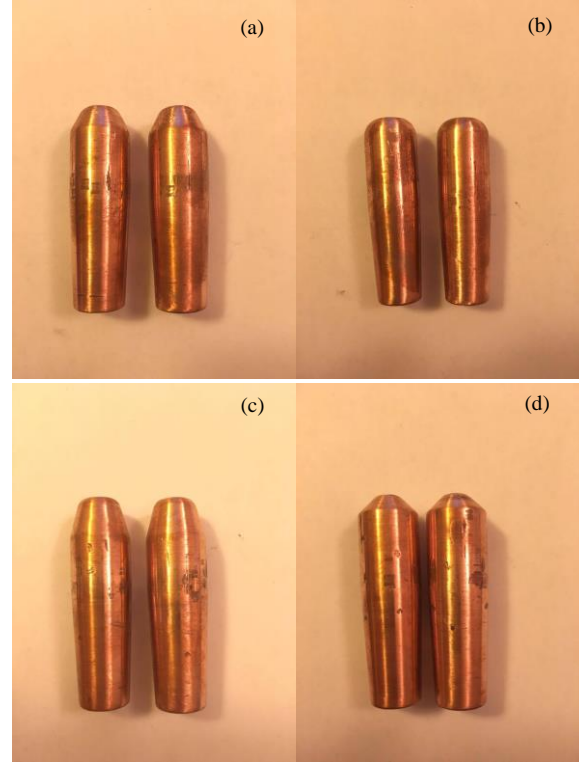
(Resistance Spot Welding Process)

NDK numuneleri, her elektrot uç tipi için 4'er çift-adet olmak üzere 100x30 mm ebatlarına giyotin makas ile kesildikten sonra üst üste bindirilip NDK işlemleri ile birleştirilmek suretiyle üretilmiştir. NDK elektrotları ticari bakır malzemeden tornalama-talaşlı imalat ile elde edilmiştir. Bu elektrotların kimyasal bileşimi Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. NDK elektrotlarının kimyasal bileşimi  
(%ağırlık) (Chemical composition of RSW electrodes (weight %))

Cu	Zn	P	Fe	S	Mn	Al	Ni
99,4	0,01	0,01	0,02	0,15	0,01	0,01	0,01

NDK işlemi için dört farklı uç tipine sahip elektrot kullanılmıştır. Elektrot uç tipleri Şekil 2'de gösterilmiştir. NDK işlemleri, yarı otomatik, elektronik akım ve zaman kontrollü pnömomatik basma donanımlı AC nokta direnç makinesinde su soğutmalı elektrotlarla gerçekleştirilmiştir. Kaynak işleminden önce numune yüzeyleri yağ, kirlilik gibi oluşabilecek herhangi bir temizlik problemine karşı kimyasal maddeler ile temizlenmiştir. NDK işlemi 9 kA kaynak akımı, 20 çevrim kaynak süresi ve 6 bar elektrot basıncında dört farklı elektrot uç tipinde gerçekleştirilmiştir (Tablo 3). NDK işlemi yapılırken numunelerin eksenlerinde sapma olmaması ve kıvrımların sıçramaması için ahşap kalıplar kullanılmış ve basma kuvvetinin sabitliği makinenin manometresinden kontrol edilmiştir. Isı girdisinin fazlalığından dolayı uçların su soğutma sistemi sürekli kontrol altında tutulmuştur.



Şekil 2. Elektrot uç tipleri a) Konik yuvarlak b) Düz R6 c) Düz R3 d) Düz konik (Electrode tip types a) Conical round b) Flat R6 c) Flat R3 d) Flat conical)

Tablo 3. NDK işlemi parametreleri (RSW process parameters)

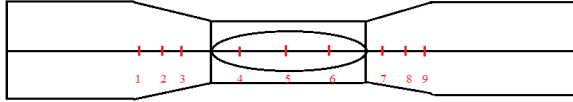
Elektrot uç tipi	Kaynak akımı (kA)	Kaynak süresi (Çevrim, 0,2 sn)	Elektrot basıncı (Bar)
Konik yuvarlak	9	20	6
Düz R6	9	20	6
Düz R3	9	20	6
Düz konik	9	20	6

## 2.3. Çekme Makaslama Deneyi (Tensile Shear Test)

Çekme makaslama testi, 50 kN kapasiteli Shimadzu marka çekme test cihazı ile her elektrot uç tipi için çekme makaslama testi için üretilen 3 numuneye 2 mm/dk çene hızında uygulanmıştır. Elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınarak çekme makaslama dayanım değerleri elde edilmiştir.

## 2.4. Mikrosertlik Testi (Microhardness Test)

Mikrosertlik ölçümleri, Shimadzu marka Vickers sertlik ölçüm cihazı kullanılarak ana metal, ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) ve kaynak metali boyunca eksenlere paralel doğrultuda HV 1 değerinde 15 saniye süreyle yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. NDK numunelerinin sertlik ölçüm bölgeleri Şekil 3'te gösterilmiştir.

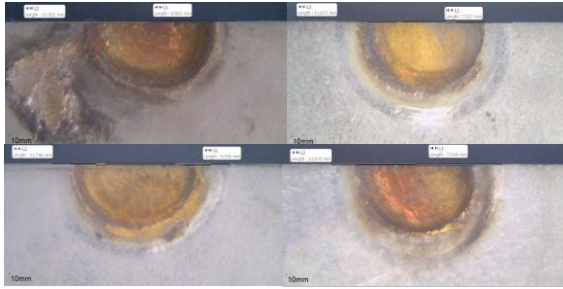


Şekil 3. NDK'lı numunelerin düzlemsel sertlik ölçüm hattı ve noktaları (Planar hardness measurement line and points of RSW samples)

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

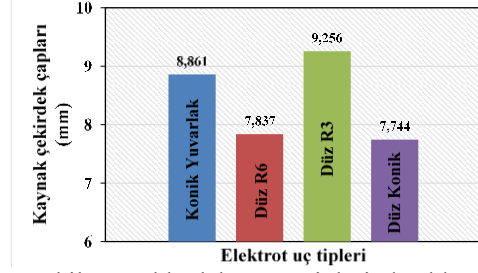
#### 3.1. Kaynak Çekirdek Boyutu (Weld Nugget Size)

Tüm birleşim alanını belirleyen kaynak çekirdek boyutu, NDK'lı birleşimlerin çekme makaslama dayanımı özelliklerini etkileyen en önemli parametredir. NDK'lı birleşimde kaynak çekirdek boyutu ile maksimum yük ve enerji absorbe kabiliyeti arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır [25,33–36]. Kaynak çekirdek boyutu arttıkça, çentik kökü etrafında gerilim konsantrasyon faktörü azalmakta ve sonucunda çekme makaslama dayanımı artış göstermektedir [25]. 4 farklı elektrot uç tipinde gerçekleştirilen NDK işlemlerinde elde edilen kaynak çekirdek çap değerleri Şekil 4'te ve grafiksel olarak Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. NDK'lı numunelerin kaynak çekirdek çap ölçümleri a) Konik yuvarlak b) Düz R6 c) Düz R3 d) Düz konik (Weld nugget diameter measurements of RSW samples a) Conical round b) Flat R6 c) Flat R3 d) Flat conical)

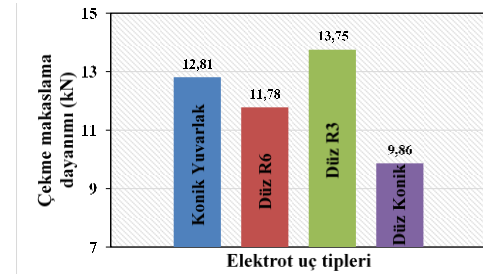
Şekil 4 ve Şekil 5 değerlendirildiğinde, en yüksek çap değerleri Düz R3 uçlu elektrotlarda (9,256 mm), en düşük değerler ise düz konik elektrot uçların (7,744 mm) kullanılması ile uygulanan NDK işlemleri ile sağlandığı anlaşılmaktadır. Elektrot uç tiplerinin farklı temas alanları, farklı akım yoğunluğu dağılımına sebep olur ve sıcaklık dağılımının simetrisini aksel yönde değiştirir [1]. Genel olarak Düz R3 elektrod ile gerçekleştirilen NDK işlemlerinde akım yoğunluğu diğer elektrot uç tiplerine göre daha yüksek miktarda gerçekleşmiş ve bu durum da daha fazla ısı üretimine yol açmıştır. Isı girdisindeki artış ile doğru orantılı olarak kaynak çekirdek çap değerleri diğer elektrot uç tiplerinde elde edilen değerlere göre daha yüksek bulunmuştur.



Şekil 5. Farklı elektrot uç tiplerinde elde edilen kaynak çekirdek çap değerleri (Weld nugget diameter values obtained at different electrode tip types)

#### 3.2. Çekme Makaslama Özellikleri (Tensile Shear Properties)

NDK'lı birleşimlerin mekanik performansı genellikle statik, yorulma ve darbe yükleme koşulları altında düşünülmektedir [37–43]. Araç yapılarındaki NDK'lı birleşimler, hem makaslama yüklemelerine hem de çekme yüklemelerine maruz kalmaktadır [33,44]. NDK'lı birleşimlerin mekanik davranışlarının değerlendirmede en sık tercih edilen testler; çekme makaslama, çapraz gerilme ve koç kabuğu testleridir. Çekme makaslama testi özellikle makaslama yüklemesini temsil etmektedir [44–46]. Bu çalışmada 4 farklı elektrot uç tipinin çekme makaslama özelliklerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen çekme makaslama deney sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir.

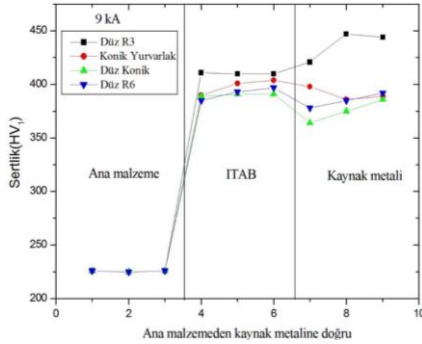


Şekil 6. Farklı elektrot uç tiplerinde elde edilen çekme makaslama kuvvet değerleri (Tensile shear force values obtained at different electrode tip types)

Çekme makaslama sonuçları (çekme yük taşıma kapasitesi), elektrot uç tipleri bakımından değerlendirildiğinde; en yüksek çekme makaslama dayanım değeri Düz R3 uçlu elektrotlar ile (13,75 kN), en düşük çekme makaslama dayanım değerinin ise düz konik uçlu elektrotlar ile (9,86 kN) elde edildiği görülmektedir. Düz R3 elektrod ile gerçekleştirilen NDK işlemlerinde akım yoğunluğu diğer elektrot uç tiplerine göre daha yüksek miktarda gerçekleşmiş ve bu durum da daha fazla bir alanda ısı üretimine yol açmıştır. Isı girdisindeki artış ile doğru orantılı olarak kaynak bölgesinde oluşan ve çekme makaslama dayanım değerini arttıran esas etken düğme (nugget) çapı (Şekil 6.) olmakla birlikte farklı uç tipleri akım geçiş modeli değerlendirildiğinde; düz

olmakla birlikte martenzit faz oranı diğer elektrot uç tiplerinde elde edilenlere göre daha fazladır. Bu sebeple en yüksek çekme makaslama dayanım değerleri Düz R3 uçlu elektrotlar ile elde edilmiş, Düz konik uçlu elektrotlar ile gerçekleştirilen ve ucun daha homojen ve yaygın bir ısı dağılımı oluşturduğu ve daha kaynak metali sıçramasına da sebep olabileceği literatür ışığında değerlendirilmektedir [1,25]. Konik ve küresel uçlarda ise merkez bölgedeki aşırı basınç ile batmanın fazlalığı ve sonuç itibarı ile bölgesel akım yoğunluğu ile sıçramaların ve düğme çapının daha düşük gerçekleşmemesi ile sonuçlandığı ve ayrıca kaynak metali bölgesindeki soğuma sırasında kaynak tane yapısının iri ve martenzit faz miktarının daha az olması ile sonuçlanabileceği değerlendirilmektedir [1]. Isı girdisindeki yaygınlık veya bölgesellik ile hem düğme boyutları ve hem de mikroyapı öznelikleri değişmekte, sonuç itibarı ile ise sertlik ve hem de çekme makaslama taşıma kapasiteleri de farklılık göstermektedir.

NDK işleminde kaynak çekirdek boyutu artıkça çekme makaslama dayanımının artış gösterdiği literatürde ifade edilmiştir [25,33–36]. Şekil 5 ve Şekil 6 birlikte değerlendirildiğinde kaynak çekirdek çap değerleriyle doğru orantılı olarak çekme makaslama dayanım değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu doğrultuda en yüksek çekme makaslama dayanım değeri Düz R3 uçlu elektrotlar ile elde edilmiştir.



Şekil 7. Farklı elektrot uç tiplerinde elde edilen sertlik değerleri (Hardness values obtained at different electrode tip types)

### 3.3. Mikrosertlik Sonuçları (Microhardness Results)

Farklı elektrot uç tiplerinde gerçekleştirilen NDK işlemleri sonucunda elde edilen sertlik değerleri grafiksel olarak Şekil 7'de gösterilmiştir. Tipik olarak, NDK'lı düşük karbonlu çeliklerin kaynak metali sertlik değeri, ana metale göre yaklaşık 2-3 kat daha yüksektir [15,47]. Şekil 7 incelendiğinde, özellikle Düz R3 uçlu elektrotlar ile ana malzemeye göre kaynak metali sertlik değerinin yaklaşık 2 kat artış gösterdiği görülmektedir. Çekme makaslama yüklemelerinde, maksimum yük değeri kaynak metalinin sertliği ile orantılıdır [25]. Şekil 6 ve Şekil

7 birlikte değerlendirildiğinde farklı elektrot uç tipleri için sertlik ve çekme makaslama dayanım değerleri arasında doğrusal bir ilişki görülmektedir.

Literatürde ticari DP600 otomotiv sac çeliğinin NDK işlemlerinden sonra kaynak metalinde ortaya çıkan sertlik değerleri incelendiğinde şu sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Ma vd. kaynak metalinin sertliğini 420 HV, Khan vd. farklı kaynak parametreleri altında gerçekleştirdikleri NDK işlemleri sonucunda kaynak metalinin sertliğini 350-400 HV aralığında bulmuştur [48,49]. Zhang vd. kaynak metali sertliğinin 361 HV, Xu vd. ise 340-370 HV aralığında olduğunu ifade etmiştir[38,50]. Long ve Khanna ise kaynak metalinin sertliğini 420 HV bulmuştur [36]. Bu çalışmada elde edilen sertlik değerleri ise farklı elektrot uç tipleri için 350-450 HV aralığında elde edilmiştir. Bu doğrultuda literatürde elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir. En yüksek sertlik değerleri Düz R3 uçlu elektrotlarla, en düşük sertlik değerleri ise Düz konik uçlu elektrotlarla gerçekleştirilen numunelerde elde edilmiştir.

Farklı elektrot uç tiplerinin etkisini belirlemek için, deneylerde kullanılan DP600 çeliğinin karbon eşdeğerliği, Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır [13]. Konaklama uyum faktörü ise Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$CE_V = C + A(C) \times \left\{ 5 \times B + \frac{S_i}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} \right\} \quad (1)$$

$$A(C) = 0,75 - 0,25 \times \tanh\{20 \times (C - 0,12)\} \quad (2)$$

Buradan elde edilen konaklama-uyum faktörü değeri DP600 çeliği için 0,5759 ve karbon eşdeğerliği değeri ise 0,2828'dir. Kaynak metali sertliği ise Eşitlik 3 kullanılarak hesaplanmaktadır [49].

$$HV_{KM} = 630 \times CE_V + 188 \quad (3)$$

Eşitlik 3 kullanılarak kaynak metali sertlik değeri 366,164 HV olarak hesaplanmıştır. Şekil 7 incelendiğinde; konik yuvarlak, düz konik ve düz R6 uçlu elektrotlarda hesaplanan kaynak metali sertlik değerine yakın değerler elde edilmiştir. Beklenen sertlik değerine göre Düz R3 uçlu elektrotlarda daha yüksek sertlik değerleri gözlenmiştir.

## 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

NDK yöntemi ile birleştirilen geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliğin kaynak çekirdek çapı, çekme makaslama dayanımı ve mikro sertlik özellikleri üzerinde farklı elektrot uç tiplerinin etkisinin



değerlendirildiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- DP600 çeliğinin düşük miktarda martenzit fazı ve ağırlıklı olarak ferrit fazından oluştuğu görülmüştür.
- En yüksek kaynak çekirdek çap değerleri Düz R3 uçlu elektrotlarda, en düşük değerler ise Düz konik elektrot uçlarda görülmüştür.
- Kaynak çekirdek boyutu arttıkça çekme makaslama dayanımı artmıştır.
- En yüksek çekme makaslama dayanım değeri ısı girdisindeki artış ile doğru orantılı olarak daha fazla martenzit faz oranına sahip Düz R3 elektrotlar ile elde edilmiştir. Isı girdisindeki yaygınlık veya bölgesellik ile hem düğme boyutları ve hem de mikroyapı öznelikleri değişmekte homojen bir yapı, geniş bir alanda martenzit fazı ile ve en büyük kaynak düğme çapının bir sonucu olarak sertlik ve çekme dayanım değerleri de artmaktadır.
- Sertlik ve çekme makaslama dayanım değerleri arasında doğrusal bir ilişki gözlenmiştir.
- Konik yuvarlak, düz konik ve düz R6 uçlu elektrotlarda hesaplama yöntemi ile elde edilen kaynak metali sertlik değerine yakın değerler elde edilirken, Düz R3 uçlu elektrotlarda ise daha yüksek sertlik değerleri gözlenmiştir.

#### TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmaya destek veren Karabük Üniversitesi Rektörlüğüne ve BAP Proje koordinatörlüğüne teşekkür ederiz (Proje no: KBÜBAP-17-KP-463).

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] B. Wang, L. Hua, X. Wang, Y. Song and Y. Liu, "Effects of electrode tip morphology on resistance spot welding quality of DP590 dual-phase steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 83, no. 9–12, pp. 1917–1926, April 2016. doi: 10.1007/s00170-015-7703-0

[2] S. Donders, M. Brughmans, L. Hermans and N. Tzannetakis, "The effect of spot weld failure on dynamic vehicle performance," *Sound and Vibration*, vol. 39, no. 4, pp. 16–25, April 2005.

[3] A. De, "Spot welding," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 13, no. 3, pp. 213–214, 2008. doi: 10.1179/174329308X326318

[4] A. Alzahougi, M. Elitas and B. Demir, "RSW junctions of advanced automotive sheet steel by using different electrode pressures," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 8, no. 5, pp. 3492–3495, October 2018. doi: 10.48084/etasr.2342

[5] M. Elitas and B. Demir, "The effects of the welding parameters on tensile properties of RSW junctions of DP1000 sheet steel," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 8, no. 4, pp. 3116–3120, August 2018. doi: 10.48084/etasr.2115

[6] D. K. Matlock, J. G. Speer, E. De Moor and P. J. Gibbs, "Recent developments in advanced high strength sheet steels for automotive applications: an overview," *Jestech*, vol. 15, no. 1, pp. 1–12, January 2012.

[7] D. K. Matlock and J. G. Speer, *Microstructure and Texture in Steels: Third generation of AHSS microstructure design concepts*. London, Springer, 2009, pp. 185–205.

[8] E. De Moor, P. J. Gibbs, J. G. Speer, D. K. Matlock and J. G. Schroth, "AIST transactions strategies for third-generation advanced high-strength steel development," *Iron & Steel Technology*, vol. 7, no. 11, pp. 133-144, November 2010.

[9] M. Pouranvari, A. Abedi, P. Marashi and M. Goodarzi, "Effect of expulsion on peak load and energy absorption of low carbon steel resistance spot welds," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 13, no. 1, pp. 39–43, 2008. doi: 10.1179/174329307X249342

[10] S. M. Zuniga, "Predicting overload pull-out failures in resistance spot welded joints," Ph.D. dissertation, Stanford Univ., Stanford, USA, 1995.

[11] H. Zhang and J. Senkara, *Resistance Welding Fundamentals and Applications*. Boca Raton, CRC Press, 2011.

- [12] M. Pouranvari, H. R. Asgari, S. M. Mosavizadch, P. H. Marashi and M. Goodarzi, "Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 12, no. 3, pp. 217–225, 2007. doi: 10.1179/174329307X164409
- [13] P. C. Lin, S. H. Lin and J. Pan, "Modeling of failure near spot welds in lap-shear specimens based on a plane stress rigid inclusion analysis," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 73, no. 15, pp. 2229–2249, October 2006. doi: 10.1016/j.engfracmech.2006.03.017
- [14] X. Sun, E. V. Stephens and M. A. Khaleel, "Effects of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high strength steel spot welds under lap shear loading conditions," *Engineering Failure Analysis*, vol. 15, no. 4, pp. 356–367, June 2008. doi: 10.1016/j.engfailanal.2007.01.018
- [15] X. Sun, E. V. Stephens and M. A. Khaleel, "Effects of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high-strength steel spot welds," *Welding Journal*, vol. 86, no. 1, pp. 18-25, January 2007.
- [16] J. Nieto, M. P. Guerrero-Mata, R. Colas and A. Mani, "Experimental investigation on resistance spot welding of galvanized HSLA steel," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 11, no. 6, pp. 717–722, 2006. doi: 10.1179/174329306X153187
- [17] X. Sun, E. V. Stephens, R. W. Davies, M. Khaleel and D. J. Spinella, "Effects of fusion zone size on failure modes and static strength of aluminum resistance spot welds," *Welding Journal*, vol. 83, no. 11, pp. 308-318, November 2004.
- [18] M. Pouranvari and S. P. H. Marashi, "Critical sheet thickness for weld nugget growth during resistance spot welding of three-steel sheets," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 16, no. 2, pp. 162–165, 2011. doi: 10.1179/1362171810Y.0000000016
- [19] S. Sam and M. Shome, "Static and fatigue performance of weld bonded dual phase steel sheets," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 15, no. 3, pp. 242–247, 2010. doi: 10.1179/136217110X12665778348461
- [20] M. I. Khan, M. L. Kuntz, P. Su, A. Gerlich, T. North and Y. Zhou, "Resistance and friction stir spot welding of DP600: a comparative study," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 12, no. 2, pp. 175–182, 2007. doi: 10.1179/174329307X159801
- [21] O. N. P. O. S. Varjenja, P. U. To, K. V. Naprednega and F. M. V. T. Jekla, "Dependence of the fracture mode on the welding variables in the resistance spot welding of ferrite-martensite DP980 advanced high-strength steel," *Materiali In Tehnologije*, vol. 46, no. 6, pp. 665–671, 2012.
- [22] A. De, O. P. Gupta and L. Dorn, "An experimental study of resistance spot welding in 1 mm thick sheet of low carbon steel," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 210, no. 4, pp. 341–347, August 1996. doi: 10.1243/PIME\_PROC\_1996\_210\_126\_02
- [23] G. Mukhopadhyay, S. Bhattacharya and K. K. Ray, "Strength assessment of spot-welded sheets of interstitial free steels," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 4, pp. 1995–2007, February 2009. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.04.065
- [24] K. R. Pedersen, A. Harthøj, K. L. Friis, N. Bay, M. A. Somers and W. Zhang, "Microstructure and hardness distribution of resistance welded advanced high strength steels," in *5th International Seminar on Advances in Resistance Welding, 24-26 August 2008, Toronto, Canada* [Online]. Available: DTU Orbit, <https://orbit.dtu.dk/en/> [Accessed: 08 Oct. 2021].
- [25] M. Pouranvari and S. P. H. Marashi, "Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 18, no. 5, pp. 361–403, 2013. doi: 10.1179/1362171813Y.0000000120
- [26] Z. Duan, Y. Li, M. Zhang, M. Shi, F. Zhu and S. Zhang, "Effects of quenching process on mechanical properties and microstructure of high strength steel", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, vol. 27, no. 6, pp. 1024–1028, December 2012. doi: 10.1007/s11595-012-0593-1
- [27] N. A. Özbek and E. Saraç, "Effects of tempering heat treatment temperatures on mechanical properties of carbon steels," *Gazi Journal of Engineering Sciences (GJES)*, vol. 7, no. 1, pp. 17–25, April 2021. doi: 10.30855/gmbd.2021.01.03
- [28] H. Gökçe, "Modelling and optimization for thrust force, temperature and burr height in drilling of custom 450," *Experimental Techniques*, pp. 1–15, September 2021. doi: 10.1007/s40799-021-00510-z

- [29] H. Yang, X. Lai, Y. Zhang and G. Chen, "Investigations on the weldability of high-strength steels sheet to cylindrical tube single-sided spot welding," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 49, no. 5–8, pp. 513–518, November 2009. doi: 10.1007/s00170-009-2418-8
- [30] M. Eshraghi, M. A. Tschopp, M. A. Zaeem and S. D. Felicelli, "Effect of resistance spot welding parameters on weld pool properties in a DP600 dual-phase steel: a parametric study using thermomechanically-coupled finite element analysis," *Materials & Design*, vol. 56, pp. 387–397, April 2014. doi: 10.1016/j.matdes.2013.11.026
- [31] S. Frydman and G. Pękalski, "Structure and hardness changes in welded joints of Hardox steels," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 15–27, 2008. doi: 10.1016/S1644-9665(12)60118-6
- [32] C. W. Ziemian, M. M. Sharma and D. E. Whaley, "Effects of flashing and upset sequences on microstructure, hardness, and tensile properties of welded structural steel joints," *Materials & Design*, vol. 33, pp. 175–184, January 2012. doi: 10.1016/j.matdes.2011.07.026
- [33] R. W. Rathbun, D. K. Matlock and J. G. Speer, "Fatigue behavior of spot welded high-strength sheet steels," *Welding Journal*, vol. 82, no. 8, pp. 207–218, August 2003.
- [34] T. B. Hilditch, J. y Speer and D. K. Matlock, "Effect of susceptibility to interfacial fracture on fatigue properties of spot-welded high strength sheet steel", *Materials & Design*, vol. 28, no. 10, pp. 2566–2576, December 2006. doi: 10.1016/j.matdes.2006.10.019
- [35] M. H. Swellam, G. B. Aş and F. V. Lawrence, "A fatigue design parameter for spot welds," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 17, no. 10, pp. 1197–1204, October 1994. doi: 10.1111/j.1460-2695.1994.tb01408.x
- [36] X. Long and S. K. Khanna, "Fatigue properties and failure characterization of spot-welded high strength steel sheet," *International Journal of Fatigue*, vol. 29, no. 5, pp. 879–886, May 2007. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2006.08.003
- [37] Y. S. Yang, K. J. Son, S. K. Cho, S. G. Hong, S. K. Kim and K. H. Mo, "Effect of residual stress on fatigue strength of resistance spot weldment," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 6, no. 6, pp. 397–401, 2001. doi: 10.1179/stw.2001.6.6.397
- [38] J. Xu, Y. S. Zhang, L. Xinmin and G. L. Chen, "Experimental investigation of fatigue performance of spot welded dual phase sheet steels," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 13, no. 8, pp. 726–731, 2008. doi: 10.1179/174329307X236841
- [39] X. Long and S. K. Khanna, "Fatigue performance of spot welded and weld bonded advanced high strength steel sheets," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 13, no. 3, pp. 241–247, 2008. doi: 10.1179/174329307X249379
- [40] S. Daneshpour, S. Riekehr, M. Kocak and C. H. J. Gerritsen, "Mechanical and fatigue behaviour of laser and resistance spot welds in advanced high strength steels," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 14, no. 1, pp. 20–25, 2009. doi: 10.1179/136217108X336298
- [41] H. Gaul, G. Weber and M. Rethmeier, "Influence of HAZ cracks on fatigue resistance of resistance spot welded joints made of advanced high strength steels," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 16, no. 5, pp. 440–445, 2011. doi: 10.1179/1362171810Y.0000000031
- [42] S. Daneshpour, A. H. Kokabi, A. A. Ekrami and A. K. Motarjemi, "Crack initiation and kinking behaviours of spot welded coach peel specimens under cyclic loading," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 12, no. 8, pp. 696–702, 2007. doi: 10.1179/174329307X238416
- [43] P. Wung, T. Walsh, A. Ourchane, W. Stewart and M. Jie, "Failure of spot welds under in-plane static loading," *Experimental Mechanics*, vol. 41, no. 1, pp. 100–106, March 2001.
- [44] M. Pouranvari and S. P. H. Marashi, "Failure of resistance spot welds: tensile shear versus coach peel loading conditions," *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 39, no. 2, pp. 104–111, 2012. doi: 10.1179/1743281211Y.0000000066
- [45] M. Pouranvari and S. P. H. Marashi, "Failure mode transition in AISI 304 resistance spot welds", *Welding Journal*, vol. 91, no. 11, pp. 303–309, November 2012.
- [46] M. Pouranvari and S. P. H. Marashi, "Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part I. Controlling factors," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 29–30, pp. 8337–8343, November 2011. doi: 10.1016/j.msea.2011.08.017

[47] M. Pouranvari, S. P. H. Marashi and D. S. Safanama, "Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part II: Experimental investigation and model validation," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 29–30, pp. 8344–8352, November 2011.

doi: 10.1016/j.msea.2011.08.016

[48] C. Ma, D. L. Chen, S. D. Bhole, G. Boudreau, A. Lee and E. Biro, "Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 485, no. 1–2, pp. 334–346, June 2008.

doi: 10.1016/j.msea.2007.08.010

[49] M. I. Khan, M. L. Kuntz, E. Biro and Y. Zhou, "Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded advanced high strength steels," *Materials Transactions*, vol. 49, no. 7, pp. 1629–1637, July 2008. doi: 10.2320/matertrans.MRA2008031

[50] H. Zhang, A. Wei, X. Qiu and J. Chen, "Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded dissimilar thickness DP780/DP600 dual-phase steel joints," *Materials & Design*, vol. 54, pp. 443–449, February 2014.

doi: 10.1016/j.matdes.2013.08.027

This is an open access article under the CC-BY license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



## Yeni Betonarme Katmanla Güçlendirilen Bir Betonarme Yapının Nümerik Olarak İncelenmesi

Ömer MERCİMEK<sup>\*,a</sup> 

<sup>a,\*</sup> Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06010, Ankara, Türkiye.

### MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 30.07.2021  
Kabul: 07.10.2021

#### **Anahtar Kelimeler:**

Güçlendirme,  
Betonarme yapı,  
Nümerik inceleme

### ÖZ

Bu çalışmada, öncelikle literatürde yer alan güçlendirme yöntemleri genel olarak incelenmiş ve servis ömrü boyunca kolon ve kirişlerinde sismik kaynaklı yapısal hasarlar oluşmuş bir betonarme binanın hasar tespiti yapılmıştır. Betonarme yapının tüm kolonlarına ve hasarlı kirişlerine yeni bir betonarme tabaka eklenerek ve buna ilave olarak yapıya ek betonarme perdeler yerleştirilerek uygulanan güçlendirme işlemi nümerik olarak değerlendirilmiştir. Hasar tespiti aşamasında, betonarme kolonların neredeyse tamamının ve kesme-eğilme çatlaklarının bulunduğu betonarme kirişlerin taşıma kapasitelerinin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018 (TBDY-2018)'e göre yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan güçlendirme işleminden sonra, kolonların etkileşim diyagramları ve kirişlerin moment-eğrilik ilişkileri güçlendirme öncesi durum ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonrasında kolonların aksenal yük taşıma kapasitesinde %300, moment taşıma kapasitesinde %666, kirişlerin moment taşıma kapasitesinde ise %485 artış olduğu tespit edilmiştir. Bunların yanı sıra, güçlendirme işleminden sonra yapının ilk üç moduna ait periyotlarda oluşan düşüşe bağlı olarak yapıya etki eden yatay ve düşey deprem ivmelerinin değerleri sırasıyla %294 ve %400 oranında artış göstermiştir. Nümerik çalışmalar SAP2000 sonlu elemanlar programı ile gerçekleştirilmiştir. Nümerik çalışma sırasında, betonarme kolon ve kirişlere yeni bir betonarme tabaka eklenmesi literatürde kullanımı oldukça kısıtlı olan SAP2000-Section Designer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre hasarlı betonarme bir binada bulunan kolon ve kirişlere yeni bir betonarme tabaka eklenerek ve yapıya betonarme perdeler yerleştirilerek yapının sismik davranışının iyileştirileceği nümerik olarak ortaya konulmuştur.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.11>

## Numerical Investigation of a Reinforced Concrete Structure Strengthened by New Reinforced Concrete Layer

### ARTICLE INFO

Received: 30.07.2021  
Accepted: 07.10.2021

#### **Keywords:**

Strengthening,  
Reinforced concrete  
structures,  
Numerical  
investigation

### ABSTRACT

In this study, strengthening methods of the structures mentioned in the literature were examined in general sense and an existing reinforced concrete building that has been damaged from its columns and beams in previous earthquakes during service life was investigated numerically by determining the damage status. Then, strengthening was applied by adding a new reinforced concrete layer to all columns and damaged beams followed by placing additional reinforced concrete shear walls to the structural layout. Finally, finite element analysis of the rehabilitated building was carried out and the numerical results were compared with the initial state. At the stage of damage assessment, it has been determined that the load-bearing capacities of almost all reinforced concrete beams with flexural-shear cracks and reinforced concrete columns were insufficient according to Turkey Building Earthquake Code-2018 (TEC-2018). Once the strengthening was applied, the new interaction diagrams of the columns and the moment-curvature

\*Sorumlu yazar: [omercimek@ybu.edu.tr](mailto:omercimek@ybu.edu.tr)

To cite this article: Ö. Mercimek, "Numerical Investigation of a Reinforced Concrete Structure Strengthened by New Reinforced Concrete Layer", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 286-297, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.03.11

---

relations of the beams were compared with the un-strengthened state. It was determined that there was an increase of 300% in the axial load-carrying capacity and 666% in the moment-carrying capacity of the columns, and 485% in the moment carrying capacity of the beams. In addition, the values of horizontal and vertical earthquake accelerations affecting the structure increased by 294% and 400%, respectively, due to the decrease in the periods of the first three modes of the building. Numerical studies were carried out with SAP2000 finite element program. In the numerical study, adding a new reinforced concrete layer to the reinforced concrete columns and beams was implemented using the SAP2000-Section Designer which has quite limited usage in the literature. According to the results obtained, it has been numerically revealed that the seismic performance of the damaged structure can be improved by adding new reinforced concrete layers to the existing columns and beams and placing reinforced concrete shear walls to the building.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.11>

---

## 1. INTRODUCTION (*Giris*)

The main purpose of strengthening methods is to ensure sustainability and cost efficiency. In this context, researchers have tended to use structural materials with advanced technological properties over time. Firstly, reinforced concrete structural elements were jacketed with an additional cross-section created by using concrete and steel reinforcement with higher strength than the material strength in the existing structure, thereby, the load-bearing capacity of the structure was tried to be increased [1-6]. Although desired results were obtained in terms of bearing capacity, the challenges encountered in the process of jacketing (difficulties faced with in formwork, reinforcement and concrete application, inability to use the structure while strengthening, deterioration of the architecture of the structure, etc.) diminished the interest on this technique. Instead, strengthening the structural components with steel members against shear and bending forces has come to the forefront [7-11]. In this strengthening technique, however, risks caused by lack of qualified workers, adverse environmental effects such as fire or corrosion, or cost and architectural concerns were encountered. For the last 20 years, fiber reinforced polymer (FRP) strengthening method has been widely used and many structures have been strengthened with FRP instead of these strengthening techniques previously mentioned. Besides, many scientific studies have been carried out on this strengthening technique and FRP has become one of the most preferred materials in the studies on repair and strengthening of damaged reinforced concrete structures [12-26].

In most of the studies, an organic epoxy material was used to form a cohesive zone between the FRP and the surface on which FRP was applied. However, a number of deficiencies that need to be addressed in this strengthening technique such as (a) poor resistance against fire [27], (b) non-applicability on wet or damp surfaces [28], (c) lack of ability to replace the coating layer [29] (d) classification as a hazardous material during disposal, (e) high cost of FRP

techniques [29], (f) poor vapor permeability and the use of organic resins that damage the concrete [27]. Considering these disadvantages, the spread of the textile reinforced mortar layer (TRM) with scientific research has been accepted as a remarkable progress in the field of structural strengthening [28, 29]. TRM, which is also known as TRC, FRCM in English and TGSK in Turkish, is a composite building material formed by a cement-based inorganic mortar together with textiles obtained from different materials (such as steel, carbon, basalt, glass). Textiles used as reinforcement of composite material typically consist of perpendicular (bidirectional) fibers. Considering that the mortar is produced and applied by conventional methods, TRM has many advantages over fiber-reinforced polymers (a widely used, epoxy-based composite material). The main advantages of TRM strengthening method can be listed as (a) low cost, (b) resistance to high temperatures, (c) applicable to concrete, reinforced concrete and masonry construction surfaces, (d) applicable to wet surfaces, (e) low heat permeability, and (f) high load-bearing capacity.

Despite the fact that the jacketing method is one of the oldest strengthening methods in the literature and has some disadvantages, it is still a preferred due to its remarkable affect on the load-bearing capacity of the structural members, the availability of the qualified workers and the ease of material supply, as well [30, 31]. Researchers have used advanced, technological and innovative programs and tools in the design and analysis of engineering structures [32-39] When the literature is examined, no study has been carried out on the structures by adding a new reinforced concrete layer to the load-bearing members of the reinforced concrete structures with the SAP2000 finite element program. Within the scope of this study, the analysis of a reinforced concrete building whose surveying was done, crack distribution in the load-bearing members was detected and concrete properties were determined with the samples taken, was performed with the SAP2000 finite element program. Considering the numerical results, a new reinforced concrete layer was

added to the existing columns and beams, and reinforced concrete walls were placed on the load-bearing system which has no reinforced concrete walls in order to improve the behavior of the structure.

## 2. CASE STUDY (VAKA ÇALIŞMASI)

The storey formwork plan of the building (Table 1) is given in Figure 1, and the vertical section A-A in this plan is shown in Figure 2. In the storey formwork plan, the axis spacing was measured as 4.30 m. The information and patterns of the cracks in the building are presented in Table 2. It has been determined that the cracks in the storeys were capillary sized. However, the cracks in the columns and beams were measured to be in the range of 1-2 mm. Flexural and shear cracks were observed in some of the beams while shear cracks were observed in the joints in the columns. The dimensions of the columns, beams and storeys in the building and the details of the reinforcement steel are given in Table 3.

Table 1. Details of RC structure  
(*Betonarme yapının detayları*)

Concrete Strength	15.1 N/mm <sup>2</sup>
Modulus of Elasticity of Concrete	$E_{\text{theoretical}} / 2 = 13500 \text{ N/mm}^2$
Reinforcement Steel Grade	S220
Structural Behavior Factor	4
Seismic Design Category	Given in Figure 4
Soil Classification	ZB
Building Type	School
Building Use Category	1
Foundation Type	Raft Foundation
Structural System	Moment Resisting Frame
Infill Walls	Clay Brick
Storey Covering	Parquet Strip (beechen)

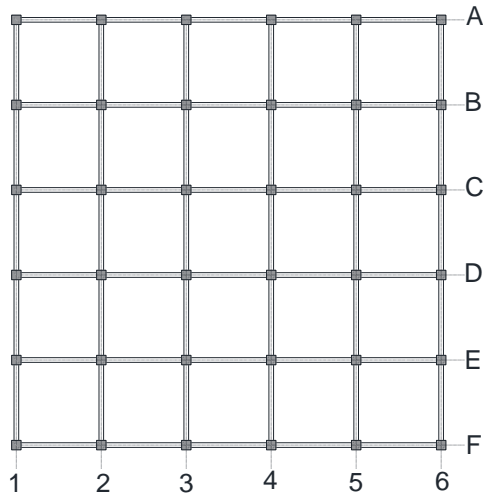


Figure 1. Formwork plan (*Kat kalıp planı*)

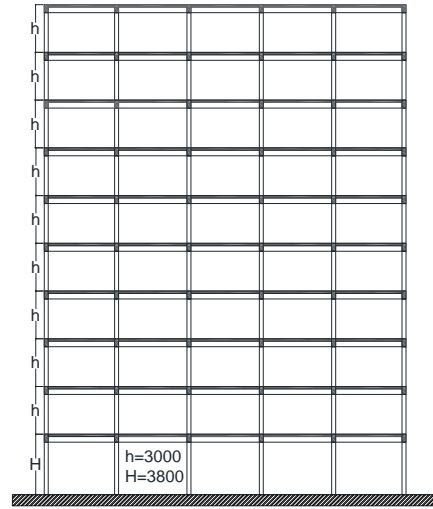


Figure 2. Reinforced concrete structural system (mm)  
(*Betonarme yapısal sistem (mm)*)

## 3. NUMERICAL INVESTIGATION (NÜMERİK İNCELEME)

### 3.1. Modeling of Existing Structure (*Mevcut Yapının Modellenmesi*)

The model of the building was created as shown in Figure 3 as close to actual by using the required data. All rigidities in storeys with cracks have been reduced to 30%. It is assumed that the beams carry neither moment in the flexural regions nor shear force in the region of shear cracks, while in the columns, shear cracks were created supposing that no force was carried in order to stay on the safe side.

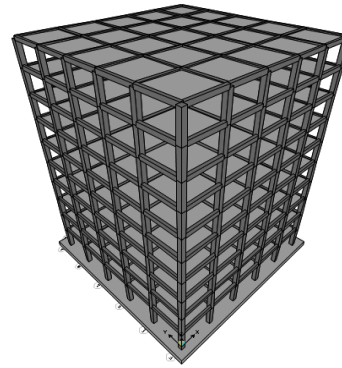


Figure 3. Structural model (*Yapısal model*)

The required earthquake data obtained for the location of the building are shown in Figure 4. The foundation of the building was formed in the ZB soil classification. The configuration of earthquake loads was carried out in the light of these information. For beams, 6 kN/m dead load was assigned. For storeys, dead load and live load, according to TS498, were assigned as 3.5 kN/m<sup>2</sup> and 5.0 kN/m<sup>2</sup>, respectively.

Table 2. Crack pattern (*Çatlak durumu*)

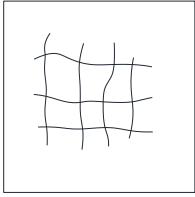
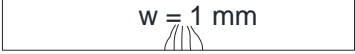
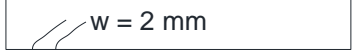
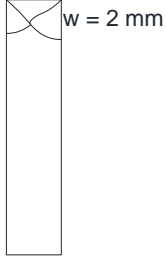
Structural members	Storey	Axes	Crack pattern	
Slab	1	C-D 4-5		
	2	B-C 1-2		
	3	B-D 4-5		
	1	B 1-2		
	1	B 5-6		
	1	D 5-6		
Beam	2	D		
	3	B 5-6		
	4	B 1-2		
	4	B 5-6		
	6	D 5-6		
	2	2 C-D		
	2	3 B-C		
	2	3 E-F		
	4	C 2-3		
	4	2 B-D		
6	2 B-D			
6	4 C-D			
6	D 3-4			
Columns	1	1-B		
	1	2-B		
	1	5-D		
	1	6-D		
	2	5-D		
	2	6-D		
	3	5-D		
	3	6-D		
	1	6-F		
	2	6-F		

Table 3. Details of reinforcement (*Donatı detayları*)

Structural members	Dimensions (mm)	Rebars
Slab	h=100	Ø10/300 plain, Ø10/300 bent-up
Beam	300 x 500	2Ø10 (top), 5Ø14 (bottom), Ø8/250 (stirrup)
Columns	500 x 500	8Ø18, Ø8/200
Foundation	h=700	14Ø20 (top), 14Ø20 (bottom)

### 3.2. Analysis of the Existing Structure and Results (*Mevcut Yapının Analizi ve Sonuçlar*)

In the light of the information given in the previous sections, the analysis of the structure was carried out according to the Turkish Building Earthquake Code

and results were obtained according to the 9 load combinations (1,4G+1,6Q, G+Q+Ex, G+Q-Ex, G+Q+Ey, G+Q-Ey, 0,9G+Ex, 0,9G-Ex, 0,9G+Ey ve 0,9G-Ey) given in TS500. In the combinations, it was observed that the worst-case loading was G+Q+Ey



and the relative story drifts obtained for this combination are given in Table 4. Information about natural periods of the existing building is given in Table 5. When all the results related to storey drifts are examined, it was seen that there was no torsional irregularity in both X and Y directions. The required controls were performed for the soft storey irregularity using the Table 6 for the earthquake in the X direction and the Table 7 for the earthquake in the Y direction according to the earthquake code.

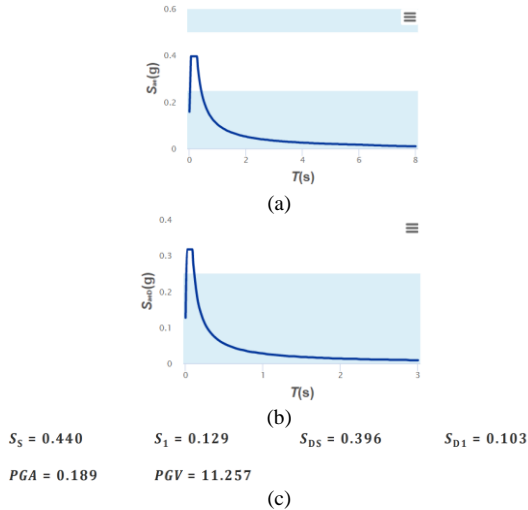


Figure 4. (a) Horizontal and (b) Vertical elastic design spectra, (c) Seismic design parameters obtained from 2018 Seismic Hazard Map ((a) yatay ve (b) düşey elastic spektrum, (c) 2018 Sismik Tehlike Haritası'ndan ele edilen sismik tasarım parametreleri parametreleri)

Table 4. Relative storey drifts of the existing building (Mevcut binanın görelî kat ötelenmesi)

Storey	U1 (mm)	U2 (mm)	U3 (mm)
1	2.55	17.26	-6.73
2	2.92	17.13	1.20
3	2.30	15.54	-0.05
4	1.65	13.08	-0.09
5	1.51	11.95	-0.12
6	1.39	10.79	-0.13
7	1.24	9.30	-0.13
8	1.10	7.44	-0.12
9	0.91	5.46	-0.09
10	0.72	3.42	-0.05

Table 5. Natural periods of the existing building (Mevcut binanın doğal periyotları)

Mode	Period (sec)	Frequency (1/sec)	CircFreq (rad/sec)	Eigenvalue
Mode 1	2.14 (translation-y)	0.48	2.94	8.63
Mode 2	2.10 (translation-x)	0.47	2.99	8.94
Mode 3	1.88 (torsion)	0.53	3.33	11.12
Mode 4	0.68	1.46	9.18	84.21
Mode 5	0.67	1.47	9.27	85.90
Mode 6	0.61	1.64	10.32	106.47
Mode 7	0.39	2.60	16.31	26613
Mode 8	0.38	2.61	16.40	269.02
Mode 9	0.35	2.86	18.00	323.89
Mode 10	0.32	3.09	19.34	374.15
Mode 11	0.27	3.71	23.30	543.05
Mode 12	0.26	3.76	23.61	557.18

Table 6. Soft storey control in X direction (X yönünde yumuşak kat kontrolü)

Storey	Loading	U1 mm	Control mm/mm	Result
1	EX	13.07	0.51	< 2
2	EX	25.58	0.68	< 2
3	EX	37.36	0.77	< 2
4	EX	48.25	0.82	< 2
5	EX	58.34	0.86	< 2
6	EX	67.44	0.89	< 2
7	EX	75.31	0.92	< 2
8	EX	81.68	0.95	< 2
9	EX	86.42	0.96	< 2
10	EX	89.50	-	< 2

Table 7. Soft storey control in Y direction (Y yönünde yumuşak kat kontrolü)

Storey	Loading	U1 mm	Control mm/mm	Result
1	EY	17.24	0.50	< 2
2	EY	34.35	0.69	< 2
3	EY	49.94	0.79	< 2
4	EY	63.05	0.84	< 2
5	EY	75.02	0.87	< 2
6	EY	85.83	0.90	< 2
7	EY	95.12	0.93	< 2
8	EY	102.50	0.95	< 2
9	EY	107.89	0.97	< 2
10	EY	111.25	-	< 2

As a result of the analyzes carried according to TS500 and 2018 Turkey Earthquake Code, it was seen that the load-bearing capacity of many columns has been exceeded and the strengthening was essential, as shown in Figure 5 in 3D and Figure 6 in 2D.

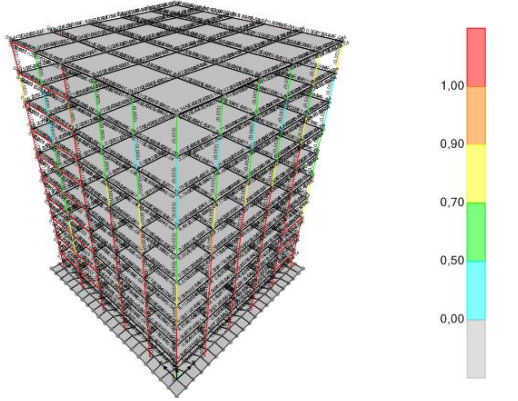
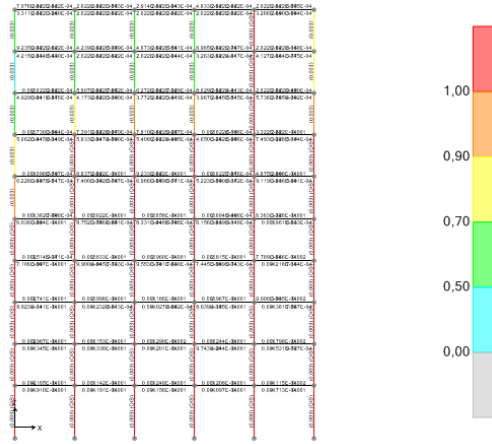
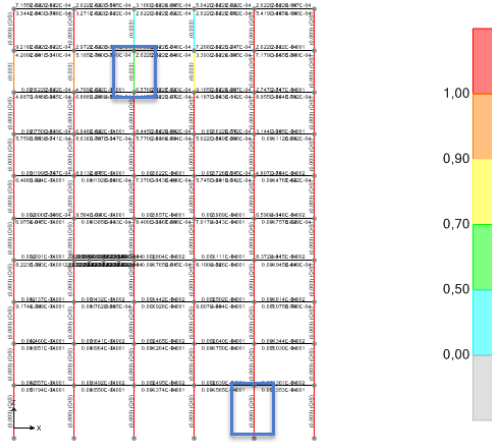


Figure 5. Exceeding the load bearing capacities of structural members (3D) (*Yapısal elemanların yük taşıma kapasitelerinin aşılması (3D)*)



(a)

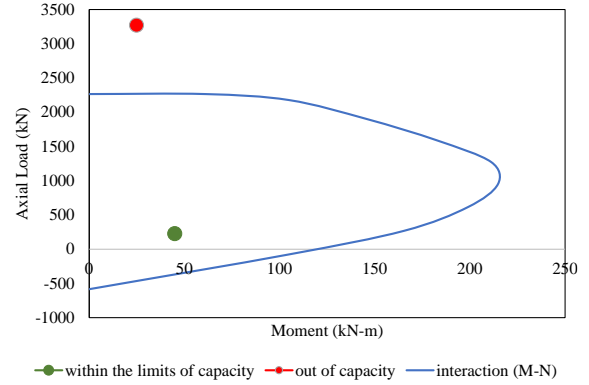


(b)

Figure 6. Exceeding the load bearing capacities of structural members (2D) (*Yapısal elemanların yük taşıma kapasitelerinin aşılması (2D)*)

Interaction diagrams, which shows the bearing capacity, are the same for all columns since the cross-sections and reinforcement steel are the same. However, the axial force and moment values on the columns are different. The interaction diagrams are

given in Figure 7 by examining the two columns whose bearing capacity is exceeded and within the bearing capacity limits which are shown in Figure 6.



— within the limits of capacity — out of capacity — interaction (M-N)

Figure 7. Interaction diagram of selected columns (*Seçilen kolonların karşılıklı etkileşim diyagramı*)

#### 4. STRENGTHENING OF THE BUILDING (*BİNANIN GÜÇLENDİRİLMESİ*)

As a consequence of the examination of the existing building, it was seen that the strengthening of the structural-system is required. Concrete with 30 MPa compressive strength and steel with 420 MPa yield strength were used for the jacketing to be implemented in the strengthening. As depicted in the plan in Figure 8, a reinforced concrete wall with a width of 30 cm in accordance with the beam width was placed on the structure. During the placement stage of the reinforced concrete walls in the plan, it was aimed that the large forces in the structure would mostly exert on the outer columns and that keeping the overlap of the mass-rigidity center of the building. In the succeeding stage, the building was analyzed with SAP2000 software. However, the load-bearing capacity of some columns was exceeded. Hereby, it was decided to apply the jacketing to all columns and beams with sections shown in Figure 9. The column jacketing process was applied to all columns, whereas the beam jacketing process was applied only to the beams with cracks. A new reinforced concrete layer with a thickness of 125 mm was added around the column. Therefore, the column cross-section became 750 mm x 750 mm. While the beams were being strengthened, a new reinforced concrete layer was added with a thickness of 50 mm on the side surfaces of the beam and 100 mm on the bottom surface. In this layer, a total of 10Ø16 reinforcement steel was used on the side surfaces and 10Ø16 reinforcement on the lower surface. The general view of the strengthened structure is shown in Figure 10. The modulus of elasticity for C30 concrete was calculated theoretically and the structural behavior factor has been updated to 6.

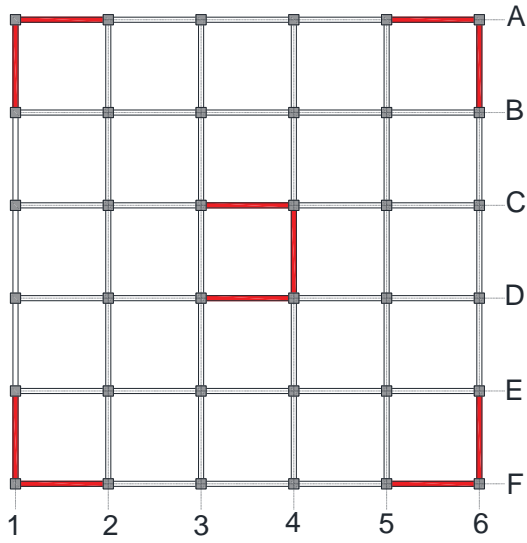


Figure 8. Lay-out of reinforced concrete walls  
(*Betonarme perde duvarların yerleşimi*)

#### 4.1. FEM Analysis of the Strengthened Building and Results (Güçlendirilen Binanın SEM analizi ve Sonuçlar)

In the light of the information given about the strengthening process, the analysis of the structure was performed and 9 load combinations given in TS500 (1.4G+1.6Q, G+Q+Ex, G+Q-Ex, G+Q+Ey, G+Q-Ey, 0.9G+Ex, 0.9G-Ex, 0.9G+Ey and 0.9G-Ey) were obtained. It was observed that the worst-case loading was G+Q+Ey and the relative story drifts obtained for this combination are given in Table 8. Information about natural periods of the strengthened building is given in Table 9. When all the results related to storey drifts are examined, it was seen that there was no torsional irregularity in both X and Y directions.

Table 8. Relative storey drifts of the strengthened building (*Güçlendirilen binanın görelî kat ötelenmesi*)

Storey	U1 (mm)	U2 (mm)	U3 (mm)
1	0.003	0.757	0.253
2	0.012	1.165	0.135
3	0.023	1.513	0.093
4	0.033	1.774	0.060
5	0.041	1.953	0.033
6	0.049	2.063	0.012
7	0.054	2.113	-0.003
8	0.060	2.114	-0.014
9	0.064	2.081	-0.017
10	0.066	2.020	-0.008

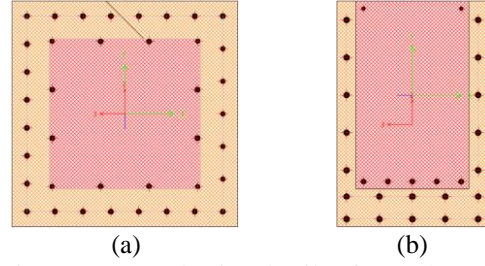


Figure 9. Strengthening details of (a) column, (b) beam (*(a) kolon, (b) kiriş güçlendirme detayı*)

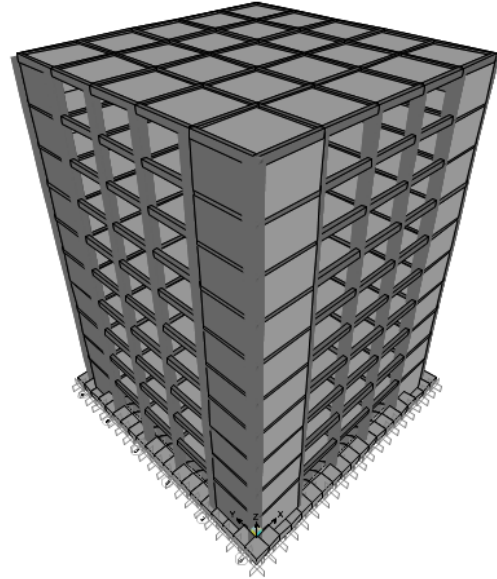


Figure 10. General view of strengthened building  
(*güçlendirilen binanın genel görünüşü*)

Table 9. Natural periods of the strengthened building  
(*Güçlendirilen binanın doğal periyotları*)

Mode	Period (sec)	Frequency (1/sec)	CircFreq (rad/sec)	Eigenvalue
Mode 1	0.597 (translation-y)	1.67	10.51	110.52
Mode 2	0.597 (translation-x)	1.67	10.52	110.72
Mode 3	0.395 (torsion)	2.52	15.88	252.46
Mode 4	0.136	7.35	46.19	2133.90
Mode 5	0.130	7.67	48.24	2327.40
Mode 6	0.097	10.23	64.28	4132.40
Mode 7	0.096	10.32	64.87	4209.20
Mode 8	0.096	10.32	64.88	4210.60
Mode 9	0.094	10.54	66.23	4386.60
Mode 10	0.094	10.57	66.41	4411.00
Mode 11	0.092	10.86	68.24	4657.50
Mode 12	0.092	10.86	68.26	4659.70

Table 10. Soft storey control in X direction  
(*X yönünde yumuşak kat kontrolü*)

Storey	Loading	U1 mm	Control mm/mm	Result
1	EX	13.07	0.51	< 2
2	EX	25.58	0.68	< 2
3	EX	37.36	0.77	< 2
4	EX	48.25	0.82	< 2
5	EX	58.34	0.86	< 2
6	EX	67.44	0.89	< 2
7	EX	75.31	0.92	< 2
8	EX	81.68	0.95	< 2
9	EX	86.42	0.96	< 2
10	EX	89.50		< 2

The required controls for the earthquakes in X and Y directions were checked out in Table 10 and Table 11, respectively in terms of soft storey irregularity.

As a result of the FEM analyzes performed according to TS500 and TEC-2018, all of the load-bearing members were able to withstand the load combinations, as shown in Figure 11 in 3D and in Figure 12 in 2D.

Table 11. Soft storey control in Y direction (*Y yönünde yumuşak kat kontrolü*)

Storey	Loading	U1 mm	Control mm/mm	Result
1	EY	0.01	0.59	< 2
2	EY	0.02	0.74	< 2
3	EY	0.02	0.82	< 2
4	EY	0.03	0.87	< 2
5	EY	0.03	0.90	< 2
6	EY	0.04	0.93	< 2
7	EY	0.04	0.96	< 2
8	EY	0.04	0.98	< 2
9	EY	0.04	1.01	< 2
10	EY	0.04		< 2

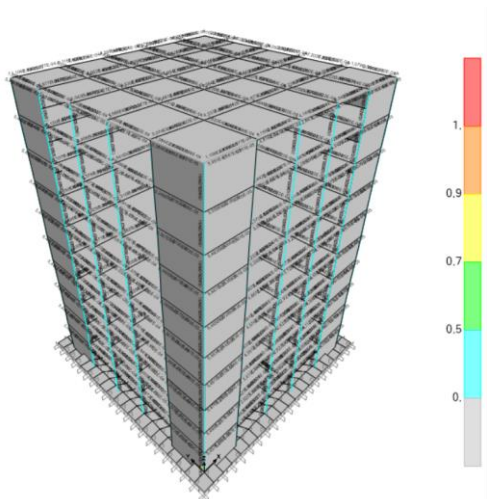


Figure 11. Control of load-bearing capacities of structural members (3D) (*Yapısal elemanların yük taşıma kapasitelerinin kontrolü (3D)*)

Since the cross-sections and reinforcement steel of the columns are identical, the interaction diagrams are same for all columns. Nevertheless, the axial force and

moment values on the columns are different. The interaction diagram of the strengthened columns is given in Figure 13 for the 5-D axis. Similar to the 5-D axis, the moment and axial-force values of all columns obtained from the numerical results are within the acceptable limits in the interaction diagram.



Figure 12. Control of load-bearing capacities of structural members (2D) (*Yapısal elemanların yük taşıma kapasitelerinin kontrolü (2D)*)

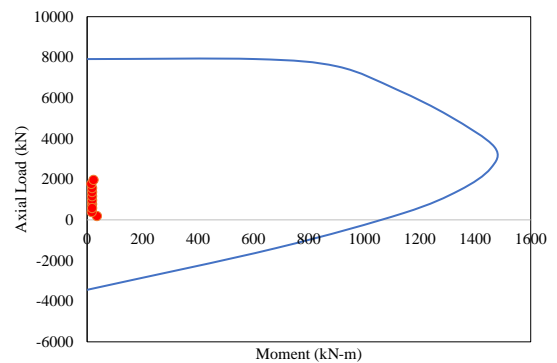


Figure 13. Interaction diagram of the strengthened columns (*Güçlendirilmiş kolonların karşılıklı etkileşim diyagramı*)

## 5. COMPARISON OF NUMERICAL RESULTS (NÜMERİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI)

In this part of the study, general behavior of the strengthened building is compared with the un-strengthened situation and the information about the load-bearing capacity increase of the columns and beams is presented.

The most important factor affecting the behavior of the building during an earthquake are the predominant periods and mode shapes of the building. The periods of the existing and the strengthened building are compared in Figure 14. Since the structural system of the existing building had a symmetrical lay-out, the behavior of the first two modes was in the form of translation. The behavior of the third mode was in the form of rotation. It was considered that this rotational behavior would prevent the large shear stresses that will occur as a result of torsion in the structure during the earthquake, and as a consequence attention has been paid to ensure that the center of rigidity does not move away from the center of gravity during the placement of the reinforced concrete shear walls added to the building. Therefore, there was no change in behavior in the predominant periods of the building, that is, the first two periods were observed as translation and the third period as rotation. As a result of the strengthening, the period of the building decreased from 2.14 to 0.60 seconds for mode-1, 2.10 to 0.60 seconds for mode-2 and 1.88 to 0.40 seconds for mode-3, respectively. Besides, the proportional increase in the rigidity of the building was approximately 13 times greater than the proportional increase in the weight of the building.

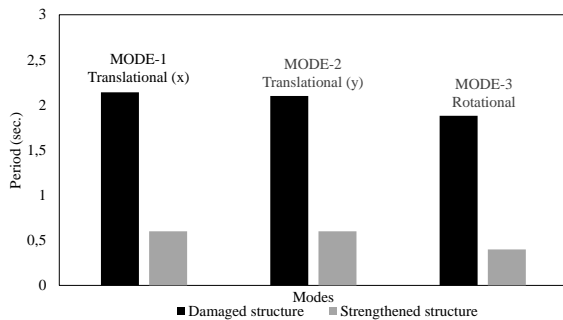


Figure 14. Period of the modes in the building  
(Bina periyotları)

The decrease in the period as a result of the increase in rigidity amplified the earthquake accelerations acting on the building. The information acquired from Figure 4 for the variation of horizontal and vertical earthquake accelerations are given in Figure 15 and Figure 16, respectively. As a result of the strengthening, the horizontal and vertical earthquake accelerations affecting the structure increased by average of 294% and 400%, respectively. In addition,

10 times decrease was observed in the storey drifts of the strengthened building compare to the existing one.

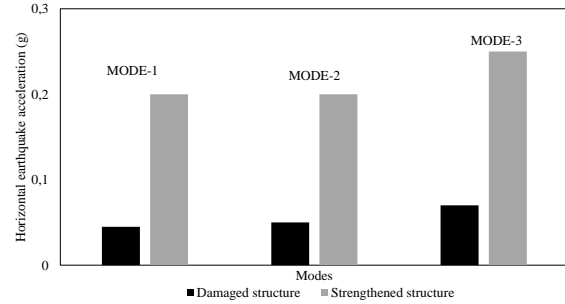


Figure 15. Horizontal earthquake accelerations depending on modes (Modlara bağlı yatay deprem ivmeleri)

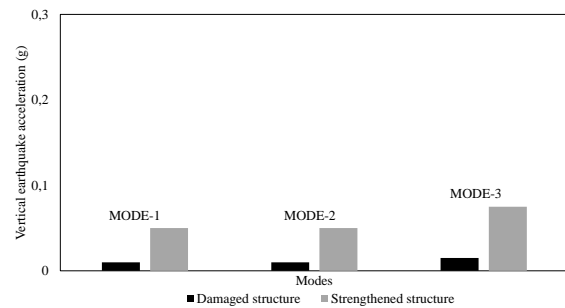


Figure 16. Vertical earthquake accelerations depending on modes (Modlara bağlı dişey deprem ivmeleri)

Significant increases occurred in the load-bearing capacities of the reinforced columns and beams. The comparison of the interaction diagrams of the reinforced columns before and after the strengthening is shown in Figure 17. In the case of zero moment, the axial compressive force bearing capacity and axial tensile force bearing capacity of reinforced concrete columns increased by 300% and 490%, respectively, compared to the unstrengthened ones. Whereas, In the case of zero axial force, the moment carrying capacity of the column increased by 666%.

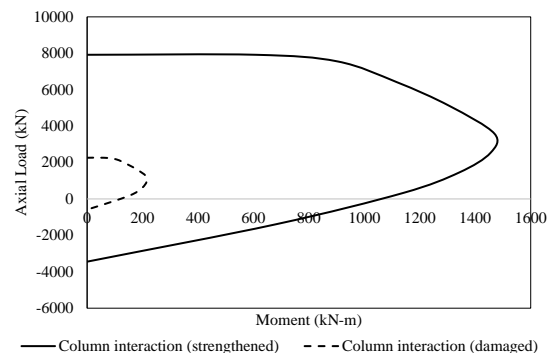


Figure 17. Comparison of column interaction diagrams (Kolon karşılıklı etkileşim diyagramlarının karşılaştırılması)

One of the information specifically examined in the behavior of reinforced concrete beams is the moment-curvature relationship. The variation of the moment-curvature curve in strengthened beams with respect to the initial state is shown in Figure 18. The moment carrying capacity of the strengthened beams increased by 485%. When the strengthened beams reach their maximum bearing capacity, the rotational value decreased by 76% due to the increase in flexural stiffness compare to the unstrengthened beams.

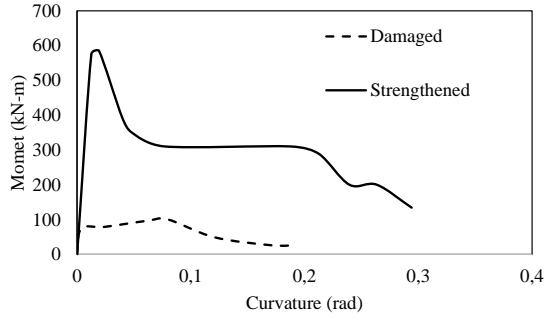


Figure 18. Comparison of moment-curvature diagrams of beams (*Kirişlerin moment-eğrilik diyagramlarının karşılaştırılması*)

## 6. CONCLUSION (SONUÇLAR)

In this study, finite element analysis of an insufficient reinforced concrete building, whose surveying was done, then, the crack distribution in the load-bearing members was detected and the concrete grade was determined with the samples taken, was performed using SAP2000 software. Considering the numerical results of the existing building, a new reinforced concrete layer was added to the columns and beams, and reinforced concrete walls were placed on the load-bearing system in order to improve the behavior of the structure. The FEM analysis of the rehabilitated building was carried out and the results were compared with the initial state. A summary of the main findings and the suggestions which have arisen in this study are listed as follows:

- It has been observed that the insufficient bearing capacities of the columns in the existed building have become sufficient according to TS500 and TEC-2018.
- Due to the increased rigidity after strengthening, the displacements in the building decreased for all combination cases stated in TS500.
- The predominant period of the building was decreased from 2.14 seconds to 0.60 seconds after the strengthening process.
- Depending on the change in the period of the building, the horizontal and vertical earthquake

accelerations acting on the building increased by 294% and 400%, respectively. Additional forces due to this increase were safely carried by reinforced concrete shear walls and strengthened columns.

- The moment carrying capacity of the strengthened beams raised up to 5 times, and at this level, the rotation decreased by three fourths due to the increase in flexural stiffness.

- When compared to unstrengthened ones, in case of zero moment, the axial compressive force bearing capacity and the axial tensile force bearing capacity of the reinforced concrete columns increased up to 3 and 5 times, respectively. Whereas, in case of zero axial force, the moment carrying capacity of the rehabilitated columns increased up to 6,6 times.

It is revealed that the existing un-strengthened reinforced concrete buildings can be aligned with the current earthquake regulations and specifications by adding a new reinforced concrete layer to the load-carrying members and placing additional reinforced concrete shear walls on the structure. However, cost which is considered as one of the main factors in building management should also be taken into account. The author recommends comparing the expenses of the reconstruction and the strengthening of the building in future studies.

## (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT) (ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ)

The authors declare that there is no conflict of interest.

## REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] M. Rodriguez and P. Robert, "Seismic load tests on reinforced concrete columns strengthened by jacketing", *Structural Journal*, vol. 91, no. 2, pp.150-159, Mar. 1994.
- [2] D. R. Stoppenhagen, O. J. James and A. W. Loring, "Seismic repair and strengthening of a severely damaged concrete frame", *Structural Journal*, vol. 92, no. 2, pp. 177-187, Mar.1995.
- [3] E. S. Julio, F. Branco and V. D. Silva. "Structural rehabilitation of columns with reinforced concrete jacketing", *Progress in Structural Engineering and Materials*, vol. 5, no. 1, pp. 29-37, Feb. 2003. doi: 10.1002/pse.140
- [4] E. S. Júlio, F. Branco and V. D. Silva, "Reinforced concrete jacketing-interface influence on monotonic loading response," *ACI structural journal*, vol. 102, no. 2, pp. 252-257, Apr. 2005.

- [5] E. S. Júlio, F. Branco and V. D. Silva, "Concrete-to-concrete bond strength. Influence of the roughness of the substrate surface", *Construction and building materials*, vol. 18, no. 9, pp. 675-681, Nov. 2004. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.023
- [6] L. L. Chung, L. Y. Wu and K. H. Lien, "Experimental study on retrofit of school buildings by adding sandwich columns to partition brick walls", *Earthquake engineering & structural dynamics* vol. 40, no. 13, pp. 1417-1434, Jan. 2011. doi: 10.1002/eqe.1092
- [7] Y. H. Chai, M. J. N. Priestley and F. Seible, "Analytical model for steel-jacketed RC circular bridge columns", *Journal of Structural Engineering* vol. 120, no. 8, pp. 2358-2376, Aug. 1994. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:8(2358)
- [8] S. Altin, Ö. Anil and M. E. Kara, "Improving shear capacity of existing RC beams using external bonding of steel plates", *Engineering structures*, vol. 27, no. 5, pp. 781-791, Apr. 2005. doi: 10.1016/j.engstruct.2004.12.01
- [9] S. Altin, Y. Koprman and M. Baran, "Strengthening of RC walls using externally bonding of steel strips", *Engineering Structures*, vol. 49 pp. 686-695, Apr. 2013. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.12.022
- [10] C. Mahrenholtz, P. C. Lin, A. C. Wu, K. C. Tsai, S. J. Hwang, R. Y. Lin and M. Y. Bhayusukma, "Retrofit of reinforced concrete frames with buckling-restrained braces", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 44, no. 1, pp. 59-78, July 2015. doi: 10.1002/eqe.2458
- [11] J. Shafaei, A. Hosseini, M. S. Marefat and J. M. Ingham, "Rehabilitation of earthquake damaged external RC beam-column joints by joint enlargement using prestressed steel angles", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* vol. 46, no. 2 pp. 291-316, Aug. 2017. doi: 10.1002/eqe.2794
- [12] S. Altin, Ö. Anil, M. E. Kara and M. Kaya, "An experimental study on strengthening of masonry infilled RC frames using diagonal CFRP strips", *Composites Part B: Engineering*, vol. 39, no. 4 pp. 680-693, June 2008. doi: 10.1016/j.compositesb.2007.06.001
- [13] S. Altin, Ö. Anil, Y. Koprman and M. E. Kara, "Hysteretic behavior of RC shear walls strengthened with CFRP strips", *Composites Part B: Engineering*, vol. 44, no. 1, pp. 321-329, Jan. 2013. doi: 10.1016/j.compositesb.2012.05.009
- [14] S. Altin, Ö. Anil, Y. Koprman, Ç. Mertoğlu and M. E. Kara, "Improving shear capacity and ductility of shear-deficient RC beams using CFRP strips", *Journal of reinforced plastics and composites*, vol. 29, no. 19, pp. 2975-2991, Apr. 2010. doi: 10.1177/0731684410363182
- [15] A. Herwig and M. Motavalli "Axial behavior of square reinforced concrete columns strengthened with lightweight concrete elements and unbonded GFRP wrapping", *Journal of Composites for Construction*, vol. 16, no. 6, pp. 747-752, Dec. 2012. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000310
- [16] Y. M. Hu, T. Yu and J. G. Teng, "FRP-confined circular concrete-filled thin steel tubes under axial compression", *Journal of Composites for Construction*, vol. 15, no. 5, pp. 850-860, Oct. 2011. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000217
- [17] A. Parvin and A. Brighton, "FRP composites strengthening of concrete columns under various loading conditions", *Polymers* vol. 6, no. 4, pp. 1040-1056, Apr. 2014. doi: 10.3390/polym6041040
- [18] K. Olivova and J. Bilcik "Strengthening of concrete columns with CFRP", *Slovak Journal of Civil Engineering*, vol. 1, pp. 1-9, Jan. 2009.
- [19] J. A. O. Barros, R. K. Varma, M. Sena-Cruz and A. F. M. Azevedo, "Near surface mounted CFRP strips for the flexural strengthening of RC columns: Experimental and numerical research", *Engineering Structures* vol. 30, no. 12, pp. 3412-3425, Dec. 2008. doi: 10.1016/j.engstruct.2008.05.019
- [20] D. L. Lorenzis, A. Nanni and L. A. Tegola, "Strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods", *In International meeting on composite materials, PLAST*, pp. 9-11. May. 2000.
- [21] G. Ze-Jun, J. C. Michael, C. Tsu-Wei and Y. C. P. David, "The retrofitting of reinforced concrete column-to-beam connections", *Composites science and technology* vol. 58, no. 8, pp. 1297-1305, Aug. 1998. doi: 10.1016/S0266-3538(98)00014-1
- [22] S. A. Sheikh, "Performance of concrete structures retrofitted with fibre reinforced polymers", *Engineering structures* vol. 24, no. 7, pp. 869-879, July 2002. doi: 10.1016/S0141-0296(02)00025-1
- [23] M. A. ElGawady, P. Lestuzzi and M. Badoux "Shear strength of URM walls retrofitted using FRP", *Engineering structures* vol. 28, no. 12, pp. 1658-1670, Oct. 2006. doi: 10.1016/j.engstruct.2006.03.005

[24] H. Wei, Z. Wu, X. Guo and F. Yi, "Experimental study on partially deteriorated strength concrete columns confined with CFRP", *Engineering Structures*, vol. 31, no. 10, pp. 2495-2505, Oct. 2009. doi: 10.1016/j.engstruct.2009.05.006

[25] W. W. Chen, Y. K. Yeh, S. J. Hwang, C. H. Lu and C. C. Chen, "Out-of-plane seismic behavior and CFRP retrofitting of RC frames infilled with brick walls", *Engineering Structures*, vol. 34, pp.213-224, Jan. 2012. doi: 10.1016/j.engstruct.2011.09.015

[26] Y. T. Obaidat, G. Abu-Farsakh and A. M. Ashteyat, "Retrofitting of partially damaged reinforced concrete beam-column joints using various plate-configurations of CFRP under cyclic loading", *Construction and Building Materials*, vol. 198, pp. 313-322, Feb. 2019. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.267

[27] T. C. Triantafillou, C. G. Papanicolaou, P. Zissimopoulos and T. Laourdekis, "Concrete confinement with textile-reinforced mortar jackets", *ACI structural journal*, vol. 103, no. 1, pp. 28-37, Feb. 2006.

[28] D. A. Bournas, P. Lontou, C. G. Papanicolaou and T. C. Triantafillou "Textile-reinforced mortar versus fiber-reinforced polymer confinement in reinforced concrete columns", *ACI Structural Journal* vol. 104, no. 6, pp. 740-748, Nov. 2007.

[29] J. Francisco, D. C. Y. Basalo, F. Matta and A. Nanni, "Fiber reinforced cement-based composite system for concrete confinement", *Construction and Building Materials*, vol. 32, pp. 55-65, July 2012. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.063

[30] S. Aykac, I. Kalkan and T. Tankut, "Flexural strengthening and repair of RC slabs by adding a new RC layer", *Structural Concrete*, vol. 17, no. 5, pp. 869-909, Apr. 2016. doi: 10.1002/suco.201500182

[31] S. Aykac, E. Özbek, and T. Tankut, (2021). "Cyclic behavior of beams rehabilitated by reinforced concrete layers", *Structural Concrete*, vol. 22, pp. 2029-2048, Sep. 2021. doi: 10.1002/suco.202000296

[32] İ. U. Çağdaş and Ö. Yıldırım, "Cam Elyaf Takviyeli Poliüretan Dış Yüzlü Sandviç Kirişlerin Eğilme Rijitliklerinin Konsol Kiriş Titreşim Deneyi İle Belirlenmesi", *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, vol. 5, no. 3, pp. 273-279, Dec. 2020, doi:10.30855/gmbd.2019.03.08.

[33] Ö. Çiçek and M. Özdemir, "Örnek Bir Hidroelektrik Santrali İçin Pompaj Depolamalı

Hidroelektrik Santrali Tasarımı", *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, vol. 7, no. 1, pp. 26-35, Apr. 2021. doi: 10.30855/gmbd.2021.01.04

[34] A. Demiröz and R. Bozkurt, "Investigation of Soil Dynamic Behavior by Using Equivalent Linear Analysis Method: Example of Aksaray Doğantarla", *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, vol. 6, no. 2, pp. 160-171, Aug. 2020. doi: 10.30855/gmbd.2020.02.08

[35] O. Doğan and Y. Genç, "Türk Bina Deprem Yönetmeliği'ne Göre Düşey Deprem Kuvvetinin İkinci Mertebeden Taban Momentlerine Etkisi", *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, vol. 5, no. 3, pp. 244-249, Dec. 2020, doi:10.30855/gmbd.2019.03.05.

[36] M. Işık, E. Işık and E. Haricihian, "Application of IOS/Android Rapid Evaluation of Post-Earthquake Damages in Masonry Buildings", *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, vol. 7, no. 1, pp. 36-50, Apr. 2021. doi: 10.30855/gmbd.2021.01.05

[37] M. A. Kalaylı and O. Doğan, "Binalarda Yükseklik/Genişlik Oranı Ve Zemin Yatak Katsayısına Bağlı Devrilme Analizi", *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, vol. 5, no. 3, pp. 300-314, Dec. 2020, doi:10.30855/gmbd.2019.03.11.

[38] E. Tekin, G. Dönder and N. Ünsal, "Topçam Tüneli Deformasyonlarının Rastgele Küme Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Hesaplanması", *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, vol. 5, no. 2, pp. 115-127, Aug. 2019. doi: 10.30855/gmbd.2019.02.01

[39] N. Ünsal, E. Tekin and G. Arslan, "Köprübaşı Barajının Oturma Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Hesaplanması", *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, vol. 5, no. 1, pp. 101-114, Apr. 2019. doi: 10.30855/gmbd.2019.01.10

This is an open access article under the CC-BY license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)





## Elektrikli Araçlarda Batarya Şarj Ünitesi için LLC Rezonans Dönüştürücünün Kurulumu, Modellemesi ve Analizi

Ünal YILMAZ<sup>\*a</sup>, Ali KIRÇAY<sup>b</sup>

<sup>a\*</sup> Harran Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 63000, Şanlıurfa, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 30.03.2021  
Kabul: 30.11.2021

#### Anahtar Kelimeler:

Elektrikli Araçlar,  
Batarya Şarj Ünitesi,  
LLC Rezonans  
Dönüştürücü

### ÖZ

Bu çalışmada, elektrikli araçların batarya şarj ünitelerine uyumlu bir yarım köprü yalıtımlı LLC rezonans dönüştürücü modellemesi, kurulumu ve analizi yapılmıştır. Önerilen çalışmanın laboratuvar ortamında kurulumu için F28027 DSP tabanlı kontrol kartı ve 'TMDSHVRESLLCKIT' geliştirme kiti kullanılmıştır. Ayrıca, önerilen çalışmanın analiz aşaması için, 300 W gücünde, 380 V giriş gerilimi ve 12 V çıkış geriliminde bir LLC rezonans dönüştürücü PI tabanlı kontrol yöntemi ile modellenmiştir. Analizi yapılan çalışma, ani değişen giriş gerilimi (380 V-400 V) ve 4 farklı yük durumunda (%100, %75, %50, %25) incelenmiştir. Analiz çalışmasının benzetim ortamında gerçekleştirilmesi için Matlab/Simulink programı kullanılmıştır.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.12>

## Installation, Modeling and Analysis of LLC Resonance Converter for Battery Charger in Electric Vehicles

### ARTICLE INFO

Received: 30.03.2021  
Accepted: 30.11.2021

#### Keywords:

Electric Vehicles,  
Battery Charger, LLC  
Resonance Converter

### ABSTRACT

In this study, a half-bridge isolated LLC resonance converter modeling, installation and analysis is performed, which is compatible with the battery charging units of electric vehicles. F28027 DSP-based control card and 'TMDSHVRESLLCKIT' development kit were used for the setup of the proposed study in the laboratory environment. In addition, for the analysis phase of the proposed study, an LLC resonance converter with 300 W power, 380 V input voltage and 12 V output voltage was modeled with PI-based control method. The analyzed study has been investigated in case of suddenly changing input voltage (380 V-400 V) and 4 different load conditions (100%, 75%, 50%, 25%). Matlab / Simulink program was used to carry out the analysis study in a simulation program.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.12>

Kısaltmalar ve Semboller			
EA	Elektrikli Araç	$Re$	AC eşdeğer yük
BŞÜ	Batarya Şarj ünitesi	$Ro$	Yük
PFC (Power Factor Correction)	Güç faktörü düzeltmesi	$Vin$	Giriş Gerilimi
EMI (Electromagnetic Interference)	Elektromanyetik Girişim	$Lm$	Manyetik Bobin
PWM (Pulse Width Modulation)	Darbe Genişlik Modülasyonu	$Qe$	Kalite Faktörü
AC	Alternatif Akım	$Ln$	Bobin katsayı
DC	Doğru Akım	$fp$	Düşük Frekans Sınırı
$Lr$	Rezonans Bobini	$P$	Güç
$Cr$	Rezonans Kapasitör	$Vo$	Çıkış gerilimi
$Fsw$	Anahtarlama Frekansı	$fco$	Rezonans Frekansı

\*Sorumlu yazar: uyilmaz@harran.edu.tr

To cite this article: Ü. Yılmaz and A. Kıryaç, "Installation, Modeling and Analysis of LLC Resonance Converter for Battery Charger in Electric Vehicles", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 298-308, 2021.  
doi:10.30855/gmbd.2021.03.12

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrikli araçlarda batarya şarj üniteleri literatürde dâhili (On-board) ve harici (Off-board) olmak üzere iki farklı başlık altında incelenmektedir. Harici batarya şarj üniteleri bataryayı şarj etmek için dc akımını kullanır, bu da şarj istasyonunda ac-dc dönüştürme işleminin gerçekleştiği anlamına gelir. Harici batarya şarj ünitelerinin en önemli avantajları, yüksek güç yoğunluğudur, bu da şarj süresini önemli ölçüde kısaltır ve batarya şarj ünitesi arabanın içinde olmadığı için yer tasarrufu sağlar. Bununla birlikte, karmaşık batarya yönetim sistemi, bataryada aşırı ısınma sorunu ve yüksek güç gereksinimi gibi önemli dezavantajlar vardır. Bu zorluklar nedeniyle, EA'lar için off-board batarya şarj üniteleri genellikle tercih edilmemektedir [1]. Diğer taraftan, dâhili batarya şarj üniteleri (BŞÜ) EA'ların ev ve ofislerde mevcut standart bir prizi kullanarak bataryayı şarj etmelerine izin verir. BŞÜ'lerin ana parçaları; Şekil 1 (b) 'de detaylıca gösterilmektedir.

Dâhili batarya şarj üniteleri, tek kademeli ve iki kademeli olmak üzere iki farklı topoloji olarak incelenmektedir. Tek kademeli batarya şarj üniteleri, kolay uygulanabilirlik, düşük gerilim kademesinde çalışırken yüksek etkinliğe sahip olmaları, düşük uygulama maliyeti ve yüksek verimlilik (düşük dönüştürme aşaması) gibi bazı avantajlara sahiptir. Ancak, tek kademeli batarya şarj cihazları, düşük güç ( $\leq 1\text{kW}$ ) uygulamaları için uygundur ve bu topolojinin önemli dezavantajlarından biri, gerilim dalgalanmasını en aza indirmek için büyük bir çıkış elektrolit kapasitörü gerektirir [2-8]. Bir diğer dâhili batarya şarj ünitesi modeli ise iki kademeli batarya şarj ünitesidir. İyi tasarlanmış iki kademeli batarya şarj üniteleri; yüksek güç yoğunluğu, düşük harmonik, yüksek verimlilik ve yüksek güç faktörü gibi ciddi avantajlara sahip iken yüksek maliyet ve karmaşık kontrol yöntemleri gibi dez avantajları da mevcuttur.

İki kademeli batarya şarj ünitelerinin ilk kademesi, güç faktörü düzenleyicisi (PFC) ile birlikte performans gösteren bir ac-dc dönüştürücü devresi iken ikinci kademesi ise, galvanik yalıtımlı dc-dc dönüştürücülerdir. İki kademeli BŞÜ'lerin, güç yoğunluğu, verimlilik, güvenilirlik ve yaşam süresi gibi bazı özelliklerini iyileştirmek ve performansını artırmak için dc-dc dönüştürücülerin eksik yönlerinin iyileştirilmesi önemli bir rol oynar [9], [10], [11].

LLC rezonans dönüştürücüler, yüksek güç yoğunluğu, yüksek verimlilik ve maliyet etkinliği

yönünden avantaj sağladığından dolayı, farklı endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca, LLC rezonans dönüştürücülerde anahtarlama elemanı (MOSFET)'lerin açılıp kapanma işlemlerinde yumuşak anahtarlama olanak sağladığından dolayı anahtarlama kayıpları oldukça düşüktür.

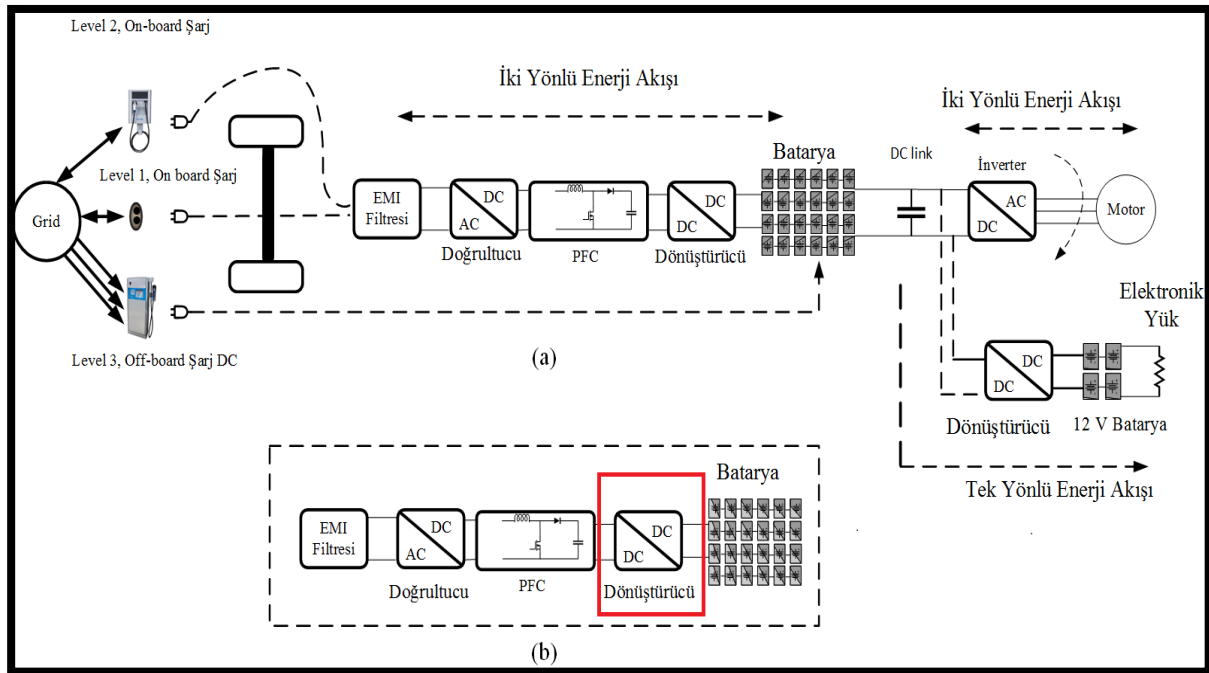
Bu çalışmada Elektrikli araçların batarya şarj ünitelerinde kullanılabilen bir yarım köprü LLC rezonans dönüştürücü labaratuvar ortamında ve benzetim programında kurulup analiz edilmiştir. Ayrıca kolay uygulanabilir, verimlilik ve güvenilirlik gibi önemli avantajlara sahip olduğundan dolayı bu çalışmada çıkış gerilim kontrolü için PI kontrol yöntemi tercih edilmiştir [12].

Önceki çalışmalar incelendiğinde, [13]'te hibrit elektrikli araçların batarya şarj ünitesi için bir LLC rezonans dönüştürücü tasarlanmış ve geleneksel yöntemlere göre temel harmonik yaklaşımlarının sebep olduğu hataları azaltmak için çalışma modu düzenlemesi gerçekleştirilmiştir. Önerilen çalışma için 3.3 kW'lık bir örnek devre adım adım tasarlanmış ve maksimum verimlilik %98.2 olarak bulunmuştur.

[14]'te, sıfıra yakın çıkış gerilimi, sıfır çıkış akımından maksimum çıkış gücüne kadar, bataryanın akım-gerilim düzlemindeki neredeyse tüm bölgeleri kapsayabilen çok yönlü bir L3C2 rezonans dönüştürücü önerilmiştir. Önerilen çalışmanın doğruluğunu kanıtlamak için 950 W gücünde bir örnek devre modellenmiş ve maksimum %96 verimliliğe ulaştığı belirtilmiştir.

[15]'te elektrikli araçlarda batarya şarj ünitesi için için paralel iki transformatörlü yeni bir LLC rezonans dönüştürücü önerilmiştir. Önerilen topolojide, şarj süresi boyunca sıfır gerilim anahtarlama olanak sağladığı için anahtarlama kayıpları azaltılmıştır. Ek olarak, önerilen çalışmada, batarya sistemi için geniş bir çıkış gerilim aralığı sağlanmıştır. Önerilen çalışmanın doğruluğunu desteklemek için 700 W gücünde bir örnek devre oluşturulmuştur. Önerilen çalışmada yaklaşık %93.6 verimliliğe ulaştığı belirtilmiştir.

Referans [16]'da hafif elektrikli araçların batarya şarj ünitesi için yumuşak anahtarlama yapabilen LLC rezonans dönüştürücü ve şarj işlemi için yeni bir kontrol algoritması önerilmiştir.



Şekil 1. EA'lar için Genel Güç Koşullandırma Ünitesi (a), On-board batarya şarj ünitesi (b).  
(General Power Conditioning Unit (a), On-board battery charger (b) for EVs.)

Önerilen çalışmanın doğruluğunu desteklemek için 1 ve 1.5 kW gücünde devre modellemesi ve deneysel analizi yapılmış ve sonuçta yaklaşık %96.4

oranında bir verimlilik elde edilmiştir. Tablo 1 de önceki çalışmaların detaylı elektriksel özellikleri sunulmuştur.

Tablo 1. Literatürdeki çalışmaların elektriksel özellikleri (Electrical characteristics of studies in the literature)

Ref.	Güç (W)	Giriş Gerilimi (V)	Çıkış Gerilimi (V)	Verim ( $\eta$ )	Anah. Frekansı
[10]	3.1 kW	400 V	120 V	96.2%	85-100 kHz
[11]	3.1 kW	400-120 V	120-24 V	95.3%	85 Hz
[13]	3.3 kW	390 V-420 V	250 V -450 V	98.2%	150 kHz
[14]	950 W	400 V	96 V	96%	145 kHz
[15]	700 W	400 V	36 V-58 V	93.6%	100 kHz
[16]	1- 1.5 kW	250 V-310 V	25.6 V-33.6 V	96.4%	30-100 kHz
[17]	2 kW	---	---	95%	---
[18]	345 W	390 V	57.6 V	96.3%	150 kHz
[19]	500 W	330 V	12 V	---	200 kHz
[20]	7.5 kW	340 V -360 V	150 V -500 V	98%	115 kHz
[21]	---	400 V	350 V	---	100 kHz

Elektrikli araçlarda tüm güç devreleri bataryalardan beslendiği için batarya teknolojisi elektrikli araçlar için hayati öneme sahiptir.

Elektrikli araçlarda kullanılan batarya çeşitleri ve genel özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur [22].

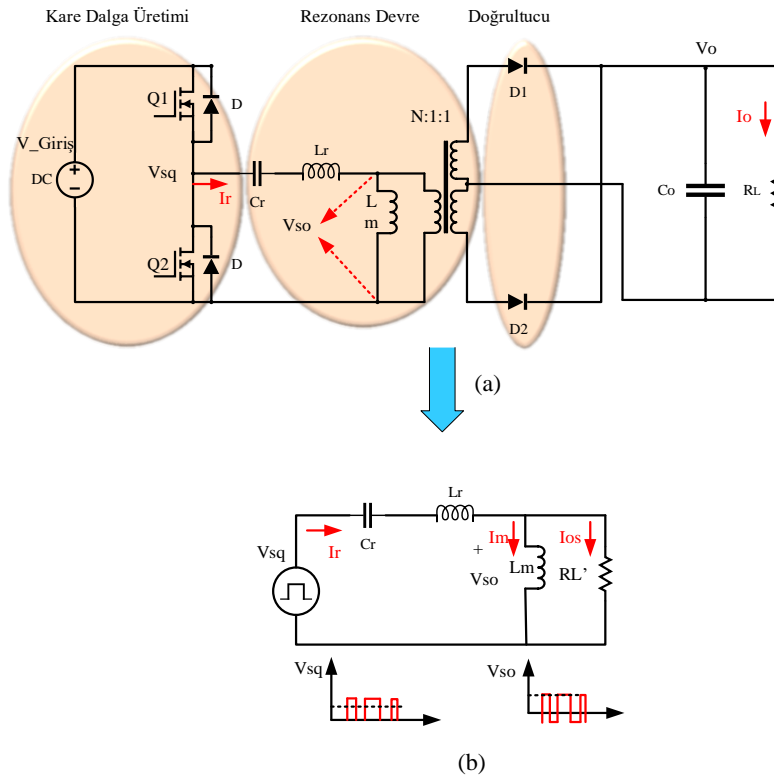
Tablo 2. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Çeşitleri (Types of Batteries Used in Electric Vehicles) [22]

Batarya Çeşitleri	Nominal Gerilim (V)	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Üretim Maliyeti (\$/kWh)
Kurşun asit (Pb-Acid)	2	35	-15≤T≤+50	60
Nikel Kadmiyum (Ni-Cd)	1.2	50-80	-20≤T≤+50	250-300
Nikel Metal	1.2	70-95	-20≤T≤+60	200-250
Zebra (Ni-Mh)	2.6	90-120	+245≤T≤+350	230-345
Lityum-İyon (Li-ion)	3.6	118-250	-20≤T≤+60	150
Lityum-İyon Polimer (Li-Po)	3.7	130-225	-20≤T≤+60	150
Lityum-İyon Fosfat (LiFePO4)	3.2	120	-45≤T≤+70	350
Çinko-Hava (Zn-Air)	1.65	460	-10≤T≤+55	90-120
Lityum-Sülfür (Li-S)	2.5	350-650	-60≤T≤+60	100-150
Lityum-hava (Li-air)	2.9	1300-2000	-10≤T≤+70	----

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

LLC rezonans dönüştürücü, yüksek verimliliği, düşük elektromanyetik paraziti (EMI), geniş yük gerilimi çalışma aralığı ve ayrıca yüksek güç yoğunluğu altında performans gösterme yeteneği ile dikkat çekici bir yalıtımlı devre modeli haline

gelmiştir. Fakat, LLC rezonans dönüştürücülerinin yüksek frekanslı işlemlerde bazı sorunları vardır, bunlar parazittik kapasitans ve kaçak endüktansa daha yüksek duyarlılık, anahtarlama cihazlarında daha yüksek stres ve artan EMI'dir. Yarım köprü LLC rezonans dönüştürücünün devre yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir [23-26].



Şekil 2. LLC rezonans dönüştürücü (a), AC eşdeğer devre (b) (LLC resonant Converter (a), AC equivalent circuit (b))

Yarım köprü LLC seri Rezonans dönüştürücü tasarımı için aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır. Anahtarlama frekansının eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (1)$$

Çıkış gerilimini kontrol edebilmek için frekans kontrolü gerekir bundan dolayı tepe rezonans ( $f_{co}$ ) değeri rezonans frekansına eşit olmalıdır. Manyetik indüktans  $L_m$  devreye eklenince tepe rezonans frekansı yük değerinin bir fonksiyonu haline gelir. Yük değişimi frekans değerini etkileyeceğinden dolayı bu durumda rezonans frekansı  $f_p \approx f_0 \approx f_{co}$  olmalıdır. Kutup frekansının eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_m)C_r}} \quad (2)$$

Bu durumda devre yüksüz ise  $f_p = f_{co}$  olur. Yük arttıkça  $f_{co}$  yavaş yavaş  $f_0$ 'a yaklaşır ve kısa devre durumunda ise  $f_{co} = f_0$  olur [23]. Giriş kare dalga geriliminin temel harmonik eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$v_{ge}(t) = \frac{2}{\pi} * V_{DC} * \sin(2\pi f_{sw}t) \quad (3)$$

Etkin değerinin ise eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$V_{ge} = \frac{2}{\pi} * V_{DC} \quad (4)$$

Çıkış tarafında ise kare dalganın temel gerilim eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$v_{oe}(t) = \frac{4}{\pi} \cdot n \cdot V_o \cdot \sin(2\pi f_{sw}t - \theta_v) \quad (5)$$

$\theta_v$ ,  $V_{ge}$  ve  $V_{oe}$  arasındaki faz açısıdır. Çıkış geriliminin etkin değerinin eşitliği aşağıdaki gibidir [23].

$$V_{oe} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} * n * V_o \quad (6)$$

$V_{oe}$  değerine karşılık gelen akım değerinin ( $I_{oe}$ ) eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$I_{oe}(t) = \frac{2}{\pi} * \frac{1}{n} * I_o * \sin(2\pi f_{sw}t - \theta_i) \quad (7)$$

$\theta_i$ ,  $V_{oe}$  ve  $I_{oe}$  arasındaki faz açısıdır. Çıkış akımının etkin değerinin eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$I_{oe} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} * \frac{1}{n} * I_o \quad (8)$$

Yükün AC eşdeğerinin eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$R_e = \frac{V_{oe}}{I_{oe}} = \frac{8 * n^2 V_o}{\pi^2 I_o} = \frac{8 * n^2}{\pi^2} R_L \quad (9)$$

Gerilim kazancının eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$M_g = \frac{V_{oe}}{V_{ge}} = \frac{JX_{Lm} // R_e}{|(JX_{Lm} // R_e) + j(X_{Lr} - X_{Cr})|} = \frac{JwL_m // R_e}{|(JwL_m // R_e) + JwL_r + \frac{1}{JwC_r}|} \quad (10)$$

Son durumda çıkış geriliminin eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$V_o = M_g * \frac{1}{n} * \frac{V_{in}}{2} \quad (11)$$

Giriş kısmında ise iki bobin değeri, tek bir bobin gibi düşünülür ve eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$L_n = \frac{L_m}{L_r} \quad (12)$$

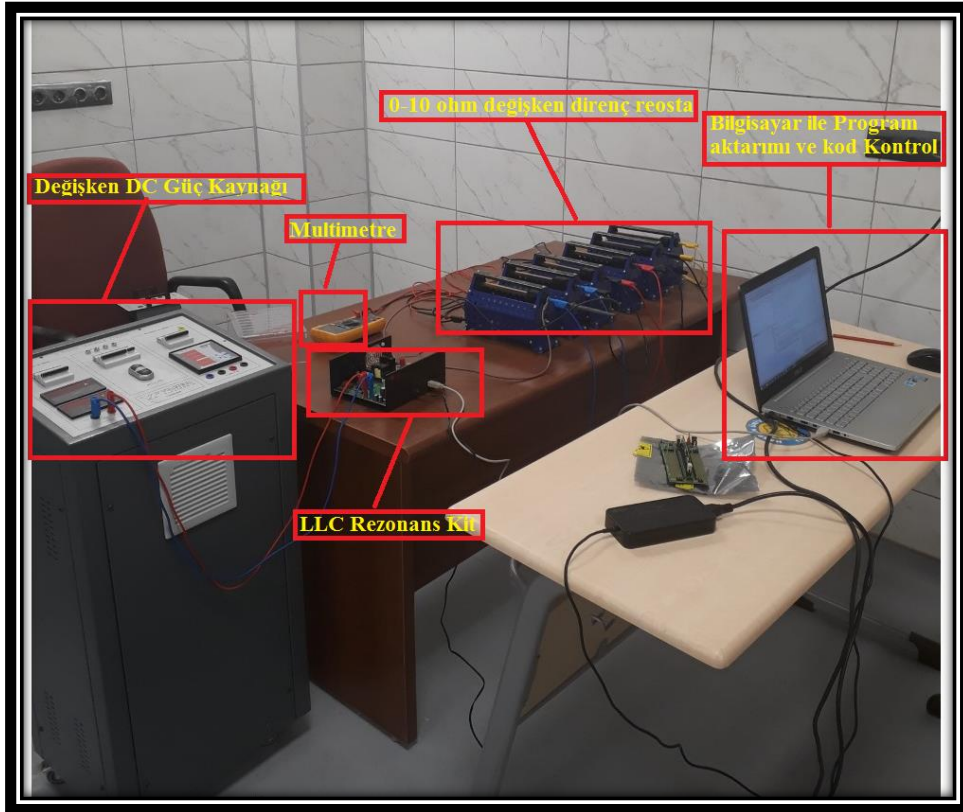
Kalite faktörünün eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$Q_e = \frac{\sqrt{L_r / C_r}}{R_e} \quad (13)$$

Eşitliklerde kullanılan ifadeler açıklanacak olursa;  $L_r$  rezonans bobini,  $L_m$  manyetik bobin,  $C_r$  rezonans kapasitörü,  $M_g$  gerilim kazancı,  $V_{DC}$  giriş gerilimi,  $V_o$  çıkış gerilimi,  $I_o$  çıkış akımı,  $n$  trafo dönüştürme oranı,  $f_{sw}$  anahtarlama frekansı [23].

## 2.1. LLC Rezonans Dönüştürücü devresinin Laboratuvar Ortamında Kurulumu (*Installation of the LLC Resonant Converter circuit in a Laboratory Environment*)

LLC Rezonans dönüştürücünün laboratuvar ortamında kurulması Şekil 3'te detaylıca gösterilmiştir. Deney seti Değişken DC güç kaynağı, 0-10 ohm 30 Ampere kadar dayanıklı Değişken yük, Multimetre, Yüksek gerilimli LLC Rezonans devresi, program çalıştırmak ve kontrol etmek için bir adet bilgisayardan oluşmuştur.



Şekil 3. LLC Rezonans Dönüştürücü Devresi ve deney setinin Laboratuvar ortamında Kurulumu  
(Installation of LLC Resonant Converter Circuit and Experiment Set in Laboratory Environment)

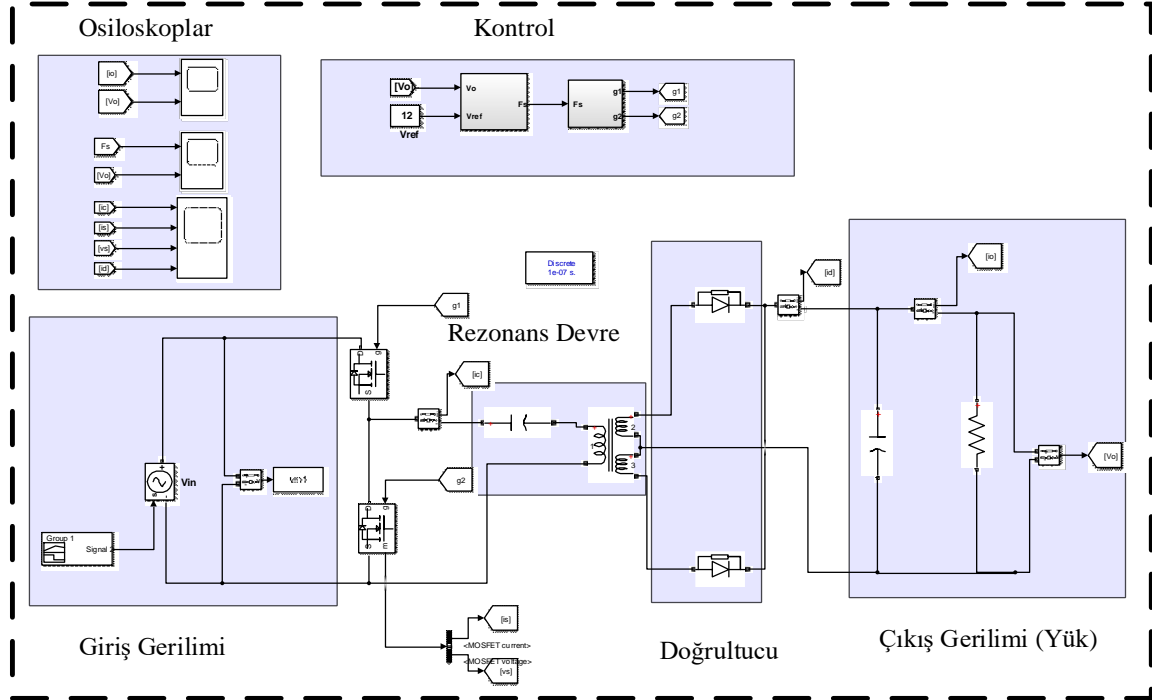
## 2.2. LLC Rezonans Dönüştürücü devresinin Benzetim Ortamında Kurulması (Setting up the LLC Resonant Converter circuit in a Simulated Environment)

Yarım köprü LLC Rezonans Dönüştürücünün Matlab/Simulink benzetim ortamındaki kurulumu

Şekil 4'te gösterilmiştir. Tasarımı yapılan yarım köprü seri LLC rezonans dönüştürücünün tüm elektriksel özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. LLC Rezonans Dönüştürücünün Elektriksel Özellikleri (Electrical Characteristics of LLC Resonant Transducer)

İsim	Sembol	Değer	İsim	Sembol	Değer
Rezonans Bobini	$L_r$	76.186 $\mu$ H	Manyetik Bobin	$L_m$	207.779 $\mu$ H
Rezonans Kapasitör	$C_r$	33.248 nF	Kalite Faktörü	$Q_e$	0.4
Anahtarlama Frekansı	$F_{sw}$	100 kHz	Bobin katsayı	$L_n$	5
AC eşdeğer yük	$R_e$	119.67	Düşük Frekans Sınırı	$F_p$	55.277 kHz
Yük	$R_o$	0.48 $\Omega$	Güç	$P$	300 W
Giriş Gerilimi	$V_{in}$	380 V	Çıkış gerilimi	$V_o$	12 V
Oransal Kazanç	$K_p$	2.283	Integral Kazanç	$K_i$	7.623

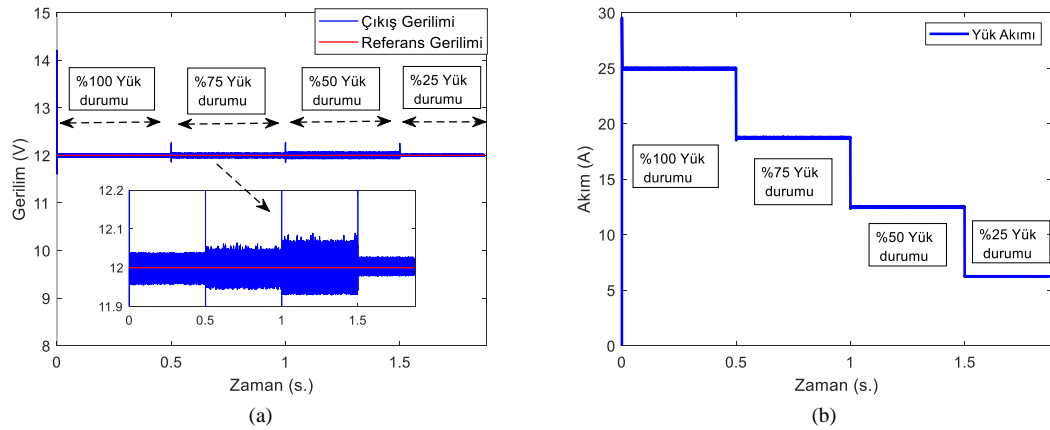


Şekil 4. Rezonans dönüştürücü benzetim ortamındaki kurulumu (Installation in resonant transducer simulation environment)

### 3. BULGULAR VE ANALİZ (FINDINGS AND ANALYSIS)

LLC Rezonans dönüştürücünün 4 farklı yük durumunda (%100, %75, %50, %25) çıkış gerilimi, referans sinyali ve yük akımı Şekil 5 te gösterilmiştir. Çıkış gerilim dalgalanması 0.1 V ( $\leq 1\%$ ) tan küçük olduğu şekilde görülmektedir.

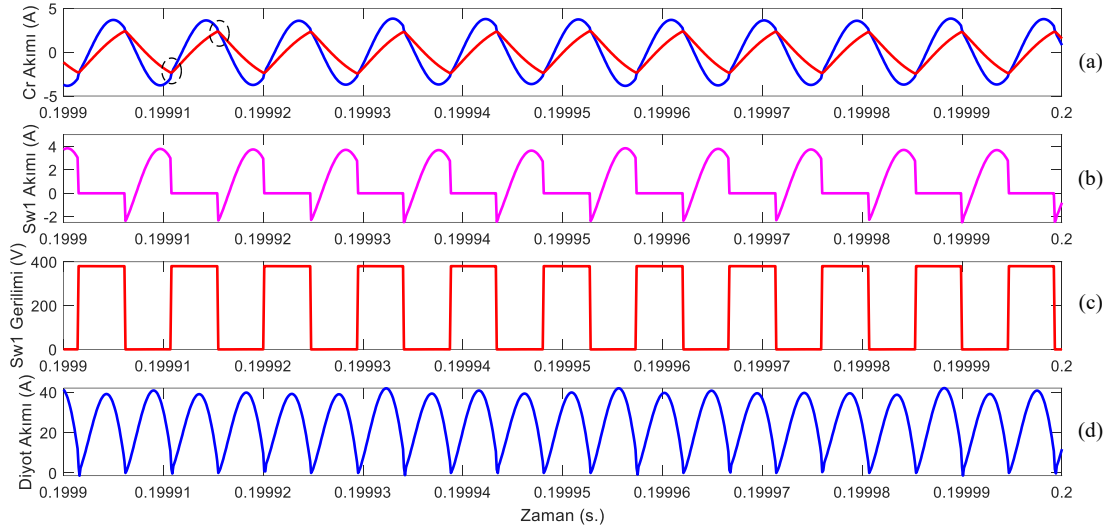
Batarya tam yük durumunda 25 A akım çekmesine rağmen %25 yük durumunda ise 5A akım çekmektedir. Değişen yük durumunda Sabit gerilimde şarj işlemi gerçekleştirebilmek için PI tabanlı kontrol yöntemi ile gerilim 12 V ta sabit tutulmuştur.



Şekil 5. (a) Çıkış gerilimi ve referans sinyali, (b)Yük akımı ((a) Output voltage and reference signal, (b) Load current)

Şekil 6 da rezonans kapasitör akımı trafonun manyetik bobin akımı, anahtar akımı (Mosfet1) Anahtar gerilimi (Mosfet1) ve diyot akımı detaylıca gösterilmiştir. Rezonans kapasitör akımı ve

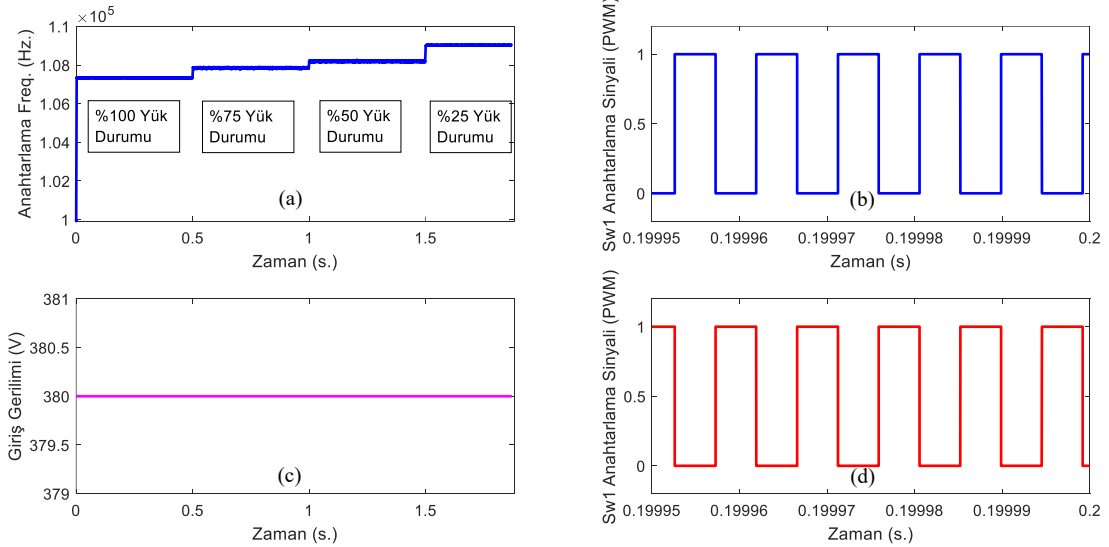
manyetik bobin akımı incelendiğinde rezonans noktaları tespit edilebilmektedir.



Şekil 6. LLC Rezonans dönüştürücü elektriksel karakteristikleri, (a) Rezonans kapasitör akımı, (b) Anahtar (Mosfet) akımı, (c) Anahtar (Mosfet) gerilimi, (d) diyot akımı (*LLC Resonant converter electrical characteristics, (a) Resonant capacitor current, (b) Switch (Mosfet) current, (c) Switch (Mosfet) voltage, (d) diode current*)

Anahtarlama frekansı rezonans dönüştürücü kontrolünde önemli bir parametre olduğundan dolayı değişen yük durumuna göre kontrol metodunun anahtarlama frekansına etkisi Şekil 7 de gösterilmiştir. Yük durumlarının değişmesinden

dolayı anahtarlama frekansı PI tabanlı kontrol yöntemi sayesinde düzenlenmektedir. Böylece yük akımı değişmesine rağmen çıkış gerilimi sabit tutulabilmektedir.

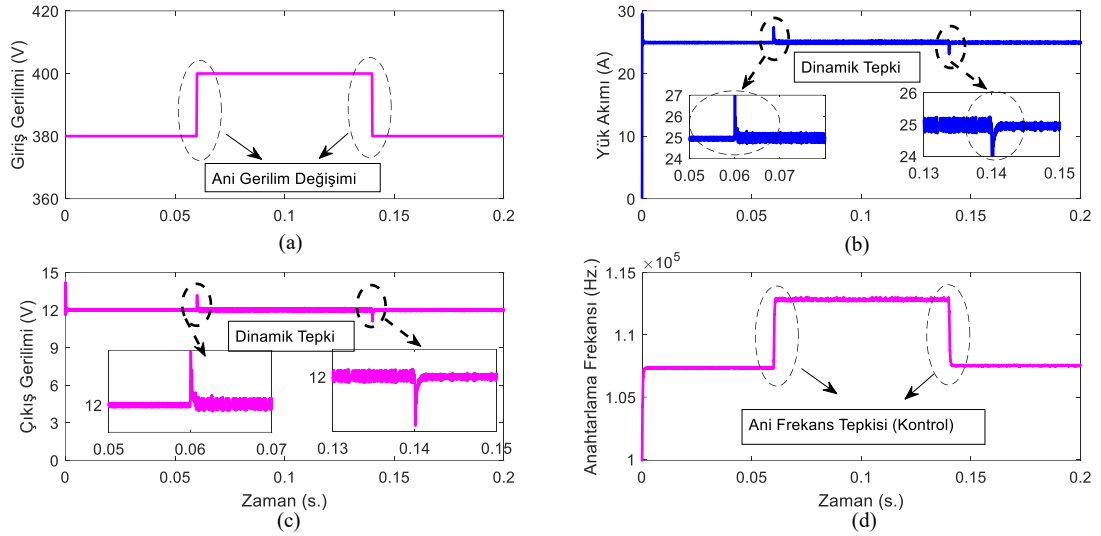


Şekil 7. (a) Anahtarlama Frekansı (b) Anahtarlama Sinyali (Mosfet1) (c) Anahtarlama, Giriş Gerilimi (d) Anahtarlama Sinyali (Mosfet2) (*(a) Switching Frequency, (b) Switching Signal (Mosfet1), (c) Switching, Input Voltage, (d) Switching Signal (Mosfet2)*)

Şebeke geriliminde olası ani değişiklikler DC-link geriliminde düzensizlik oluşturabilir. Bu durumda DC-link kontrolü sağlanana kadar LLC rezonans dönüştürücünün giriş gerilimi anlık olarak değişebilir, bu durumu test etmek amacı ile LLC rezonans dönüştürücünün giriş gerilimi anlık 380 V-

400 V arasında değiştirilerek PI kontrolün davranışı gözlemlenmiş ve PI kontrolün dinamik tepkisi Şekil 8 de gösterilmiştir. Ani giriş gerilimi değişikliğine rağmen PI kontrol yöntemi sayesinde çıkış gerilimi sabit tutularak bataryanın sabit gerilimde şarj edilebileceği gözlemlenmiştir.





Şekil 8. Giriş gerilimi değişiminin yarım köprü LLC rezonans dönüştürücü üzerindeki etkisi. (a) Giriş Gerilimi, (b) Çıkış akımı, (c) Çıkış Gerilimi, (d) Anahtarlama Frekansı (Effect of input voltage variation on half-bridge LLC resonant converter. (a) Input Voltage, (b) Output current, (c) Output Voltage, (d) Switching Frequency)

#### 4. SONUÇ (RESULTS)

Bu çalışmada Elektrikli araçlarda batarya şarj ünitesi için kullanılabilen izolasyonlu yarım köprü LLC rezonans dönüştürücü farklı yük durumları ve ani giriş gerilimi değişimlerinde test edilip sonuçlar alınmıştır. Giriş gerilimi 380 V olan ve çıkış gerilimi 12 V LLC rezonans dönüştürücü Matlab/Simulink ortamında tasarlanmış olup ayrıca laboratuvar ortamında kurulumu gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamı için Texas instrument 'Resonant LLC Half-Bridge DC/DC Converter' kiti kullanılmıştır.

Analiz çalışmasını detaylandırmak için girişte ani değişen gerilim verilmiş ve PI tabanlı kontrol yönteminin performansı Şekil 8'de gösterilmiştir. Ayrıca farklı yük koşullarında (%100, %75, %50, %25) test edilen LLC rezonans dönüştürücünün çıkış gerilimi, yük akımı ve frekans tepkisi Şekil 5 te detaylandırılmıştır. Analizi yapılan devrenin çıkış gerilim dalgalanması 0.1 V ( $\leq 1\%$ ) civarında ölçülmüştür. Sonuç olarak yalıtımlı yarım köprü LLC rezonans dönüştürücü modelinin; yüksek güç yoğunluğu, düşük anahtarlama kayıpları ve aynı zamanda tasarım yapılırken çıkış filtresine gereksinim duyulmaması gibi önemli avantajlara sahip olduklarından dolayı elektrikli araçların batarya şarj ünitesinde kullanılan dc-dc dönüştürücüler arasında ciddi adaylardan biri olarak düşünülebilir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: 19012. Çalışma laboratuvarının düzenlenmesinde yardımcı olan Serkan KAHRAMAN'a teşekkür ederiz.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] G. Waltrich and M.L. Heldwein, "Modeling and simulation of electric vehicles (EVs) and design of batteries for EVs," *IEEE Southern Power Conference, 2015, November 29th to December 2nd, 2015*.
- [2] C-Y. Oh, D-H. Kim, D-G. Woo, W-Y. Sung and B-K Lee, "A High-Efficient Non isolated Single Stage On-Board Battery Charger for Electric Vehicles," *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. 5746-5757, 2013.
- [3] S. Li, J. Deng and C.C. Mi, "Single-Stage Resonant Battery Charger with Inherent Power Factor Correction for Electric Vehicles," *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, vol. 62, no. 9, pp. 4336-4344, 2013.
- [4] S. Dusmez and A. Khaligh, "A Charge-Nonlinear-Carrier-Controlled Reduced-Part Single-Stage Integrated Power Electronics Interface for

Automotive Applications," *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, vol. 63, no. 3, pp. 1091-1103, 2014.

[5] B. Koushki, A. Safaee, P. Jain and A. Bakhshai, "Review and Comparison of Bi-Directional AC-DC Converters with V2G Capability for On-Board EV and HEV," *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC) 2014*, pp. 1-6.

[6] U.R. Prasanna, A.K. Singh and K. Rajashekara, "Novel Bidirectional Single-phase Single-Stage Isolated AC-DC Converter with PFC for Charging of Electric Vehicles," *IEEE Transactions On Transportation Electrification*, vol. 3, no. 3, pp. 536-544, 2017.

[7] H.S. Ribeiro and B.V. Borges, "High-Performance Voltage-Fed AC-DC Full-Bridge Single-Stage Power Factor Correctors with a Reduced DC Bus Capacitor," *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 29, no. 6, pp. 2680-2692, 2014.

[8] C.A. Cheng, C.H. Chang, T.Y. Chung and F.L. Yang, "Design and Implementation of a Single-Stage Driver for Supplying an LED Street-Lighting Module with Power Factor Corrections," *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 30, no. 2, pp. 956-966, 2015.

[9] M. Kwon, S. Choi, "An Electrolytic Capacitorless Bidirectional EV Charger for V2G and V2H Applications," *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 32, no. 9, pp. 6792-6799, 2013.

[10] U. Yılmaz, O. Turksoy and A. Teke, "Intelligent control of high energy efficient two-stage battery charger topology for electric vehicles," *Energy*, vol.186, 115825, 2019.

[11] U. Yılmaz, O. Turksoy and A. Teke, "Improving a battery charger architecture for electric vehicles with photovoltaic system," *J Energy Res.*, vol. 44, pp.4376-4394, 2020. doi: 10.1002/er.5211

[12] S. Alqahtani, S. Ganesan and M. A. Zohdy, "The Comparison between PI and PID Controllers in Engine Speed Control Model," *2020 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*, 2020, pp. 629-634. doi: 10.1109/EIT48999.2020.9208313.

[13] J. Deng, S. Li, S. Hu, C. C. Mi and R. Ma, "Design Methodology of LLC Resonant Converters for Electric Vehicle Battery Chargers," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 4, pp. 1581-1592, May 2014.

doi: 10.1109/TVT.2013.2287379.

[14] N. Shafiei and M. Ordonez, "Improving the Regulation Range of EV Battery Chargers with L3C2 Resonant Converters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 6, pp. 3166-3184, June 2015. doi: 10.1109/TPEL.2014.2336668.

[15] C.C Hua, Y.H Fang and C.W Lin, "LLC resonant converter for electric vehicle battery chargers," *IET Power Electron.*, Vol. 9, no. 12, pp. 2369-2376, 2016.

[16] D.H. Kim, M.S. Kim, S.H. Nengroo, C.H. Kim and H.J. Kim, "LLC Resonant Converter for LEV (Light Electric Vehicle) Fast Chargers," *Electronics*, vol. 8, no. 362, pp. 1-14, 2019.

[17] M. Li, Q. Chen, X. Ren, Y. Zhang, K. Jin and B. Chen, "The integrated LLC resonant converter using center-tapped transformer for on-board EV charger," *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Montreal, QC, Canada, 2015, pp. 6293-6298. doi: 10.1109/ECCE.2015.7310542.

[18] X. Dan Gumera, A. Caberos and S. Huang, "Design and Implementation of a High Efficiency Cost Effective EV Charger Using LLC Resonant Converter," *2017 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT)*, Singapore, 2017, pp. 1-6. doi: 10.1109/ACEPT.2017.8168618.

[19] S. Kimura, K. Nanamori, M. Noah and M. Yamamoto, "A novel llc resonant dc-dc converter with integrated transformer," *2017 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Broadbeach, QLD, Australia, 2017, pp. 506-510. doi: 10.1109/INTLEC.2017.8214186.

[20] Y. Daş, A. Tekin, M. Boztepe and C. Tarhan, "A Robust Voltage Control Method for Universal EV Battery Charger LLC Resonant Converters," *2019 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies and Systems (ICSETS)*, Bhubaneswar, India, 2019, pp. 120-125. doi: 10.1109/ICSETS.2019.8744865.

[21] H. Bai, D. Yang, J. Song, Q. Su, B. Duan and C. Zhang, "Linear Active Disturbance Rejection Control of LLC Resonant Converters for EV Chargers," *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, Shanghai, China, 2020, pp. 993-998. doi: 10.1109/CAC51589.2020.9327865.

[22] J.J. Yong, V.K. Ramachandaramurthy, K.M. Tan and N. Mithulananthan, "A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 365–385, 2015.

[23] Designing an LLC Resonant Half-Bridge Power Converter. *2010 Texas Instruments Power Supply Design Seminar*. pp. 1-27.

[24] R.L. Lin and L.H. Huang, "Efficiency Improvement on LLC Resonant Converter Using Integrated LCLC Resonant Transformer," *IEEE Transactions On Industry Applications*, vol. 54, no. 2, pp.1756-1764, 2018.

[25] H.N. Vu and W. Choi, "A Novel Dual Full-Bridge LLC Resonant Converter for CC and CV Charges of Batteries for Electric Vehicles". *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, vol. 65, no. 3, pp. 2212-2225, 2018.

[26] M. Noah, S. Endo, H. Ishibashi, K. Nanamori J. Imaoka, K. Umetani and M. Yamamoto, "A Current Sharing Method Utilizing Single Balancing Transformer for a Multiphase LLC Resonant Converter with Integrated Magnetics," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 6, no. 2, pp. 977-992, 2017.

This is an open access article under the CC-BY license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



## Yapay Zeka Destekli Kavramsal Tasarım: Tekerlekli Sandalye Tasarım Seçenekleri Değerlendirmede Bulanık Mantık Kullanımı

Nurullah YÜKSEL\*<sup>ID</sup>, Hüseyin R. BÖRKLÜ<sup>ID</sup>

Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, ANKARA, TÜRKİYE

### MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 20.05.2021  
Kabul: 30.11.2021

#### Anahtar Kelimeler:

Bulanık mantık,  
Kavramsal tasarım,  
Mühendislik Tasarımı,  
Tasarım  
değerlendirme, Yapay  
zekâ

### ÖZ

Mühendislik tasarımı; işlevsellik, üretilebilirlik, estetik, maliyet gibi birçok parametreyi hesaba katma ve optimize etmeyi içerir. Tüm bu parametreleri özenli dikkate alabilmek için sistematik tasarım yaklaşımı kullanılabilir. Ancak, ürün yaşam döngüsündeki kısaltmalar tasarım ve geliştirme süreçlerini de kısaltmasını gerekli kılmıştır. Yapay zekâ teknolojileri, erken tasarım aşaması değerlendirme ve seçim işlemlerini hızlandırmaya yardımcı olabilir. Bu çalışmada Pahl ve Beitz'in Sistematik tasarım yaklaşımına dâhil edilen bulanık mantık yöntemi ile tasarım değerlendirmesi yapılmaktadır. Tasarımda bulanık mantık yöntemi kullanılan önceki çalışmalarda tasarım kısmen değerlendirilmektedir. Bu çalışmada ise tasarım tüm yönleriyle incelenmektedir. Yöntemin geçerlilik ve etkinliği bir tekerlekli sandalye kavramsal tasarımı ile gösterilmiştir. Ayrıca kullanılan yöntem ve normal kavramsal tasarım yöntem sonuçları da karşılaştırılmıştır. İki yöntemde de değerlendirme adımları sonunda aynı tasarım seçeneği ideal tasarım olarak belirlenmiştir. Bulanık mantık yöntemi ile değerlendirme işlemi klasik kavramsal tasarım sürecine göre daha kısa sürmüştür. Ayrıca 0-100 arası değerlendirme ölçeği sonuçların hassasiyetini artırmaktadır. Kavramsal tasarımda bulanık mantık kullanımı basit ve kolay anlaşılır olması yanında hızlı, hassas ve kapsamlı değerlendirmeler de sağlamaktadır.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.13>

## Artificial Intelligence Asisted Conceptual Design: Using Fuzzy Logic For the Evaluation of Design Variants of A Wheelchair

### ARTICLE INFO

Received: 20.05.2021  
Accepted: 30.11.2021

#### Keywords:

Fuzzy logic,  
Conceptual design,  
Engineering Design,  
Design Evaluation,  
Artificial intelligence

### ABSTRACT

The engineering design process is a comprehensive process in which many parameters such as functionality, manufacturability, aesthetics, and cost are considered and optimized. Systematic design methods can be used to take into account these parameters and not to overlook the details. However, the shortening of the product lifetimes has made it necessary to shorten the design and development processes. Artificial intelligence technologies can help designers speed up selection and evaluation processes in the early design phase. This study, it is aimed to evaluate the design options by including the fuzzy logic method in the systematic design approach of Pahl and Beitz. The design is partially evaluated in previous studies using fuzzy logic method in design. In this study, the design is examined in all its aspects. The validity and effectiveness of the method were demonstrated by a wheelchair conceptual design. In addition, the presented method has been compared with the traditional conceptual design method in terms of its results. In both methods, the same design option was determined as the ideal design at the end of the evaluation steps. With the fuzzy logic method, the evaluation process was completed in a shorter time than the classical conceptual design process. In addition, the rating scale between 0-100 increases the sensitivity of the results. The use of the fuzzy logic method in conceptual design provides fast, sensitive, and comprehensive evaluation besides being simple and easy to understand.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.13>

\*Sorumlu yazar: nurullahyüksel@gazi.edu.tr

To cite this article: N. Yüksel and H.R. Börklü, "Artificial Intelligence Asisted Conceptual Design: Using Fuzzy Logic For the Evaluation of Design Variants of A Wheelchair", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 309-319, 2021.  
doi:10.30855/gmbd.2021.03.13

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bilim ve teknolojiye - özellikle de bilişim, iletişim, ulaşım, alt yapı gibi konularda - yaşanan hızlı gelişmeler ürün tasarım süreçlerini de etkilemiştir [1]. Kullanıcı beklenti değişimleri ürün yaşam süresi kısılmalarına da neden olmaktadır. Değişen beklenti ve ihtiyaçlar yeni ürünler geliştirilerek karşılanabilir. Ancak, yeni ürün geliştirme ise birçok faktörün dikkate alındığı uzun ve kapsamlı bir süreçtir. Problemin belirlenmesi ile başlar, nihai ürünle son bulur. Yeni ürün yaşam sürelerindeki kısalma bu ürünlerin tasarım, üretim ve piyasaya arzlarının da daha hızlı ve kısa olmasını gerekli kılmıştır. Dolayısı ile güncel yeni ürün tasarımlarında; verimli, etkili ve inovatif özellikler yanında zaman ve maliyet tasarrufları da ön plana çıkmaktadır.

Bir firmanın hayatta kalması ve pazar payını koruması yeni ürün tasarımlarıyla mümkündür. Başarılı ürün tasarımı sistematik bir çalışmayla elde edilebilir. Pahl ve Beitz'in Sistematik Tasarım yaklaşımı uzun yıllardır mühendislik problemleri çözümü ve yeni ürün geliştirme süreçlerinde başarıyla kullanılmaktadır [2]. Ancak, bilgisayarların yaygınlaşması ve yapay zekâ teknolojilerinin devreye girmesi ile geleneksel yöntemlerin yerini akıllı ve dijital sistemler almaktadır. İnsan benzeri çıkarım (muhakeme) mekanizması ve sözel ifadelerle işlem yapabilen bulanık mantık bu amaçla kullanılan yöntemlerden biridir. Erken tasarım aşaması karar verme işlemlerinde ve optimizasyon problem çözümlerinde tasarımcılara destek sağlayabilir. Bu araştırmada bulanık mantık yönteminin kavramsal aşamada tasarım seçeneklerini (varyantlarını) değerlendirmede nasıl kullanılabileceği incelenmektedir. Ayrıca, bulanık mantık destekli kavramsal tasarım ve geleneksel kavramsal tasarım yöntem sonuçları değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Yöntemin geçerlilik ve etkinliği bir tekerlekli sandalye kavramsal tasarımı ile gösterilmiştir.

Çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde organize edilmiştir. Konuyla ilgili önceki çalışmalar ve genel değerlendirmeler 2. Bölümde yer almaktadır. 3. Bölümde kavramsal tasarım ve bulanık mantık hakkında genel bilgiler verilmiştir. Kavramsal tasarımda bulanık mantık kullanımı 4. Bölümde ayrıntılı olarak tanıtılmaktadır. Araştırma bulguları ve sonuçları ile bu çalışmanın devamı olacak yeni araştırma istikametleri ise son bölümde özetlenmektedir.

## 2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR (RELATED WORKS)

Mühendislik tasarımında işlevsellik, üretilebilirlik, estetik, maliyet gibi birçok parametre dikkate alınır ve optimize edilir. Tasarımcılar en iyi tasarımı elde etmek için çeşitli yöntem ve tekniklerden yararlanır. Bu yöntemler; kolay anlaşılabilir ve kullanılabilir olmalı, farklı problem türlerine uyarlanabilmeli, sistemli ve amaç odaklı olmalıdır. Bu amaçla Pahl ve Beitz kavramsal tasarım aşamasında tasarım seçenekleri (varyantları) oluşturur ve bunları kademeli olarak eleyerek en iyi tasarım konseptine ulaşmaya çalışır [3]. Bu ön tasarımlar; seçim kartı, amaçlar ağacı değerlendirme çizelgesi, değer profil diyagramı gibi bazı yöntemler ile kademeli olarak değerlendirilir ve aralarından en iyisi (optimumu) seçilir. Pahl ve Beitz'in yanı sıra birçok araştırmacı sistematik ve teorik tasarım yöntemleri üzerinde çalışmıştır [4-6].

Çok sayıda seçeneğin olduğu tasarım süreçlerinde değerlendirme işlemi zor ve zaman alıcı olabilir. Süreci hızlandırma, hassasiyeti artırma ve kapsamı genişletme oldukça önemlidir. Bu amaçla Ayağ, umut vaat etmeyen çözümleri erken değerlendirme aşamalarında elemek için bulanık analitik hiyerarşi sürecini kullanmıştır [7]. Tasarımcı tarafından belirlenen sınır değerini karşılamayan tasarımlar elenir ve diğer tasarımlar ise simülasyon analizi ile değerlendirmeye devam edilir. Ayağ ve Özdemir, başka bir çalışmada analitik hiyerarşi sürecinden daha kapsamlı değerlendirme yeteneğine sahip bulanık analitik ağ sürecini kullanmıştır [8]. Bu karma yöntem kapsamlı çözüm sağlasa da nihai ürüne karar vermek için uzun süre gerektirir. Malekly ve arkadaşları, QFD ve bulanık mantık yöntemlerini birleştirilmiş ve bir köprü tasarımında kullanılmıştır [9]. Ancak bu yöntemin köprü tasarımı için geliştirilmiş olması kullanımını sınırlı kılmaktadır. Kang, müşterilerin duygusal taleplerini karşılamak ve estetik ürünler elde etmek için kaba set teorisi ve bulanık QFD metodunu birleştirmiştir. Kaba set teorisi ürün estetik kalitesini belirlemek için kullanılmış. Bulanık QFD metodu ise ürün estetik gereksinimleriyle tasarım özellikleri arasında ilişki kurar [21]. Bir başka çalışmada kavramsal tasarım sürecinde bulanık mantık destekli hata modu ve etki analizi kullanılmıştır [10]. Belirsiz ve kesin olmayan kriterleri hata modu ve etki analizi çalışmasına dâhil etmek için bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Uzman ürün geliştirme sistemi olarak adlandırılan bu yaklaşım, tekrarlayan tasarım süreçlerini kısaltma, maliyetleri azaltma ve güvenilir ürünler ortaya çıkarmada kullanılabilir. Bu yöntem ürüne ait maliyet ve güvenilirliği değerlendirmede başarılı olsa da ürünün teknik özelliklerini

değerlendirmek için yetersiz kalmaktadır. Mohebbi ve arkadaşları, mekatronik sistemlerin kavramsal tasarım aşamasında Choquet İntegrali, Sugeno İntegrali ve bulanık tabanlı sinir ağı olmak üzere üç farklı yöntem önermiştir [11]. Burada tasarım seçenekleri; zekâ, güvenilirlik, karmaşıklık, esneklik ve maliyet gibi temel tasarım kriterleri ve ilişkili alt kriterlerle değerlendirilmektedir. Ancak, karmaşık mekatronik sistemlerde bileşen sayısına bağlı olarak bulanıklaştırma işlemi zaman alıcı ve zor olabilir. Aguiar ve arkadaşları kavramsal tasarım aşamasında risk değerlendirmesi için bulanık hata modu etki analizi yöntemini önermiş. Ürün hakkında yeterli bilgi olmayan belirsiz durumlarda risk öncelik sayısı (RÖS) belirlemek için bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır [23]. Huang, tasarım seçeneklerini değerlendirmek için sıralamaya dayalı uyarlanabilir evrimsel operatör genetik algoritma destekli bulanık sinir ağı (RAOGA-FNN) kullanmıştır [12]. Sutono ve arkadaşları, ürün form tasarımı için bulanık tabanlı Taguchi Metodu kullanmıştır. Ürün form seçenekleri dört farklı kanse kelimesiyle değerlendirilmiştir. Belirlenen dört değişkenin birleştirilmesinde bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır [19]. Zhou ve arkadaşları kavramsal ürün seçiminde bulanık ikili anlamsal karar verme yöntemini kullanmışlardır [20]. Ma ve arkadaşları, erken tasarım aşamasında ürün yaşam sonu değerlendirmesi için bulanık mantık yöntemini kullanmıştır. Yaşam sonu stratejisinde karşılaşılan belirsizlikleri ele almada bulanık küme teorisinden yararlanılmıştır [22].

Önceki çalışmalar genelde tasarımı tek bir yönden veya kısmen incelemektedir. Bazı çalışmalarda maliyet değerlendirilirken bazılarında kavramsal tasarımların çevresel etkileri karşılaştırılmaktadır. Ancak kapsamlı ve doğru bir değerlendirme için tasarım; üretim, kullanım, maliyet gibi her açıdan değerlendirilmesi gerekir. Bu çalışmada Pahl ve Beitz'in kavramsal tasarım yaklaşımı bulanık mantık yöntemi ile birleştirilmiştir. Bulanık mantık yöntemi tasarım seçenekleri arasında en ideal olan belirleme sağlayabilir. Bu yöntem basit ve kolay olması yanında hızlı, hassas ve kapsamlı değerlendirme de sağlamaktadır.

### 3. YÖNTEMLERE GENEL BAKIŞ (AN OVERVIEW OF METHODS)

#### 3.1. Kavramsal Tasarım (Conceptual Design)

Sistemik tasarım; görevi belirleme, kavramsal tasarım, şekillendirme tasarımı ve ayrıntılı tasarım adımlarından oluşur [4]. Yeni ürün geliştirme işleminde çok önemli yere sahip olan kavramsal

tasarım esnasında alınan karar ve stratejiler (konsept / kavram veya temel çözümler) sonraki tüm tasarım iş veya işlemlerini derinden etkiler. Kavramsal tasarım aşamasında; genel ve temel problemler belirlenir, fonksiyon şemaları geliştirilir (tasarımı küçük, soyut ve bağımsız parçalara bölme), alt fonksiyonlara çözümler aranır, bu çözümler bir tabloda gösterilir (morfolojik matris / kart) ve bunların çeşitli birleşimlerinden farklı çözüm seçenekleri (tasarım varyantları) elde edilir. Böylece büyük bir çözüm uzayında alternatif tasarım çözümleri elde edilir. Daha sonra tasarım seçenekleri üzerinde yapılan bazı değerlendirme ve seçme işlemleri ile en uygun tasarım konsepti (varyantı) belirlenir.

Farklı tasarım seçeneklerini değerlendirme ve bunlardan en uygununun seçimi hala üzerinde çalışılan güncel bir araştırma konusudur. Bu amaçla geliştirilecek yöntemin basit, güvenilir ve hızlı olması arzulanır. Farklı problemlere uyarlanabilmeli ve ürün yaşam döngüsünün tüm aşamalarını dikkate alınmalıdır. Pahl ve Beitz'in kavramsal tasarım yöntemi erken tasarım aşamasında tasarımcılara eksiksiz ve kapsamlı değerlendirme imkanı sunmaktadır. Özellikle, çözüm uzayının geniş olduğu büyük ölçekli tasarım projelerinde bu yöntem uzun zamandır kullanılmaktadır.

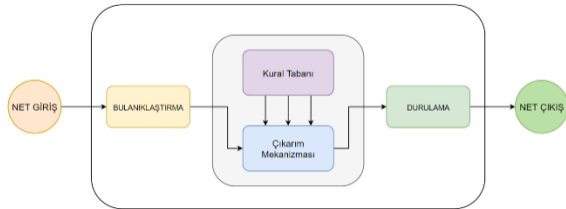
Tasarım ve değerlendirme süresini kısaltmak ve hassasiyetini artırmak ürüne rekabet avantajı kazandırabilir. Bu amaçla mevcut yöntemleri hızlandıracak yeni yollar aranmalıdır. Bu çalışma kavramsal tasarımda bulanık mantık yöntemi kullanımı ele almaktadır.

#### 3.2. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)

Akla, bilime, toplumsal değerlere uygun ve tutarlı düşünme şekline mantık denir. Önceden kazanılan bilgi ve tecrübelerden yeni bilgi veya sonuçlar elde etmeyi sağlar. (Klasik / ikili) mantık işlemleri; var-yok, açık-kapalı, siyah-beyaz, saydam-opak gibi zıt / tezat ilişkilere dayanır. Bulanık mantık ise siyah ve beyaz arasında birçok farklı (gri) ton olduğu ve bunlar hesaba katılmaz ise problem formülasyonunun eksik kalacağı tezine dayanır [13]. Klasik mantıktan farklı olarak bulanık mantık sisteminde bir eleman aynı anda iki farklı kümenin üyesi olabilir. Üyelik dereceleri 0-1 arasındaki sayılarla (0.15, 0.35, 0.93 vb.) ifade edilir. 0 (sıfır), bir elemanın o kümeyle ait olmadığını gösterirken, 1 (bir) ise küme özelliklerini tamamen taşıdığını belirtir. Bulanık mantık, (klasik/ikili) mantığın genişletilmesiyle oluşturulmuştur. Klasik mantığın yetersiz kaldığı durumlarda veya karmaşık problem çözümlerinde kullanılabilir [14].

Lotfi Zadeh'in 1960'lı yılların ikinci yarısında ortaya koyduğu bu yaklaşım yarım asırlık geçmişe rağmen hala güncel yapay zekâ araştırma alanlarından biridir [15]. Otomasyon ve kontrol sistemleri başta olmak üzere biyoloji, tıp, ekonomi, psikoloji, sosyoloji, pazarlama, yönetim, çevre, mühendislik vb. alanlarında yoğun kullanılmaktadır. Araç ve ev fiyatlarının belirlenmesi, tanı ve tedavi işlemleri, fabrika yeri ve maliyet tahminleri, ses ve görüntü tanıma sistemleri, kalite-kontrol işlemleri, suç izleme ve tespiti gibi birçok uygulama mevcuttur.

Bulanık mantık yöntemi; bulanıklaştırma (fuzzification), çıkarım (inference) ve durulama (defuzzification) işlemlerinden oluşur. Burada günlük hayatta kullanılan bazı sözel ifadelerin ("çok az, biraz, az, çok, çok fazla" gibi) üyelik fonksiyonlarına dönüştürme işlemine bulanıklaştırma denir. Giriş verileri, bulanıklaştırma işlemi ile 0-1 arasında sayısal değerlere dönüştürülür [16]. Çıkarım işlemi için kural tabanına ihtiyaç vardır. Kural tabanı oluşturmak ve kullanabilmek için mantıksal operatörlerden (ve, veya, değil) yararlanır. Kural tabanına kayıtlı veriler ve giriş değerleri çıkarım birimi vasıtasıyla işlenir ve sonuç elde edilir. Probleme uygun çıkarım yöntemi, bulanık mantık tasarımcısı tarafından belirlenir ve düzenlenir [17]. Elde edilen sonuçları anlamlandırmak ve gerçek dünya değerlerine dönüştürmek için durulama işlemi gereklidir. Bulanık mantık işlem modeli Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Bulanık mantık işlemi (Process of fuzzy logic)

#### 4. KAVRAMSAL TASARIMDA BULANIK MANTIK KULLANIMI (USE OF FUZZY LOGIC IN CONCEPTUAL DESIGN)

Örnek olarak burada yürüme engellilerin hareketlerini kolaylaştıran ve yaşam kalitesini artıran inovatif bir tekerlekli sandalye kavramsal tasarımı ele alınmaktadır. Özellikle ayaklarını kullanamayan bireyler diğer uzuvları ile bu ürünü kolayca kullanabilmeleri istenmektedir. Farklı zeminlerde (toprak, asfalt, beton, halı vd.) hareket edebilmeli ve kullanıcı emniyetini sağlamalıdır. Ayrıca tekerlekli sandalye engelli birey ihtiyaçlarına göre pozisyon değiştirebilmeli ve ortam şartlarına uyum sağlamalıdır. Bu tasarım için, değerlendirme sürecinde bulanık mantık destekli, Pahl ve Beitz'in

kavramsal tasarım işlemi kullanılacaktır. Kavramsal tasarım işlemi; (a) İhtiyaçları belirleme, (b) fonksiyon şeması oluşturma, (c) tasarım seçenekleri (varyant) oluşturma, (d) ön değerlendirme, (e) önemli tasarımları belirleme, (f) kriter ağacı oluşturma (g) bulanık mantık ve (h) değerlendirme adımlarını içermektedir.

#### 4.1. İhtiyaçları Belirleme (Identifying Requirements)

İhtiyaç listesi / şartname, kavramsal tasarım işleminin temelini oluşturur ve tasarımcının hareket noktasıdır. Bu liste; tedarik, malzeme, tasarım, ergonomi, üretim, montaj, nakliye, kullanım, bakım / onarım, maliyet vb. gibi bilgileri içermelidir. İhtiyaçlar açıkça ifade edilmeli, kesin ve tam bilgiler yer almalıdır [3, 18]. İstek ve arzu olmak üzere iki tür ihtiyaç vardır. İstekler, tasarım çözümü tarafından kesinlikle karşılanması gerekir. Arzu ise teknolojik, psikolojik ve ekonomik koşullara göre dikkate alınabilir. Tasarım sürecinde ihtiyaç listesine ekleme ve çıkarma yapılabilir. Tekerlekli sandalye kavramsal tasarımı için hazırlanan genel bir ihtiyaç listesi Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Tekerlekli sandalye tasarım ihtiyaç listesi (Design specification for the wheelchair)

A/İ	İhtiyaçlar
1	İ İnsan antropometrisine uygun tasarım
2	A En az 3 kademeli hız değiştirme sistemi
3	İ 20 km/saat hıza kadar hareket yeteneği
4	İ Akslar arası mesafe 120 cm'yi geçmemeli
5	A Maks. araç genişliği 75 cm'yi aşmamalı
6	İ Min. 10 Hp güç üretebilmeli, Min. 50 cm <sup>3</sup> motor hacmi
7	A Düşük enerji sarfiyatı, enerji depolayabilme ve tekrar kullanma
8	İ Hafif ve dayanıklı olmalı (min. 100kg)
9	A Kaza ve devrilme önleme sistemi
10	İ Aydınlatma (min. 3 lux)
11	İ Farklı zeminlerde ilerleyebilecek mekanizma
12	İ Kullanıcının doğrulması sağlayacak tasarım
13	A Min. 50% oranda standart malzeme kullanımı
14	İ Ürün maliyetini 50.000,00 TL'yi aşmamalı
15	İ Modüler ve çekici tasarıma sahip olmalı
16	A Bakım maliyetleri yıllık 500,00 TL'yi geçmemeli
17	İ Sesli uyarı / ikaz sistemi olmalı
18	A Yük taşıma için min 0.5 m <sup>3</sup> hacim
19	A Merdiven çıkma fonksiyonu

#### 4.2. Fonksiyon Şeması Oluşturma (Establishing A Function Structure)

Ürünün yerine getirdiği temel işleve genel (tüm) fonksiyon denir. Tekerlekli sandalyenin genel fonksiyonu engelli bireyin hareketini sağlamaktır. Teknik sitemlerde bileşen fonksiyonlarının anlaşılması ve fonksiyonlar arasındaki ilişkinin belirlenmesi için tüm sistem, belli kurallar çerçevesinde alt sistemlere ayrılır. Enerji (E), malzeme (M) ve sinyal (S) akışı ile alt sistemlerin anlamlı birleşimleri fonksiyon yapısını oluşturur [2]. Tekerlekli sandalyeye ait fonksiyon şeması Şekil 2'de gösterilmiştir. Sistemin önemli alt fonksiyonları; güç elde etme, kontrol, torku iletme, hareket, koltuk hareketi, emniyet sistemi ve aydınlatma / ikaz olarak tasarımı seçenek sayı ve kaliteleri de artabilir. Bu çalışmada oluşturulan kavramsal tasarım seçenekleri Tablo 3'de verilmiştir ve burada 6 farklı alternatif vardır.

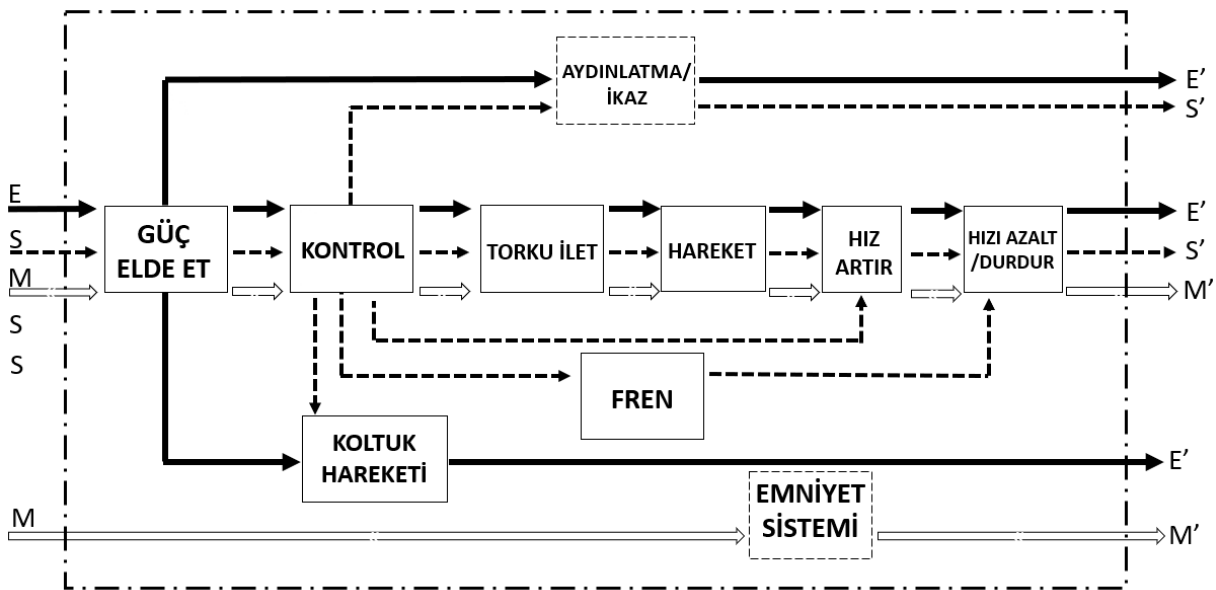
#### 4.3. Tasarım Seçenekleri Oluşturma (Development of Design Variants)

Önemli alt fonksiyonların her birine çözüm önerileri geliştirilerek bir tablo oluşturulur. Muhtelif çözüm önerilerinin uygun birleşimleriyle tasarım seçenekleri (varyantlar) elde edilir. Tablo 2'de gösterilen tekerlekli sandalyeye ait morfolojik matraste önemli alt fonksiyonlar birinci sütuna yerleştirilmiştir. Her bir alt fonksiyonun bulunduğu satıra uygun çözüm önerileri sıralanır. Mevcut teknolojilerle olası tüm alternatif çözümler bu tabloda yer alabilir. Sisteme güç elde etmede elektrik motoru, içten yanmalı motor veya kas gücü kullanılabilir. Kontrol ve idare için uzaktan kumanda, bilgisayar

destekli kontrol, direksiyon, zihin kontrolü ve el ile idare seçenekleri düşünülmüştür. Torku iletmede; kayış-kasnak mekanizması, dişli kutusu, zincir dişli ve her teker için ayrı motor çözümleri kullanılabilir. Tekerlekli sandalyenin farklı zeminlerde ilerleyebilmesi için 2 büyük - 2 küçük teker, 2 büyük - 1 küçük teker, 4 eş boyutlu teker, palet-tekerlek ve yalnızca paletli hareket birimlerinden biri tercih edilebilir. Kullanıcı pozisyonunu ayarlama sabit koltuk ve hareketli koltuk olmak üzere iki seçenek vardır. Emniyet kemeri, kafes ve hava yastığı koruyucu sistem amaçlı alternatif çözümler olabilir. Aydınlatma ve ikaz için led lamba, flaş lamba veya korna kullanılabilir. Alt çözüm öneri sayılarına bağlı olarak tasarım seçenek sayı ve kaliteleri de artabilir. Bu çalışmada oluşturulan kavramsal tasarım seçenekleri Tablo 3'de verilmiştir ve burada 6 farklı alternatif vardır.

#### 4.4. Ön Değerlendirme (Pre-evaluation of sample design)

İhtiyaç listesi, fonksiyon yapısı geliştirme ve morfolojik kart oluşturma adımları sonrası tasarım seçenekleri oluşturulur. Bundan sonraki süreçlerde tasarım seçenekleri değerlendirilir ve en ideal / optimum tasarım belirlenir (seçilir) [2]. Şekil 3'de gösterilen seçim kartı, değerlendirme araçlarının ilki olarak bu çalışmada kullanılmıştır. Tekerlekli sandalye tasarımı için bir önceki adımda oluşturulan tasarım seçenekleri (6 farklı tasarım alternatifi), belirlenen kıstaslara göre değerlendirilmiş ve uygun/uyumlu olmayan üç seçenek elenmiştir (Şekil 3).



Şekil 2. Bulanık mantık işlem akışı (Flow chart of fuzzy logic)



Tablo 2. Örnek tasarım için morfolojik matris (Morphological matrix of the sample problem)

		1	2	3	4	5
<b>A</b>	GÜÇ ELDE ET					
		ELEKTRİK MOTORU	İÇTEN YANMALI MOTOR	KAS GÜCÜ		
<b>B</b>	KONTROL					
		EL İLE	UZAKTAN KUMANDA	BILGISAYAR DESTEKLİ	DİREKSİYON	ZİHİN KONTROLÜ
<b>C</b>	TORKU İLET					
		KAYIŞ-KASNAK	DİŞLİ KUTUSU	ZİNCİR DİŞLİ	HER TEKER İÇİN AYRI	GÜÇ İLETİMİ YOK
<b>D</b>	HAREKET					
		2 BÜYÜK 2 KÜÇÜK	2 BÜYÜK 1 KÜÇÜK	4 EŞ BOY TEKER	PALET	PALET + TEKER
<b>E</b>	KOLTUK HAREKETİ					
		SABİT KOLTUK	HAREKETLİ KOLTUK	KOLTUK YOK		
<b>F</b>	EMNİYET BİRİMİ					
		EMNİYET KEMERİ	KAFES SİSTEMİ	HAVA YASTIĞI	YOK	
<b>G</b>	AYDINLATMA /İKAZ					
		LED	FLASH	KORNA		

Tablo 3. Elde edilen kavramsal tasarım seçenekleri (Conceptual design variants obtained)

Seçenek No	Alt Fonksiyonlara Çözüm Önerileri
<b>Seçenek 1</b>	A1-B3-C4-D3-E2-F2-G1
<b>Seçenek 2</b>	A3-B1-C5-D1-E1-F4-G3
<b>Seçenek 3</b>	A2-B2-C3-D4-E2-F3-G2
<b>Seçenek 4</b>	A3-B1-C1-D2-E1-F1-G2
<b>Seçenek 5</b>	A1-B5-C4-D5-E3-F2-G1
<b>Seçenek 6</b>	A1-B4-C2-D1-E1-F1-G2

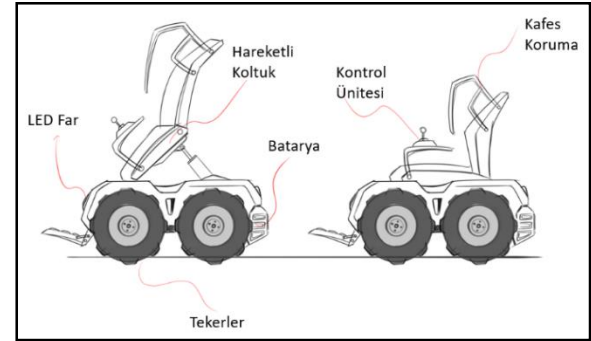
#### 4.5. Önemli Tasarımlar (Promising Designs)

Ön (kaba) değerlendirme işlemi sonucunda kıstasları karşılayan ve umut vadeden üç tasarım seçeneği belirlenmiştir (diğer üçü ise elenmiştir).

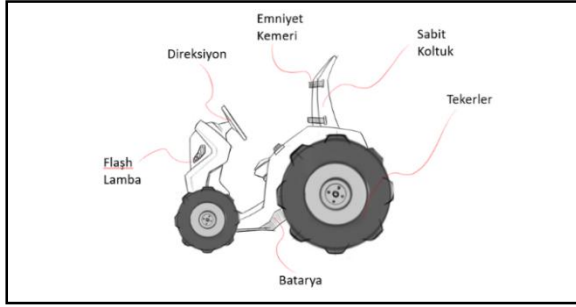
Seçim kartı ile ön elemeyi geçen tasarım seçeneklerine (varyantlarına) ait eskizler (kavramlar/konseptler) aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4-6). Bunlardan tasarım seçeneği 1 hareketli koltuk mekanizmasıyla kullanıcıya doğrulma (ayağa kalkma) imkânı sağlamaktadır. Ayrıca her teker ayrı bir motora sahip olduğundan engebeli arazilerde kolaylıkla hareket edebilir. Tasarım seçeneği 2 kullanıcının kas gücüyle hareket edebilmektedir. Öndeki iki küçük tekerlek aracılığıyla ise kolay kullanılabilir. Tasarım seçeneği 3, direksiyonla yönlendirilir ve 2 büyük - 2 küçük tekerleğe sahiptir. Burada emniyet kemeri ile kullanıcının güvenliği sağlanır.

SEÇİM KARTI	
SEÇİM KRİTERLERİ	KARAR
Çözüm seçeneklerini değerlendirilir	Çözüm seçeneklerini işaretle
Evet (+)	(+) Çözümü sürdür
Hayır (-)	(-) Çözümü elimine et
Bilgi yetersiz (?)	(?) Bilgi topla çözümü tekrar değerlendir
Tanımlı kontrol et (!)	
Tüm işlevle uyumlu	
Sartname isteklerini karşıla	
Üretilebilirlik	
Müsaade edilebilir maliyet	
Emniyet şartlarını doğrudan karşılar	
Kolay tasarım	
Yeterli bilgi	
Açıklama	
S <sub>1</sub>	+ + + ? + + +
S <sub>2</sub>	? - + + ? + +
S <sub>3</sub>	- + - + ? + +
S <sub>4</sub>	+ - + + - - ?
S <sub>5</sub>	+ + - - + ? -
S <sub>6</sub>	+ + + + ? + +

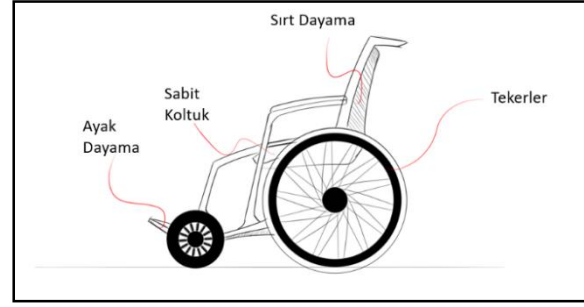
Şekil 3. Ön değerlendirme seçim kartı (Pre-evaluation selection card)



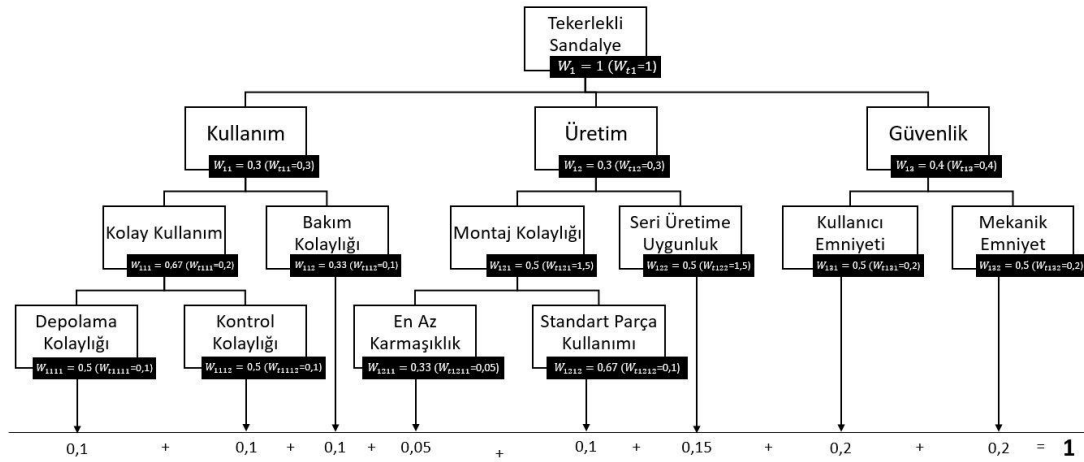
Şekil 4. Kavramsal tasarım seçeneği 1 (Design variant 1)



Şekil 5. Kavramsal tasarım seçeneği 2 (Design variant 2)



Şekil 6. Kavramsal tasarım seçeneği 3 (Design variant 3)



Şekil 7. Tekerlekli sandalye kriter ağacı (Objectives tree for the design of wheelchair)

#### 4.6. Kriter Ağacı (Objective Tree)

Optimum tasarım seçeneğini bulabilmek için elde kalan tasarımlar ek seçim / değerlendirme işlemlerine tabi tutulur. Kriter ağacı ayrıntılı bir değerlendirme imkânı sunmaktadır. Kriter ağacının toplam ağırlık değeri 1 veya 100 olarak belirlenir. Toplam ağırlık değeri ağacın en uç dallarına kadar önem derecesine göre pay edilir. En alt dallardaki ağırlık değerleri toplamı 1 veya 100 olmalıdır. Tekerlekli sandalyenin karşılması istenen üretim, montaj, kullanım, depolama, güvenlik vb. kriterler hiyerarşik şekilde yazılmış ve bu kriterlerin ağırlık değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Engelli kullanıcılar için tasarlanan bir sistemde güvenlik en önemli kriter olacaktır. Bu nedenle güvenlik kriterinin ağırlık (önem) değerleri nispeten daha yüksektir.

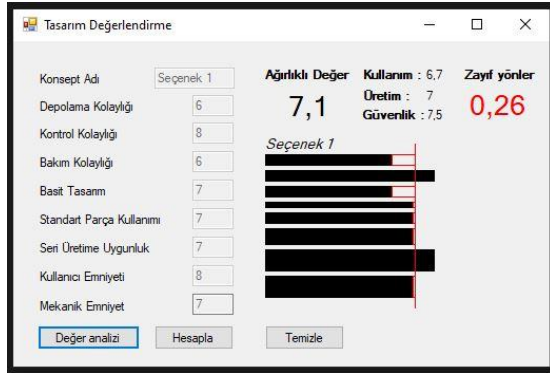
Elde kalan tasarım seçenekleri, kriterleri karşılama durumlarına göre değerlendirilip 0 ile 10 arasında puanlandırılır (0 puan: hiç karşılamıyor, 10 puan: tamamen karşılıyor). Bu puanlar bir sonraki değerlendirme adımı olan bulanık mantık denetleyicisi için giriş değişkenleri olacaktır.

#### 4.7. Bulanık mantık ile değerlendirme (Using Fuzzy logic for the evaluation)

Kullanıcı beklentilerinin tespiti ve tasarım sürecine dahil edilmesi ürün başarısını doğrudan etkiler. Müşteriler, çoğu durumda beklentilerini güzel, sağlam, dayanıklı, güvenli vb. gibi sözel terimlerle ifade eder. Sözel terimlerin teknik sistemlere uyarlanmasında bulanık mantık yaklaşımı kullanılabilir.

Tasarımın başarısı birçok etkenin bir araya gelmesiyle sağlanabilir. Bir tasarımın iyi olarak kabul edilebilmesi için üretilebilir, kullanımı kolay, estetik, fonksiyonel, yenilikçi, ekonomik ve emniyetli olması gerekir. Ayrıntılı bir tasarım değerlendirmesi için bu özellikleri oluşturan alt bileşenler de hesaba katılmalıdır. Bu çalışmada tekerlekli sandalye için 8 farklı değerlendirme kriteri belirlenmiştir. Üç tasarım seçeneği; depolama kolaylığı, kontrol kolaylığı, bakım kolaylığı, basit tasarım, standart parça kullanımı, seri üretime uygunluk, kullanıcı emniyeti ve mekanik emniyet kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Çok sayıda girdi değişkeni ile

işlem yapmak bulanık mantık modelini karmaşık hale getirebilir ve değerlendirme süresini uzatabilir. Bu nedenle yukarıda bahsedilen 8 kriter; kullanım, üretim ve güvenlik olmak üzere 3 ana grupta toplanmıştır. Tasarım seçeneklerini değerlendirme ve ağırlık oranlarını belirlemek için Visual Basic dilinde bir bilgisayar programı hazırlanmıştır (Şekil 8). Bu program, 8 kritere verilen puanların 3 temel kritere dönüştürmede kullanıcıya kolaylık sağlamaktadır. Bu kriterlere ait puanlar ise bulanık mantık modeli giriş değişken değerlerini oluşturmaktadır. Ayrıca aynı program ile değer profil diyagramı da oluşturulabilmektedir (-ki bu diyagram seçenek sayısı ikiye düşürüldüğü ve bunların da kriterlerden aldığı puanlar birbirine yakın olması halinde kullanılır. Böylece iki tasarım seçeneğinden hangisinin daha dengeli puanlara sahip olduğu belirlenebilir). Değer profil diyagram sonuçları ve bulanık mantık işlemi sonuç değerleri karşılaştırılabilir ve işlemlerin uyum ve doğruluğu kontrol edilebilir.



Şekil 8. Tasarım değerlendirme program arayüzü  
(Interface of the developed design evaluation program)

Tekerlekli sandalye bulanık mantık modeli üç giriş ve bir çıkış değişkeninden oluşmaktadır. Giriş değişkenleri kullanım, üretim ve güvenlik kriterlerine ait toplam puanlardır. Çıkış değişkeni ise tasarımın 0 ile 100 (0 en düşük, 100 en yüksek) arasında aldığı başarı puanını ifade eder. Bulanık mantık yönteminde sayısal giriş değerleri bulanıklaştırma işlemi ile “çok az, az, orta, fazla, çok fazla” gibi üyelik fonksiyonlarına dönüştürülür. Üyelik fonksiyonları, bir elemanın bir kümeye hangi oranda ait olduğunu belirtmektedir [14]. Problemin durumuna göre üyelik fonksiyon sayıları değişebilir. Daha hassas sonuçlar isteniyorsa üyelik fonksiyonları artırılabilir. Giriş ve çıkış değişkenleri arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bu nedenle üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonları tercih edilmiştir.

Üretim, kullanım ve güvenlik, Tekerlekli sandalye bulanık mantık modelinin giriş değişkenleridir. Bu giriş değişkenleri üçer üyelik fonksiyonundan

oluşmaktadır. Kullanım ve üretim değişkenleri için zor, ortalama, kolay; güvenlik değişkeni için ise kötü, ortalama ve iyi üyelik fonksiyonları belirlenmiştir (Şekil 9). Tekerlekli sandalye engelli kullanıcılara yönelik araçtır. Kullanıcı emniyeti ve mekanik emniyet tasarımca mutlaka karşılanmalıdır. Bu nedenle güvenlik değişkeni için düşük puanlar kabul edilemez. Şekil 9’da da görüldüğü gibi güvenlik değişkeni için 3 ve daha düşük puanlar %100 “kötü” olarak değerlendirilmektedir. Diğer giriş değişkenlerinde üyelik fonksiyonları 0-10 aralığında simetrik olarak sıralanmaktadır. Çıkış değişkeni ise çok kötü, kötü, ortalama, iyi, çok iyi olmak üzere 5 üyelik fonksiyonundan oluşur. Tüm üyelik fonksiyonları ve sınır değerleri Şekil 9’da gösterilmiştir.

Bir konuda karar vermek için bilgi ve tecrübeden yararlanır. Bu tecrübelerin bilgisayar alanındaki karşılığı ise kural tabanlı ilişkilerdir. Bulanık mantık modelde IF-THEN (EĞER-İSE) yapısı / formatı ile gerekli bilgiler kural tabanına eklenir. Giriş değişkeni birden fazla ise aralarında OR-AND-NOT (VEYA-VE-DEĞİL) bağlaçları kullanılabilir. İyi bir kural tabanlı sistem tüm olasılıkları hesaba katmalıdır. Tekerlekli sandalye bulanık mantık modeli için 27 (= 3 x 3 x 3) kuraldan oluşan bir kural veri tabanı geliştirilmiştir. Tekerlekli sandalye tasarımı için oluşturulan kural tabanının bir kısmı Tablo 4’te görülmektedir.

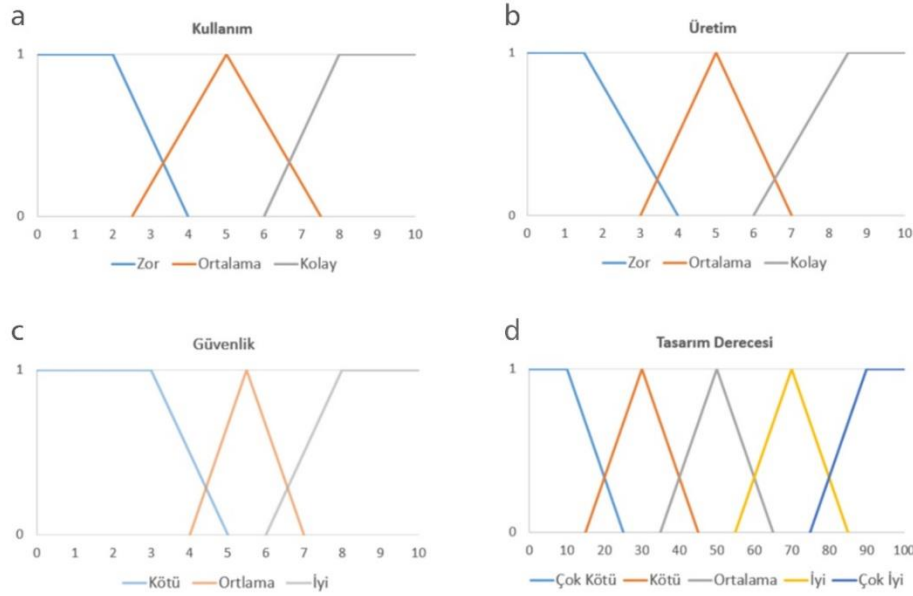
Tablo 4. Tekerlekli sandalye için oluşturulan kural tabanı (Rule base for wheelchair design)

	Kullanım			Üretim		Güvenlik	Tasarım Derecesi
1	Eğer	Zor	Ve	Zor	Ve	Kötü	İse Çok Kötü
2	Eğer	Zor	Ve	Zor	Ve	Ortalama	İse Çok Kötü
3	Eğer	Zor	Ve	Zor	Ve	İyi	İse Kötü
4	Eğer	Zor	Ve	Ortalama	Ve	Kötü	İse Çok Kötü
5	Eğer	Zor	Ve	Ortalama	Ve	Ortalama	İse Kötü
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
25	Eğer	Kolay	Ve	Kolay	Ve	Kötü	İse Ortalama
26	Eğer	Kolay	Ve	Kolay	Ve	Ortalama	İse İyi
27	Eğer	Kolay	Ve	Kolay	Ve	İyi	İse Çok İyi

Çıkarım mekanizması, bulanık giriş değerlerini kural tabanı vasıtasıyla yorumlar ve bir sonuç bulur. Mamdani, Larsen, Tagaki-Sugeno vd. gibi modeller çıkarım işleminde kullanılabilir. Bu çalışmada basit yapısı ve hesaplama kolaylığından dolayı Mamdani (Max-Min) modeli kullanılmıştır. Çıkarım işlemi sonucunda elde edilen bulanık ifadeler (çok kötü, kötü, ortalama, iyi, çok iyi) durulama işlemi ile sayısal

değerlere dönüştürülür. Bu amaçla ağırlık merkezi, ağırlıklı ortalama, alan merkezi, en büyüklerin ortalaması gibi yöntemler kullanılabilir [24]. Bu

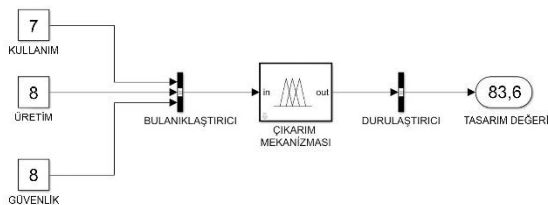
çalışmada durulama işlemi için en sık tercih edilen yöntemlerden ağırlık merkezi (centroid) uygulanmıştır.



Şekil 9. Üyelik fonksiyonları: (a) Kullanım (b) Üretim, (c) Güvenlik ve (d) Tasarım Derecesi (Membership functions: (a) Usage, (b) Production, (c) Security and (d) Design Degree)

#### 4.8. Değerlendirme (Evaluation)

Tüm seçim ve değerlendirme işlemleri sonucunda seçenek 1'in nihai tasarım olması karar verilmiştir. Her tekerlek için ayrı bir elektrik motoruna sahip tekerlekli sandalye, farklı zemin türlerinde ve engebeli arazilerde kolaylıkla hareket edebilir. Hareketli koltuk, kullanıcının günlük işlerini daha kolay yapmasını sağlayacaktır. Ayrıca, bu sayede kullanıcının araca binip-inmesi de daha kolay ve zahmetsiz olabilir. Kafes sistemi, kullanıcıyı çarpma, devrilme gibi kazalardan en az hasarla kurtulmasını sağlayabilir. Bilgisayar destekli kontrol ünitesi; arıza durumu, hız, batarya doluluk oranı, menzil, sıcaklık vb. gibi bilgileri kontrol etmeye olanak sağlar. Led ışıklı aydınlatma, kullanıcının gece yolculuğu yapmasına izin verir.



Şekil 10. Tasarım değerlendirilmede bulanık mantık modeli (Fuzzy logic model in the design evaluation)

#### 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Kavramsal tasarım, birçok ürün ve makine tasarımında kullanılan sistematik bir yöntemdir. Mevcut çözüm uzayında olmayan yenilikçi çözümler ile ideal tasarıma ulaşmayı hedefler. Önce istenilen özelliklere sahip tasarım seçenekleri oluşturulur, sonrasında adım adım bu seçenekler elenerek ideal tasarıma ulaşılır. Ancak değerlendirme işlemleri zordur ve uzun zaman alır. Bu çalışmada; değerlendirme hassasiyetini artırma, süreci hızlandırma ve otomatikleştirme için kavramsal tasarımda bulanık mantık yöntemi kullanımı açıklanmıştır. İhtiyaç listesi oluşturma ile işleme başlanır. İstek ve arzuların açık ve tam olarak ifade edilmesi ideal tasarım sonucuna ulaşmada önemlidir. Fonksiyon şemasında problem formülasyonu ile alt fonksiyonlar belirlenir. Bu fonksiyonların her birine morfolojik kart kullanılarak öneriler sunulur. Çözüm önerilerinin uygun birleşimleriyle tasarım seçenekleri (varyantlar) oluşturulur. Tasarım seçeneklerini değerlendirmek ve en iyi tasarımı (konsepti) bulmak için sırasıyla; seçim kartı ve bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır.

Kavramsal tasarım aşamasında verilen kararlar ürün başarısını doğrudan etkiler. Bu aşamada üretim, montaj, nakliye, kullanım, bakım, geri dönüşüm gibi pek çok kriter hesaba katılır. Ancak tasarımın erken

aşamalarında bilgiler (genelde) eksik veya belirsizdir. Belirsizliğin üstesinden gelmek için bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalardan en önemli farkı pek çok kriteri dikkate alması ve ürünü tüm yönlerden değerlendirmesidir. Yazılan bilgisayar programı ile tasarım kriterleri 3 ana gruba (üretim, kullanım ve güvenlik) indirgenmiştir. Böylece işlem kolaylığı ile değerlendirme süresinin kısaltılması hedeflenmiştir.

Yöntemin uygulanabilirlik ve başarısını değerlendirmek için aynı çalışma klasik kavramsal tasarım yaklaşımı ile tekrar yapılmıştır. İki yöntemde de değerlendirme adımları sonunda tasarım seçeneği 1'in ideal tasarım olduğu görülmüştür. Bulanık mantık yöntemi ile değerlendirme işlemi normal kavramsal tasarım sürecine göre daha kısa sürede tamamlanmıştır. Ayrıca 0-100 arası değerlendirme ölçeği sonucun hassasiyetini artırmaktadır. Bu sonuçlar, değerlendirme süreçlerinin otomasyonu için kavramsal tasarımda bulanık mantık yönteminin kullanılabilirliği göstermektedir.

Özellikle çok sayıda tasarım seçeneğinin olduğu durumlarda değerlendirme işlemi için bulanık mantık yöntemi tercih edilebilir. Ancak yöntemin farklı problemlere uyarlanabilmesi için kural tabanının daha kapsamlı ve hassas düzenlenmesi gerekir. Benzer problemlerin çözümünde aynı bulanık mantık modeli kullanılabilir de özellikle farklı sektörlerde ürün tasarımlarına uyarlamak için düzenlemeye ihtiyaç olabilir. Gelecek çalışmalarda tasarım değerlendirme adım sayısını azaltmak ve seçenek oluşturma adımları da dâhil tüm süreci otomatikleştirme konusu ele alınabilir ve irdelenebilir.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] M. Cantamessa, F. Montagna, S. Altavilla, and A. Casagrande-Seretti, "Data-driven design: The new challenges of digitalization on product design and development," *Design Science*, vol. 6, no. 27, pp. 1-33, September 2020. doi: 10.1017/dsj.2020.25.

[2] H. R. Börklü, N. Yüksel, K. Çavdar, and H. K. Sezer, "A practical application for machine design education," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 12, no. 2, pp. 1-11, March 2018.

doi: doi.org/10.1299/jamdsm.2018jamdsm0036.

[3] H. R. Börklü, *Mühendislik Tasarımı: Sistematik Yaklaşım*. Ankara: Hatiboğlu Yayınları, 2010.

[4] G. Pahl and W. Beitz, *Engineering Design: A systematic approach*. London: Springer, 1997.

[5] S. Pugh, *Total design: integrated methods for successful product engineering*. Wokingham: Addison-Wesley, 1991, p. 278.

[6] D. G. Ullman, *The Mechanical Design Process*. McGraw: Hill Inc, 1991.

[7] Z. Ayağ, "A fuzzy AHP-based simulation approach to concept evaluation in a NPD environment," *IIE Transactions*, vol. 37, no. 9, pp. 827-842, September 2005. doi:10.1080/07408170590969852.

[8] Z. Ayağ and R. G. Özdemir, "A hybrid approach to concept selection through fuzzy analytic network process," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 56, no. 1, pp. 368-379, February 2009. doi: 10.1016/j.cie.2008.06.011.

[9] H. Malekly, S. Meysam Mousavi, and H. Hashemi, "A fuzzy integrated methodology for evaluating conceptual bridge design," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 7, pp. 4910-4920, July 2010. doi: 10.1016/j.eswa.2009.12.024.

[10] K.-S. Chin, A. Chan, and J.-B. Yang, "Development of a fuzzy FMEA based product design system," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 36, no. 7, pp. 633-649, March 2008. doi: 10.1007/s00170-006-0898-3

[11] A. Mohebbi, S. Achiche, and L. Baron, "Multi-criteria fuzzy decision support for conceptual evaluation in design of mechatronic systems: a quadrotor design case study," *Research in Engineering Design*, vol. 29, no. 3, pp. 329-349, July 2018. doi: 10.1007/s00163-018-0287-6

[12] H.-Z. Huang, Y. Liu, Y. Li, L. Xue, and Z. Wang, "New evaluation methods for conceptual design selection using computational intelligence techniques," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 733-746, March 2013. doi: 10.1007/s12206-013-0123-x.

- [13] R. Belohlavek and G. J. Klir, *Concepts and Fuzzy Logic*. London: The MIT Press, 2011.
- [14] R. Sarfaraz Khabbaz, B. Dehghan Manshadi, A. Abedian, and R. Mahmudi, "A simplified fuzzy logic approach for materials selection in mechanical engineering design," *Materials & Design*, vol. 30, no. 3, pp. 687-697, March 2009.  
doi: 10.1016/j.matdes.2008.05.026.
- [15] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, June 1965.  
doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [16] C. R. Alavala, *Fuzzy Logic and Neural Network: Basic Concept & Application*. New Delhi: New Age International Limited, 2008.
- [17] F. Deroncourt, "Introduction to fuzzy logic," *Massachusetts Institute of Technology*, vol. 21, 2013.
- [18] M. Mayda and H. R. Börklü, "An integration of TRIZ and the systematic approach of Pahl and Beitz for innovative conceptual design process," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 859-870, October 2014. doi: 10.1007/s40430-013-0106-y
- [19] S. B. Sutono, S. H. Abdul-Rashid, H. Aoyama, and Z. Taha, "Fuzzy-based Taguchi method for multi-response optimization of product form design in Kansei engineering: a case study on car form design," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 10, no. 9, December 2016.  
doi: 10.1299/jamdsm.2016jamdsm0108.
- [20] X. Zhou, Y. Wu, and V. Polochova, "Product Conceptual Design Method Based on Intuitionistic Fuzzy Binary Semantics Group Decision Making," *Journal of Service Science and Management*, vol. 12, pp. 742-754, October 2019.  
doi: 10.4236/jssm.2019.126050.
- [21] X. Kang, "Aesthetic product design combining with rough set theory and fuzzy quality function deployment," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 39, pp. 1131-1146, July 2020.  
doi: 10.3233/JIFS-192032
- [22] J. Ma, G. E. O. Kremer, and C. D. Ray, "A comprehensive end-of-life strategy decision making approach to handle uncertainty in the product design stage," *Research in Engineering Design*, vol. 29, pp. 469-487, November 2018.  
doi: 10.1007/s00163-017-0277-0
- [23] J. d. Aguiar, R. K. Scalice, and D. Bond, "Using fuzzy logic to reduce risk uncertainty in failure modes and effects analysis," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 40, November 2018.  
doi: 10.1007/s40430-018-1437-5.
- [24] H. T. Nguyen, C. L. Walker, and E. A. Walker, *A First Course in Fuzzy Logic*, 4 ed. (Textbooks in Mathematics). Boca Raton: CRC Press, 2019.

This is an open access article under the CC-BY license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



# Myrtus communis (Mersin) ve Üzüm Çekirdeği Özütü Kullanılarak Gümüş Nanoparçacık Biyosentezi ve Karakterizasyonu

Mustafa GÜNGÖRMÜŞ<sup>\*a,b</sup> 

<sup>a,\*</sup> Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Biyomedikal Mühendisliği Bölümü 06010, Ankara, Türkiye

<sup>b</sup> Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi 06010, Ankara, Türkiye

## MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 13.07.2021  
Kabul : 11.11.2021

### Anahtar Kelimeler:

Biyosentez,  
Gümüş,  
Nanoparçacık,  
Myrtus communis,  
Üzüm çekirdeği,  
Antibakteriyel

## ÖZ

Bitkisel malzemeler ve özütlerin, metal nanoparçacıkların biyosentezinde önemleri giderek artmaktadır. Biyosentez, nanoparçacık sentezinde hem ekonomik hem de çevreye zararsız bir yolak sunmaktadır. Bitki özütleri ile yapıldığında, faydalı fitokimyasallar nanoparçacık yüzeyine tutunmakta ve nanoparçacığa işlevsellik kazandırmaktadır. Bu çalışmada, mersin yaprağı ve üzüm çekirdeğinin basit sulu özütleri kullanılarak gümüş nanoparçacıkları sentezlenmiştir. Nanoparçacıklar UV-Vis spektrofotometri, XRD, SEM ve Raman spektrofotometrisi ile karakterize edilmiştir. Ortalama boyu 10-30 nm olan küre parçacıklar elde edilmiştir. Nanoparçacıkların antibakteriyel etkisi Gram-pozitif ve Gram-negatif model organizmalarda test edilmiştir. Biyosentezle üretilen nanoparçacıkların, geleneksel yöntemle sentezlenen nanoparçacıklara veya bitki özütlerinin sulu çözeltilerine göre çok daha yüksek antibakteriyel aktivite gösterdikleri belirlenmiştir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.14>

# Biosynthesis and Characterization of Silver Nanoparticles Using Myrtus Communis (Myrtle) and Grape Seed Extract

## ARTICLE INFO

Received: 13.07.2021  
Accepted: 11.11.2021

### Keywords:

Biosynthesis,  
Silver,  
Nanoparticles,  
Myrtus communis,  
Grapeseed,  
Antibacterial

## ABSTRACT

Plant based materials and extracts have gained an increased importance for biosynthesis of metallic nanoparticles. Biosynthesis offers an economical and environmentally friendly pathway for nanoparticle synthesis. When done with plant extracts, beneficial phytochemicals get absorbed on the nanoparticles and provide functionality. In this study, we have used simple water extracts of myrtle and grape seed to facilitate the synthesis of silver nanoparticles. The nanoparticles were characterized via UV-Vis spectroscopy, XRD, SEM and Raman spectroscopy. Average size of 10-30 nm spherical particles was obtained. The antibacterial activity of the nanoparticles was tested on Gram-positive and Gram-negative model organisms. Biosynthesized nanoparticles showed superior antibacterial activity compared to conventionally synthesized nanoparticles or soluble plant extracts.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.14>

## 1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Silver nano particles are being utilized in various fields, ranging from medical devices to textiles [1] Due to their unique inherent antibacterial properties,

they have been used as antibacterial agents since ancient times [2]. In fact, before the introduction of modern antibiotics, silver in the form of aqueous colloidal suspensions were used orally and topically until the first half of the 20<sup>th</sup> century [2, 3]. Silver

\*Corresponding author: [mgungormus@ybu.edu.tr](mailto:mgungormus@ybu.edu.tr)

To cite this article: M. Güngörmüş "Synthesis and Characterization of Silver Nanoparticles Using Myrtus Communis (Myrtle) and Grape Seed Extract", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 320-329, 2021.  
doi:10.30855/gmbd.2021.03.14

nanoparticles exert their antibacterial effects mainly by releasing silver cations. Silver cations are electron-pair acceptors with affinity to sulfur and nitrogen. Therefore, they can interact with the sulfur-containing thiol groups and nitrogen-containing amino groups of proteins, nucleic acids and membrane lipids, and disrupt their functions [4]. Because of the wide range of possibilities for silver cations to interact with biological processes, a generalized description of the antibacterial action of silver has not yet been possible [5].

Silver nanoparticles are synthesized by the reduction of silver cations. The reduction reaction can be facilitated through physical, chemical, and biological means. Physical methods include evaporation-condensation, pyrolysis, and spark discharging [6-8]. Physical methods have been shown to be environmentally safe since they include no hazardous chemicals. However, they also have low yields, require high energy consumption, and the size/shape of the particles are difficult to control [1].

Chemical methods involve a metal precursor in the form of soluble salt and a reducing agent. The reduction of the silver ions is followed by nucleation and growth of nanoparticles. Usually a capping-agent is also added to control the size and to increase the stability of the particles [9]. Chemical methods are usually simple, low cost and high yield methods, however, the reducing agents used, such as borohydride or  $\beta$ -mercaptoethanol, are hazardous to living organisms [10]. The toxic chemicals create environmental concerns, especially with large scale manufacturing, and medical concerns, as the toxic chemicals adsorbed to the nanoparticles poses risks to living organisms [11].

Biosynthesis and/or green synthesis methods have emerged as alternatives to the methods mentioned above. The term "green synthesis" is usually used when the reduction of metallic ions is achieved via mild or environmentally safe reducing agents, such as polysaccharides, aldehydes, or irradiation [12-15]. Biosynthesis, on the other hand, includes use of biological organisms (microbial synthesis), such as bacteria, fungi, algae, etc., or molecules obtained from biological organisms [16]. Microbial synthesis can be achieved via utilizing the natural biochemical processes within a microorganism or via genetically engineering the organism to tailor the nanoparticle formation [17, 18]. Microbial synthesis has been shown to be suitable for removing heavy metal ions from environment in the form of metallic nanoparticles [17]. However, when large scale

manufacturing of nanoparticles are considered, microbial synthesis poses challenges such as requirement of specialized bioreactors and aseptic working conditions [16]. Therefore, biosynthesis of nanoparticles using plant extracts have gained increased attention. In this method, various active biomolecules, such as proteins, sugars, alkaloids, terpenoids, phenolics, etc., present in the plant extracts act as the reducing- and capping-agent during particle formation.

Biosynthesis using plant extracts have several advantages compared to the techniques discussed above. First, the extracts used are considered environmentally safe and non-hazardous [19]. The extraction and synthesis procedures are simple compared to physical or microbial techniques. There is also an economical advantage since extracts of waste products can be used as well [20]. One of the most important premises of biosynthesis is the potential of beneficial biomolecules being adsorbed on the synthesized nanoparticles [21, 22]. This results in nanoparticles that are already loaded with beneficial biomolecules without the need for immobilization or functionalization steps.

In this study, we have used extracts from *Myrtus communis* leaves and grape seeds to investigate their efficiency in synthesizing silver nanoparticles. *Myrtus communis* leaves contain high amounts of sugars, tannins, flavonoids, and volatile oils, making the extract from the leaves a suitable reducing agent for metallic nanoparticle synthesis [23]. Major components of the leaf extracts have been shown to have antibacterial, anticancer, antiviral, and antioxidant properties [24]. The major component of grape seed extract is gallic acid and it has been shown to inhibit growth and promote apoptosis of cancerous cells [25].

We have compared the physical and antimicrobial characteristics of the particles synthesized using borohydride and the plant extracts as reducing agents. The physical properties were characterized via UV-Vis. spectroscopy, X-Ray diffractometry (XRD), Raman spectroscopy and scanning electron microscopy (SEM). The antimicrobial activity was tested against a gram negative (*E. coli*) and a gram positive (*S. mutans*) strain in liquid media.



## 2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOT)

### 2.1. Preparation of Plant Extracts (Bitki Özülerinin Hazırlanması)

Dried *Myrtus communis* leaves and grape seed powder from *Vitis vinifera* were obtained commercially. The extracts were prepared using water extraction [26]. Briefly, 100 g of plant material was weighed and added to 500 ml of distilled water at 60°C. The mixture was stirred via a magnetic stirrer on a temperature controlled hot plate for 1 hr., cooled to room temperature and filtered with Whatman filter number 41 (Merck & Co., Kenilworth, NJ, USA) The extracts were prepared freshly for each nanoparticle synthesis batch.

### 2.2. Synthesis of Nanoparticles with Sodium Borohydride (Nanoparçacıkların Sodyum Borohidür ile Sentezlenmesi)

Nanoparticles synthesized via chemical method using sodium borohydride (NaBH<sub>4</sub>) [27] as the reducing agent were used as control group. 2 mM NaBH<sub>4</sub> (Sigma Aldrich, St. Louis, MO, USA) and 20 mM tri-sodium citrate (Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>) (Merck & Co., Kenilworth, NJ, USA) mixture was prepared in 250 ml of ice-cold distilled water. The mixture was kept in an ice bath to prevent degradation of NaBH<sub>4</sub>. 1 mM silver nitrate (AgNO<sub>3</sub>) (Merck & Co., Kenilworth, NJ, USA) prepared in 2 ml distilled water was added on top of the mixture by dripping at ~1 drop/sec. The mixture was stirred via a magnetic stirrer for 30 min in an ice bath. At the end of 30 min, the mixture was centrifuged at 5000 rcf for 1 hr. The supernatant was discarded, and the pellet was resuspended in 25 ml distilled water. The centrifugation and resuspension was repeated two more times. After the last centrifugation step, the pellet was dried under vacuum for 24 hours.

### 2.3. Synthesis of Nanoparticles with Plant Extracts (Nanoparçacıkların Bitki Özüleri ile Sentezlenmesi)

1 mM AgNO<sub>3</sub> Merck & Co., Kenilworth, NJ, USA) prepared in 2 ml distilled water was added on top of the plant extracts at 60°C by dripping at ~1 drop/sec. The mixture was stirred via a magnetic stirrer for 30 min on a temperature controlled hot plate. At the end of 30 min, the mixture was centrifuged at 5000 rcf for 1 hr. The supernatant was discarded, and the pellet was resuspended in 25 ml distilled water. The centrifugation and resuspension were repeated two more times. After the last centrifugation step, the pellet was dried under vacuum for 24 hours.

### 2.4. UV-Vis Spectroscopy (UV-Vis Spektroskopisi)

UV-Vis spectroscopy was performed using a Varioskan Flash micro-plate reader (Fischer Scientific Inc., Hampton, NY, USA). When the synthesis of the particles was finished, 200 µl aliquots of the synthesis solutions were transferred to a 96 well plate in triplicates. Absorbance values between 300 – 600 nm wavelength were recorded and the average of the three measurements were taken.

### 2.5. XRD Analysis (XRD Analizi)

The XRD analyses were performed using a Miniflex 600 diffractometer (Rigaku Corp., Tokyo, Japan) employing 0.154056 nm Cu K $\alpha$  radiation at a 40 kV accelerating voltage and 15 mA current. Data were collected in the range  $2\theta = 20^\circ - 80^\circ$  using a  $0.01^\circ$  step size and  $1^\circ/\text{min}$  scan speed.

### 2.6. SEM Analysis (Taramalı Elektron Mikroskopi Analizi)

SEM analyses on dried nanoparticles were performed using a Hitachi SU5000 field emission SEM (Hitachi High Technologies Corp., Tokyo, Japan) at 10 kV accelerating voltage.

### 2.7. Raman Spectroscopy Analysis (Raman Spektroskopisi Analizi)

The Raman spectra of the nanoparticles was recorded using a NRS 4500 confocal Raman microscope (JASCO Co., Tokyo, Japan). The data was collected at a spectral range of 120–1900 cm<sup>-1</sup> at 784 nm laser wavelength and 2 mW laser power.

### 2.8. Antibacterial Activity Tests (Antibakteriyel Aktivite Testleri)

Antibacterial activity of the plant extracts themselves and the nanoparticles synthesized using the plant extracts were tested in liquid media. *E. coli* (ATCC 25922) and *S. mutans* (ATCC 25175) were used as model organisms. Frozen stocks of the bacteria were grown overnight in Luria-Bertani (LB) Broth (Sigma Aldrich, St. Louis, MO, USA) at 37°C. Fresh passages from the overnight cultures were grown until mid-log phase.

LB broth containing 1:10 and 1:100 dilutions of the plant extracts were used to test the plant extracts themselves. LB broth containing 60 ng/ml silver nanoparticles was used to test the nanoparticles. LB broth containing no additives was used as negative control. 300 µl of the prepared broths were placed in a 96-well microtiter plate and the bacteria were added to their respective broths to a final concentration of  $5 \times 10^4$  CFU/ml. Blanks were prepared for each group with the same type of media with no bacteria added. The bacteria were grown at 37°C with 200 rpm orbital

shaking. The growth of the bacteria was followed at 90 minutes intervals using a Varioskan Flash microplate reader (Fischer Scientific Inc., Hampton, NY, USA) at 600 nm wavelength for 16 hours. The absorbance values from the blanks of each group were subtracted from the absorbance values obtained from the respective groups.

Growth rates of the bacteria were calculated using Eq. 1 [28]

$$\mu = \frac{(\ln N_t - \ln N_{t_0})}{t - t_0} \quad (1)$$

where  $\mu$  is the growth rate ( $\text{hour}^{-1}$ ),  $t_0$  and  $t$  are the onset and end time of the log phase, respectively (hour), and  $N_{t_0}$  and  $N_t$  are the number of bacteria at  $t_0$  and  $t$ , respectively (bacteria/ml). Conversion of OD to bacteria/ml was done using previously reported conversion factors [29, 30]

### 2.9. Statistical Analysis (İstatistik Analiz)

For antibacterial activity tests, one-way repeated measures analysis of variance (RM-ANOVA) test was performed, using SPSS 25.0 (IBM, NY, USA).  $P$  values  $< 0.05$  were regarded to be statistically significant.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

### 3.1. UV-Vis Spectroscopy (UV-Vis Spektroskopisi)

UV-Vis spectroscopy yielded characteristic absorbance peaks for silver nanoparticles. The  $\lambda_{\text{max}}$  for nanoparticles synthesized with  $\text{NaBH}_4$ , *Myrtus communis* and grape seed were measured as 382 nm, 378 nm and 402 nm, respectively. (Fig. 1)

UV-Vis spectroscopy is the first and easiest step for the verification and characterization of nanoparticles. The absorbance arises from the localized surface plasmon resonance created by the oscillations of free electrons in the nanoparticles excited by light [31]. The position of the peak is an indicator of the size of the particles, the intensity of the peak is an indicator of the number of particles and the overall peak width is an indicator of the size distribution of the particles. The peaks obtained in this study indicate particles were in between 10-30 nm [32]. The size of the particles was further investigated by SEM.

### 3.2. XRD Analysis (XRD Analizi)

XRD analyses of the particles showed that the resulting particles were a mixture of Ag, AgO and Ag<sub>2</sub>O nanoparticles.  $\text{NaBH}_4$  yielded Ag and Ag<sub>2</sub>O

only, while *Myrtus communis* and grape seed extracts yielded a mixture of the three. (Fig. 2)

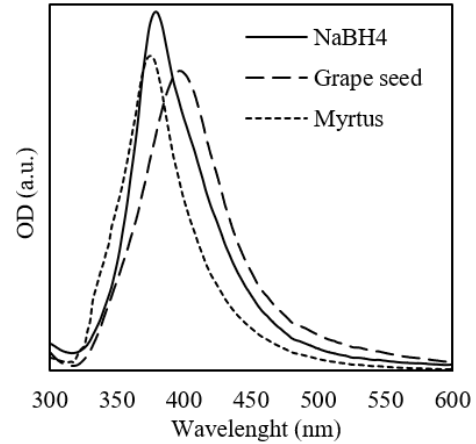


Figure 1. UV-Vis absorption spectra of the nanoparticles (*Nanoparçacıkların UV-Vis absorpsiyon spektraları*)

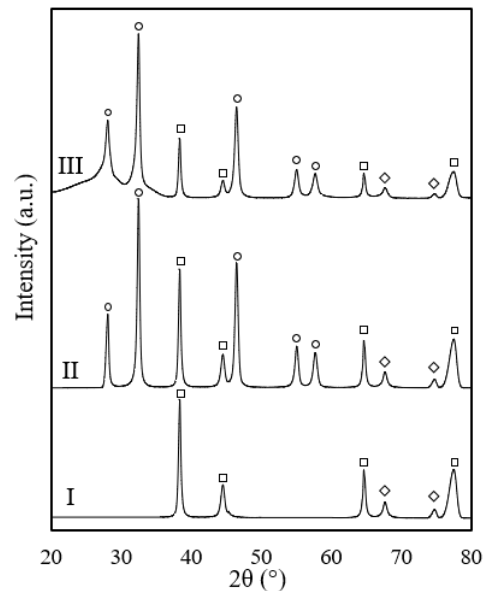


Figure 2. XRD patterns of the nanoparticles (I:  $\text{NaBH}_4$ , II: *Myrtus communis*, III: Grape seed. □: Metallic AgNP, ○: AgO, ◇: Ag<sub>2</sub>O) (*Nanoparçacıkların XRD paternleri (I: NaBH4, II: Myrtus communis, III: Üzüm çekirdeği. □: Ag, ○: AgO, ◇: Ag2O)*)

AgO and Ag<sub>2</sub>O are the two stable phases of silver oxide. These phases can be deoxidized and decomposed into metallic Ag [33]. Silver oxides also possess strong antibacterial properties like metallic AgNPs [34, 35]. In fact, it is suggested that the antibacterial activity of silver oxides is higher compared to metallic AgNPs [36]. Therefore, the lack of ultrapure metallic AgNPs was not a concern within the context of this study.

### 3.3. SEM Analysis (*Taramalı Elektron Mikroskopi Analizi*)

SEM analyses showed that roughly spherical particles with a wide size distribution was obtained in all cases. (Fig. 3) The size of the particles ranged from 5-30 nm with majority of the particles being on the larger side. These findings were in accordance with the UV-Vis spectroscopy findings (Fig. 1).

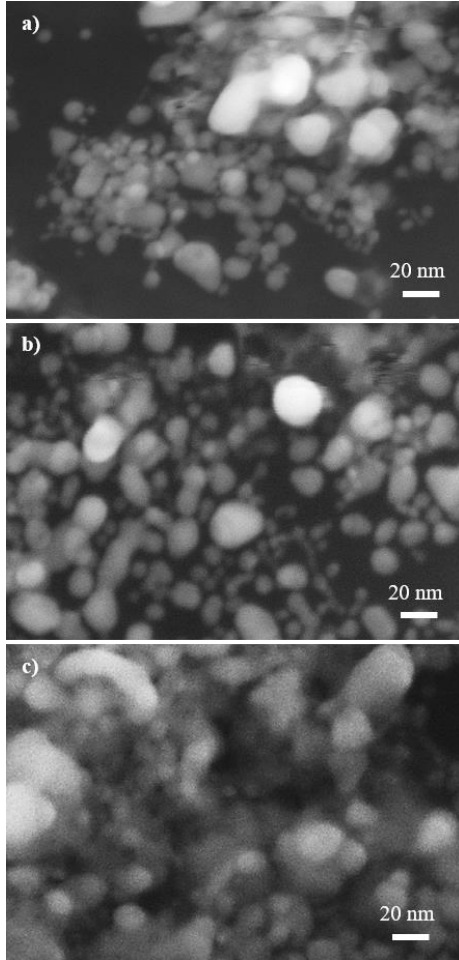


Figure 3. SEM images of the nanoparticles synthesized with borohydrite (a), *Myrtus communis* extract (b) and grape seed extract (c) (*Borohidrür (a), Myrtus communis* özütü (b) ve üzüm çekirdeği özütü (c) ile sentezlenen nanoparçacıkların SEM görüntüleri)

### 3.4. Raman Spectroscopy Analysis (*Raman Spektroskopisi Analizi*)

Raman spectroscopy was performed to investigate possible phytochemicals absorbed on the silver nanoparticles. The Raman spectra obtained from the nanoparticles used in the study are shown in Fig. 4. The observed Raman spectra bands and their tentative assignments are shown in Table 1. Spectral differences and some common bands were observed. The ~220 cm<sup>-1</sup> band attributed to Ag-O or Ag-N bands were observed in all samples. Bands attributed

to in-plane bending C=O bonds and out of plane bending C-H bonds were also observed in all specimens. As expected, bands attributed to plant biomass and pigments were only observed in nanoparticles synthesized with plant extracts.

Raman spectroscopy has become increasingly popular for investigating biomolecules and their orientations on metallic surfaces [37]. The origin of the observed spectra is believed to originate by the surface plasmon resonance and the charge transfer interactions between the molecules on the surface [38]. Our findings indicate that phytochemicals present in the plant extracts have indeed been absorbed on the silver nanoparticles. Slight variations observed in the spectra are expected due to the differences in the compositions of the two different plants.

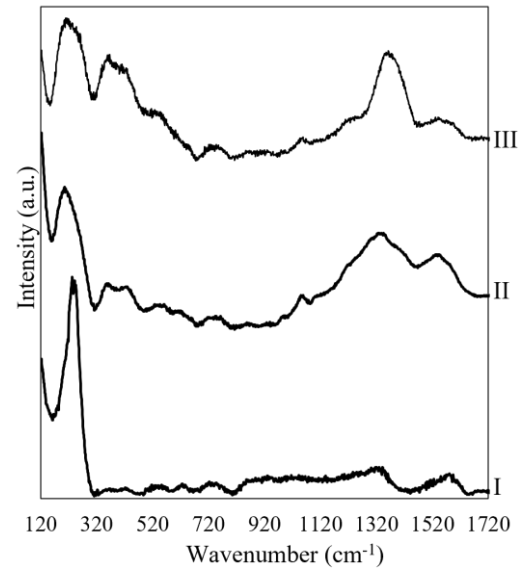


Figure 4. Background-corrected Raman spectra of the nanoparticles synthesized with borohydrite (I), *Myrtus communis* extract (II) and grape seed extract (III) (*Borohidrür (I), Myrtus communis* özütü (II) ve üzüm çekirdeği özütü (III) ile sentezlenen nanoparçacıkların zemindeğer düzeltmesi yapılmış Raman spektralleri)

Table 1. Raman spectra bands of the nanoparticles and their tentative assignments. (BH: Borohydride, Mc: Myrtus communis extract, Gs: Grape seed extract) (*Nanoparçacıkların Raman banıları ve atamaları (BH: Borohidür, Ms: Myrtus communis özütü, Gs: Üzüm çekirdeği özütü)*)

Band (cm <sup>-1</sup> )			Assignment
BH	Mc	Gs	
229	222	221	Ag-N, Ag-O [39]
-	380	380	Plant biomass (cellulose) [40]
560	560	560	in-plane bending C=O bonds [41]
739	739	739	out of plane bending C-H bonds [41]
-	1056	1056	in-plane bending C-H bonds [41]
-	1207	1207	C-X stretching vibrations [41]
1307	1310	-	In-plane bending C-H bonds [41]
-	-	1350	CH- and -CH <sub>2</sub> deformations [42]
-	1527	1527	Pigments (chlorophyll and carotenoids) [40]
1570	-	-	C-COO- [43]

### 3.5. Antibacterial Activity Tests (*Antibakteriyel Aktivite Testleri*)

Antibacterial activity tests were performed using a gram-positive and a gram-negative strain in liquid media. The growth rates and the growth curves of *S. mutans* and *E. coli* are shown in Table 2 and Fig. 5, respectively. The percent growth inhibition rates are shown in Fig. 6.

For both strains, maximum inhibition was observed with AgNPs synthesized with *M. communis* extract at ~80% inhibition. AgNPs synthesized with grape seed extract showed a slightly lower and similar inhibition at ~75% inhibition. AgNPs synthesized with borohydride showed and inhibition ~60%. The 1:10 dilution of the plant extracts showed a moderate inhibition at ~25-35% inhibition. At 1:100 dilution almost no inhibition was observed.

These results indicate that biosynthesized nanoparticles had a more potent antibacterial effect compared to the extracts alone. This finding is noteworthy since when the extracts are added to the growth media, the available concentration of phytochemicals is expected to be higher, compared to biosynthesized nanoparticles. However, as our findings indicate, biosynthesized nanoparticles had a

more potent antibacterial effect compared to the extracts themselves.

One possible explanation to this observation is that when the plant extracts are added to the growth media, they may be getting inactivated via degradation, oxidation, interactions with the components of the media, or other mechanisms. Raman spectroscopy analyses showed that the nanoparticles synthesized with plant extracts carry phytochemicals through absorption to their surface. As has been reported before, activity or stability of proteins can be enhanced through absorption onto nanoparticles [44, 45]. A similar effect may be responsible for the superior antibacterial effects on nanoparticles. Absorption to the nanoparticle surface may be increasing the stability of the phytochemicals by preventing/delaying inactivation.

Another possible explanation for this observation is a synergistic antibacterial activity of silver ions and the phytochemicals. Similar synergistic effects have been reported for silver nanoparticles and conventional antibiotics, antimicrobial peptides, and other plant extracts [46-48].

Further studies elaborating the individual components of the plant extracts and the antimicrobial effect mechanisms will help to elucidate the observations reported here.

Table 2. Calculated growth rate of the bacteria (Group names are the same as indicated in Fig. 5) (*Bakterilerin hesaplanmış büyüme oranları (Grup isimleri Şekil 5'te belirtilenlerle aynıdır)*)

Group	Growth rate (hour <sup>-1</sup> )	
	<i>E. coli</i>	<i>S. mutans</i>
I	0.1335	0,1114
II	0.1786	0,1649
III	0.1808	0,1659
IV	0.2928	0,2603
V	0.3368	0,2833
VI	0.4385	0,3567
VII	0.4502	0,3765
VIII	0.4519	0,3911

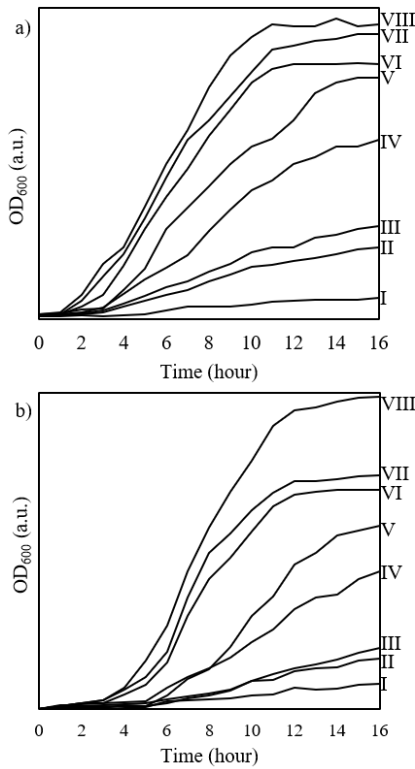


Figure 5. Growth curves of *E. coli* (a) and *S. mutans* (b) (I: *M. communis*-AgNP, II: Grape seed-AgNP, III: Borohydride-AgNP, IV: 1:10 *M. communis* extract, V: 1:10 grape seed extract, VI: 1:100 *M. communis* extract, VII: 1:100 grape seed extract, VIII: Control) (*E. coli* (a) ve *S. mutans* (b) büyüme eğrileri (I: *M. communis*-AgNP, II: Üzüm çekirdeği-AgNP, III: Borohydür-AgNP, IV: 1:10 *M. communis* özütü, V: 1:10 üzüm çekirdeği özütü, VI: 1:100 *M. communis* özütü, VII: 1:100 üzüm çekirdeği özütü, VIII: Kontrol))

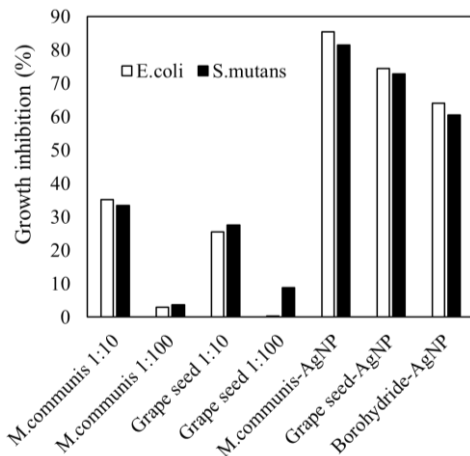


Figure 6. Percent inhibition rates of the tested agents against *E. coli* and *S. mutans*. (Test edilen ajanların *E. coli* ve *S. mutans*'a karşı yüzde inhibisyon oranları)

#### 4. CONCLUSIONS (SONUÇ)

Biosynthesis of silver nanoparticles offer a myriad of advantages, such as being surfactant free, economically, and environmentally viable, and resulting in particles loaded with phytochemicals. In this study we have used two plant extracts prepared by simple water extraction for biosynthesis of silver / silver oxide nanoparticles. We have shown that silver nanoparticles and the phytochemicals absorbed on them show a synergistic effect, resulting in superior antibacterial activity compared to nanoparticles synthesized by conventional solution-based techniques. Moreover, we have shown that biosynthesized nanoparticles show superior antibacterial activity compared to the plant extracts themselves. We propose the observed effect is due to stabilization of the phytochemicals when absorbed onto the nanoparticles. Further studies elaborating the individual components of the plant extracts and the antimicrobial effect mechanisms will help to elucidate the observations reported here.

#### ACKNOWLEDGMENT (TEŞEKKÜR)

This study was carried out using the facilities of Ankara Yıldırım Beyazıt University, Central Research Laboratory Application and Research Center (MERLAB).

#### CONFLICT OF INTEREST STATEMENT (ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ)

The author declare that there is no conflict of interest.

#### REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] X.-F. Zhang, Z.-G. Liu, W. Shen, and S. Gurunathan, "Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Properties, Applications, and Therapeutic Approaches," (in eng), *Int J Mol Sci*, vol. 17, no. 9, pp. 1534, 2016. doi: 10.3390/ijms17091534.
- [2] J. W. Alexander, "History of the Medical Use of Silver," *Surgical Infections*, vol. 10, no. 3, pp. 289-292, 2009. doi: 10.1089/sur.2008.9941.
- [3] H. J. Klasen, "Historical review of the use of silver in the treatment of burns. I. Early uses," *Burns*, vol. 26, no. 2, pp. 117-130, 2000/03/01/ 2000. doi: 10.1016/S0305-4179(99)00108-4.

- [4] A. B. G. Lansdown, "Silver in Medical Devices: Technology and Antimicrobial Efficacy," in *Silver in Healthcare: Its Antimicrobial Efficacy and Safety in Use: The Royal Society of Chemistry*, 2010. pp. 92-143.
- [5] S. Chernousova and M. Epple, "Silver as antibacterial agent: ion, nanoparticle, and metal," (in eng), *Angew Chem Int Ed Engl*, vol. 52, no. 6, pp. 1636-53, Feb 4 2013. doi: 10.1002/anie.201205923.
- [6] A. Schmidt-Ott, "New approaches to in situ characterization of ultrafine agglomerates," *Journal of Aerosol Science*, vol. 19, no. 5, pp. 553-563, 1988.
- [7] D. Tien et al., "Novel technique for preparing a nano-silver water suspension by the arc-discharge method," *Rev. Adv. mater. sci.*, vol. 18, pp. 750-756, 2008.
- [8] T. Pluym et al., "Solid silver particle production by spray pyrolysis," *Journal of aerosol science*, vol. 24, no. 3, pp. 383-392, 1993.
- [9] Y. Xia, Y. Xiong, B. Lim, and S. E. Skrabalak, "Shape-Controlled Synthesis of Metal Nanocrystals: Simple Chemistry Meets Complex Physics?," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 48, no. 1, pp. 60-103, 2009, doi: 10.1002/anie.200802248.
- [10] S. Prabhu and E. K. Poulouse, "Silver nanoparticles: mechanism of antimicrobial action, synthesis, medical applications, and toxicity effects," *International nano letters*, vol. 2, no. 1, pp. 1-10, 2012.
- [11] V. Demchenko et al., "Effect of the type of reducing agents of silver ions in interpolyelectrolyte-metal complexes on the structure, morphology and properties of silver-containing nanocomposites," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, p. 7126, 2020/04/28 2020. doi: 10.1038/s41598-020-64079-0.
- [12] P. Raveendran, J. Fu, and S. L. Wallen, "Completely "Green" Synthesis and Stabilization of Metal Nanoparticles," *Journal of the American Chemical Society*, Article vol. 125, no. 46, pp. 13940-13941, 2003. doi: 10.1021/ja029267j.
- [13] Y. Yin, Z. Y. Li, Z. Zhong, B. Gates, Y. Xia, and S. Venkateswaran, "Synthesis and characterization of stable aqueous dispersions of silver nanoparticles through the Tollens process," *Journal of Materials Chemistry*, Article vol. 12, no. 3, pp. 522-527, 2002. doi: 10.1039/b107469e.
- [14] J. P. Abid, A. W. Wark, P. F. Brevet, and H. H. Girault, "Preparation of silver nanoparticles in solution from a silver salt by laser irradiation," *Chemical Communications*, 10.1039/B200272H no. 7, pp. 792-793, 2002. doi: 10.1039/B200272H.
- [15] N. M. Dimitrijevic, D. M. Bartels, C. D. Jonah, K. Takahashi, and T. Rajh, "Radiolytically induced formation and optical absorption spectra of colloidal silver nanoparticles in supercritical ethane," *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 105, no. 5, pp. 954-959, 2001. doi: 10.1021/jp0028296.
- [16] V. K. Sharma, R. A. Yngard, and Y. Lin, "Silver nanoparticles: Green synthesis and their antimicrobial activities," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 145, no. 1, pp. 83-96, 2009/01/30/ 2009. doi: 10.1016/j.cis.2008.09.002.
- [17] Mandeep and P. Shukla, "Microbial Nanotechnology for Bioremediation of Industrial Wastewater," (in English), *Frontiers in Microbiology*, vol. 11, no. 2411, 2020-November-02 2020. doi: 10.3389/fmicb.2020.590631.
- [18] T. J. Park, K. G. Lee, and S. Y. Lee, "Advances in microbial biosynthesis of metal nanoparticles," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 100, no. 2, pp. 521-534, 2016/01/01 2016. doi: 10.1007/s00253-015-6904-7.
- [19] S. Ahmed, M. Ahmad, B. L. Swami, and S. Ikram, "A review on plants extract mediated synthesis of silver nanoparticles for antimicrobial applications: A green expertise," *Journal of Advanced Research*, vol. 7, no. 1, pp. 17-28, 2016/01/01/ 2016. doi: 10.1016/j.jare.2015.02.007.
- [20] G. Vasyliov, V. Vorobyova, M. Skiba, and L. Khrokalo, "Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Waste Products (Apricot and Black Currant Pomace) Aqueous Extracts and Their Characterization," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, Article ID. 4505787, 2020. doi: 10.1155/2020/4505787.
- [21] P. Khandel, R. K. Yadaw, D. K. Soni, L. Kanwar, and S. K. Shahi, "Biogenesis of metal nanoparticles and their pharmacological applications: present status and application prospects," *Journal of Nanostructure in Chemistry*, vol. 8, no. 3, pp. 217-254, 2018. doi: 10.1007/s40097-018-0267-4.

- [22] D. Inbakandan, R. Venkatesan, and S. A. Khan, "Biosynthesis of gold nanoparticles utilizing marine sponge *Acanthella elongata* (Dendy, 1905)," *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 81, no. 2, pp. 634-639, 2010.
- [23] T. Baytop, *Therapy with Medicinal Plants in Turkey*. Istanbul, Turkey: Istanbul University Press, 1984.
- [24] V. Aleksic and P. Knezevic, "Antimicrobial and antioxidative activity of extracts and essential oils of *Myrtus communis* L.," *Microbiological Research*, vol. 169, no. 4, pp. 240-254, 2014/04/01/ 2014. doi: 10.1016/j.micres.2013.10.003.
- [25] R. Veluri, R. P. Singh, Z. Liu, J. A. Thompson, R. Agarwal, and C. Agarwal, "Fractionation of grape seed extract and identification of gallic acid as one of the major active constituents causing growth inhibition and apoptotic death of DU145 human prostate carcinoma cells," *Carcinogenesis*, vol. 27, no. 7, pp. 1445-1453, 2006. doi: 10.1093/carcin/bgi347.
- [26] N. Krithiga, A. Rajalakshmi, and A. Jayachitra, "Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Leaf Extracts of *Clitoria ternatea* and *Solanum nigrum* and Study of Its Antibacterial Effect against Common Nosocomial Pathogens," *Journal of Nanoscience*, vol. 2015, p. 928204, 2015/04/09 2015. doi: 10.1155/2015/928204.
- [27] K. Mavani and M. Shah, "Synthesis of silver nanoparticles by using sodium borohydride as a reducing agent," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 1-5, 2013.
- [28] P. Dalgaard, T. Ross, L. Kamperman, K. Neumeyer, and T. A. McMeekin, "Estimation of bacterial growth rates from turbidimetric and viable count data," *International Journal of Food Microbiology*, vol. 23, no. 3, pp. 391-404, 1994/11/01/ 1994. doi: 10.1016/0168-1605(94)90165-1.
- [29] S. Sutton, "Measurement of microbial cells by optical density," *Journal of Validation technology*, vol. 17, no. 1, pp. 46-49, 2011.
- [30] K. Stevenson, A. F. McVey, I. B. Clark, P. S. Swain, and T. Pilizota, "General calibration of microbial growth in microplate readers," *Scientific reports*, vol. 6, no. 1, pp. 1-7, 2016.
- [31] S. A. Maier, "Surface Plasmon Polaritons at Metal / Insulator Interfaces," in *Plasmonics: Fundamentals and Applications*. New York, NY: Springer US, pp. 21-37, 2007.
- [32] S. Agnihotri, S. Mukherji, and S. Mukherji, "Size-controlled silver nanoparticles synthesized over the range 5–100 nm using the same protocol and their antibacterial efficacy," *RSC Advances*, 10.1039/C3RA44507K vol. 4, no. 8, pp. 3974-3983, 2014. doi: 10.1039/C3RA44507K.
- [33] G. I. N. Waterhouse, G. A. Bowmaker, and J. B. Metson, "The thermal decomposition of silver (I, III) oxide: A combined XRD, FT-IR and Raman spectroscopic study," *Physical Chemistry Chemical Physics*, 10.1039/B103226G vol. 3, no. 17, pp. 3838-3845, 2001. doi: 10.1039/B103226G.
- [34] A. Besinis, T. De Peralta, and R. D. Handy, "The antibacterial effects of silver, titanium dioxide and silica dioxide nanoparticles compared to the dental disinfectant chlorhexidine on *Streptococcus mutans* using a suite of bioassays," (in eng), *Nanotoxicology*, vol. 8, no. 1, pp. 1-16, Feb 2014. doi: 10.3109/17435390.2012.742935.
- [35] H. Yang, Y.-y. Ren, T. Wang, and C. Wang, "Preparation and antibacterial activities of Ag/Ag<sup>+</sup>/Ag<sub>3</sub><sup>+</sup> nanoparticle composites made by pomegranate (*Punica granatum*) rind extract," *Results in Physics*, vol. 6, pp. 299-304, 2016/01/01/ 2016. doi: 10.1016/j.rinp.2016.05.012.
- [36] Y. H., W. K., D. X., Z. G., and G. M., "Study on Relationship Between Antibacterial Property and Silver Ions in Inorganic Antibacterial Powders," *Journal of the Chinese Ceramic Society*, vol. 30, 2002.
- [37] X. X. Han, B. Zhao, and Y. Ozaki, "Surface-enhanced Raman scattering for protein detection," *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 394, no. 7, pp. 1719-1727, Aug 2009. doi: 10.1007/s00216-009-2702-3.
- [38] J. F. Arenas, I. López-Tocón, J. L. Castro, S. P. Centeno, M. R. López-Ramírez, and J. C. Otero, "Resonant charge transfer on the nanoscale: studying doublet states of adsorbates by surface-enhanced Raman scattering," *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 36, no. 6-7, pp. 515-521, 2005. doi: 10.1002/jrs.1331.
- [39] J. Chowdhury, M. Ghosh, and T. N. Misra, "pH-Dependent Surface-Enhanced Raman Scattering of 8-

Hydroxy Quinoline Adsorbed on Silver Hydrosol," (in eng), *J Colloid Interface Sci*, vol. 228, no. 2, pp. 372-378, Aug 15 2000. doi: 10.1006/jcis.2000.6977.

[40] U. P. Agarwal, "1064 nm FT-Raman spectroscopy for investigations of plant cell walls and other biomass materials," *Frontiers in Plant Science*, vol. 5, no. 490, 2014-September-23 2014. doi: 10.3389/fpls.2014.00490.

[41] J. Chowdhury and M. Ghosh, "Concentration-dependent surface-enhanced Raman scattering of 2-benzoylpyridine adsorbed on colloidal silver particles," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 277, no. 1, pp. 121-127, 2004/09/01/ 2004. doi: 10.1016/j.jcis.2004.04.030.

[42] A. Sengupta, M. L. Laucks, and E. J. Davis, "Surface-enhanced Raman spectroscopy of bacteria and pollen," *Appl Spectrosc*, vol. 59, no. 8, pp. 1016-23, Aug 2005. doi: 10.1366/0003702054615124.

[43] A. Campion, "Infrared and Raman Spectroscopy of Biological Materials. Practical Spectroscopy Series. Volume 24 Edited by Hans-Ulrich Gremlich (Novartis Pharma AG, Basel, Switzerland) and Bing Yan (ChemRx Advanced Technologies, Inc., South San Francisco, California). Marcel Dekker: New York and Basel. 2001. xii + 582 pp. \$195.00. ISBN 0-8247-0409-6," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 123, no. 42, pp. 10427-10427, 2001. doi: 10.1021/ja004845m.

[44] S. Ding, A. A. Cargill, I. L. Medintz, and J. C. Claussen, "Increasing the activity of immobilized enzymes with nanoparticle conjugation," *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 34, pp. 242-250, 2005. doi: 10.1016/j.copbio.2015.04.005.

[45] C. Palocci et al., "Lipolytic Enzymes with Improved Activity and Selectivity upon Adsorption on Polymeric Nanoparticles," *Biomacromolecules*, vol. 8, no. 10, pp. 3047-3053, 2007. doi: 10.1021/bm070374l.

[46] L. Zou et al., "Synergistic antibacterial activity of silver with antibiotics correlating with the upregulation of the ROS production," *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, p. 11131, 2018. doi: 10.1038/s41598-018-29313-w.

[47] S. Ruden, K. Hilpert, M. Berditsch, P. Wadhvani, and A. S. Ulrich, "Synergistic Interaction between Silver Nanoparticles and Membrane-

Permeabilizing Antimicrobial Peptides," *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, vol. 53, no. 8, pp. 3538-3540, 2009. doi: 10.1128/AAC.01106-08.

[48] K. Aabed and A. E. Mohammed, "Synergistic and Antagonistic Effects of Biogenic Silver Nanoparticles in Combination With Antibiotics Against Some Pathogenic Microbes," *Front Bioeng Biotechnol*, vol. 9, pp. 652362-652362, 2021. doi: 10.3389/fbioe.2021.652362.

This is an open access article under the CC-BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)





# Cornell Kas-İskelet Rahatsızlık Anketi Kullanarak Kas-İskelet Rahatsızlıkları Kaynaklı Üretim Çalışanı Devamsızlıklarının Azaltılması ve Sıralı Lojistik Regresyon Modeli

Duygu İNCİ<sup>a</sup>, Mürüvvet Deniz SEZER<sup>\*.b</sup>, Bengü GÜNGÖR<sup>c</sup>, Pırıl ERGÖNEÇ<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Ege Fren Sanayi Tic. A.Ş., Yalın Ofis Mühendisi, İZMİR, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Yaşar Üniversitesi İşletme Bölümü, 35100, İZMİR, TÜRKİYE

<sup>c</sup> İzmir Demokrasi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, 35100, İZMİR, TÜRKİYE

## MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 08.11.2021  
Kabul : 25.12.2021

**Anahtar Kelimeler:**  
Cornell Kas-İskelet Rahatsızlık Anketi, Ergonomi analizi, Kas-İskelet rahatsızlıkları, Lojistik Regresyon Analizi, Otomotiv endüstrisi

## ÖZ

Günümüzde, aşırı yüklenmiş işgücüne bağlı olarak çalışma ortamında insan motivasyonunu ve sağlığını etkileyebilecek zorluklar gitgide artmaktadır. Artan rekabet ortamının beraberinde getirdiği yoğun üretim faaliyetleri, özellikle üretim çalışanlarında kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının daha fazla meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında otomotiv endüstrisinde faaliyet gösteren bir yan sanayi kuruluşunda talaşlı üretim sırasında meydana gelen kas-iskelet sistemi kaynaklı işe devamsızlıkların azaltılması için ergonomi analizi çalışması yapılması hedeflenmiştir. İlk olarak, ergonomik olmayan çalışma koşulları firma içindeki proje ekibi çalışanlarının katıldığı çalıştay sonucunda belirlenmiştir. Belirlenen bu koşullar, yapılacak olan analizin bağımsız değişkenlerini olarak tanımlanmıştır. Bağımlı değişken olarak adlandırılan bölgesel ağrı durumu üzerinde bağımsız değişkenlerin etkisinin analizi için veri toplama aracı olarak Cornell Üniversitesi tarafından geliştirilen "Kas-İskelet Sistemi Rahatsızlık Anketi" kullanılmıştır. Veri analizi kısmında ise, bağımsız değişkenlerin bölgesel ağrı durumu üzerindeki etkileri Lojistik Regresyon Analizi ile IBM SPSS Statistics 25.0 programı aracılığıyla gözlemlenmiştir. İstatistiksel analizden sonra, analiz çıktılarının validasyonu firmanın ilgili ekibinde yer alan çalışanların görüşleri alınarak sağlanmıştır. Çalışmanın uygulama aşamasında firma, üretim çalışanlarının kas-iskelet sistemi kaynaklı devamsızlıklarında karşı önlemler olarak düşüş sağlamayı hedeflemektedir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.15>

# Reducing the Musculoskeletal Disorders-induced Production Employee Absenteeism Through the Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire and Ordinal Logistic Regression Model

## ARTICLE INFO

Received: 08.11.2021  
Accepted: 25.12.2021

### Keywords:

Automotive industry,  
Cornell  
Musculoskeletal

## ABSTRACT

Today, the overworked workforce situation is getting more prevalent that may result in impair human motivation and health in the workplace. Increased musculoskeletal disorders, especially among production employees, are caused by increased production activities brought on by a more competitive economy. Therefore, the aim of this study is to conduct an ergonomics analysis in order to reduce absenteeism caused by musculoskeletal system disorders during machining in an automotive sub-industrial company. As a consequence of the workshop attended by the relevant project team workers within the company, non-ergonomic working conditions were determined at first. These defined conditions were also specified as the independent variables for the analysis section. The "Musculoskeletal Discomfort Questionnaire," developed by Cornell University, was

\*Sorumlu yazar: deniz.sezer@yasar.edu.tr

**To cite this article:** İnci, Sezer, Güngör and Ergöneç , "Reducing the Musculoskeletal Disorders-induced Production Employee Absenteeism Through the Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire and Ordinal Logistic Regression Model", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp.330-345, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.03.15

---

Discomfort  
Questionnaire,  
Ergonomics analysis,  
Logistic Regression  
Analysis,  
Musculoskeletal  
disorders

employed as a data collecting method for the investigation of the effect of independent variables on the dependent variable, local pain status. The effects of independent variables on local pain status were analysed using Logistic Regression Analysis via the IBM SPSS Statistics 25.0 program. Following the statistical examination, the analytical outputs were validated by expert feedback with the company's relevant team workers. In the implementation phase, the company aims to reduce production employee absenteeism due to the musculoskeletal system disorders by taking precautions.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.15>

---

## 1. INTRODUCTION (*giriş*)

Musculoskeletal disorders (MSDs) refer to a group of inflammatory and degenerative diseases and defined by the World Health Organization as "health issues involving the locomotor apparatus, including muscles, tendons, bone skeleton, cartilage, ligaments, and nerves." This includes any form of problem, from little annoyances to permanent and incapacitating traumas." [1]. The low back, neck, shoulder, forearm, and hand are the most typically affected body parts, while the lower extremities have recently garnered greater attention [2]. The number of workers eligible for disability pensions due to musculoskeletal illnesses, has increased dramatically during the previous ten years [3]. Workplace design that ignores ergonomic principles has negative effects for worker health and safety by creating musculoskeletal problems and psychological discomfort [4]. In addition to the unmeasurable human misery, there are higher costs to employers in the form of workers' claims, by causing less productivity, increasing scrap and creating lower manufacturing quality, and finally it creates decrease in the viability of a company [5].

The existing European Union regulatory framework has been used to act in the UK to avoid certain illnesses. Key directives, such as health and safety environment at work, manual handling of equipment, and display screen equipment using, were introduced in 1992 and have played a significant role in raising public awareness and implementing prevention measures across a wide range of industrial sectors [6]. Punnett and Wegman [2] indicate that musculoskeletal disorders are three to four times more common in industries and occupations than in the general population. Heavy and light manufacturing are assessed as high-risk industries in their study. As another aspect, Hiba [7] states that increased productivity and competitiveness can be achieved by improving the working environment and work structure. Additionally, entrepreneurs of small and medium-sized businesses in Asia, Latin America, and Africa have proved this by taking voluntary action to enhance working conditions and production.

The increased automation of the manufacturing processes in the automotive industry, which has assigned much of the assembly to machines, has

greatly reduced the stress of heavy lifting on workers [6]. Despite workplace ergonomic improvements, many jobs still demand employees to complete repeated tasks [8]. Therefore, companies need to evaluate their work environment under the view of ergonomic-based potential risk conditions periodically. Ergonomic analyses can be performed in a variety of ways, according to the literature. Rapid Entire Body Assessment (REBA) and Rapid Upper Limb Assessment (RULA) methods are the most prevalent and appropriate for usage with the other ergonomic assessment methods, used by combined with each other as well. For instance, ergonomic risk assessment of the walker design study developed by Top et al. [9] performed the analyses with both REBA and RULA methods via using Digital Human Modelling (DHM). As another joint-method study, Koç et al. [10] designed an assembly fixture for use in the building of the helicopter transmission and applied Biomechanical Movement Analysis (BMA) methodologies to assess the suitability for ergonomic conditions. As a precedent study for this study's methodology, Salazar and Prasetyo [11] performed the Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire (CMDQ), RULA, and REBA methods to measure ergonomic risk stemming from employee postures working in wafer industry.

In this study, a company operating in the automotive industry in Turkey is selected for analysis. An ergonomic evaluation matrix is used in this company on parts that are regarded to be ergonomically hazardous. Then, NIOSH, REBA and RULA analyses are carried out based on the outcome by concentrating on the operation. Following these evaluations, manufacturing and other divisions collaborate on improvement studies for activities that necessitate precautions. The workplace doctor's data, on the other hand, shows that Musculoskeletal Disorders account for 52 percent of the reports received by the operators. This issue has highlighted the importance of conducting company-wide research to reduce production employee absenteeism caused by musculoskeletal problems. The aim of this study was constructed based on this problem and, by this aim, the Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire (CMDQ) has been used to gather data for this study, which was designed to reduce employee absenteeism.

The Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire considers the severity and frequency of pain in the body, as well as body postures, gender, and the manner in which labor is performed [12]. CMDQ is a well-designed data gathering tool, which was developed at Cornell University in 1999, musculoskeletal disorders identification [13]. This tool has been used in research involving repetitive actions in a variety of industries. According to Koç and Testik [14], CMDQ's advantages include its low cost, effectiveness, and ability to handle big samples. For all these reasons, the fact that this study targets a real-world problem by considering human health and that it employs a low-cost data collection instrument owing to the CMDQ method are the primary motivators that will set it apart from similar studies.

Following the data gathering, the impacts of the determined independent variables (factors generating musculoskeletal disorders) on dependent variables (local pain states in the body parts) were examined using the logistic regression analysis approach, which is one of the statistical analysis methods. Gathered data stored in an Excel file and then exported to IBM SPSS Statistics 25.0 software to perform logistic regression analysis. The research questions addressed in the statistical analysis part are as follows:

**RQ1:** Which independent variable causes the most pain in multiple body parts?

**RQ2:** What are the independent variables that make a significant difference due to body parts?

**RQ3:** Which independent variables affect the right and left sides of the body parts (e.g., right wrist vs. left wrist) differently?

Section two explains how the Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire was used in the study and how the logistic regression analysis was methodologically conducted.

## 2. METHODOLOGY (METODOLOJİ)

In this section of the study, firstly, the structure of the Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire used as a data collection tool, some application examples in the literature and its application in the case company are mentioned. Then, the features of logistic regression analysis, which constitutes the statistical analysis methodology of the study, some similar ergonomics studies applied in the literature and its designed structure are presented.

### 2.1. Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire (Cornell Kas-İskelet Rahatsızlıkları Anketi)

One-dimensional pain scales may be used for anatomical locations are a frequent and valid way for obtaining pain intensity [15]. These scales, on the other hand, do not consider functional characteristics like occupational activity. The Roland-Morris Disability Questionnaire and the Oswestry Disability Index are two common questionnaires with functional outcomes [16]. However, these tools are only useful for chronic low back pain and limitations in everyday life. Other questionnaires dealing with office work, such as the RSI-QuickScan, focus specifically on problems in the arm and shoulder regions, as well as the neck area [17]. The Nordic Musculoskeletal Questionnaire (NMQ), unlike the RSI-QuickScan, collects data on the presence of musculoskeletal problems in nine important anatomical regions from the neck to the foot.

The Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire (CMDQ) collects information on the severity of discomfort as well as the effects of the condition for specific regions of human body [18]. The survey is also a one-page chart that combines the frequency and intensity of musculoskeletal pain and complaints with work-related impairments for 20 body regions [19]. In the literature, there are similar studies applied to CMDQ in the automotive industry. Smets [20] investigated self-reported MSD in the neck and shoulders during the overhead work in automotive assembly. In another study presented by Aziz et al. [21], MSD and ergonomics risk factors are examined by using CMDQ among production team members at an automotive industry. As can be seen in the studies given as examples, similar CMDQ applications have been basically carried out in automotive assembly lines. However, in this study, the machining process, which requires more physical power and repetitive work, is discussed as different from those ergonomics studies.

The CMDQ was chosen as the data collection technique for this study because of the features described above. Within the case company, the production department was found to have the highest rate of absence due to musculoskeletal problems, as well as the highest number of reports received. The male type CMDQ was used because the production department is mostly made up of men employees. The Turkish version of the questionnaire (T-CMDQ) sample presented by Erdiç et al. [13] was used in this section of the study (see Figure 1).



**Table 1.** Gathered data categories within the study  
(Çalışma Kapsamında Toplanan Veri Kategorileri)

Independent variables	Defined categories
Tonnage in shift	0-15000; 15000-30000; 30000-60000; 130000 and over
Apparatus type	Hydraulic; Mechanic-Hydraulic; Mechanic
Job experience in the industry	Inexperienced; 0-1 year; 1-5 year; 5-10 year; 10 year and over
Job experience in the case company	0-1 year; 1-5 year; 5-10 year; 10 year and over
Body-mass index	15-20; 20-25; 25-30; 30 and over
Sport frequency in a week	Never; Sometimes; 1 day; 2-3 days; 4-5 days; Everyday
Sleep time in a day	Less than 3 hrs; 3-4 hrs; 5-6 hrs; 7-8 hrs
Overtime during the last fifteen days	Yes; No
Local pain status in a week	Never; 1-2 times; 3-4 times; Only one time in each day; Several times in each day

According to literature research, it was detected that logistic regression analysis was commonly used in similar MSD studies. Abledu and Abledu [26] applied multiple logistic regression analysis to investigate the prevalence and predicted characteristics of MSDs. As another study presented by Ling et al. [27], they used binary logistic regression is beneficial for the determining significant factors for MSDs development among back-end workers. Alexopoulos et al. [28] investigated the relationships between physical, psychological, and individual variables and several endpoints of musculoskeletal complaints of the low back, neck, shoulders, and hand/wrist using logistic regression analysis. In MSD investigations, different types of logistic regression analysis are performed, as demonstrated in the literature.

Within this study, Warner's work [29] on ordinal logistic regression was the source of inspiration for the study's statistical analysis method. As statistical aspect, the author mentioned that when a dependent variable only has two possible values (e.g., yes or no), binary logistic regression is typically used to test or model the relationship between that answer and a number of potential causal variables, with each relationship assessed in terms of an odds ratio (OR). On the other side, when such dependent variable is categorical and has more than two possible values, multinomial logistic regression is used. Ordinal

logistic regression is a sort of multinomial regression that is particularly useful when the response variable is ordinal. Moreover, according to Warner's study, ordinal response variables are popular in medical research. For instance, a pain score could be recoded to "some discomfort" rather than "none" or "severe pain" rather than the rest which can be claimed as ordinal logistic regression's study scope aspects.

The dependent and independent variable categories identified in this study (see Table 1) both comply with the ordinal logistic regression features and are the recommended analysis approach in the evaluation of local pain state, as similar in the Warner's study, for all of the reasons described above. In section three, the data collection of the study with T-CMDQ and the implementation of ordinal logistic regression through IBM Statistics SPSS 25.0 software will be discussed.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

This study focuses on the investigate the ergonomics problems in order to decrease absenteeism caused by musculoskeletal system disorders in the automotive sub-industrial company. For the achieve these purposes, ordinal logistic regression is carried out based on Musculoskeletal Discomfort Questionnaire results.

The project conducted in the four stages. At the first stage, the field studies were carried out to determine employees' ergonomic conditions and to take initial actions for the first findings obtained as a result of the field studies. This stage is beginning with the explaining the project objectives to the operators. Understanding the project objectives by the operators is important for the project to proceed properly. In the first stage, various problems are identified in this stage. The first of the problem is unnecessary stretching motion. It has been observed that the operators frequently stretch to the apparatus to connect and disassemble parts during their working periods. Besides, another problem determined as an unnecessary bending over. Operators have to bend while picking up and leaving the part from the pallet. In addition to that, it has been observed that when the apparatus used in the benches is not ergonomic, it causes working at or above the shoulder level. The final problem of this stage is identified as the number of handlings which is important for ergonomically. The weight of the part and the difficulty of holding emerged as a problem to be dealt with. After the operators take the part from the bench, cleaning the burrs and chips remaining on the part need to be conducted. However, due to the design of the

countersink gun used during this process, the operator performs movements that are not suitable for ergonomic conditions such as turning the wrist and lifting the gun. Based on the root cause analysis, it can be stated that the non-ergonomic design of the apparatus has been caused bending and stretching problem. In addition, the use of unsuitable covers and non-ergonomic hand tools such as sandpaper, file, wrench, countersink also caused unergonomic conditions for the operators.

Then, in the second stage, based on the field studies that analyse non-ergonomic conditions, questionnaire was conducted to employees. There are welding, assembly, paint shop and machining departments in the case company. The questionnaire was applied to all operators working in the machining workshop, since the production in the company is carried out intensively in the machining stage and most of the ergonomic problems mostly occur in this stage. Thus, it is important to suggest improvement for the enhancing ergonomic environment. In order evaluate of local pain state, the questionnaire was applied to 92 operators in a total of 2 weeks. Survey includes demographic data of employees, general information about employee's and Cornell survey analysis, which is used to assess of local pain state in this study.

For the third stage of this study, ordinal logistic regression analysis was used in order to model employees' local pain status based on the questionnaire. Independent variables are determined as a tonnage in shift which is consist of multiplying the number of shifts with the part weight and the number of handling, apparatus type which are machining, mechanical and hydraulic, job experience in the industry, job experience in the case company, body-mass index, sport frequency in a week, sleep time in a day, overtime during the last fifteen days; and dependent variable is the determined as a local pain status in a week. The final stage, the results and appropriate implications are suggested based on the regression analysis.

Frequency and percentage distributions of the model inputs are presented in the Table 2. According to the table 2, although 56% of the employees have experience in the industry, approximately 56% of them have less than 1-year experience in the case company. Besides, 87 % percent of the employees have been exposed to shift tonnage a more than 15000 kg in one shift. Besides, 62 % of the employees either do not do sports at all or rarely do sports. Almost 70 % of employees have done overtime during the last fifteen days.

Based on the effects of independent variables that mentioned before on the local pain status, ordinal logistic regression model is developed. The ordinal logistic regression analysis classified into four levels for local pain status. Table 3,4,5,6,7,8,9,10,11,12 and 13 presents the results of the ordinal logistic regression models based on local pain status.

According to the Table 3, while tonnage in shift and job experience in the industry was a significant predictor ( $p$ -value = 0.029 and  $p$ -value=0.013) in the ordinal regression model based on the wrist pain (right); apparatus type, job experience in the case company, body-mass index, sport frequency in a week, sleep time in a day, overtime during the last fifteen days was not a significant predictor in the regression model ( $p$ -value  $\geq 0.05$ ). Based on the table 4, Overtime during the last fifteen days was determined as a significant predictor ( $p$ -value = 0.019) for the ordinal regression model based on the left wrist pain. The others variable was not a significant predictor for left wrist pain status.

Table 5 presents output of the ordinal regression model considering the upper leg pain (right). Job experience in the industry is a significant predictor for the model ( $p$ - value = 0.041). According to the Table 6, while apparatus type was a significant predictor ( $p$ -value = 0.037) in the ordinal regression model for the right knee pain. The other predictors were not significant in this regression model ( $p$ -value  $\geq 0.05$ ). Table 7 showed output of the ordinal regression model based on the lower leg pain (right). Tonnage in shift and Body-mass index are significant predictor for the model ( $p$ - value = 0.023;  $p$ -value= 0.042).

Based on the Table 8 and 9, the one significant predictor which is body-mass index is determined ( $p$ -value = 0.004 and  $p$ - value= 0.001) in the ordinal logistic regression model for the foot pain (right) and the foot pain (left). Output of the ordinal regression model based on the neck pain are presented in the table 10. It indicated that job experience in the industry and job experience in the case company are significant predictor ( $p$ -value = 0.014 and  $p$ - value= 0.037) for the model. Based on the table 11, it can be seen that apparatus type is a significant predictor for the upper arm pain ( $p$ -value= 0.043). According to the table 12, tonnage in shift and overtime during the last fifteen days are significant predictors for the ordinal logistic regression model ( $p$ -value = 0.029 and  $p$ -value= 0.030). Based on the output of the ordinal regression model based on the forearm pain (right), apparatus type is determined as a significant predictor for the regression model.

According to the results, tonnage in shift is significant predictor for the wrist pain and lower leg pain. This shows us that the amount of tonnage carried by the operator increases pain score. In order to deal with this problem, the tonnage should be calculated for each operator based on tonnage and the job scheduling and job matching should be done according to tonnage that will provide ergonomic conditions [30,31]. 'Apparatus Type' is significant predictor for the right knee pain, upper arm pain (right), and forearm pain (right). While designing the apparatus, ergonomics should also be considered, and models should be standardized by the company, hand tools should be selected considering ergonomic

conditions, and the use of torque guns should be expanded in the company [32, 33]. Overtime during the last fifteen days is determined as a significant predictor for the wrist pain (left) and low back pain. Thus, the firm should plan a more efficient working arrangement for employees [34]. Job experience in the industry and the case company is significant predictor for the upper leg pain and neck pain. Therefore, the company should provide effective on-the-job training [35]. With these improvements, it is aimed to prevent Musculoskeletal Disorders in the case company.

Table 2. Frequency and percentage distributions of the model inputs (*Model girdilerinin frekans ve yüzde dağılımları*)

Variable	Categories	Frequency	Percentage
Tonnage in shift	[0–14999]	12	13.0
	[15000–29999]	30	32.6
	[30000–59999]	40	43.5
	≥130000	10	10.9
Job experience in the industry	Inexperienced	1	1.1
	[0–1]	12	13.0
	[2–4]	16	17.4
	[4–9]	12	13
	≥10	51	55.4
Body-mass index	[15–19]	8	8.7
	[20–24]	39	42.4
	[25–29]	40	43.5
	≥30	5	5.4
	Job experience in the case company	[0–1]	51
	[2–4]	8	8.7
	[4–9]	7	7.6
	≥10	26	28.3
Sport frequency	None	17	18.5
	Once in a while	40	43.5
	1 time per week	13	14.1
	2-3 times a week	15	16.3
	4-5 times a week	6	6.5
	Everyday	1	1.1
Overtime during the last fifteen days	No	64	69.6
	Yes	28	30.4
Sleep time in a day	0	1	1.1
	less than 3 hours	4	4.3
	3-4 hours	47	51.1
	5-6 hours	38	41.3
	7-8 hours	2	2.2

Table 3. Output of the ordinal regression model based on the wrist pain (right) (*Sağ Bilek ağrısı baz alınarak oluşturulan regresyon modelinin çıktısı*)

Wrist pain (right)	Estimate	Sig.	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
Tonnage in shift	.572	.029*	.059	1.086
Apparatus type	.508	.119	-.132	1.148
Job experience in the industry	-.548	.013*	-.979	-.118
Job experience in the case company	.248	.244	-.169	.666
Body-mass index	.146	.636	-.457	.749
Sport frequency in a week	-.148	.399	-.491	.195
Sleep time in a day	-.134	.672	-.756	.487
Overtime during the last fifteen days	-.901	.057	-1.829	.026

Table 4. Output of the ordinal regression model based on the wrist pain (left) (*Sol Bilek ağrısı baz alınarak oluşturulan regresyon modelinin çıktısı*)

Wrist pain (left)	Estimate	Sig.	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
Tonnage in shift	.451	.107	-.097	1.000
Apparatus type	.657	.061	-.030	1.344
Job experience in the industry	-.150	.523	-.610	.310
Job experience in the case company	.083	.717	-.366	.533
Body-mass index	.265	.443	-.413	.944
Sport frequency in a week	-.247	.200	-.623	.130
Sleep time in a day	.428	.232	-.274	1.131
Overtime during the last fifteen days	-1.270	.019*	-2.332	-.208

Table 5. Output of the ordinal regression model based on the upper leg pain (right) (*Sağ Üst Bacak ağrısı baz alınarak oluşturulan regresyon modelinin çıktısı*)

Upper leg pain (right)	Estimate	Sig.	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
Tonnage in shift	.172	.669	-.617	.962
Apparatus type	.489	.419	-.697	1.675
Job experience in the industry	-.964	.041*	-1.890	-.038
Job experience in the case company	.812	.085	-.111	1.735
Body-mass index	1.000	.063	-.056	2.055
Sport frequency in a week	-.161	.608	-.777	.454
Sleep time in a day	.012	.984	-1.191	1.216
Overtime during the last fifteen days	-.525	.515	-2.105	1.055



Table 6. Output of the ordinal regression model based on the right knee pain (*Sağ Diz ağrısı baz alınarak oluşturulan regresyon modelinin çıktısı*)

Right knee pain	Estimate	Sig.	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
Tonnage in shift	.747	.106	-.158	1.653
Apparatus type	1.285	.037*	.077	2.492
Job experience in the industry	-.652	.122	-1.479	.174
Job experience in the case company	.839	.053	-.010	1.687
Body-mass index	1.076	.077	-.115	2.266
Sport frequency in a week	-.071	.810	-.645	.504
Sleep time in a day	-.270	.657	-1.463	.923
Overtime during the last fifteen days	-2.010	.050	-4.022	.002

Table 7. Output of the ordinal regression model based on the lower leg pain (right) (*Sağ Alt Bacak ağrısı baz alınarak oluşturulan regresyon modelinin çıktısı*)

Lower leg pain (right)	Estimate	Sig.	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
Tonnage in shift	1.224	.023*	.171	2.276
Apparatus type	-.010	.988	-1.378	1.357
Job experience in the industry	-.723	.177	-1.771	.326
Job experience in the case company	.676	.196	-.348	1.700
Body-mass index	1.380	.042*	.051	2.709
Sport frequency in a week	-.103	.764	-.777	.570
Sleep time in a day	.584	.402	-.781	1.950
Overtime during the last fifteen days	-1.175	.256	-3.203	.852

Table 8. Output of the ordinal regression model based on the foot pain (right) (*Sağ Ayak ağrısı baz alınarak oluşturulan regresyon modelinin çıktısı*)

Foot pain (right)	Estimate	Sig.	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
Tonnage in shift	.032	.912	-.540	.604
Apparatus type	.103	.798	-.684	.890
Job experience in the industry	-.112	.662	-.613	.389
Job experience in the case company	-.150	.557	-.652	.352
Body-mass index	1.191	.004*	.384	1.999
Sport frequency in a week	-.343	.127	-.783	.097
Sleep time in a day	.069	.859	-.692	.830
Overtime during the last fifteen days	-.369	.499	-1.441	.702

Table 9. Output of the ordinal regression model based on the foot pain (left) (*Sol Ayak ağrısı baz alınarak oluşturulan regresyon modelinin çıktısı*)

Foot pain (left)	Estimate	Sig.	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
Tonnage in shift	.016	.958	-.560	.591
Apparatus type	.119	.768	-.670	.907
Job experience in the industry	.051	.844	-.456	.557
Job experience in the case company	-.318	.226	-.834	.197
Body-mass index	1.386	.001*	.531	2.241
Sport frequency in a week	-.327	.143	-.764	.111
Sleep time in a day	.200	.612	-.573	.972
Overtime during the last fifteen days	-.694	.223	-1.810	.422

Table 10. Output of the ordinal regression model based on the neck pain (*Boyun ağrısı baz alınarak oluşturulan regresyon modelinin çıktısı*)

Neck pain	Estimate	Sig.	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
Tonnage in shift	-.291	.251	-.789	.206
Apparatus type	-.035	.918	-.690	.620
Job experience in the industry	-.587	.014*	-1.054	-.121
Job experience in the case company	.470	.037*	.029	.911
Body-mass index	.223	.474	-.389	.836
Sport frequency in a week	-.176	.349	-.544	.192
Sleep time in a day	.146	.656	-.498	.790
Overtime during the last fifteen days	-.719	.138	-1.670	.231

Table 11. Output of the ordinal regression model based on the upper arm pain (right) (*Sağ Üst Kol ağrısı baz alınarak oluşturulan regresyon modelinin çıktısı*)

Upper arm pain (right)	Estimate	Sig.	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
Tonnage in shift	-.220	.488	-.842	.402
Apparatus type	.842	.043*	.027	1.657
Job experience in the industry	-.158	.578	-.715	.399
Job experience in the case company	.201	.432	-.301	.704
Body-mass index	.193	.638	-.609	.994
Sport frequency in a week	-.250	.272	-.696	.196
Sleep time in a day	.447	.310	-.416	1.310
Overtime during the last fifteen days	.304	.582	-.780	1.389

Table 12. Output of the ordinal regression model based on the low back pain (*Bel ağrısı baz alınarak oluşturulan regresyon modelinin çıktısı*)

Low back pain	Estimate	Sig.	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
Tonnage in shift	-.535	.029*	-1.016	-.054
Apparatus type	.103	.736	-.496	.701
Job experience in the industry	-.043	.835	-.444	.358
Job experience in the case company	-.073	.712	-.460	.314
Body-mass index	.329	.269	-.255	.912
Sport frequency in a week	-.041	.802	-.365	.282
Sleep time in a day	-.033	.912	-.621	.554
Overtime during the last fifteen days	-.963	.030*	-1.835	-.091

Table 13. Output of the ordinal regression model based on the forearm pain (right) (*Sağ Ön Kol ağrısı baz alınarak oluşturulan regresyon modelinin çıktısı*)

Forearm pain (right)	Estimate	Sig.	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
Tonnage in shift	.279	.391	-.359	.917
Apparatus type	1.048	.017*	.190	1.907
Job experience in the industry	-.480	.100	-1.052	.092
Job experience in the case company	.479	.100	-.092	1.051
Body-mass index	.434	.288	-.367	1.236
Sport frequency in a week	-.116	.603	-.554	.322
Sleep time in a day	.088	.841	-.770	.945
Overtime during the last fifteen days	-1.195	.070	-2.486	.097

#### 4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Recently, companies attach importance to ergonomic analyses to increase employee motivation and improve their performance. Moreover, companies want to investigate working conditions that can affect the performance of employees in the firm. Therefore, the aim of this study is to conduct an ergonomics analysis to reduce absenteeism caused by musculoskeletal disorders during machining in an automotive supplier industry.

For this purpose, the "Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire (DMDQ)" was used for the data collecting stage to analyse the effect of independent variables on the dependent variable. In this study, independent variables are determined as a tonnage in shift, apparatus type, job experience in the industry, job experience in the case company, body-mass index, sport frequency in a week, sleep

time in a day, overtime during the last fifteen days; and dependent variable is the determined as a local pain status in a week. Then, the effects of independent variables on local pain status were modelled through Logistic Regression Analysis.

According to the results, firstly tonnage in shift is significant predictor for the wrist pain and lower leg pain. Besides, Apparatus Type is significant predictor for the right knee pain, upper arm pain (right), and forearm pain (right). also, overtime during the last fifteen days is determined as a significant predictor for the wrist pain (left) and low back pain. Finally, job experience in the industry and the case company is significant predictor for the upper leg pain and neck pain.

Thus, this study is beneficial to investigate reducing absenteeism caused by musculoskeletal system disorders during machining in the case

company. In terms of the used methodology, CMDQ provides a low-cost data gathering, easy marking and clearly understandable questions to use among employees, and ability to additional sample in a short time. Based on the suggested results, the company has made several improvements that have led to an increase in productivity in the company and increase employee's motivation. These improvements can be summarized as follows; in the packaging department, a one-piece flow started to be used instead of mass production. In addition, it has been observed that the use of unsuitable pallets and non-ergonomic hand tools such as sandpaper, files, wrenches, countersinks also have led to pain on the operators. Thus, in order to prevent Musculoskeletal Disorders in the case company, the material handling amount was reduced by 50% with the conveyor. A field analysis is carried out to make improvements for the types of apparatus and pallet. Ergonomically unsuitable apparatus was determined and improvements were conducted through the kaizen method. In order to improve ergonomic conditions, job matching of employees should be based on tonnages and the company should plan a more efficient working order for its employees. Besides, workshops are organized in the company with the participation of different departments in order to reduce the bending and stretching. The awareness of workers and employer was increased by giving ergonomics training in the company.

As a limitation of this study, it can be considered that it was carried out in an automotive supplier industry case company. Therefore, this study cannot be generalized for other sectors and other companies since ergonomic problems that occur within the case company are discussed in this study. Besides, limited number of parameters are included in the regression model and thus the study can be expanded by adding different parameters.

#### CONFLICT OF INTEREST STATEMENT (ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ)

The author declare that there is no conflict of interest.

#### REFERENCES (Referanslar)

[1] M. Gómez-galán and J. Pérez-alonso, "Owas Review 315," *Ind. Health*, vol. 55, pp. 314–337, 2017, [Online]. Available: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/indhealth/55/4/55\\_2016-0191/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/indhealth/55/4/55_2016-0191/_pdf). [Accessed: Sep. 21, 2021]

[2] L. Punnett and D. H. Wegman, "Work-

related musculoskeletal disorders: The epidemiologic evidence and the debate," *J. Electromyogr. Kinesiol.*, vol. 14, no. 1, pp. 13–23, 2004. doi: 10.1016/j.jelekin.2003.09.015.

[3] K. Landau *et al.*, "Musculoskeletal disorders in assembly jobs in the automotive industry with special reference to age management aspects," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 38, no. 7–8, pp. 561–576, 2008. doi: 10.1016/j.ergon.2008.01.006.

[4] L. Punnett, "The costs of work-related musculoskeletal disorders in automotive manufacturing," *New Solut.*, vol. 9, no. 4, pp. 403–426, 2000. doi: 10.2190/Y93Q-DEAQ-FEU2-8B26.

[5] S. R. Kirkhorn, G. Earle-Richardson, and R. J. Banks, "Ergonomic risks and musculoskeletal disorders in production agriculture: Recommendations for effective research to practice," *J. Agromedicine*, vol. 15, no. 3, pp. 281–299, 2010. doi: 10.1080/1059924X.2010.488618.

[6] P. Buckle, "Ergonomics and musculoskeletal disorders: Overview," *Occup. Med. (Chic. Ill.)*, vol. 55, no. 3, pp. 164–167, 2005. doi: 10.1093/occmed/kqi081.

[7] J. C. Hiba, *Improving working conditions and productivity in the garment industry*, Geneva, Italy: International Labour Office, 1998.

[8] N. M. Nur, S. Z. Dawal, and M. Dahari, "The Prevalence of Work Related Musculoskeletal Disorders Among Workers Performing Industrial Repetitive Tasks in the Automotive Manufacturing Companies," pp. 1–8, 2014. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017. doi:10.1088/1757-899X/257/1/012040.

[9] N. Top, H. Başak, İ. Şahin, "Biyomimetik Tabanlı Fonksiyonel Yürüteç Tasarımı ve Dijital İnsan Modelleme ile Ergonomik Analizi," *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, cilt.8, no.2, ss. 618-634, 2021. doi:10.31202/ecjse.854770.

[10] Ö. Koç, N. Top, C. Eldem, H. Gökçe, İ. Şahin, "Ergonomics Assessment and Redesign of Helicopter Transmission Assembly Fixture Using Digital Human Models," *Journal of Polytechnic*, vol.24, no.3, pp. 1197-1203, 2021. doi: 10.2339/politeknik.886411

[11] D. D. Salazar, Y. T. Prasetyo, "Analysis of Worker's Posture in Wafer Manufacturing Industry," *6<sup>th</sup> International Conference on Industrial and Business Engineering (ICIBE), Macau Macao*, September 27 -29, 2020.

doi:10.1145/3429551.3429581.

[12] Erman Çakıt, "Ergonomic Risk Assessment using Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire in a Grocery Store," *Ergon. Int. J.*, vol. 3, no. 6, 2019.

doi: 10.23880/eoj-16000222.

[13] O. Erdinc, K. Hot, and M. Ozkaya, "Turkish version of the Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire: Cross-cultural adaptation and validation," *Work*, vol. 39, no. 3, pp. 251–260, 2011. doi: 10.3233/WOR-2011-1173.

[14] S. Koç and Ö. M. Testik, "Mobilya sektöründe yaşanan kas-iskelet sistemi risklerinin farklı değerlendirme metodları ile incelenmesi ve minimizasyonu," *Endüstri Mühendisliği Derg.*, vol. 27, no. 2, pp. 2–27, 2016.

[15] M. J. Hjermstad *et al.*, "Studies comparing numerical rating scales, verbal rating scales, and visual analogue scales for assessment of pain intensity in adults: A systematic literature review," *J. Pain Symptom Manage.*, vol. 41, no. 6, pp. 1073–1093, 2011.

[16] J. C. T. Fairbank, J. B. Davies, J. Couper, and J. P. O'Brien, "The Oswestry low back pain disability questionnaire," *Physiotherapy*, vol. 66, no. 8, pp. 271–273, 1980.

[17] M. J. M. Hoozemans, E. M. Speklé, and J. H. Van Dieën, "Concurrent validity of questions on arm, shoulder and neck symptoms of the RSI QuickScan," *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, vol. 86, no. 7, pp. 789–798, 2013.

[18] A. Shariat, S. B. M. Tamrin, M. Arumugam, M. Danaee, and R. Ramasamy, "Prevalence Rate of Musculoskeletal Discomforts Based on Severity Level among Office Workers," *Acta Medica Bulg.*, vol. 43, no. 1, pp. 54–63, 2016.

[19] S. Kreuzfeld, R. Seibt, M. Kumar, A. Rieger, and R. Stoll, "German version of the Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire (CMDQ): Translation and validation," *J. Occup. Med. Toxicol.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–12, 2016.

[20] M. Smets, "A Field Evaluation of Arm-Support Exoskeletons for Overhead Work Applications in Automotive Assembly," *IISE Trans. Occup. Ergon. Hum. Factors*, vol. 7, no. 3–4, pp. 192–198, 2019.

[21] F. A. Aziz, Z. Ghazalli, N. M. Z. Mohamed, and A. Isfar, "Investigation on musculoskeletal

discomfort and ergonomics risk factors among production team members at an automotive component assembly plant," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 257, no. 1, 2017.

[22] A. Rawat, "Binary Logistic Regression- An overview and implementation in R," *towardsdatascience.com*, 2017. [On line]. Available:

<https://towardsdatascience.com/implementing-binary-logistic-regression-in-r-7d802a9d98fe>.

[Accessed: Sep. 23, 2021].

[23] H. Bircan, "Lojistik Regresyon Analizi: Tıp Verileri Üzerine Bir Uygulama," *Kocaeli Üniversitesi Sos. Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 2, pp. 185–208, 2004.

[24] C. Y. J. Peng, K. L. Lee, and G. M. Ingersoll, "An introduction to logistic regression analysis and reporting," *J. Educ. Res.*, vol. 96, no. 1, pp. 3–14, 2002. doi: 10.1080/00220670209598786.

[25] M.M.E. Tranmer, "Binary Logistic Regression," *In Best Practices in Quantitative Methods*, (Ed. J. Osborne). London, UK: Sage Publication, 2008.

doi: 10.4135/9781412995627.d29.

[26] J. K. Abledu, "Multiple Logistic Regression Analysis of Predictors of Musculoskeletal Disorders and Disability among Bank Workers in Kumasi, Ghana," *J. Ergon.*, vol. 02, no. 04, 2012.

doi: 10.4172/2165-7556.1000111.

[27] C. F. Ling, R. Z. Radin Umar, and N. Ahmad, "Development of a predictive model for work-relatedness of MSDs among semiconductor back-end workers," *Int. J. Occup. Saf. Ergon.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–11, 2020.

doi: 10.1080/10803548.2020.1840116.

[28] E. C. Alexopoulos, I. C. Stathi, and F. Charizani, "Prevalence of musculoskeletal disorders in dentists," *BMC Musculoskelet. Disord.*, vol. 5, pp. 1–8, 2004. doi: 10.1186/1471-2474-5-16.

[29] P. Warner, "Ordinal logistic regression," *J Fam Plann Reprod Heal. Care*, vol. 34, no. 3, pp. 169–170, 2008.

doi: 10.1783/147118908784734945.

[30] H. Rashid, I. Mohammadfam, M. Babamiri, A.R. Soltanian, H. Khotanlou, and M.S. Sohrabi, "What do the different ergonomic interventions accomplish in the workplace? A systematic review," *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, pp. 1-25, 2020.

doi: 10.1080/10803548.2020.1811521

[31] J.A. Diego-Mas, "Designing cyclic job rotations to reduce the exposure to ergonomics risk factors, " *International journal of environmental research and public health*, vol.17, no. 3, 1073, 2020. doi: 10.3390/ijerph17031073

[32] N.K. Sharma, M. Tiwari, A. Thakur and A.K. Ganguli, "A systematic review of methodologies and techniques for integrating ergonomics into development and assessment of manually operated equipment," *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, pp. 1-13, 2021.

doi: 10.1080/10803548.2020.1862552

[33] C. Ana, C. Faria, J. Cunha, J. Oliveira, N. Sousa, and L.A. Rocha, "Physical Ergonomic Improvement and Safe Design of an Assembly

Workstation through Collaborative Robotics." *Safety*, vol. 7, no. 1, 14, 2021.

doi: 10.3390/safety7010014

[34] M. Budumuru, K.D.V. Prasad and M. Rao, "Association among Remote Working Concerns and Challenges on Employee Work-Life Balance: An Empirical Study Using Multiple Regression Analysis with Reference to International Agricultural Research Institute, Hyderabad." *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, vol. 11, no. 6, pp. 281-297, 2020. doi: 10.34218/IJARET.11.6.2020.025

[35] L. Ibrahim and S. Abbas, "Organizational Behavior: A Model of Assessing Training Needs and Performance of Employees in Nigeria," *International Research Journal Business and Management*, vol. 13, no. 1, pp. 9-16, 2020.

## APPENDIX (EKLER)- EK 1. EGE FREN ERGONOMİ DEĞERLENDİRME ANKETİ

## EGE FREN ERGONOMİ DEĞERLENDİRME ANKETİ

\*Son 15 gün içerisinde çalıştığınız yerler için doldurulmalıdır.

Parça No:

Aparat Türü:

El aleti Kullanımı:

Tezgâh Bilgisi:

## KİŞİSEL BİLGİLER

Yaş: \_\_\_\_\_

Medeni Durum:  Bekâr  EvliEğitim Durumu:  İlkokul  Ortaokul  Lise  Üniversite

Sektörde Çalışma Süresi(ay/yıl belirtiniz): \_\_\_\_\_

EGE FREN 'de Çalışma Süresi(ay/yıl belirtiniz): \_\_\_\_\_

Boy: \_\_\_\_\_ cm

Kilo: \_\_\_\_\_ kg

Sigara kullanıyor musunuz?:  Evet  Hayır

Ne sıklıkla spor yapıyorsunuz?:

 Haftada 1 kez  Haftada 2-3 kez  Haftada 4-5 kez  Her gün  Arada bir  Hiç

Günde ortalama kaç saat uyursunuz?:

 3 saatten az  3-4 saat  5-6 saat  7-8 saat  8 saatten fazla

Son 6 aydır sürekli devam eden Kas İskelet Sistemi Rahatsızlığınız mevcut mu?

(Yanıtınız evet ise rahatsızlığınızı yazınız.)

 Hayır  Evet; \_\_\_\_\_

Ege Fren'de çalışmaya başlamadan önce sahip olduğunuz kronik rahatsızlığınız var mı?

(Yanıtınız evet ise rahatsızlığınızı yazınız.)

 Hayır  Evet; \_\_\_\_\_

Son 15 gün fazla mesai yaptınız mı? (Yanıtınız evet ise süresini yazınız.)

 Hayır  Evet; \_\_\_\_\_

Son 3 ay fazla mesai yaptınız mı? (Yanıtınız evet ise süresini yazınız.)

 Hayır  Evet; \_\_\_\_\_

Son 6 ayda Kas İskelet Sistemi Rahatsızlığından dolayı rapor aldınız mı? (Yanıtınız evet ise süresini yazınız.)

 Hayır  Evet; \_\_\_\_\_

Son 15 gün iş dışında güç sarf edilen bir aktivitede yer aldınız mı? (Örn: eşya taşıma, futbol oynama vb.)

(Yanıtınız evet ise ne olduğunu yazınız.)

 Hayır  Evet; \_\_\_\_\_

Aşağıdaki resim, ankette sorulan vücut bölümlerini yaklaşık olarak göstermektedir.  
Lütfen uygun kutucuğu işaretleyerek cevaplayınız.

Geçtiğimiz hafta çalıştığınız süre boyunca, vücutunuzda ne sıklıkta ağrı, sızı, rahatsızlık hissettiniz? (Her vücut bölümü için cevaplayınız)	Eğer ağrı, sızı, rahatsızlık hissettiyseniz, ne kadar şiddetliydi?				Eğer ağrı, sızı, rahatsızlık hissettiyseniz, bu işinizi yapmanıza engel oldu mu?		
	Hic hissetmedim	Hafif şiddetliydi	Orta şiddetliydi	Çok şiddetliydi	Hic engel olmadı	Biraz engel oldu	Çok engel oldu
Boyun	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Omuz	(Sağ)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	(Sol)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sırt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Üst Kol (omuz - dirsek arası)	(Sağ)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	(Sol)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ön Kol (dirsek - bilek arası)	(Sağ)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	(Sol)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
El Bileği	(Sağ)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	(Sol)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kalça	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Üst Bacak (kalça - diz arası)	(Sağ)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	(Sol)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Diz	(Sağ)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	(Sol)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Alt Bacak (diz - ayak arası)	(Sağ)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	(Sol)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ayak	(Sağ)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	(Sol)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



## Buji Ateşlemeli Bir Motorda Yüksek Performans ve Düşük Emisyon Elde Etmek Amacıyla Kullanılacak Optimum Metanol Oranının Cevap Yüzey Metodu ile Belirlenmesi

Hayri YAMAN <sup>a, ID</sup>, Murat Kadir YEŞİLYURT <sup>b, ID</sup>, Samet USLU <sup>\*, c, ID</sup>

<sup>a</sup> Kırıkkale Üniversitesi Kırıkkale Meslek Yüksekokulu Otomotiv Teknolojisi Programı, 71451, KIRIKKALE, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Yozgat Bozok Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 66200, YOZGAT, TÜRKİYE

<sup>c</sup> \* Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 78050, KARABÜK, TÜRKİYE

### MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 12.05.2021  
Kabul: 25.12.2021

**Anahtar Kelimeler:**  
Optimizasyon  
Cevap Yüzey Metodu  
Metanol  
Buji Ateşlemeli Motor

### ÖZ

Bu çalışmada, buji ateşlemeli bir motorda alternatif yakıt olarak kullanılan metanolün performans ve emisyonlar açısından optimum seviyesinin cevap yüzey metodu ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, benzine hacimsel olarak üç farklı oranda metanol (%0, %10 ve %20) ilave edilerek oluşturulan yakıt karışımları ile tek silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı, buji ateşlemeli bir motorda farklı motor yüklerinde (6, 8, 10, 12 ve 14 kg) deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçları ile iki faktörlü merkezi kompozit tam tasarım kullanılarak varyans analizi destekli bir cevap yüzey modeli oluşturulmuş ve en iyi fren efektif verimi, fren özgül yakıt tüketimi, karbon monoksit, hidrokarbon, karbondioksit ve azot monoksit emisyonu seviyelerine karşılık gelen optimum metanol oranı ve motor yükü değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen optimizasyon sonuçlarına göre optimum metanol oranı %7 çıkarken, optimum motor yükü 12 kg olarak bulunmuştur. Optimum metanol oranı ve motor yüküne karşılık gelen fren efektif verimi, fren özgül yakıt tüketimi, karbon monoksit, hidrokarbon, karbondioksit ve azot monoksit sırasıyla %32,037, 0,251 kg/kWh, %0,384, 110,05 ppm, %14,35 ve 1090,358 ppm olarak elde edilmiştir. Cevap yüzey metodu sonuçlarının doğruluğunun belirlenmesi için elde edilen optimum metanol ve motor yükü ile deneyler gerçekleştirilmiş ve cevap yüzey metodu sonuçları ile kıyaslanmıştır. Optimizasyon sonuçlarının deney sonuçları ile %6'dan daha düşük bir hata oranı ile uyumlu olduğu ve optimum metanol oranının tespiti için cevap yüzey metodunun etkili olarak kullanılabilecek bir araç olduğu sonucuna varılmıştır.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.16>

## Determination of Optimum Methanol Ratio to be Used with the Aim of Obtaining High Performance and Low Emissions in a Spark Ignition Engine by Response Surface Methodology

### ARTICLE INFO

Received: 12.05.2021  
Accepted: 25.12.2021

**Keywords:**  
Optimization  
Response Surface  
Methodology  
Metanol

### ABSTRACT

In the present study, it is aimed to identify the optimum level of methanol used as an alternative fuel in a spark ignition engine in terms of performance and emissions by the response surface methodology. For this purpose, three different fractions of methanol (0%, 10% and 20%) by volume were added to gasoline and the prepared test fuels were experimented in a single-cylinder, four-stroke, water-cooled, spark ignition engine at various engine loads (6, 8, 10, 12, and 14 kg). The model was developed supported with analysis of variance by using the two-factorial central composite full design and the optimum methanol concentration and engine load values were determined corresponding to the best brake thermal efficiency, brake specific fuel consumption,

\*Sorumlu yazar: sametuslu@karabuk.edu.tr

**To cite this article:** H. Yaman, M.K. Yeşilyurt ve S. Uslu, "Determination of Optimum Methanol Ratio to be Used with the Aim of Obtaining High Performance and Low Emissions in a Spark Ignition Engine by Response Surface Methodology", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 346-358, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.03.16

Spark Ignition Engine

carbon monoxide, hydrocarbon, carbon dioxide and nitrogen monoxide emission levels. According to the optimization results, while the optimum methanol ratio was found to be 7%, the optimum engine load was found to be 12 kg. Corresponding to the optimum methanol ratio and engine load; brake thermal efficiency, brake specific fuel consumption, carbon monoxide, hydrocarbon, carbon dioxide and nitrogen monoxide were obtained as 32.037%, 0.251 kg/kWh, 0.384%, 110.05 ppm, 14.35% and 1090.358 ppm, respectively. In order to determine the sensitivity of the response surface methodology results, the experiments were performed with optimum methanol ratio and engine load and compared with response surface methodology results. It was concluded that the optimization results were compatible with the experimental results with an error rate of less than 6% and that response surface methodology is an effective tool to determine the optimum methanol ratio.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.16>

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz dünyasının daha yaşanabilir bir hale gelmesi için yapılan çalışmalar tüm insanlık tarafından devam etmektedir. Özellikle son yüzyılda gelişen teknoloji, sanayileşme ve kentselleşme ile artan hava kirliliği, insanlığı ve diğer canlıları direkt etkileyecek boyutlara ulaşmıştır [1, 2]. Bu yüzden hava kirliliğini azaltmaya yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Hava kirliliğine sebep olan unsurların başında motorlu taşıtlardan kaynaklanan hava kirliliği gelmektedir. 2009 yılında dünya genelinde arazi araçları ve ağır iş makineleri hariç, yaklaşık 940 milyon motorlu araç kullanılmakta iken, 2011 yılı itibariyle bu sayı 1 milyarı geçmiştir [3]. 2018 yılına gelindiğinde ise dünya genelinde 1.3 milyar motorlu taşıt bulunduğu, günümüzde ise bu rakamın yaklaşık 2 milyar olduğu belirtilmektedir. Motorlu araç sayısındaki önlenemez bu artış beraberinde hava kirliliğini de getirmektedir. Hem bu kirliliğin önüne geçebilmek, en azından azaltabilme, hem de azalan fosil yakıt rezervlerine alternatif olabilmesi amacıyla fosil yakıtların yerini alabilecek temiz yakıt arayışı günden güne hızlanarak devam etmektedir [4].

Buji ateşlemeli motorlarda performans ve emisyon açısından önemli bir kriter kullanılan yakıtın oktan sayısıdır. Yüksek oktan sayısı beraberinde yüksek verim ve düşük emisyon getirmektedir. Buna istinaden, benzine kıyasla daha yüksek oktan sayısına sahip olan alkoller buji ateşlemeli motorlar için ideal bir alternatif yakıttır [5, 6]. Alkollerin yüksek oktan değerleri ve daha yüksek buharlaşma ısısı değerleri, onları yüksek sıkıştırma oranlı motorlar için uygun yakıtlar haline getirmektedir [7, 8]. Alternatif yakıt olarak kullanılacak birçok yakıt olmakla birlikte metanol en çok tercih edilen alkol yakıtların başında gelenlerdendir. Metanol nişasta ekinlerinin fermente edilmesi ve damıtılmasıyla, doğalgazdan, kömürün gazlaştırılmasından, odundan, samandan, bitki saplarından, çöpten ve hatta yanıcı çöplerden de üretilebilmektedir [9–11]. Buna ilaveten, talaş, pirinç kepeği ve pirinç kabuğu gibi biyoyakıt

kaynaklarından da metanol üretilebilmektedir [12]. Metanol yüksek oktan sayısına, oksijen oranına, düşük karbon/hidrojen oranına sahiptir ve yenilenebilir bir yakıt olarak kabul edilmektedir [13, 14]. Metanol ayrıca motora giren havayı soğutan ve hacimsel verimliliği ve güç çıkışını artıran yüksek bir ısı buharlaşma oranına sahiptir [15]. Ancak, soğuk çalıştırma ve daha düşük gizli ısıtma değeri gibi olumsuz etkileri de vardır.

Metanolün buji ateşlemeli motorlarda kullanımı ile alakalı geçmişten günümüze çok sayıda çalışma mevcuttur. Prasad vd. [16] tek silindirli dört zamanlı değişken sıkıştırma oranlı buji ateşlemeli bir motor üzerinde 1200 d/d ile 1800 d/d arasında değişen farklı hızlarda, üç farklı sıkıştırma oranında (8:1, 9:1 ve 10:1) metanol kullanımının performans ve emisyonlara etkisini incelemişlerdir. Benzine %50 metanol ilave ederek oluşturdukları test yakıtının, 10:1 sıkıştırma oranı değerinde performans ve emisyon açısından en iyi değerleri verdiğini ifade etmişlerdir. Diğer bir çalışmada Balki vd. [12] 8.5:1 sıkıştırma oranına sahip, hava soğutmalı, tek silindirli bir buji ateşlemeli motorda saf etanol, metanol ve benzin kullanarak sıkıştırma oranının ve yakıt türlerinin motor performansı, yanma ve emisyon özellikleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Tüm sıkıştırma oranlarında, etanol ve metanol yakıt karışımlarının fren efektif verimi (FEV) ve fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT) değerlerinin benzine göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Buna ilaveten, genel olarak, saf etanol ve metanol kullanımı ile tüm sıkıştırma oranlarında benzin emisyonlarına kıyasla daha düşük bir egzoz emisyonu bulunduğunu ifade etmişlerdir. Çay vd. [17] yapay sinir ağları kullanarak metanol yakıtının performans ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini araştırmışlar ve benzine kıyasla metanol kullanımıyla emisyonlarda iyileşme sağlandığı sonucuna ulaşmışlardır.

Alternatif yakıt arayışındaki araştırmacılar yakıt türünün uygunluğunu belirlemek, performans ve



Tablo 1. Deney motorunun teknik özellikleri  
(*Technical specifications of the test engine*)

Marka	Kirloskar VCR motor
Model	TV 1
Tipi	Tek silindirli ve dört zamanlı
Anma gücü	7,5 kW
Maksimum motor hızı	1850 d/d
Çap x Strok	87,5 mm x 110 mm
Silindir hacmi	661,5 cc
Sıkıştırma oranı	6:1-10:1
Soğutma tipi	Su soğutmalı
Rölanti devri	750 d/d
Yük kapasitesi	0-50 kg

FEV ve FÖYT değerlerinin hesaplanması için aşağıda gösterilen denklem 1 ve denklem 2 sırasıyla kullanılmıştır.

$$FEV = \frac{Pe * 3600}{B * Hu} \quad (1)$$

$$FÖYT = \frac{B * 1000}{Pe} \quad (2)$$

Burada Pe motor gücü, B saatlik yakıt tüketimi ve Hu yakıtın alt ısıl değerini ifade etmektedir.

Bosch marka BEA 350 model egzoz gazı analizörü ile egzoz gazı emisyonları ölçülmüştür. Egzoz gazı analizörünün teknik özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 2. Egzoz gazı analizörünün teknik özellikleri  
(*Technical properties of exhaust gas analyzer*)

Özellik	Birim	Ölçüm aralığı
Karbon monoksit (CO)	% hac.	0-10
Karbondioksit (CO <sub>2</sub> )	% hac.	0-18
Hidrokarbon (HC)	ppm	0-9999
Azot monoksit (NO)	ppm	0-5000
λ	-	0,500-9,999

Yapılan hesaplamalar ve ölçümler sonunda elde edilen deneysel sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Deney sonuçları (*Experimental results*)

Metanol Oranı (%)	Yük (kg)	CO (%)	HC (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	NO <sub>x</sub> (ppm)	FÖYT (kg/kWh)	FEV (%)
0	6	0,59	145	15,05	621	0,37	22,50
10	6	0,58	135	14,05	474	0,38	21,00
20	6	0,46	139	14,62	487	0,37	21,60
0	8	0,59	142	14,96	862	0,31	27,10
10	8	0,65	130	13,83	742	0,32	24,47
20	8	0,66	138	14,18	765	0,33	24,10
0	10	0,46	123	15,22	1058	0,26	30,44
20	10	0,41	131	14,33	904	0,29	27,15
0	12	0,41	106	15,22	1200	0,25	32,45
10	12	0,35	104	13,95	1048	0,26	33,00
20	12	0,33	115	14,49	1002	0,26	30,03
0	14	0,35	107	15,20	1238	0,24	34,70
10	14	0,34	109	14,27	1196	0,24	34,00

## 2.1. Cevap Yüzey Yöntemi (*Response Surface Methodology*)

Bir yanıt ya da yanıtlar ile bağımsız faktörler arasındaki korelasyona dayalı bir deneysel tasarım ve istatistiksel modelleme oluşturabilen, çok değişkenli tahmin ve optimizasyon yapabilen RSM, birçok mühendislik alanında tercih edilmesinin yanında içten yanmalı motorların modellenmesi ve optimizasyonu için de tercih edilen bilgisayar tabanlı bir uygulamadır [26–30]. RSM, gerekli deneysel çalışma sayısını önemli ölçüde azaltır ve seçilen modele dayalı olarak,

faktörler arasındaki etkileşimin etkisini de belirleyebilir [31]. Deneysel sonuçlar, doğru tahmin için 2. dereceden bir polinom modelinin tepki regresyonu kullanılarak araştırılır [32]. Böyle bir sistemin davranışı, aşağıda denklem 3'te açıklandığı gibi ikinci dereceden bir denklem kullanılarak kontrol edilir.

$$y = \beta_0 + \sum_i^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j \geq i}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3)$$

Burada  $\beta_0$  sabit,  $\beta_i$  doğrusal katsayı ve  $\beta_{ij}$  etkileşim katsayısıdır.  $i$  ve  $j$  sırasıyla doğrusal ve ikinci

dereceden katsayılarıdır.  $\epsilon$  rastgele test hatası,  $k$  faktör sayısı,  $y$  tahmin edilen yanıt,  $x_i$  ve  $x_j$  ise bağımsız faktörlerdir [33].

Bu çalışmada, optimum metanol oranı ve motor yükü seviyelerini belirlemek ve bunlara karşılık gelen optimum FEV, FÖYT, CO, CO<sub>2</sub>, HC ve NO cevaplarını belirlemek amacıyla RSM uygulanmıştır. Seçilen faktörler seviyeleriyle birlikte Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. Faktörler ve seviyeleri (*Factors and their levels*)

Faktör	Seviyeler				
Metanol oranı (%)	0	10	20	-	-
Motor yükü (kg)	6	8	10	12	14

RSM'nin yanı sıra, faktörlerin ortalamaları arasında anlamlı bir fark olup olmadığını görmek amacıyla varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. ANOVA tablosunda dikkate alınması gereken en önemli kriterler F-değeri ve p-değeri'dir. Daha büyük F-değeri daha etkili bir faktör manasına gelmektedir. F istatistiği, genel sonuçların anlamlı olup olmadığına

karar verirken, p-değeri ile birlikte kullanılmalıdır. p-değeri, F istatistiği tarafından belirlenir ve sonuçların tesadüfen gerçekleşmiş olma olasılığını ifade eder. Bir faktörün cevap üzerinde etkisinin olabilmesi için p-değerinin 0,05'ten düşük olması gerekmektedir [34, 35]. Tablo 6 bir parametrenin cevap üzerinde anlamlı etkisinin olup olmadığını ifade eden p-değerlerini göstermektedir. 0,05'ten büyük p-değerleri, parametrenin önemsiz olduğu veya yanıt üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı anlamına gelmektedir. Tabloya bakıldığında motor yükünün lineer açıdan CO<sub>2</sub> emisyonu dışında tüm cevaplarda anlamlı etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Diğer taraftan, metanol oranının ise CO ve HC emisyonları dışında diğer tüm cevaplar üzerinde etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen regresyon sonuçları tüm yanıtlar için %90'dan büyük R<sup>2</sup> değerlerinin elde edildiği ve buna istinaden, oluşturulan RSM modelinin, farklı motor yükünde buji ateşlemeli motor cevapları üzerindeki metanol oranının etkisini doğru bir şekilde verme yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 6. Her bir cevap için ortaya çıkan p-değerleri ve R<sup>2</sup> değerleri (*p-values and R<sup>2</sup> values resultant for each answer*)

Faktörler	p-değeri					R <sup>2</sup>
	A	B	AB	A <sup>2</sup>	B <sup>2</sup>	
FEV	<b>0,002</b>	<b>0,000</b>	0,329	0,819	0,052	%97,99
FÖYT	<b>0,009</b>	<b>0,000</b>	0,410	0,910	<b>0,000</b>	%99,02
CO	0,578	<b>0,003</b>	0,678	0,662	0,580	%90,11
HC	0,589	<b>0,000</b>	0,347	0,149	0,824	%90,80
CO <sub>2</sub>	<b>0,000</b>	0,184	0,978	0,255	0,406	%91,26
NO	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,970	0,031	<b>0,002</b>	%98,99

Anlamlı – (0,000 < p ≤ 0,05).

(A: Metanol oranı, B: Yük, AB: Metanol oranı \* Yük, A<sup>2</sup>: Metanol oranı \* Metanol oranı, B<sup>2</sup>: Yük \* Yük)

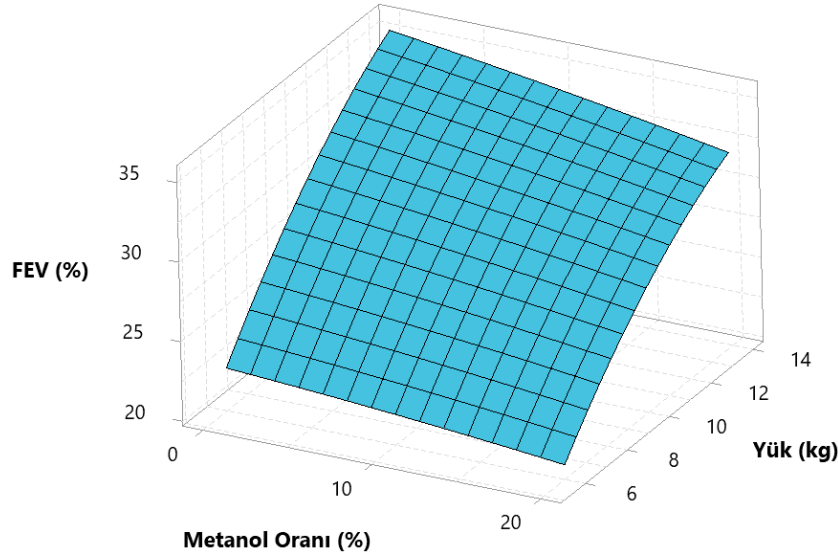
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (*RESULTS AND DISCUSSIONS*)

Metanol oranına ve motor yüküne bağlı olarak FEV ve FÖYT değerlerindeki değişimler sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmektedir. Grafikler incelendiğinde artan motor yükünün FEV değerini artırırken, FÖYT değerini ise düşürdüğü görülmektedir. Diğer taraftan, artan metanol oranının ise FEV değerini hafif düşürürken, FÖYT değerini artırdığı açıkça anlaşılmaktadır. En yüksek FEV değeri %100 benzin içerikli yakıt ile 14 kg motor yükünde %34,70 olarak bulunmuştur. Aynı motor yükü değerinde %10 metanol içerikli yakıt kullanımı ile elde edilen FEV değeri %34,00 iken, %20 metanol içerikli yakıt ile %31,50 olarak elde edilmiştir. Buna göre, benzine %10 metanol ve %20 metanol ilave edilmesi ile FEV değerleri %100 benzine kıyasla sırasıyla %2,06 ve %10,16 oranlarında azalmıştır.

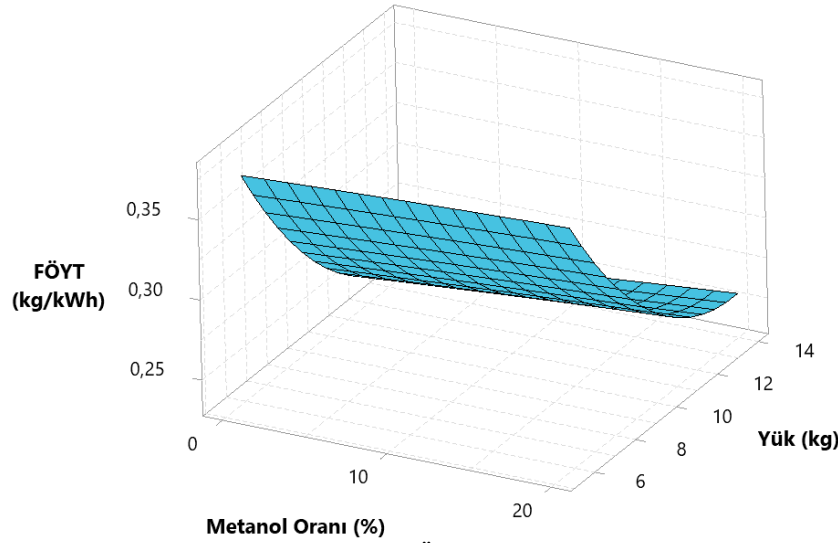
Metanol-benzin karışımlarının düşük alt ısı değerinden dolayı motor ısı veriminin düşmesi ve özellikle sıkıştırma işlemlerinde kaybedilen ısı artmasına bağlı olarak faydalı ısı azalması gibi etkenlerin bu duruma yol açtığı söylenebilir. Metanolün düşük alt ısı değeri nedeniyle FEV'i düşürdüğü bulgusu literatürdeki aşağıdaki referanslar ile uyumludur [23, 24].

Diğer taraftan en yüksek FÖYT değeri 6 kg motor yükünde %20 metanol içerikli yakıt ile 0,38 kg/kWh olarak elde edilmiştir. Artan metanol oranı ile FÖYT değerinin artması metanolün alt ısı değerinin benzine göre düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Tablo 1'de de gösterildiği gibi benzinin alt ısı değeri 44,0 MJ/kg iken, metanolün alt ısı değeri 20,05 MJ/kg'dır. Benzine metanol ilavesi ile yakıt karışımlarının alt ısı değerleri düşmekte ve motordan aynı çıkış gücünün alınabilmesi için daha fazla yakıt ihtiyacı

duyulmaktadır. Böylece, FÖYT değeri artış tarafından da benzer sonuçlar gözlemlenmiştir [12, göstermektedir. Literatürdeki araştırmacılar 36] .



Şekil 2. Metanol oranı ve motor yüküne bağlı olarak FEV değişimi (The variation of BTE depending on the methanol ratio and engine load)



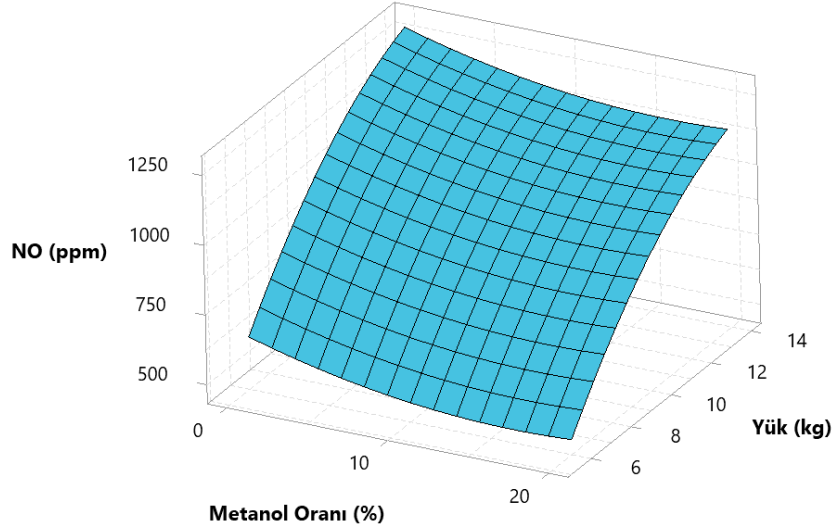
Şekil 3. Metanol oranı ve motor yüküne bağlı olarak FÖYT değişimi (The variation of BSFC depending on the methanol ratio and engine load)

Şekil 4'te metanol oranına ve motor yüküne bağlı olarak NO emisyonu değişimleri gösterilmektedir. NO emisyonu doğrudan silindir içi sıcaklıkla ve yanma odasındaki oksijen fazlalığı ile ilgili bir emisyon türüdür. Silindir içi sıcaklığın özellikle 1500-1600 °C değerlerine çıkmasıyla NO emisyonları aşırı artış göstermektedir. Buna ilaveten, silindir içi sıcaklığı artırıcı yönde etki yapan tüm faktörler NO emisyonunun da artmasına sebep olacaktır. Grafik incelendiğinde, en düşük NO emisyonunun %10 metanol ilaveli yakıt ile ortaya çıktığı görülmektedir. Metanol benzine göre daha yüksek buharlaşma gizli ısısına sahip olduğundan, emme zamanının sonunda

yanıcı karışım sıcaklıkları ve maksimum yanma sıcaklığı değerleri benzine göre nispeten daha düşüktür [36]. Bu sayede NO emisyonları daha düşük çıkmaktadır. Metanol kullanımı ile NO emisyonlarının azaldığına dair benzer sonuçlara sahip çalışmalar bulunmaktadır [37,38]. En düşük NO emisyonu 474 ppm olarak %10 metanol ilavesi ile bulunurken, metanol oranının %20'ye çıkartılmasıyla NO emisyonları tekrar hafif artış göstermiştir. Metanolün oksijen içerikli bir yakıt olması nedeniyle artan metanol oranına bağlı olarak yanma odasında oksijen fazlalığı olmakta ve bu durum NO emisyonlarının tekrar artma eğilimine geçmesine

sebeptir [39]. Metanol oranının tersine, artan motor yükü ile NO emisyonunun oldukça arttığı gözlemlenmektedir. En düşük NO emisyonunun görüldüğü %10 metanol oranında yapılan

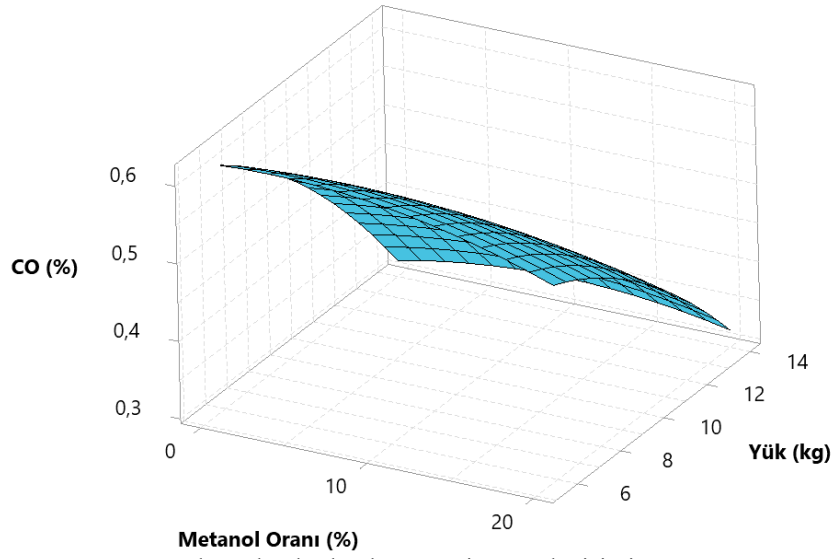
kıyaslamaya göre motor yükünün 6 kg'dan 14 kg'a çıkmasıyla NO emisyonu yaklaşık 2,5 kat artmıştır. Motor yükü silindir içi sıcaklığı artıran bir parametre olduğu için NO emisyonu artışı gerçekleşmiştir.



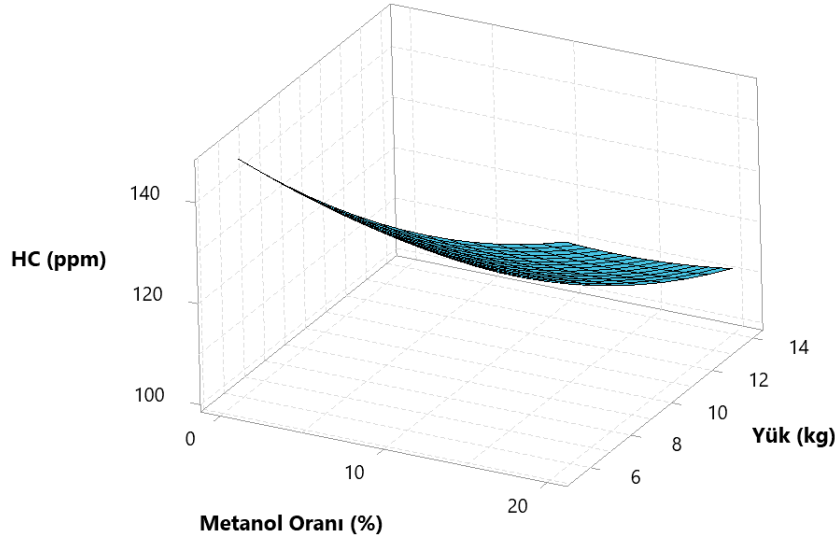
Şekil 4. Metanol oranı ve motor yüküne bağlı olarak NO emisyonu değişimi (*The variation of NO emission depending on the methanol ratio and engine load*)

Eksik yanma ürünü olan CO ve HC emisyonları ile tam yanma ürünü olan CO<sub>2</sub> emisyonlarının metanol oranına ve motor yüküne bağlı olarak değişimi sırasıyla Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmektedir. Hem CO hem de HC emisyonu herhangi bir sebeple ortaya çıkan eksik yanmadan kaynaklı emisyonlardır [40,41]. HC ve CO grafikleri incelendiğinde, en düşük CO emisyonu %20 metanol ile elde edilirken, en düşük HC emisyonu %10 metanol ile bulunmuştur. Metanol oranının %20'ye çıkarılması HC emisyonunun tekrar artmasına sebep olurken, CO emisyonları azalmaya devam etmiştir. Metanolün daha yüksek buharlaşma gizli ısı silindir içi sıcaklığı düşürür ve bu bazen yanma odası duvarlarının yakınında yanmanın gerçekleşmemesine

veya kısmi yanmaya neden olabilir. Bu yüzden %20 metanol oranı ile karışımın buharlaşma gizli ısı çok düştüğü için HC emisyonlarının tekrar artışa geçtiği düşünülmektedir. Diğer taraftan, artan metanol oranı ile silindir içinde oksijen varlığının artması, oksijen yetersizliği nedeniyle ortaya çıkan CO emisyonlarını azaltmıştır. Literatürde benzer sonuçlar elde edilen çalışmalar mevcuttur [42,43]. Motor yükü değişimi açısından HC ve CO grafikleri incelendiğinde, daha yüksek motor yüklerinde, nispeten daha zengin karışımların yanması nedeniyle yanma odası içindeki sıcaklık artmakta ve yüksek sıcaklıklarda yanma, tam yanma oranını artırdığı için HC ve CO emisyonlarını azaltmaktadır.



Şekil 5. Metanol oranı ve motor yüküne bağlı olarak CO emisyonu değişimi (The variation of CO emission depending on the methanol ratio and engine load)

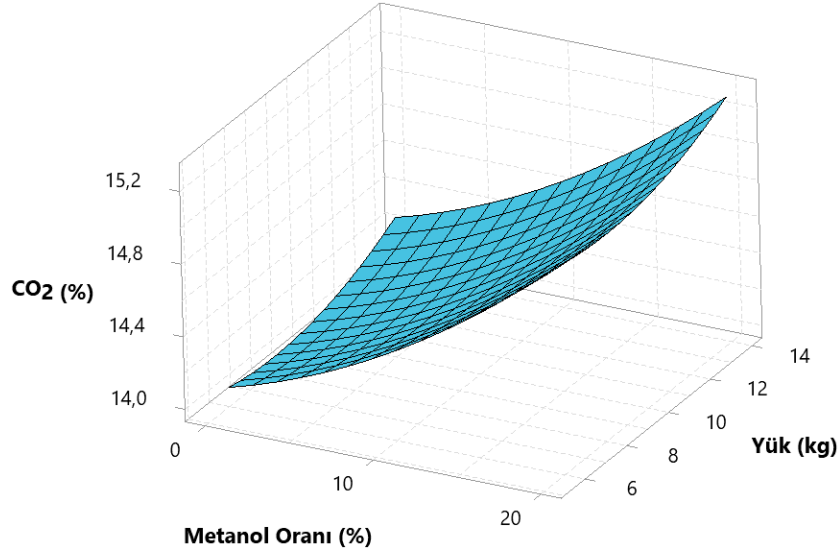


Şekil 6. Metanol oranı ve motor yüküne bağlı olarak HC emisyonu değişimi (The variation of HC emission depending on the methanol ratio and engine load)

CO ve HC emisyonlarının tersine, CO<sub>2</sub> emisyonu tam yanma reaksiyonunda ortaya çıkan bir emisyonudur. Yanma reaksiyonunda karbon atomları yeterli oksijeni bulabilirse CO<sub>2</sub> emisyonuna dönüşür. Oksijen yetersizliği durumunda CO emisyonu olarak kalır. Dolayısıyla, CO emisyonu azalırken CO<sub>2</sub> emisyonunun artması beklenen bir durumdur. Metanolün içeriğindeki oksijen sayesinde tam yanma

oranını artırarak CO emisyonlarını azalttığından yukarıda bahsedilmişti. Buna göre CO<sub>2</sub> emisyonunun artması beklenir ve Şekil 7 incelendiğinde artan metanol oranına bağlı olarak CO<sub>2</sub> emisyonunun arttığı açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Buna ilaveten, artan motor yükü de CO<sub>2</sub> emisyonunu artırmıştır. Metanol içeriğine bağlı olarak CO<sub>2</sub> emisyonunun arttığı bazı çalışmalarda rapor edilmiştir [44, 45].



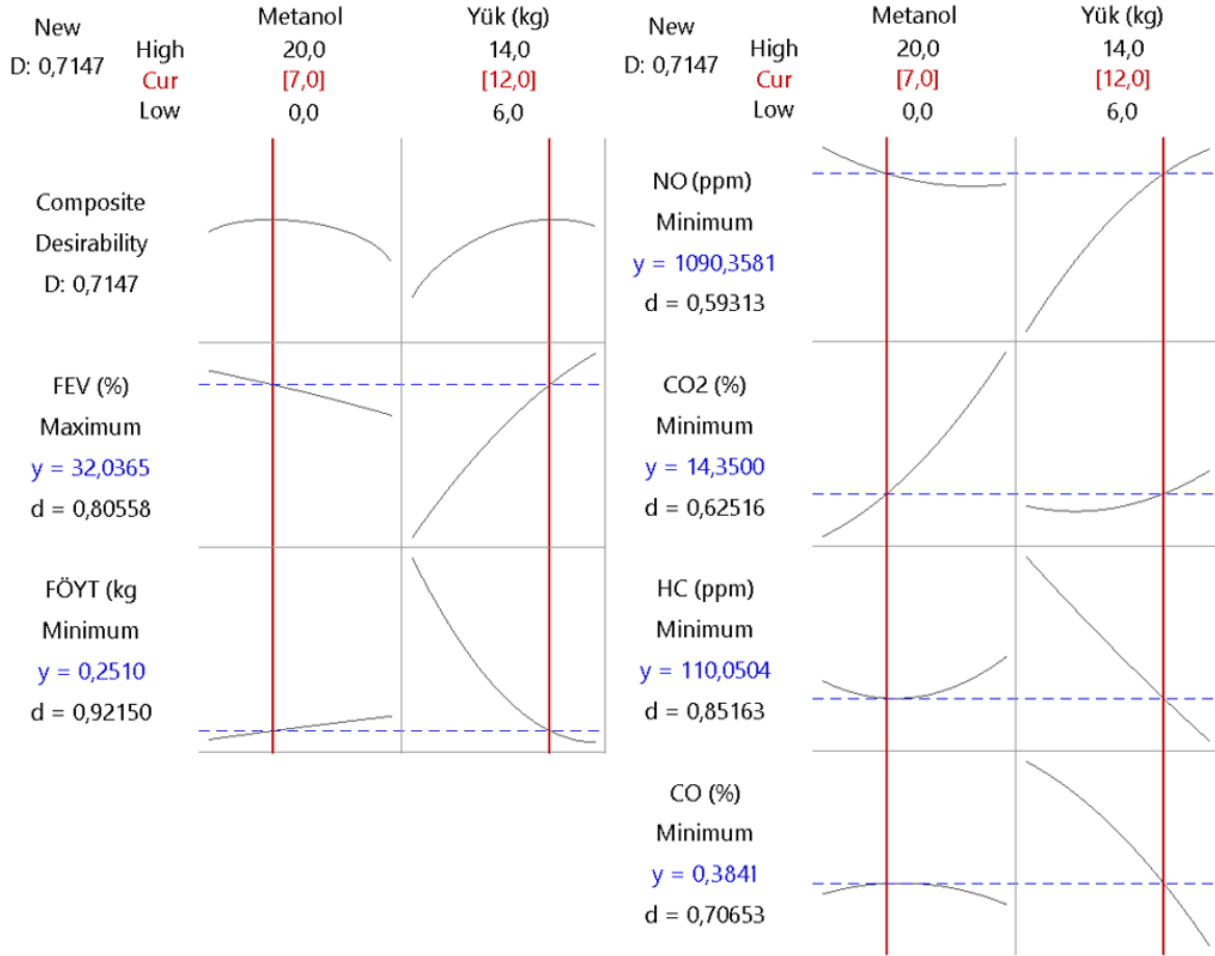


Şekil 7. Metanol oranı ve motor yüküne bağlı olarak CO<sub>2</sub> emisyonu değişimi (*The variation of CO<sub>2</sub> emission depending on the methanol ratio and engine load*)

### 3.1. Optimizasyon ve Doğrulama (*Optimization and Validation*)

Bu çalışmadaki optimizasyonun amacı, optimum metanol oranı ile motor yükünü belirlemek ve optimum çalışma şartlarına karşılık gelen en yüksek performans ve en düşük emisyon seviyelerini elde etmektir. Yukarıdaki bölümde gösterilen 3 boyutlu grafiklerde her bir cevap için ayrı ayrı optimum metanol oranı ve motor yükü gösterilmişti ancak bu bölümde tüm cevapların optimizasyonu eşzamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Optimizasyondan elde edilen sonuçlar Şekil 8'de gösterilmiştir. Optimizasyon sonuçlarına göre optimum metanol oranı %7 çıkarken, optimum motor yükü 12 kg olarak bulunmuştur. Optimum metanol oranı ve motor yüküne karşılık gelen cevaplar ise FEV, FÖYT, CO,

HC, CO<sub>2</sub> ve NO için sırasıyla %32,037, 0,251 kg/kWh, %0,384, 110,05 ppm, %14,35 ve 1090,358 ppm olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca, optimizasyon ile elde edilen sonuçların doğruluğu ile ilgili soru işaretlerinin ortadan kaldırılması için bir doğrulama çalışması yapılması gerekmektedir. Bu doğrulama çalışmasında, optimizasyondan elde edilen optimum çalışma parametreleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Optimum sonuçlar ile deney sonuçlarının kıyaslaması Tablo 7'de verilmiştir. Bu doğrulama çalışmasında ortaya çıkan hata oranlarının %6'nın altında olması nedeniyle optimizasyon çalışmasının başarılı olduğu söylenebilir. Literatürdeki optimizasyon çalışmalarında benzer seviyede veya daha yüksek oranda hata ile optimizasyon yapılan çalışmalar mevcuttur [18,46].



Şekil 8. Optimum çalışma şartları ve karşılık gelen cevaplar (Optimum operating conditions and corresponding answers)

Tablo 7. Doğrulama uygulaması (Application of validation)

Metanol oranı (%)	Yük (kg)		FEV (%)	FÖYT (kg/kWh)	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	HC (ppm)	NO (ppm)
7	12	Optimum	32,037	0,251	0,384	14,35	110,05	1090,358
		Deneysel	32,835	0,254	0,366	13,952	104,47	1093,733
		Hata (%)	2,43	0,99	4,86	2,85	5,34	0,31

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, optimum metanol oranı ve motor yükünü belirleyerek en yüksek performans ve en düşük emisyonları elde etmek amacıyla RSM ile optimizasyon çalışması yapılmıştır. RSM optimizasyonu için gerekli veriler, üç farklı metanol oranında (%0, %10 ve %20), ve beş farklı motor yükünde (6, 8, 10, 12 ve 14 kg) yapılan deneylerden alınmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir:

- Optimum metanol oranı %7 ve motor yükü 12 kg olarak tespit edilmiştir.
- Elde edilen regresyon sonuçları tüm yanıtlar için %90'dan büyük R<sup>2</sup> değerlerinin elde

edildiği ve buna istinaden, oluşturulan RSM modelinin, farklı motor yükünde buji ateşlemeli motor cevapları üzerindeki metanol oranının etkisini doğru bir şekilde verme yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir.

- Optimum metanol oranı ve motor yüküne karşılık gelen cevaplar FEV için %32,037, FÖYT için 0,251 kg/kWh, CO için %0,384, HC için 110,05 ppm, CO<sub>2</sub> için %14,35 ve NO için 1090,358 ppm olarak bulunmuştur.
- Metanol ilavesinin genel olarak emisyonları iyileştirdiği ancak diğer taraftan performansı az da olsa kötüleştiği sonucuna varılmıştır.
- Optimizasyon ve doğrulama çalışmaları ile elde edilen sonuçlar, metanol yakıt

karışımlarının kullanıldığı buji ateşlemeli bir motorun RSM ile %6'nın altında bir hata oranıyla başarılı bir şekilde optimize edilebileceğini göstermektedir.

#### ACKNOWLEDGMENT (TEŞEKKÜR)

Bu çalışma Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje No: 2018/067). BAP biriminde desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

#### KISALTMALAR

ANOVA	varyans analizi
CO	karbon monoksit
CO <sub>2</sub>	karbon dioksit
FEV	fren efektif verimi
FÖYT	fren özgül yakıt tüketimi
HC	hidrokarbon
NO	azot monoksit
RSM	cevap yüzey metodu

#### REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] S. Baidya, S., J. Borke-Kleefeld, "Atmospheric emissions from road transportation in India", *Energy Policy*, vol. 37, no. 10, pp. 3812–3822, 2009.
- [2] T. M. I. Mahlia, Z. A. H. S. Syazmi, M. Mofijur, A. P. Abas, M. R. Bilad, H. C. Ong, A. S. Silitonga, "Patent landscape review on biodiesel production: Technology updates", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 118, pp. 109526, 2020.
- [3] D. Sperling, *Two billion cars: Driving toward sustainability*. New York: Oxford University Press, pp. 93–94, 2009.
- [4] B. Dogan, A. Cakmak, M. K. Yesilyurt, D. Erol, "Investigation on 1-heptanol as an oxygenated additive with diesel fuel for compression-ignition engine applications: An approach in terms of energy, exergy, exergoeconomic, enviroeconomic, and sustainability analyses", *Fuel*, vol. 275, pp. 117973, 2020.
- [5] A. Elfasakhany, "Comparisons of using ternary and dual gasoline-alcohol blends in performance and releases of SI engines", *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp. 1-14, 2021.
- [6] B., Dogan, D. Erol, H. Yaman, E. Kodanli, "The effect of ethanol-gasoline blends on performance and exhaust emissions of a spark ignition engine through exergy analysis", *Applied Thermal Engineering*, vol. 120, pp. 433–443, 2017.
- [7] M. B. Çelik, B. Özdayan, F. Alkan, "The use of pure methanol as fuel at high compression ratio in a single cylinder gasoline engine", *Fuel*, vol. 90, no. 4, pp. 1591–1598, 2011.
- [8] H. Liu, Z. Wang, Y. Long, S. Xiang, J. Wang, S. W. Wagnon, "Methanol-gasoline dual-fuel spark ignition (DFSI) combustion with dual-injection for engine particle number (PN) reduction and fuel economy improvement", *Energy*, vol. 89, pp. 1010–1017, 2015.
- [9] I. Gravalos, D. Moshou, T. Gialamas, P. Xyradakis, D. Kateris, Z. Tsiropoulos, "Emissions characteristics of spark ignition engine operating on lower e higher molecular mass alcohol blended gasoline fuels", *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 27–32, 2013.
- [10] J. Vancoillie, J. Demuyneck, L. Sileghem, M. V. D. Ginste, S. Verhelst, L. Brabant, L. V. Hoorebeke, "The potential of methanol as a fuel for flex-fuel and dedicated spark-ignition engines", *Applied Energy*, vol. 102, pp. 140–149, 2013.
- [11] C. Gong, Z. Li, K. Huang, F. Liu, "Research on the performance of a hydrogen/methanol dual-injection assisted spark-ignition engine using late-injection strategy for methanol", *Fuel*, vol. 260, pp. 116403, 2020.
- [12] M. K. Balki, C. Sayin, "The effect of compression ratio on the performance, emissions and combustion of an SI (spark ignition) engine fueled with pure ethanol, methanol and unleaded gasoline", *Energy*, vol. 71, pp. 194–201, 2014.
- [13] S. A. Shirazi, B. Abdollahipoor, J. Martinson, B. Windom, T. D. Foust, K. F. Reardon, "Effects of dual-alcohol gasoline blends on physiochemical properties and volatility behavior", *Fuel*, vol. 252, pp. 542–552, 2019.
- [14] B. Waluyo, M. Setiyo, I. N. G Wardana, "Fuel performance for stable homogeneous gasoline-methanol-ethanol blends", *Fuel*, vol. 294, pp. 120565, 2021.

- [15] F. Xie, X. Li, X. Wang, Y. Su, W. Hong, "Research on using EGR and ignition timing to control load of a spark-ignition engine fueled with methanol", *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, no. 1, pp. 1084–1091, 2013.
- [16] B. S. N. Prasad, J. K. Pandey, G. N. Kumar, "Impact of changing compression ratio on engine characteristics of an SI engine fueled with equi-volume blend of methanol and gasoline", *Energy*, vol. 191, pp. 116605, 2020.
- [17] Y. Çay, I. Korkmaz, A. Çiçek, F. Kara, "Prediction of engine performance and exhaust emissions for gasoline and methanol using artificial neural network", *Energy*, vol. 50, no. 1, pp. 177–186, 2013.
- [18] A. N. Kumar, P. S. Kishore, K. B. Raju, B. Ashok, R. Vignesh, A. K. Jeevanantham, K. Nanthagopal, A. Tamilvanan, "Decanol proportional effect prediction model as additive in palm biodiesel using ANN and RSM technique for diesel engine", *Energy*, vol. 213, pp. 119072, 2020.
- [19] O. I. Awad, R. Mamat, O. M. Ali, W. H. Azmi, K. Kadirgama, I. M. Yusri, A. M. Leman, T. Yusaf, "Response surface methodology (RSM) based multi-objective optimization of fusel oil -gasoline blends at different water content in SI engine", *Energy Conversion and Management*, vol. 150, pp. 222–241, 2017.
- [20] T. Kumar, R. Mohsin, Z. A. Majid, M. F. A. Ghafir, A. M. Wash, "Experimental study of the anti-knock efficiency of high-octane fuels in spark ignited aircraft engine using response surface methodology", *Applied Energy*, vol. 259, pp. 114150, 2020.
- [21] G. Najafi, B. Ghobadian, T. Yusaf, S. Mohammad, S. Ardebili, R. Mamat, "Optimization of performance and exhaust emission parameters of a SI (spark ignition) engine with gasoline–ethanol blended fuels using response surface methodology", *Energy*, vol. 90, no. 2, pp. 1815–1829, 2015.
- [22] A. S. Onawumi, O. S. I. Fayomi, S. T. A. Okolie, T. A. Adio, N. E. Udoeye, A. U. Samuel, "Determination of a spark ignition engine's performance parameters using response surface methodology", *Energy Procedia*, vol. 157, pp. 1412–1422, 2019.
- [23] S. Sarikoç, "Effect of H<sub>2</sub> addition to methanol-gasoline blend on an SI engine at various lambda values and engine loads: A case of performance, combustion, and emission characteristics", *Fuel*, vol. 297, pp. 120732, 2021.
- [24] Y. Li, J. Gong, Y. Deng, W. Yuan, J. Fu, B. Zhang, "Experimental comparative study on combustion, performance and emissions characteristics of methanol, ethanol and butanol in a spark ignition engine", *Applied Thermal Engineering*, vol. 115, pp. 53–63, 2017.
- [25] S. Özer, "Alkollerin içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılması", *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 19, no. 1, pp. 100–101, 2014.
- [26] V. K. Sharma, V. Kumar, R. S. Joshi, "Parametric study of aluminium-rare earth based composites with improved hydrophobicity using response surface method", *Journal Of Materials Research And Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 4919–4932, 2020.
- [27] M. Alrugaibah, Y. Yagiz, L. Gu, "Use natural deep eutectic solvents as efficient green reagents to extract procyanidins and anthocyanins from cranberry pomace and predictive modeling by RSM and artificial neural networking", *Separation and Purification Technology*, vol. 255, pp. 117720, 2021.
- [28] A. Sharma, Y. Singh, N. K. Singh, A. Singla, H. C. Ong, W. H. Chen, "Effective utilization of tobacco (*Nicotiana tabacum*) for biodiesel production and its application on diesel engine using response surface methodology approach", *Fuel*, vol. 273, pp. 117793, 2020.
- [29] S. Uslu, M. B. Celik, "Performance and exhaust emission prediction of a SI engine fueled with 1-amy alcohol-gasoline blends: An ANN coupled RSM based optimization", *Fuel*, vol. 265, pp. 116922, 2020.
- [30] S. Simsek, S. Uslu, "Determination of a diesel engine operating parameters powered with canola, safflower and waste vegetable oil based biodiesel combination using response surface methodology (RSM)", *Fuel*, vol. 270, pp. 117496, 2020.
- [31] M. Ghanbari, L. Mozafari-Vanani, M. Dehghani-Soufi, A. Jahanbakhshi, "Effect of alumina nanoparticles as additive with diesel–biodiesel blends on performance and emission characteristic of a six-cylinder diesel engine using response surface methodology (RSM)", *Energy Conversion and Management: X*, vol. 11, pp. 100091, 2021.
- [32] S. Dey, N.M. Reang, P.K. Das, M. Deb, "Comparative study using RSM and ANN modelling

for performance-emission prediction of CI engine fuelled with bio-diesohol blends: A fuzzy optimization approach", *Fuel*, vol. 292, pp. 120356, 2021.

[33] H. Yaman, M. K. Yesilyurt, S. Uslu, "Simultaneous optimization of multiple engine parameters of a 1-heptanol / gasoline fuel blends operated a port-fuel injection spark-ignition engine using response surface methodology approach", *Energy*, vol. 238, no. (Part C), pp. 122019, 2021.

[34] S. Simsek, S. Uslu, "Investigation of the effects of biodiesel/2-ethylhexyl nitrate (EHN) fuel blends on diesel engine performance and emissions by response surface methodology (RSM)", *Fuel*, vol. 275, pp. 118005, 2020.

[35] M. Dana, M. A. Sobati, S. Shahhosseini, A. Ansari, "Optimization of a continuous ultrasound assisted oxidative desulfurization (UAOD) process of diesel using response surface methodology (RSM) considering operating cost", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 28, no. 5, pp. 1384–1396, 2020.

[36] A. K. Agarwal, H. Karare, A. Dhar, "Combustion, performance, emissions and particulate characterization of a methanol–gasoline blend (gasohol) fuelled medium duty spark ignition transportation engine", *Fuel Processing Technology*, vol. 121, pp. 16–24, 2014.

[37] B. Wu, L. Wang, X. Shen, R. Yan, P. Dong, "Comparison of lean burn characteristics of an SI engine fueled with methanol and gasoline under idle condition", *Applied Thermal Engineering*, vol. 95, pp. 264-270, 2016.

[38] M. Canakci, A. N. Ozsezen, E. Alptekin, M. Eyidogan, "Impact of alcohol–gasoline fuel blends on the exhaust emission of an SI engine", *Renewable Energy*, vol. 52, pp. 111-117, 2013.

[39] S. Raviteja, G. N. Kumar, "Effect of hydrogen addition on the performance and emission parameters of an SI engine fueled with butanol blends at stoichiometric conditions", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 30, pp. 9563–9569, 2015.

[40] S. Simsek, S. Uslu, H. Simsek, G. Uslu, "Multi-objective-optimization of process parameters of diesel engine fueled with biodiesel/2-ethylhexyl nitrate by using Taguchi method", *Energy*, vol. 231, pp. 120866, 2021.

[41] S. Simsek, S. Uslu, R. Coştu, "A novel approach to study the effect of motor silk-added pyrolysis tire oil on performance and emission characteristics of a diesel engine", *Fuel*, vol. 288, pp. 119668, 2021.

[42] A. Elfasakhany, "Exhaust emissions and performance of ternary iso-butanol–bio-methanol–gasoline and n-butanol–bio-ethanol–gasoline fuel blends in spark-ignition engines: Assessment and comparison", *Energy*, vol. 158, pp. 830-844, 2018.

[43] T. C. C. De Melo, G. B. Machado, C. R. Belchior, M. J. Colaço, J. E. Barros, E. J. de Oliveira, D. G. de Oliveira, "Hydrous ethanol–gasoline blends–Combustion and emission investigations on a Flex-Fuel engine". *Fuel*, vol. 97, pp. 796- 804, 2012.

[44] İ. Örs, B. S. Kul, M. Ciniviz, "A Comparative Study of Ethanol and Methanol Addition Effects on Engine Performance, Combustion and Emissions in the SI Engine", *International Journal of Automotive Science and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 59-69, 2020.

[45] Z. Chen, L. Wang, X. Yuan, Q. Duan, B. Yang, K. Zeng, "Experimental investigation on performance and combustion characteristics of spark-ignition dual-fuel engine fueled with methanol/natural gas.", *Applied Thermal Engineering*, vol. 150, pp. 164-174, 2019.

[46] A. N. Abdalla, H. Tao, S. A. Bagaber, O. M. Ali, M. Kamil, X. Ma, O. I. Awad, "Prediction of emissions and performance of a gasoline engine running with fusel oil–gasoline blends using response surface methodology", *Fuel*, vol. 253, pp. 1-14, 2019.

This is an open access article under the CC-BY license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

