

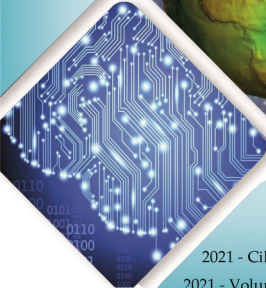


# Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi

## Konya Journal of Engineering Sciences



**(KONJES)**  
E-ISSN: 2667-8055



2021 - Cilt: 9 - Sayı: 1  
2021 - Volume: 9 - Issue: 1

**KONYA JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES (KONJES)  
KONYA MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ**

**HAKEMLİ DERGİDİR**

OWNER/SAHİBİ

Owner on Behalf of Engineering and Natural Sciences Faculty of Konya Technical University **Prof. Dr. Ferruh YILDIZ**  
Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Adına Dekan **Prof. Dr. Ferruh YILDIZ**

Chief Editor/Şef Editör

**Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ**

Editors/Editörler

**Prof. Dr. Halife KODAZ**

**Prof. Dr. Mustafa TABAKCI**

**Assoc. Prof. Dr. Omer Kaan BAYKAN**

Section Editors/Alan Editörleri

**Prof. Dr. A. Afşin KULAKSIZ**

Prof. Dr. hsan ÖZKAN

**Prof. Dr. Kürşad ERSOY**

**Prof. Dr. Mustafa TABAKCI**

**Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN**

Assoc. Prof. Dr. Alpaslan YARAR

**Assoc. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN**

**Assoc. Prof. Dr. Volkan KALEM**

**Assist. Prof. Dr. Selim DOĞAN**

Advisory Board/Danışma Kurulu

Prof.Dr. Ferruh YILDIZ, Konya Technical University

Prof.Dr. Reşat ULUSAY, Hacettepe University

Prof.Dr. Ibaraki SOICHI, Kyoto University

Prof.Dr. Matchavariani LIA, Tbilisi State University

Prof.Dr. Seref SAGIROGLU, Gazi University

Prof.Dr. Vijay P. SINGH, Texas A and M University

Prof.Dr.-Ing. Rudolf STAIGER, Bochum University of Applied Sciences

Prof.Dr. Chryssy POTSIOU, National Technical University of Athens

Prof.Dr. Lena HALOUNOVA, Czech Technical University

Prof.Dr. Petros PATIAS, The Aristotle University

Prof.Dr. Sitki KULUR, Istanbul Technical University

Language Editing/Yabancı Dil Editörü

**Prof. Dr. Ali BERKTAY**

Composition and Printing/Baskı ve Dizgi

**Assist. Prof. Dr. Ismail KOC**

**Dr. Emel Zeray OZTURK**

**Res. Assist Emir Ali DINSEL**

**Res. Assist. Aybüke BABADAG**

Correspondance Address/ Yazışma Adresi

Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Dekanlığı  
42075-Kampüs, Selçuklu, Konya-TURKEY

Tel : 0 332 223 88 18

Fax : 0 332 241 06 35

E-mail : konjes@ktun.edu.tr

Web : <http://dergipark.org.tr/konjes>

## **Editorial Board/Yayın Kurulu**

Ahmet Afsin Kulaksiz, Konya Technical University, TURKEY

Alla Anohina-Naumeca, Riga Technical University, LATVIA

Ashok K. Mishra, Clemson University, USA

Baris Binici, Middle East Technical University, TURKEY

Coskun Bayrak, University of Arkansas, USA

Demetrio Fuentes Ferrera, University of Castilla-La Mancha, SPAIN

Fahrettin Ozturk, The Petroleum Institute, UAE

Haci Murat Yilmaz, Aksaray University, TURKEY

Heinz Ruther University of Cape Town, SOUTH AFRICA

Homayoun Moghimi, Payame Noor University, IRAN

Ihsan Ozkan, Konya Technical University, TURKEY

John Trinder, The University of New South Wales, AUSTRALIA

Kerim Kocak, Konya Technical University, TURKEY

Loredana Judele, Technical University of Iasi, ROMANIA

Mohamed Bouabaz, Université 20 août 1955-Skikda, ALGERIA

Mohd Arif Wani, California State University, USA

Mortaza Yari, University of Tabriz, IRAN

Ömer Aydan, University of the Ryukyus, JAPAN

Sanchoy K. Das, New Jersey Institute of Technology, USA

Selim Dogan, Konya Technical University, TURKEY

Spase Shumka, Agricultural University of Tirana, ALBANIA

Tahira Geroeva, Baku State University, AZERBAIJAN

Vladimir Androkhonov, Novosibirsk Soil Research Institute, RUSSIA

Ali Kocak, Yildiz Technical University, TURKEY

Alpaslan Yarar, Konya Technical University, TURKEY

Ataur Rahman, University of Western Sydney, AUSTRALIA

Cihan Varol Sam Houston State University, USA

Dan Stumbea, Alexandru Ioan Cuza University of Iasi, ROMANIA

Eva Burgetova, Czech Technical University, CZECH REPUBLIC

Georgieva Lilia, Heriot-Watt University, UNITED KINGDOM

Halil Kursad Ersoy, Konya Technical University, TURKEY

Hi-Ryong Byun, Pukyong National University, SOUTH KOREA

Huseyin Devenci, Konya Technical University, TURKEY

Iraida Samofalova, Perm University, RUSSIA

Juan Maria Menendez Aguado, University of de Oviedo, SPAIN

Laramie Vance Potts, New Jersey Institute of Technology, USA

Mila Koeva, University of Twente, NETHERLANDS

Mohamed Metwaly Abu Anbar, Tanta University, EGYPT

Moonis Ali Khan, King Saud University, KSA

Murat Karakus, University of Adelaide, AUSTRALIA

Saadettin Erhan Kesen, Konya Technical University, TURKEY

Selcuk Kursat Isleyen, Gazi University, TURKEY

Shukri Maxhuni, Prizen University, KOSOVA REPUBLIC

Syed Tufail Hussain Sherazi, University of Sindh, PAKISTAN

Thomas Niedoba, AGH University of Science and Technology, POLAND

Zoran Sapuric, University American College Skopje, MACEDONIA

**KONYA MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ**  
**Konya Journal of Engineering Sciences**  
**(KONJES)**

ISSN 2667 – 8055 (Elektronik)

Cilt	9	Mart	2021	Sayı	1
Volume	9	March	2021	Issue	1

**İÇİNDEKİLER (CONTENTS)**

**Araştırma Makalesi (Research Article)**

**PRELIMINARY INVESTIGATION OF ANAEROBIC CO-DIGESTION POTENTIAL OF PRIMARY AND SECONDARY SEWAGE SLUDGE FRACTIONS WITH FRUIT WASTE**

Primer ve Sekonder Arıtma Çamur Fraksiyonlarının Meyve Atığı ile Anaerobik Çoklu Besiyeri Çürütmesi Ön Çalışması

**Dilek ERDIRENCELEBI..... (English) 1-7**

**OBTAINING THE PARAMETRIC POSITION EQUATIONS OF A FOUR-BAR MECHANISM USING THE PARAMETRIC POSITION EQUATIONS OF THE PLANAR MANIPULATOR WITH 3 REVOLUTE JOINTS (3RM)**

Üç Döner Mafsallı Düzlemsel Manipülatörün (3RM) Parametrik Pozisyon Denklemlerini Kullanarak Bir Dört Çubuk Mekanizmasının Parametrik Pozisyon Denklemlerinin Elde Edilmesi

**Orhan Erdal AKAY..... (English) 8-16**

**MİKROAKIŞKAN CİHAZ KULLANARAK POLİMERİK MİKROBALONCUK / NANOPARTİKÜLLERİN ÜRETİM VE KARAKTERİZASYONU**

Production and Characterization of Polymeric Microbubble / Nanoparticles Using a Microfluidic Device

**Sümeyye CESUR, Muhammet Emin ÇAM, Oğuzhan GÜNDÜZ..... 17-24**

**ARKLI PUNTA SAYILARININ POLİESTER KUMAŞ ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Investigation of the Effects of Different Number of Nips on the Properties of Polyester Fabric

**Beysim GARİP, Ayten Nur YÜKSEL YILMAZ, Necati ER,**

**Ayşe ÇELİK BEDELOĞLU..... 25-35**

**RAYLI SİSTEM TREN EKİPMANLARININ YERLİLEŞTİRME PROBLEMİ İÇİN ÇOK KRİTERLİ BİR KARAR MODELİ**

A Multi-Criteria Decision Model for the Localization Problem of the Rail System Train Equipment

<b>M.Abdullah GENÇER, Evrencan ÖZCAN, Tamer EREN.....</b>	<b>36-49</b>
<b>EARLY DETECTION OF ALZHEIMER'S DISEASE USING DATA MINING: COMPARISON OF ENSEMBLE FEATURE SELECTION APPROACHES</b>	
Veri Madenciliği Kullanılarak Alzheimer Hastalığının Erken Tespiti: Topluluk Özellik Seçim Yaklaşımlarının Karşılaştırılması	
<b>Selim BUYRUKOĞLU..... (English)</b>	<b>50-61</b>
<b>FREN DİSK-BALATA MEKANİZMASININ ÜÇ BOYUTLU GERİLME ANALİZİ</b>	
Three Dimensional Stress Analysis of a Brake Disc-Pad Mechanism	
<b>Mehmet Nurullah BALCI.....</b>	<b>62-84</b>
<b>ARAÇ SÜSPANSİYON SİSTEMİNİN NÜMERİK ve DENEYSEL DİNAMİK ANALİZİ</b>	
Numerical and Experimental Dynamic Analysis of Vehicle Suspension System	
<b>Himmet OKUTURLAR, Mustafa TINKIR.....</b>	<b>85-105</b>
<b>FABRICATION OF UNDERCOOLED BISMUTH TIN LIQUID METAL PARTICLES WITH HIGH YIELD</b>	
Aşırı Soğumuş Bizmut Kalay Sıvı Metal Parçacıklarının Yüksek Verimle Üretimi	
<b>Simge ÇINAR..... (English)</b>	<b>106-121</b>
<b>FARKLI Zn ve Mg İÇERİĞİNE SAHİP YAŞLANDIRILABİLİR TİCARİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ</b>	
Investigation of the Structural Properties of Age-Hardenable Commercial Aluminum Alloys with Various Zn and Mg Contents	
<b>Yusuf KAPLAN, Sercan TAŞAR, Mehmet YILDIRIM.....</b>	<b>122-128</b>
<b>ARAÇ İÇİ SESİNDEN ARACI TANIMA VE SINIFLANDIRMA</b>	
Vehicle Detection and Classification from Its Interior Sound	
<b>Emrah AYDEMİR, Murat IŞIK.....</b>	<b>129-136</b>
<b>ZAMAN TANIM BÖLGESİNDE SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE PYTHON DİLİNDE GRAFİK KULLANICI ARAYÜZLÜ BİR ELEKTROMANYETİK BENZETİM YAZILIMININ GELİŞTİRİLMESİ</b>	
Development of an Electromagnetic Simulation Software with Graphical User Interface in Python Programming Language Using Finite Difference Time Domain Method	
<b>Murat Can SERKUŞ, Serhan YAMAÇLI.....</b>	<b>137-155</b>
<b>PICK-UP HAFİF KAMYON UYGULAMALARI İÇİN TEK PARÇALI ALÜMİNYUM KARDAN MİLİ KONSEPT TASARIMI</b>	
Concept Design Of an Aluminum One-Piece Driveshaft for Pick-up Truck Applications	
<b>Muzaffer KASABA, Efe IŞIK, Sedat TARAKÇI.....</b>	<b>156-163</b>
<b>ENDÜSTRİYEL BİYOLOJİK FERMANTASYON İŞLEMİ İÇİN DENGE OPTİMİZASYON ALGORİTMASIYLA KONTROLÖR TASARIMI</b>	
Controller Design with Equilibrium Optimization Algorithm for an industrial biological	

fermentation process

**Abdullah ATEŞ**..... 164-179

**ELERİN ARŞİVLENMESİNDE BİLGİSAYAR ALTYAPISININ KULLANILMASI VE KLASİK MODELLERLE KIYASLANMASI**

Using Computer Infrastructure in Archiving Historical Sille Fountains and Comparing with Classical Models

**Mehmet Emin BAŞAR, Bayram AKDEMİR, İlknur ACAR ATA**..... 180-192

**ÖNCE DEN EĞİTİLMİŞ DERİN AĞLAR İLE GÖĞÜS RÖNTGENİ GÖRÜNTÜLERİ KULLANARAK PNÖMONİ SINIFLANDIRILMASI**

Classification of Pneumonia Using Pre-Trained Deep Networks with Chest X-Ray Images

**Mehmet Bilal ER**..... 193-204

**ELECTRICAL AND THERMAL CONDUCTIVITIES OF IRON (II, III) OXIDE ADDED RIGID POLYURETHANE FOAM NANOCOMPOSITES**

Demir (II, III) Oksit Katkılı Rijit Poliüretan Köpük Nanokompozitlerin Elektriksel ve Termal İletkenlikleri

**Meral AKKOYUN**..... (English) 205-215

**BATMAN İLİNDEKİ ŞİŞEN ZEMİNLERİN JEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN NİCEL ve NİTEL YÖNTEMLERLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

The Evaluation of the Geotechnical Properties of the Swelling Soils in Batman Province with Quantitative and Qualitative Methods

**Mehmet Emin TUTUŞ, Habib AKGÜL, Nuray ALPASLAN**..... 216-231

**Derleme Makalesi (Review Article)**

**TRİBOELEKTRİK NANOJENERATÖRLER İLE ENERJİ HASADI: TEORİK KÖKEN, ÇALIŞMA PRENSİBİ VE ÇALIŞMA MODLARI**

Energy Harvesting with Triboelectric Nanogenerators: Theoretical Roots, Working Principles and Working Modes

**Nazire Deniz YILMAZ**..... 232-249

**DÖRT AYAKLI ROBOTLARIN MODELLENMESİ, KONTROLÜ VE ENGEBELİ YÜZEYLERDE YÜRÜYÜŞÜ ÜZERİNE BİR LİTERATÜR ARAŞTIRMASI**

A Literature Review on Modeling, Control and Walking on Rough Surfaces of Quadruped Robots

**Muhammed Arif ŞEN, Mete KALYONCU**..... 250-279



## PRELIMINARY INVESTIGATION OF ANAEROBIC CO-DIGESTION POTENTIAL OF PRIMARY AND SECONDARY SEWAGE SLUDGE FRACTIONS WITH FRUIT WASTE

Dilek ERDIRENCELEBI

Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Environmental Engineering Department,  
Konya, TURKEY

[derdirencelebi@ktun.edu.tr](mailto:derdirencelebi@ktun.edu.tr)

(Geliş/Received: 02.03.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 26.06.2020)

**ABSTRACT:** Co-digestion feasibility of primary (PS) and secondary (SS) sewage sludge fractions produced in a municipal wastewater treatment plant (WWTP) was investigated by the mixing of fruit waste in sequential batch reactors. Toxic threshold level for pH was exceeded as fruit waste digestion produced a high level of volatile fatty acid (VFA) concentration. Alkali (NaOH) addition provided an optimum level of pH at 7.95-8.05 and 8.16-8.25 in the co-digestion of PS and SS, respectively, and efficient conversion of VFA to methane gas eliminating VFA accumulation. Buffered co-digestion resulted in 55% (+227-271 mL) and 400% (+501-546 mL) increase in biogas production compared to solely PS and SS stabilization. Fruit waste digestion's positive effect was obtained at a higher level in SS digestion. pH rather than VFA proved to be the key parameter and NaOH highly effective as an alkali source producing double buffering effect by converting carbonic acid produced to bicarbonate alkalinity. High carbohydrate content of fruit waste exhibited a beneficial potential to neutralize high pH occurring in PS and SS digestion, thus, minimize free ammonia toxicity balancing hydroxide alkalinity formed from protein hydrolysis. Optimization of fruit waste loading rate based on pH will enable surplus energy gain and stable operation in sewage sludge and protein-rich wastewater digestion.

**Key Words:** Sewage sludge, co-digestion, organic waste, biogas, energy.

### Primer ve Sekonder Arıtma Çamur Fraksiyonlarının Meyve Atığı ile Anaerobik Çoklu Besiyeri Çürütmesi Ön Çalışması

**ÖZ:** Kentsel atıksu arıtma tesislerinde (AAT) oluşan primer (PÇ) ve sekonder (SÇ) arıtma çamurlarının meyve atığı ile birlikte anaerobik çürütme çalışması ardışık kesikli reaktörlerde yürütülmüştür. Proseste meyve atığının parçalanması ile yüksek seviyede uçucu yağ asitleri (UYA) oluşarak toksik pH eşiği geçilmiştir. Alkali kaynağı olarak NaOH ilavesi sonrasında pH PÇ ve SÇ için sırasıyla 7.95-8.05 ve 8.16-8.25 olarak alkali seviyelerde gerçekleşmiş ve UYA'nın etkin metana dönüşümü ile biyogazda sırasıyla %55 (+227-271 mL) ve %400 (+501-546 mL) artış elde edilmiştir. Meyve atığının aynı alkali şartta SÇ için daha yüksek verim ve proses stabilitesi sağladığı gözlenmiştir. Proses için UYA'dan ziyade pH'nın anahtar parametre olduğu belirlenmiştir. NaOH, alkali kaynağı olarak proseste oluşan karbonik asiti bikarbonat alkalinitesine çevirdiği için çift kat etki sağlamıştır. Meyve atığının karbonhidrat içeriği, PÇ ve SÇ çürütmesinde oluşan yüksek pH'nın nötralize edilmesinde faydalı katkı sağlamıştır. Sonuç olarak meyve atığının özellikle SÇ çürütmesinde ilave substrat olarak enerji eldesini arttıracığı belirlenmiştir. Organik yükleme hızının pH bazında optimize edilmesi ile alkali ilavesiz arıtma çamurlarının ve proteinli atıkların çoklu çürütmesinin kararlı işletimle gerçekleştirilmesi de mümkün olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Arıtma çamuru, anaerobik, çürütme, organik atık, biyogaz, enerji.

## 1. INTRODUCTION

Sewage sludge produced as primary (PS) and secondary (SS) sludge fractions in municipal wastewater treatment plants (WWTP) are mixed, thickened and fed to anaerobic digesters to obtain useful methane/energy and volatile solid (VS) reduction. Sewage sludge stabilization and disposal usually make up more than half the overall operational costs of the WWTP (Mininni *et al.*, 2015). An approximate 40-50% of the VS in the mixed sludge is degraded producing a biogas composed of mainly methane (65%) and CO<sub>2</sub> (35%) which is converted to electrical energy via regenerators (Metcalf and Eddy, 2003). The energy obtained has a potential to recover 40 (in case of solely PS digestion) to 70% of the WWTP's total daily operation costs where 100% recovery is possible depending on the rate of solid loading and/or organic content. Each sludge fraction owns its specific content and ability to biodegrade. PS is the sum of settleable solids separated in the first settling tank on the main line of a municipal WWTP and consists of raw organic material as proteins and lipids with a high degree of degradability. SS is the settled bacteria grown in the biological treatment unit (activated sludge process) and resistant to anaerobic degradation. As the sludge age applied increases in nutrient removing activated sludge systems, the bacteria get older and gain further resistance to anaerobic biodegradation and methane yield drops in such WWTPs. Conversion rate to methane is faster for PS because SS is composed of viable microorganisms and extracellular polymeric substances for which hydrolysis is the limiting step of anaerobic digestion which proceeds at a low rate. Lab-scale studies investigated pre-treatment methods' efficiency to improve biodegradability such as thermal, ultrasonic and wet oxidation prior to anaerobic digestion for which cost-efficiency has not been proved yet for full-scale application (Carrere *et al.*, 2010). There is also a contrast in the pre-treatment of SS as high dewaterability is largely reduced leading to higher cost for chemical in the decanter unit (Erdirencelebi *et al.*, 2017).

Anaerobic co-digestion of sewage sludge with organic wastes of food and agricultural origin is an attractive alternative which helps increase methane production and is advantageous over composting with useful energy recovery, increased anaerobic degradability and stabilization in a shorter time scale (Demirer *et al.*, 2001). Anaerobic biotechnology is a very valuable process in the renewable energy field as the most economic method to stabilize organic wastes for which a predicted production of 2.2 billion ton worldwide is given by United Nations' FAO until 2025 (Ariunbaatar *et al.*, 2014; 2015).

In the present paper, a preliminary lab-scale anaerobic co-digestion study was conducted with PS and SS fractions as parallel batch and sequential batch feeding sets with multiple substrate as fruit waste and process performance was investigated on biogas and volatile fatty acid (VFA) production and pH/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> balance as the key parameters of the anaerobic stabilization.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### 2.1. Batch Study

The study was started for PS in two 1000 mL volume glass and special-made reactors with gas outlets in the first part of the study. Control reactor received 700 mL anaerobic inoculum sludge and 100 mL PS whereas the second reactor received an additional fruit mix at 100 mL volume. The reactors' incubation temperature was adjusted to 35(+/-0.5)°C. The process was monitored for 17 d and evaluated with biogas production and than the second part's operational setup was configured.

### 2.2. Sequential Batch Study

Eight 250 mL special-made glass reactors were used in paralel for PS, SS and fruit waste digestion. Two paralel reactors were set for each feeding condition where control/reference reactors were set in paralel to compare the process performance with multiple substrate digestion. The control reactors received 100 mL of inoculum sludge, 25 mL of PS or SS and others an additional 25 mL of fruit mix. The reactors' incubation temperature was adjusted to 35(+/-0.5)°C. Four subsequent feedings were



implemented at durations of 16-22 d depending on the biogas production. pH,  $\text{HCO}_3^-$  and VFA were determined in the end of feeding periods.

### 2.3. Sludge and Substrate Characteristics

Inoculum, PS and SS samples were obtained from the anaerobic sludge digester outlet, primary settling tank outlet and recycle line of the main-line biological treatment unit of the municipal WWTP, respectively. Winter fruit waste was collected from the market place and blandered to pieces smaller than 3 mm and stored at 4°C. Volatile (VS) and total solid (TS) concentrations were measured at ranges of 12465-35810 mg VS/L and 18270-48700 mg TS/L for PS and 2620-10385 mg VS/L and 5315-13040 mg TS/L for SS.

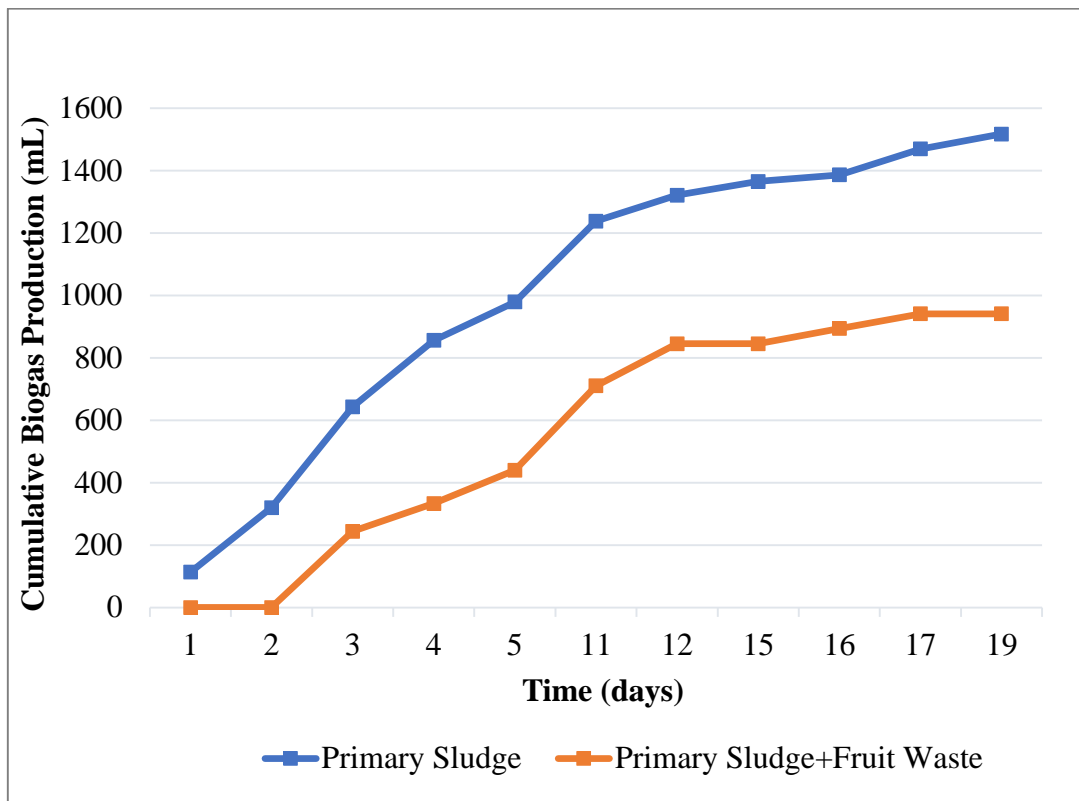
### 2.4. Analytical Methods

Biogas was measured by liquid displacement method. VFA and  $\text{HCO}_3^-$  were determined by a two-point titrimetric method according to Anderson and Yang (1992). TS and VS concentrations were measured via standart methods of 2540-B and C (APHA, 2005). A multi parameter Hach Lange HQ40d was used for pH measurement and titration.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

The batch study with PS showed a significant inhibitory effect in case of multiple substrate digestion (Fig. 1). Fruit waste feeding produced 62% lower biogas compared to PS digestion only which indicated a strong inhibitory effect. A delaying effect also was observed in the inhibited digestion as inoculum was adapted to PS as a substrate but not to fruit waste. Delaying effect in the biogas production indicated that hydrolysis of fruit waste generated some intermediate products that hindered methanogenesis, thus, methane production. Recovery did start on the 3<sup>rd</sup> day but stopped on the 12<sup>th</sup> day. The pattern revealed that inhibitory intermediate products increased in concentration as digestion progressed and were severely effective on methanogenesis.

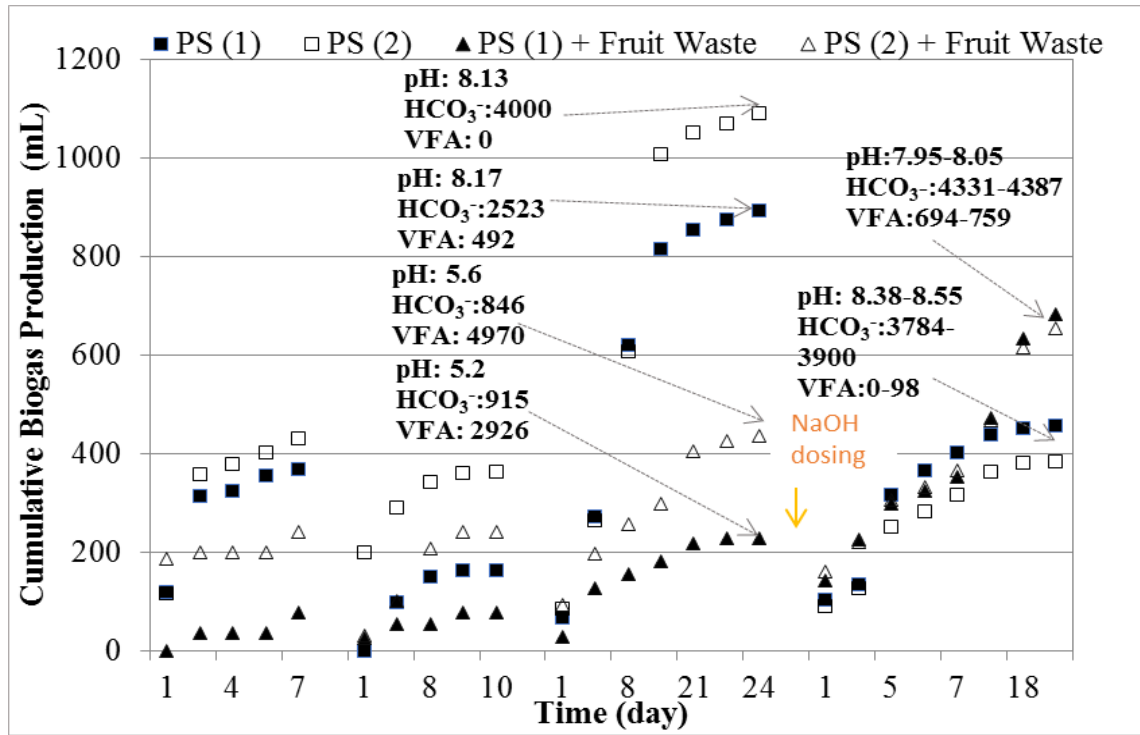
The biogas yield in PS digestion was obtained at a high level as 0.44 L/g  $\text{VS}_{\text{added}}$ . High anaerobic degradability of PS was supported by the high yield value.



**Figure 1.** Comparative cumulative biogas production in PS digestion with fruit waste

In the sequential batch feeding part, smaller reactors were used as 2 parallel for each digestion style. The same pattern as lower amounts at 50% in biogas production was observed in PS digestion with fruit waste compared to only PS digestion in the first two feedings (Fig. 2). Raw sludge changed and VS content increase induced higher biogas production in the 3. feeding where VS load tripled promoting a similar effect on methanogenesis in PS digestion where VFA at 492 mg CaCO<sub>3</sub>/L in one reactor indicated a delay or inhibition effect resulting in lower biogas production. As PS is the sum of most particulate matter in the raw wastewater, its digestion is subject to risks originating from various toxic pollutants as heavy metals, lipids and toxic organic compounds adsorbed on sludge particles which may enter the digesters at varying contents. Any difference is possible between parallel reactors under the same feeding conditions. pH at an alkali level is a natural outcome of PS digestion as ammonia nitrogen produced from the proteinaceous matter hydrolysis is an alkali compound and generates hydroxide alkalinity after conversion to its acidic ammonium form in the process.

In multiple substrate PS digestion, reduced biogas production indicated an inhibited methanogenesis which was evidenced by very low pH at 5.2-5.6 and high VFA concentration at 2926-4970 mg CaCO<sub>3</sub>/L. Bicarbonate as the buffering power of the process was consumed significantly and dropped to 1/3-1/4<sup>th</sup> of the values of the PS digestion.



**Figure 2.** Cumulative biogas production and pH/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/VFA in PS digestion with and without fruit waste (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/VFA concentrations in mg CaCO<sub>3</sub>/L)

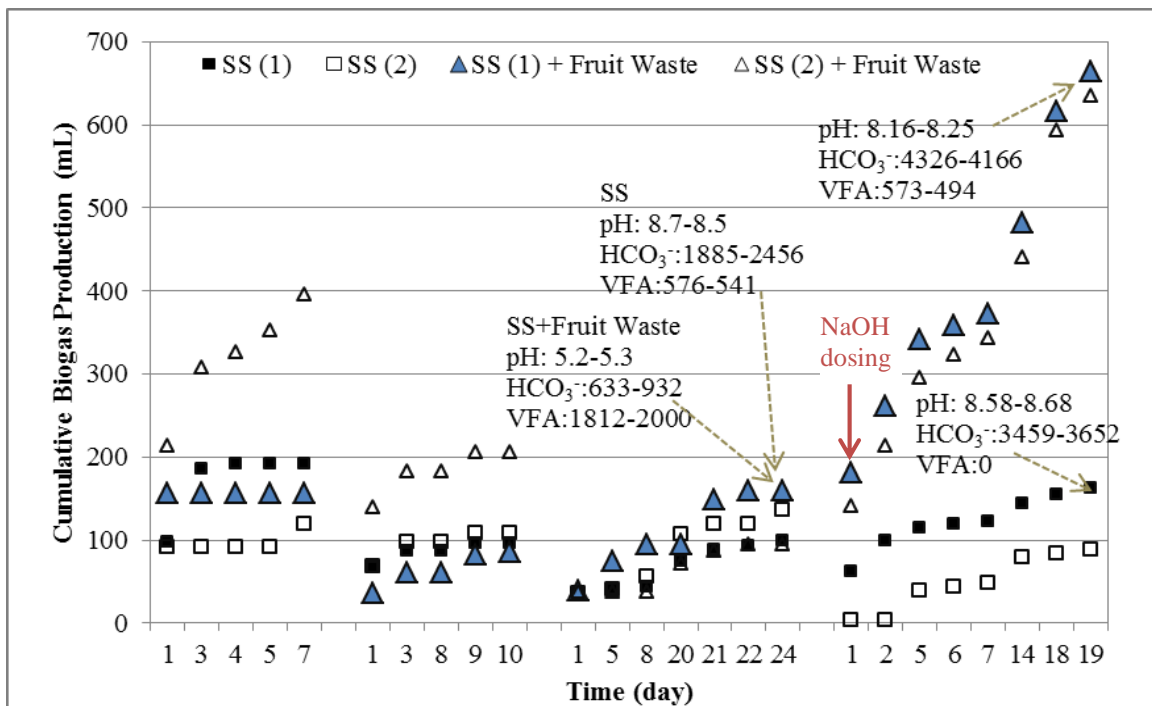
A noticeable point was that higher VFA did not produce a worse effect on biogas production in fruit waste fed digesters. pH at 5.2 was the key parameter for the low process performance where pH levels below 5.5 is detrimental on methanogens and can't be tolerated for more than 24 hrs in continuously fed reactors (Speece, 1996). VFA and long chain fatty acids (LCFA)(produced as intermediate products from degradation of lipids and further  $\beta$ -oxidation by anaerobic hydrolytic and acidogenic bacteria, respectively) are in their toxic acid forms at this level. NaOH was added at 0.03 M to raise the pH and supply extra buffering power to multiple substrate fed reactors and new feeding set was started. Hydroxide salts are the most suitable alkali sources in case of intensive acidification because they generate double buffering effect on the system as they convert carbonic acid to bicarbonate and organic acids to their anionic forms that contribute to the alkalinity of the system.

Multiple substrate PS digesters' performances increased in the 4. feeding as they produced biogas at 1.5 time compared to PS digestion where pH occurred at 7.95-8.05 and VFA concentrations were at 1/4-1/7 compared to previous feeding indicating higher conversion to methane. pH control was highly effective on the process, especially on methanogenesis in digesting fruit waste. Higher bicarbonate level in multiple substrate PS digestion proved the efficiency of the alkali source as carbonic acid produced intensely in fruit waste digestion was converted to bicarbonate alkalinity and VFA were kept at their salt form (contributing to alkalinity).

Drop in biogas level in PS digestion was correlated to raw sludge change. The biogas yield obtained in PS digestion was 1.16-1.38, 0.99-1.21 and 0.76-0.90 L/g VS<sub>fed</sub> in the 1-2., 3. and 4. feedings, respectively. The gradual decrease of the yield indicated also some inhibitory effect's accumulation in the reactors originating from PS or fruit waste content and/or degradation. High pH level at 8.33-8.55 is prone to increase the concentration of toxic free ammonia (FA) in the reactor which is a common problem in the digestion of protein-rich wastes (Speece, 1996; Astals *et al.*, 2014). The synergistic effect of carbohydrate matter in the balancing of pH came out as faster kinetics and improved process performance (Astals *et al.*, 2014). Fruit waste exhibited a potential to overcome possible FA toxicity as a co-substrate to PS digestion but necessitated alkali addition which could be eliminated at lower loading rates in the present study.

The process performance in SS digestion proceeded at a more stable level with biogas yield gradually decreasing from 1.3-1.6 down to 0.5-0.9 L/g VS<sub>added</sub> in subsequent feedings as raw sludge changed (Fig. 3). pH proceeded at a stable range of 8.5-8.7 and some degree of VFA accumulation at 541-576 mg CaCO<sub>3</sub>/L occurred.

In the case of multiple substrate SS digestion, biogas production was augmented up to 2.06, 1.9 and 1.16 times (compared to SS digestion alone) where the gradual decrease was caused by the intense acidification producing a final pH at 5.2-5.3 and VFA at 1812-2000 mg CaCO<sub>3</sub>/L. The different pattern compared to multiple PS digestion was that lower pH levels were experienced with lower VFA values at similar methanogenic activity. After NaOH dosing, biogas production jumped to values 4 times the SS digestion with an alkali pH (8.16-8.25) and lower VFA compared to multiple PS digestion.



**Figure 3.** Cumulative biogas production and pH/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/VFA in SS digestion with and without fruit waste (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/VFA concentrations in mg CaCO<sub>3</sub>/L)

#### 4. CONCLUSIONS

Fruit waste loading applied at equal volume to PS and SS in the sequential lab-scale batch study showed that even this high loading proved feasible under optimum pH control with a suitable alkali source and high VFA concentration is tolerable and can be reduced effectively by conversion to methane gas. pH was determined as the key control parameter of the process.

Co-digestion resulted in 55% ((+227-271 mL) and 400% ((+501-546 mL) increase in biogas production compared to solely PS and SS stabilization. Fruit waste induced a higher degree of VFA accumulation with lower surplus biogas in PS co-digestion and proved its potential and promoting effect as a co-substrate at a significantly higher degree in SS digestion.

Anaerobic sludge digesters are fed at high sludge flow rates and any chemical addition may add considerably to the operational costs. The need for alkali addition can be eliminated via optimization of organic loading rate in case of fruit wastes and its high carbohydrate content will balance high pH range produced in sewage sludge and protein-rich wastewater digestion. Continuous feeding studies with a low-to-moderate mixing is the tool to obtain the optimum flow/load rate of multiple substrate digestion feasible for augmenting energy yield in municipal WWTPs.

Further research on increased biodegradability of sewage sludge fractions with different organic wastes' feeding will also show the high potential of separate PS and SS digestion at full scale towards the amelioration of the sludge line efficiency in municipal WWTPs. Co-digestion can also improve the final stabilized sludge's quality such as nutrient content for soil applications.

## REFERENCES

- Anderson, G. K., and Yang, G. 1992. "Determination of bicarbonate and total volatile acid concentration in anaerobic digesters using a simple titration." *Water Environ. Res.*, 64(1), 53–59.
- APHA (American Public Health Association). 2005." Standard methods for the examination of water and wastewater." AWWA and WEF, Washington, DC.
- Ariunbaatar, J., Di Perta, E.S., Panico, A., Frunzo, L., Esposito, G., Lens, P.N., Pirozzi, F. 2015. "Effect Of Ammoniacal Nitrogen On One-Stage And Two-Stage Anaerobic Digestion Of Food Waste." *Waste Management* 38, 388-398.
- Ariunbaatar, J., Panico, A., Esposito, G., Pirozzi, F., Lens, P.N. 2014. "Pretreatment Methods To Enhance Anaerobic Digestion Of Organic Solid Waste." *Applied Energy* 123: 143-156.
- Astals, S., Batstone, D.J., Mata-Alvarez, J., Jensen, P.D. 2014. "Identification of synergistic impacts during anaerobic co-digestion of organic wastes." *Bioresource Technology* 169: 421–427.
- Carrere, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batstone, D.J., Delgenes, J.P., Steyer, J.P., Ferrer, I. 2010. "Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability:a review." *Journal of Hazardous Materials*, 183 (1-3): 1-15.
- Demirer, G.N., Duran, M., Güven, E., Uğurlu, O., Ergüder, T.H. Tezel, U., Şen, S., Korkusuz, E.A., Varolan, N. 2001. "Biogas Gain from Organic Wastes by Anaerobic Methods: Feasibility in Turkey (in Turkish)." Presented at the Renewable Energy Sources Symposium, Jan 18–20, İzmir (TR), 99–105.
- Erdirencelebi, D., Sarıkaya, F., Bayhan, C., Aysan, H. 2017. "Anaerobic Biodegradability and Dewaterability of Sewage Sludge Fractions: Potential for Separate Anaerobic Stabilization in Sequential Batch Reactors." Presented at the International Symposium on Environmental Science and Technology (2017 ISEST), 19-22 September, Beijing (CH).
- Metcalf and Eddy, 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4. Basım). New York: McGRAW-Hill Companies.
- Mininni, G., Laera, G., Bertanza, G., Canato, M., Sbrilli, A. 2015. "Mass and energy balances of sludge processing in reference and upgraded wastewater treatment plants", *Environment :Science and Pollution Research* 22: 7203-7215.
- Speece R.E. 1996. "Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters." Archae Press, TN, USA, p.297.



## OBTAINING THE PARAMETRIC POSITION EQUATIONS OF A FOUR-BAR MECHANISM USING THE PARAMETRIC POSITION EQUATIONS OF THE PLANAR MANIPULATOR WITH 3 REVOLUTE JOINTS (3RM)

Orhan Erdal AKAY 

Sütcü Imam University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Kahramanmaraş, TURKEY  
[akayorhan@ksu.edu.tr](mailto:akayorhan@ksu.edu.tr)

(Geliş/Received: 07.04.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 11.09.2020)

**ABSTRACT:** In a four-bar mechanism, the crank link rotates at a constant angular velocity, while the other two links have constantly changing angular velocities. If it is desired to convert a 3RM into a four-bar mechanism, the variable angular velocities of the rotary actuators at both ends of the coupler link should be accurate. The general parametric set of equations that give the cartesian coordinates of 3RM can be arranged so that they can be used for the four-bar mechanism by limiting the degree of freedom. In this case, the angular velocities of the actuators on both ends of the coupler link should be determined while the crank link rotates at a constant angular speed. Angular velocities of actuators have been obtained using the WorkingModel2D (WM2D) "dynamic motion-simulation software" for a four-bar mechanism, whose geometric parameters have been selected as the crank-rocker. Using the angular velocity data, unknown coefficients in polynomials expressing the angular velocities of the rotary actuators connected to the coupler link have been found using Mathematica software. The trajectory and angular velocity data have been obtained from WM2D, the results of trajectory and angular velocity equations have been compared and the results have been at acceptable levels.

**Key Words:** Parametric model, four bar mechanism, 3R manipulator, inverse kinematic solution

### Üç Döner Mafsallı Düzlemsel Manipulatörün (3RM) Parametrik Pozisyon Denklemlerini Kullanarak Bir Dört Çubuk Mekanizmasının Parametrik Pozisyon Denklemlerinin Elde Edilmesi

**ÖZ:** Bir dört çubuk mekanizmasında, kol uzvu sabit bir açısal hız ile dönerken, diğer iki uzuv sürekli değişen açısal hızlara sahiptir. Bir 3RM mekanizması, dört çubuk mekanizmasına dönüştürülmek istenirse, biyel uzvunun her iki ucundaki döner aktuatörlerin değişken açısal hızlarının doğru olarak belirlenmesini gerekir. 3RM'nin kartezyen koordinatlarını veren genel parametrik denklem seti serbestlik derecesi sınırlanarak dört çubuk mekanizması için kullanılabilir. Bu durumda kol uzvu sabit bir açısal hız ile dönerken, biyel uzvunun her iki ucundaki aktuatörlerin açısal hızları belirlenmelidir. Aktuatörlerin açısal hızları, geometrik parametreleri kol-sarkaç çalışmasına göre seçilen bir dört çubuk mekanizması için WorkingModel2D (WM2D) "dinamik hareket simülasyon yazılımı" kullanılarak elde edilmiştir. Açısal hız verileri kullanılarak, biyel uzvuna bağlı döner aktuatörlerin açısal hızlarını ifade eden polinomlardaki bilinmeyen katsayılar Mathematica yazılımı kullanılarak bulunmuştur. WM2D'den elde edilen yörünge ve açısal hız verileri, yörünge ve açısal hız denklemlerinin sonuçları karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların kabul edilebilir seviyelerde olduğu bulunmuştur.

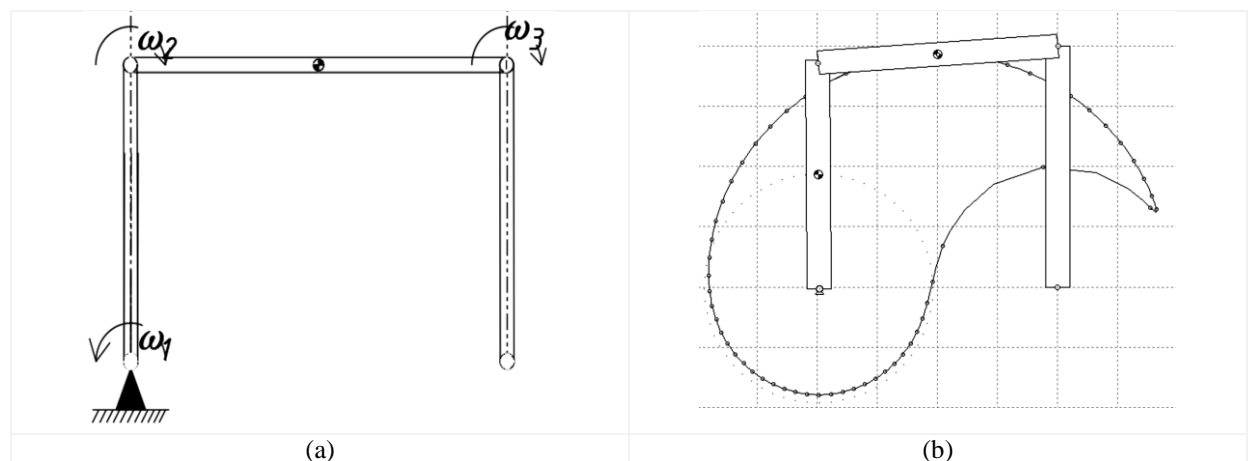
**Anahtar Kelimeler:** Parametrik model, dört çubuk mekanizması, 3R Manipulatör, ters kinematik çözüm

## 1. INTRODUCTION

Theoretically, four bar mechanisms that can draw an infinite number of trajectories have a very important place in machine design. Trajectory synthesis has been one of the main areas of studies on these mechanisms. Because the position equations of the four-bar mechanisms are in non-linear form, various computer algorithms are used for their solutions (Roy *et al.*, 2008; Wampler *et al.*, 1992; Acharyya and Mandal, 2009; Hong-Sen Yan and Soong, 2001; Tang *et al.*, 2013; Dong *et al.*, 2013). In addition to the old research topics such as kinematics and dynamic analysis of four bar mechanisms, many interesting studies are carried out about bio-mechanisms (Alfaro *et al.*, 2004; Fujie *et al.*, 2013; Pennock and Yang, 1983).

Trajectory generation of a planar revolute manipulator ( $nRM$ ) depends on geometric and kinematic parameters including, link dimensions, initial angular positions of the links and actuator velocities of the joints. Such mechanisms may be constructed by mechanically coupling the rotations of the links of an  $n$ -link,  $n$  degree of freedom serial chain manipulator using cable and pulley drives or gear-trains. Each coupling between two successive joint rotations reduces one DOF (Degrees of freedom) and repeated coupling reduces the overall degrees of freedom of the manipulator to one (Krovi *et al.*, 2002; Nie and Krovi, 2005; Vukobratovic and Kircanski, 1986). It is one of the important study topics in the adaptation of walking trajectory curves to robots in humanoid and animal mobile robots (Çatalkaya and Akay, 2018; Hirose and Ogawa, 2007; Shieh, 1996).

In the four-bar mechanisms which driven with angular velocity  $\omega_1$ , the angular velocities of the joints which the coupler link is connected vary with time [ $\omega_2(t) \neq \omega_3(t)$ ]. The special case of this situation is parallelograms. In these mechanisms, absolute angular velocities are equal all of the joints ( $\omega_1 = -\omega_2 = -\omega_3$ ). For this reason, parametric position equations of a 3RM ( $\omega_1 = -\omega_2 = -\omega_3$ ) are also valid for a parallelogram (Fig 1a). The shape of the trajectory drawn by the parallelogram coupler undergoes a radical change when the length of the input link of the parallelogram is slightly reduced (Fig 1b). According to the Grashof theorem, the mechanism works with the crank-rocker character, with the condition " $l + s < p + q$ " is satisfied. This radical change is the result of the relationship of  $\omega_2(t) \neq \omega_3(t)$  depending on the geometric change. In order to obtain the parametric position equations, it is necessary to obtain the equations that give the angular joint velocities  $\omega_2(t)$  and  $\omega_3(t)$ . This study focuses on how to solve this problem.



**Figure 1.** Schematic models of parallelogram and 3RM

The data used in the study have been obtained with the simulation software WM2D. Working Model 2D (WM2D) is a motion simulation package. By defining connected systems formed from rigid bodies, motors and springs, and defining constraining forces and torques. The program accepts imported data from popular CAD packages in DXF format in addition to systems created within its own environment, and furthermore will accept inputs from other applications such as Excel and Matlab to add control inputs to the models. There are various motion and dynamic analysis studies using this software (Cruz *et al.*, 2015; Shala and Bruqi, 2017; Wang, 2001; Wang, 1996; Yan and Soong, 2001)

2. GEOMETRIC AND PARAMETRIC MODEL

The geometric ( $\theta_{1,2,3}$ ,  $l_{1,2,3}$ ) and kinematic parameters ( $\omega_{1,2,3}$ ) of the 3RM are shown in Fig 2 The reference point  $P_3$  is the end point of the link  $l_3$ . The point is  $P_{2m}$  the midpoint of the link  $l_2$ .

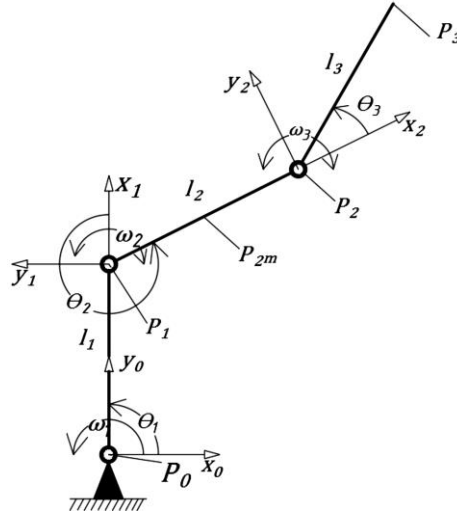


Figure 2. The geometric and kinematic parameters of the 3RM

The general position equations of the end effector  $P_3(x_3, y_3)$  can be written in the parametric form according to initial angles ( $\theta_{10,20,30}$ ) and time ( $t$ ) parameters as follows;

$$P_{3x}(t) = l_1 \cos(\theta_{10} + \omega_1 t) + l_2 \cos[\theta_{10} + \theta_{20} + t(\omega_1 + \omega_2)] + l_3 \cos[\theta_{10} + \theta_{20} + \theta_{30} + t(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)] \quad (1)$$

$$P_{3y}(t) = l_1 \sin(\theta_{10} + \omega_1 t) + l_2 \sin[\theta_{10} + \theta_{20} + t(\omega_1 + \omega_2)] + l_3 \sin[\theta_{10} + \theta_{20} + \theta_{30} + t(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)] \quad (2)$$

Equations 1 and 2 give the correct results when  $\omega_{1,2,3}$  are constant. The 3RM's DOF will be 3 under these conditions. On the condition that  $P_3$  is fixed, the 3RM turns into a four-bar mechanism. Geometric and kinematic parameters of this mechanism are illustrated below (Fig. 3).

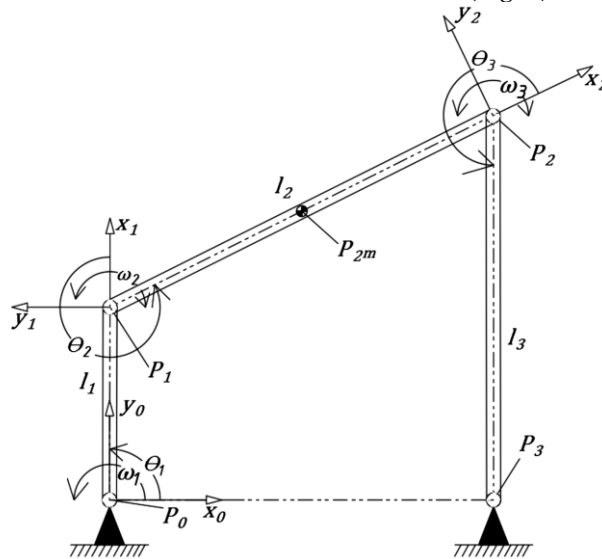


Figure 3. Geometric and kinematic parameters of four bar mechanism



The angular velocities  $\omega_2$  and  $\omega_3$  vary depending on the time. Therefore, the change of angular velocities should be investigated by taking into account the small-time intervals ( $t_s$ ) obtained by dividing the time by  $n$  intervals. If equations 1 and 2 are arranged according to  $\omega_1=\text{const.}$ ,  $\omega_2(t)\neq\omega_3(t)$  for  $P_3$  fixed joint coordinates, these equations take the form below:

$$P_{3x}(t) = l_1 \cos(\theta_{10} + nt_s \omega_1) + l_2 \cos(\sum_{i=1}^2 \theta_{i0} + t_s(i\omega_1 + \sum_{i=0}^n \omega_{2i})) + l_3 \cos(\sum_{i=1}^3 \theta_{i0} + t_s(i\omega_1 + \sum_{i=0}^n (\omega_{2i} + \omega_{3i}))) \quad (3)$$

$$P_{3y}(t) = l_1 \sin(\theta_{10} + nt_s \omega_1) + l_2 \sin(\sum_{i=1}^2 \theta_{i0} + t_s(i\omega_1 + \sum_{i=0}^n \omega_{2i})) + l_3 \sin(\sum_{i=1}^3 \theta_{i0} + t_s(i\omega_1 + \sum_{i=0}^n (\omega_{2i} + \omega_{3i}))) \quad (4)$$

Equations 3 and 4 can be applied to any point on the four bar mechanism, with the requirement of the dimensional and angular parameters according to any selected point. Table 1 summarizes the time-dependent variation of link angle according to the time ( $\theta_{1i}$ ,  $\theta_{2i}$ ,  $\theta_{3i}$ ). In these table the time interval is  $t_s=0.05$  second;

**Table 1.** The time-dependent variation of  $\theta_{1i}$ ,  $\theta_{2i}$ ,  $\theta_{3i}$

$i$	$t_i$	$\theta_{1i}(t)$	$\theta_{2i}(t)$	$\theta_{3i}(t)$
0	0	$\theta_{10}$	$\theta_{10} + \theta_{20}$	$\theta_{10} + \theta_{20} + \theta_{30}$
1	0.05	$(\theta_{10}) + \omega_1 t_s$	$(\theta_{10} + \theta_{20}) + t_s (\omega_1 + \omega_{21})$	$(\theta_{10} + \theta_{20} + \theta_{30}) + t_s (\omega_1 + \omega_{21} + \omega_{31})$
2	0.10	$(\theta_{10} + \omega_1 t_s) + \omega_1 t_s$	$(\theta_{10} + \theta_{20} + t_s (\omega_1 + \omega_{21})) + t_s (\omega_1 + \omega_{22})$	$(\theta_{10} + \theta_{20} + \theta_{30} + t_s (\omega_1 + \omega_{21} + \omega_{31})) + t_s (\omega_1 + \omega_{22} + \omega_{32})$
.	.	.	.	.
$n$		$\theta_{10} + t_s n \omega_1$	$\theta_{10} + \theta_{20} + t_s \left( \sum_{i=0}^n i \omega_1 + \omega_{2i} \right)$	$\theta_{10} + \theta_{20} + \theta_{30} + t_s \left( \sum_{i=0}^n (i \omega_1 + \omega_{2i} + \omega_{3i}) \right)$

In order to use equations 3 and 4 it is necessary to obtain equations which give time-dependent variation of angular velocities  $\omega_2$  and  $\omega_3$ . For this we can define " $\omega_1 + \omega_{2i}$ " and " $\omega_1 + \omega_{2i} + \omega_{3i}$ " with polynomials which seventh degree. In these equations  $a_i$  and  $b_i$  are unknown constant coefficients. Although the degree of polynomial can be chosen smaller, the results of the accuracy will decrease and in the opposite case, the accuracy will increase.

$$i\omega_1 + \sum_{i=0}^n \omega_{2i} = \sum_{j=0}^7 a_j t^j \quad (5)$$

$$i\omega_1 + \sum_{i=0}^n (\omega_{2i} + \omega_{3i}) = \sum_{j=0}^7 b_j t^j \quad (6)$$

### 3. MODEL VALIDATION OF PARAMETRIC EQUATION SET

In order to validate equations 3-4, an inverse kinematic solution has been made. Kinematic data of the sample crank-rocker mechanism has been used to perform inverse kinematic solution. Geometric and kinematic parameters of the mechanism are randomly selected ( $\omega_1=1 \text{ rad/s}$ ,  $l_0=P_0P_3=1$ ,  $l_1=0.5$ ,  $l_2=1.118$ ,  $l_3=1$ ,  $\theta_1=1.57$ ,  $\theta_2=5.1836$ ,  $\theta_3=4.2411 \text{ rad.}$ ). The only limiting condition of these randomly selected criteria is that the mechanism works as a crank-rocker. The mid-point trajectory of the coupler has been selected for investigation ( $P_{2m(x,y)}$ ). Data of WM2D simulation software has been used to get the unknown coefficients ( $a_j, b_j$ ). One period time of the mechanism movement is divided into  $n=126$  time intervals as  $t_s=0,05 \text{ seconds}$ . For curve fitting process 127 angular velocity data,  $[(\omega_1 + \omega_{2i}(t_i)), (\omega_1 + \omega_{2i}(t_i) + \omega_{3i}(t_i))]$  has been used for each equation (5-6). Accuracy settings of the WM2D which has been used in the study are given in Fig 4.

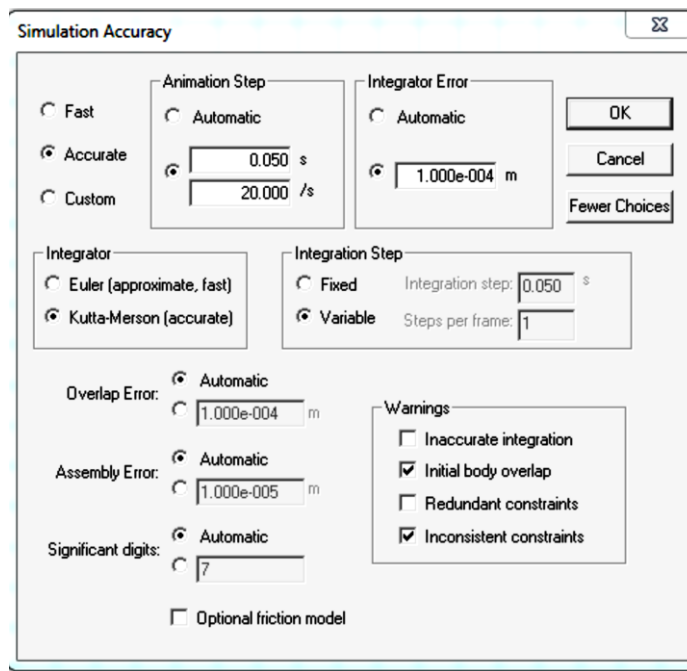


Figure 4. WM2D accuracy settings

Constant coefficients ( $a_j, b_j, 0 \leq j \leq 7$ ) have been calculated by NonlinearModelFit function with Mathematica software using WM2D data ( $(\omega_1 + \omega_{2i}(t_i)), (\omega_1 + \omega_{2i}(t_i) + \omega_{3i}(t_i))$ ). Screen capture of Mathematica software has given in Fig.5.

```
nlmw12 = NonlinearModelFit[dataw12, w12, {{a7, 0}, {a6, 0}, {a5, 0}, {a4, 0}, {a3, 0}, {a2, 0}, {a1, 0}, {a0, 0}}, t]
Normal[nlmw1+2]
nlmw12[{"ParameterTable", "RSquared"}]
Show[ListPlot[dataw12], Plot[nlmw12[t], {t, 0, 6.30}], Frame -> True, FrameLabel -> {"t(s)", "w1+2"}]

nlmw123 = NonlinearModelFit[dataw123, w123, {{b7, 0}, {b6, 0}, {b5, 0}, {b4, 0}, {b3, 0}, {b2, 0}, {b1, 0}, {b0, 0}}, t]
Normal[nlmw123]
nlmw123[{"ParameterTable", "RSquared"}]
Show[ListPlot[dataw123], Plot[nlmw123[t], {t, 0, 6.30}], Frame -> True, FrameLabel -> {"t(s)", "w1+2+3"}]
```

Figure 5. Screen capture of Mathematica

#### 4. RESULT AND DISCUSSION

Four bar mechanism arranged according to geometric and kinematic parameters has been simulated with WM2D ( $0 \leq t \leq 6.30$ ). As a result of the simulation,  $(\omega_1 + \omega_{2i}(t_i))$ , and  $(\omega_1 + \omega_{2i}(t_i) + \omega_{3i}(t_i))$  angular velocities, cartesian coordinates of the  $P_{2mx}(t)$  and  $P_{2my}(t)$  points have been obtained depends on the time. Constant coefficients ( $a_j, b_j, 0 \leq j \leq 7$ ) have been calculated by NonlinearModelFit function with Mathematica software using WM2D data ( $(\omega_1 + \omega_{2i}(t_i)), (\omega_1 + \omega_{2i}(t_i) + \omega_{3i}(t_i))$ ). Screen capture of curve fittings results has given in Table 2.

**Table 2.** Curve fitting results

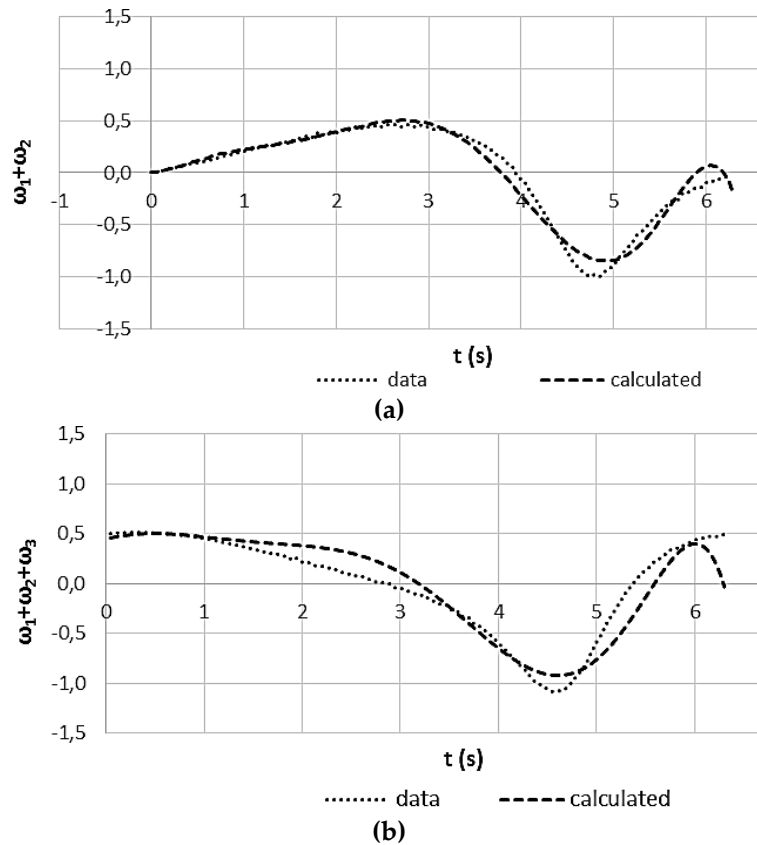
"Estimate"		"Estimate"		
$a_7$	-0.001813477812779328	$b_7$	-0.001185270220434778	
$a_6$	0.03390786004840107	$b_6$	0.01982784209897974	
$a_5$	-0.23682398067048188	$b_5$	-0.11727174842874329	
$a_4$	0.7721336909447628	$0.96532b_4$	0.2889999901177289	0.99997
$a_3$	-1.2242243493790288	$b_3$	-0.2415875300301827	
$a_2$	0.8586005844259332	$b_2$	-0.13316797699760774	
$a_1$	0.01469943760892944	$b_1$	0.20409794471981227	
$a_0$	0.00737108328376324	$b_0$	0.4448991323842059	

The numerical values of the coefficients have been placed in the equations 5 and 6 and the equations 7 and 8 given below were obtained.

$$\omega_{1+2} = 0.00737108328376324 + 0.01469943760892944t + 0.8586005844259332t^2 - 1.2242243493790288t^3 + 0.7721336909447628t^4 - 0.23682398067048188 + 0.03390786004840107t^6 - 0.001813477812779328t^7 \quad (7)$$

$$\omega_{1+2+3} = 0.444899132384216 + 0.20409794471982887t - 0.13316797699760435t^2 - 0.24158753003018377t^3 + 0.28899999011772887t^4 - 0.11727174842874326t^5 + 0.019827842098979743t^6 - 0.0011852702204347783t^7 \quad (8)$$

Variation of angular velocities has been calculated by using equations 7 and 8. The results and the graphs drawn by the data obtained from the WM2D simulation are given below (Fig 6a, b). In Fig 5a,  $R^2$  (the coefficient of multiple determination for multiple regression) as 0.965 and in Fig 5b  $R^2$  as 0.901 have been calculated. It is clear that better results can be obtained if the degree of the polynomial is increased.



**Figure 6.** Angular velocities obtained by simulation data and calculation.

Coordinates of the mid point of the coupler  $P_{2m}[x(t), y(t)]$  have been obtained according to angular velocity and geometric parameters ( $\omega_1=1 \text{ rad/s}$ ,  $l_0=1$ ,  $l_1=0.5$ ,  $l_2=0.559$ ,  $l_3=0$ ,  $\theta_1=1.57$ ,  $\theta_2=5.1836$ ,  $\theta_3=0$ ). According to these parameters' equation 3 and 4. are re-arranged. (Equation 9 and 10).

$$P_{2mx}(t) = l_1 \text{Cos}(\theta_{10} + nt_s \omega_1) + (l_2/2) \text{Cos}(\sum_{i=1}^2 \theta_{i0} + t_s(i\omega_1 + \sum_{i=0}^n \omega_{2i})) \quad (9)$$

$$P_{2my}(t) = l_1 \text{Sin}(\theta_{10} + nt_s \omega_1) + (l_2/2) \text{Sin}(\sum_{i=1}^2 \theta_{i0} + t_s(i\omega_1 + \sum_{i=0}^n \omega_{2i})) \quad (10)$$

WM2D simulation data and solving results of equations for  $P_{2mx}$  and  $P_{2my}$  are presented graphs below (Fig 7a,b). The  $R^2$ 's of the data were calculated 0.999 in both graphs. WM2D trajectory data ( $P_{2mx}$ ,  $P_{2my}$ ) has been used for calculation of  $R^2$ .

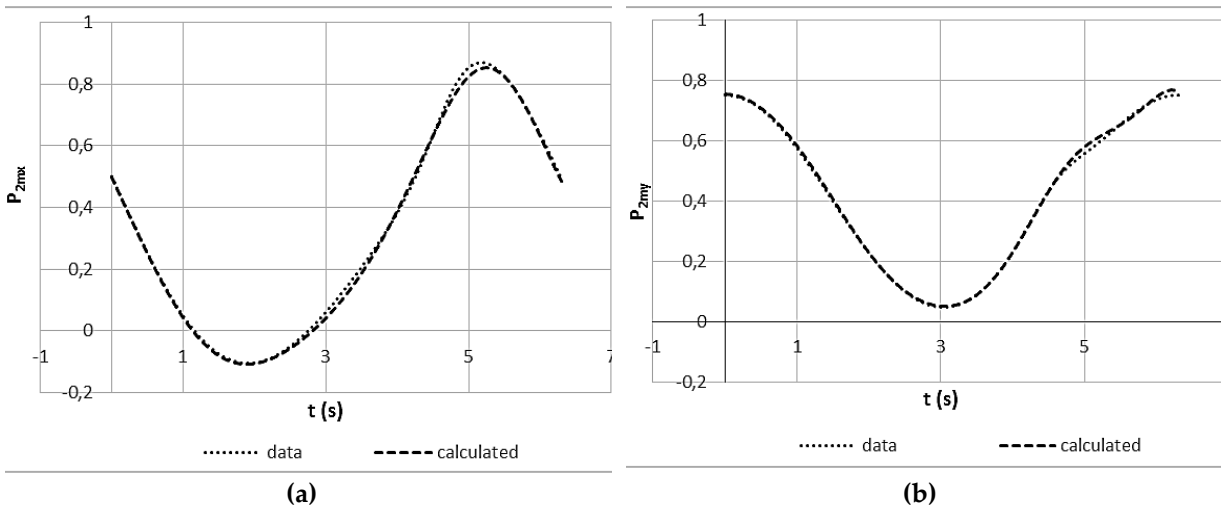


Figure 7. Time dependent change of coordinates  $P_{2mx}$  and  $P_{2my}$

Figure 8 shows the trajectory of the point  $P_{2m}$  on the coupler. The curves in this graph are calculated results and WM2D simulation data. As can be seen from the graph, the trajectories drawn by the simulation and calculation results are quite similar.

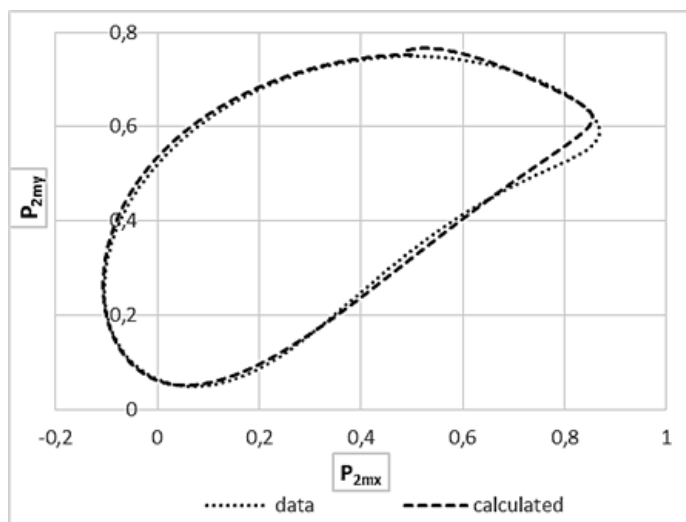


Figure 8. The graph of  $P_{2mx}$  and  $P_{2my}$

In this study, it is focused on obtaining parametric general position equations of a four-bar mechanism. Therefore, parametric position equations of 3RM have been used, parametric position equations have been obtained for four-bar mechanism, limiting the degree of freedom to operate like a

four-bar mechanism. In order to test the validity of the assumptions and solutions to obtain these equations, a sample inverse kinematic solution has been applied and found to be quite compatible with the actual data. Although the parametric velocity and acceleration equations can be easily obtained with these equation sets, they are excluded from the study for not avoid of the focus point of the study. The parametric position equations have a suitable mathematical form for the time depended position synthesis of dimensional and kinematic parameters.

## REFERENCES

- Acharyya, S. K., Mandal, M., 2009, "Performance of EAs for four-bar linkage synthesis", *Mechanism and Machine Theory* 44, 1784–1794.
- Alfaro, M. E., Bolnick, D. I., Wainwright, P. C., 2004, "Evolutionary Dynamics of Complex Biomechanical Systems: An Example Using the Four-Bar Mechanism", *Evolution*, Vol. 58, No. 3, pp. 495-503.
- Cruz, M., A., et al., 2015, "Modeling, Simulation and Construction of a Furuta Pendulum Test-Bed", *International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP)*, 25-27 Feb. 2015, DOI: 10.1109/CONIELECOMP.2015.7086928.
- Çatalkaya, M., AKAY, O. E., 2018, "Obtaining Human Step Trajectory Curves Using 2R Manipulator", *Journal of Engineering Sciences*, ISSN: 1309-1751, Vol. 21, No. 3, 267-271.
- Dong, H., Du, Z., Chirikjian, G. S., 2013, "Workspace Density and Inverse Kinematics for Planar Serial Revolute Manipulators", *Mechanism and Machine Theory* Volume 70, 508-522.
- Fujie, H., Kimura, K., Yamakawa, S., "Static and Dynamic Properties of a 6-DOF Robotic System for Knee Joint Biomechanics Study", *Asme 2013 Summer Bioengineering Conference* Paper No. SBC2013-14849, pp. V01BT23A012; 2 pages DOI:10.1115/SBC2013-14849.
- Hirose, M., Ogawa K., 2007, "Honda humanoid robots development", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Science*, 365, 11-19.
- Krovi, V., Ananthasuresh, G. K., Kumar, V., 2002, "Kinematic and kinetostatic synthesis of planar coupled serial chain mechanisms", *Journal of Mechanical Design*, 124, 301-312.
- Leardini, A., Moschella, D., "Dynamic Simulation of the Natural and Replaced Human Ankle Joint", *Medical and Biological Engineering and Computing*, Volume 40, pages193–199(2002).
- Nie, X., Krovi, V., 2005, "Fourier Methods for Kinematic Synthesis of coupled serial chain", *Journal of Mechanical Design*, 127, 232-241.
- Pennock, G. R., Yang, A. T., 1983, "Dynamic Analysis of a Multi-Rigid-Body Open-Chain System," *J. Mech., Trans., and Automation* 105(1), 28-34, (7pages)doi:10.1115/1.
- Roy, L., Sen, A., Chetia, R. P., Borah, M. J., 2008, "Analysis and Synthesis of Fourbar Mechanism", *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics* ISSN 0973-6085 Volume 3 Number 2, pp. 171–186.
- Shala, A., Bruqi, M., , August 2017, "Kinetostatic Analysis of six-bar Mechanism Using Vector Loops and The Verification of Results Using Working Model", *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, Volume 8, Issue 8, pp. 1109–1117.
- Shieh, W. B., 1996, Design and Optimization of Planar Leg Mechanisms Featuring Symmetrical Foot-Point Paths, Doctor of Philosophy, Department of Mechanical Engineering, University of Maryland, Maryland.
- Tang, Y., Chang, Z., Dong, X., Yafei Hu, Zhenjiang Yu, 2013, "Nonlinear Dynamics and Analysis of a Four-Bar Linkage with Clearance", *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(2): 160–168, DOI 10.1007/s11465-013-0258-6.
- Vukobratovic, M., Kircanski, M., 1986, "Kinematics and Trajectory Synthesis of Manipulation Robots", *Springer-Verlag*, ISBN-13: 978-3642821974.
- Wampler, C. W., Morgan, A. P., Sommese, A. J., 1992, "Complete Solution of the Nine-Point Path Synthesis Problem for Four-Bar Linkage", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 114, pp. 153-159, doi:10.1115/1.2916909.

- Wang, S., L., Jun 2001, Motion Simulation with working Model 2D and MSC VisualNastran 4D, *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, 1(2): 193-196, <https://doi.org/10.1115/1.1389462>.
- Wang, S., L., Nov. 1996, "Mechanism Simulation With Working Model", *Technology-Based Re-Engineering Engineering Education Proceedings of Frontiers in Education FIE'96 26th Annual Conference*, 6-9, DOI10.1109/FIE.1996.567781.
- Yan, H. S., Soong, R. C., 2001, "Kinematic and Dynamic Design of Four-Bar Linkages by Links Counterweighing with Variable Input Speed", *Mechanism and Machine Theory* 36, 1051-1071.



## MİKROAKIŞKAN CİHAZ KULLANARAK POLİMERİK MİKROBALONCUK/NANOPARTİKÜLLERİN ÜRETİM VE KARAKTERİZASYONU

<sup>1,2</sup>Sümeyye CESUR , <sup>1,3</sup>Muhammet Emin ÇAM , <sup>1,4</sup>Oğuzhan GÜNDÜZ 

<sup>1</sup>Marmara Üniversitesi, Nanoteknoloji ve Biyomalzeme Uygulama ve Araştırma Merkezi (NBUAM), İstanbul, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

<sup>3</sup>Marmara Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Farmakoloji Anabilim Dalı, İstanbul, TÜRKİYE

<sup>4</sup>Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

<sup>1</sup>sumeycesur@marun.edu.tr, <sup>2</sup>muhammet.cam@marmara.edu.tr, <sup>3</sup>oguzhan@marmara.edu.tr

(Geliş/Received: 09.05.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 13.09.2020)

**ÖZ:** Son yıllarda, biyomedikal uygulamalarda farklı morfolojilere sahip polimerik mikro/nano partiküller kontrollü ilaç salımı gibi birçok uygulamadaki potansiyelleri nedeniyle ilgi görmektedir. Bu çalışmada, polimer kaplı mikrobalonculardan nanopartiküller üretmek için T-bağlantılı mikroakışkan cihaz kullanılmıştır. Mikrobaloncukların ve nanopartiküllerin morfolojisi ve yapısı optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektrometresi (FT-IR) kullanılarak üretim işleminden sonra incelendi. Elde edilen mikrobaloncukların ve nanopartiküllerin çapı sırasıyla  $104 \pm 91 \mu\text{m}$  ve  $116 \pm 13 \text{ nm}$  idi. Solüsyonun akış hızının nanopartiküllerin çapı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Ortaya çıkan bu sonuçlar, biyomedikal tedavide hücre nakli, ileri terapötik uygulamalar ve gıda endüstrisi gibi birçok uygulama için çok yararlı olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Mikrobaloncuk, Polimerik nanopartikül, Mikroakışkan cihaz, Polivinil alkol

### Production and Characterization of Polymeric Microbubble / Nanoparticles Using a Microfluidic Device

**ABSTRACT:** In recent years, polymeric micro/nanoparticles with different morphologies in biomedical applications have gained attention due to their potential in many applications such as controlled drug release. In this study, a T-junction microfluidic device was used to produce nanoparticles from polymer-coated microbubbles. The morphology and structure of microbubbles and nanoparticles were performed after the production process using optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), and Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR). The diameter of the produced microbubbles and nanoparticles was  $104 \pm 91 \mu\text{m}$  and  $116 \pm 13 \text{ nm}$ , respectively. The flow rate of the solution was found to have a significant effect on the diameter of the nanoparticles. These results can be very useful for many applications such as advanced therapeutic applications, cell transplantation in biomedical therapy, and the food industry.

**Key Words:** Microbubble, Polymeric nanoparticle, Microfluidic device, Polyvinyl alcohol

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mikrobaloncuklar ve nanopartikül uygulamalarının hastalık tespiti ve tedavisi, ilaçların veya biyoaktif moleküllerin enkapsüle edilmesi ve hedeflenen organlara doğrudan iletilme yetenekleri;

kimyasal reaktifler, hücre/enzim deneyleri, genler gibi geniş uygulama yelpazesi nedeniyle son yıllarda giderek önemi artmaktadır (Fernandez-Fernandez ve diğ., 2011; Martínez-Gómez ve diğ., 2017; Xu ve diğ., 2011). Polimerik partiküller, çeşitli hastalıkların tedavisinde görüntüleme ve ilaç taşıyıcı sistem olarak kullanılmaktadır. Çalışmalarda polimerik partiküller kanser tedavisi, diyabet tedavisi ve doku mühendisliği için kullanılmıştır. Yenilikçi immünoterapi (otoimmün hastalıkların tedavisi veya kanser tedavisi için immünotimülasyon) ve endotelial hastalık terapisi alanlarında polimerik partiküller artan bir rol oynamaktadır (Liu ve diğ., 2017). Polimerik taşıyıcılar, kanser ve diğer hastalıklarda ilaçların yavaş salınması ve hedefli tedavi için klinik öncesi ve klinik olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Jain ve diğ., 2012). Polimer taşıyıcıların partikül boyutu, ürünün biyo-dağılımını yöneten ana parametrelerden biridir ve ayrıca ilaçların biyoyararlanımı için de kritik bir öneme sahiptir (Banerjee ve diğ., 2016; Kumar ve diğ., 2015).

Spreyle kurutma, elektrohidrodinamik teknikler, çökeltme, faz ayrılması gibi polimerik mikropartiküllerin hazırlanmasına yönelik çeşitli geleneksel yöntemler vardır (Cam ve diğ., 2019a). Bu yöntemlerle tek tip nano ölçekli partiküller üretilemez (Peltonen ve diğ., 2010). Monodispers (tek dağılımlı) mikrobaloncuklar geleneksel hazırlama yöntemlerinin aksine, tek adımlı mikroakışkan bazlı bir yöntem kullanılarak elde edilir (Pancholi ve diğ., 2008).

Mikroakışkan teknikler, gaz basıncı ve sıvı akışının kolay kontrolü gibi özellikleri nedeniyle monodispers mikrobaloncuklar/partiküllerin üretimini sağlarlar (Garstecki ve diğ., 2004; McEwan ve diğ., 2016). Dahası, bu teknik, baloncukların tek bir adımda ve diğer tekniklerden daha uygun maliyetle üretilmesine izin verir. Literatürde T kavşaklar, akan veya çapraz akışlı cihazlar ve akış odaklı kılcal borular gibi çeşitli cihaz geometrilerine sahip mikroakışkan yöntemleri araştırılmıştır. Bu yöntemler arasında T-bağlantı cihazı, yüksek oranda homojen ve ölçeklenebilir baloncuk üretmenin en kolay yöntemlerinden biridir. Polimer çözeltisi gaza ulaştığında baloncuklar oluşur, genişler ve düşmeye başlar. Gaz basıncı, akış hızı ve polimer çözeltisinin fiziksel özellikleri baloncuk boyutunu ve dağılımını etkileyen ana parametrelerdir (Elsayed ve diğ., 2016). Tek dağılımlılık, ilaç verme sistemlerinde kullanılan mikrokapsüller için çok önemlidir, çünkü mikrokapsüllerin in vivo dağılımı ve biyolojik hücreler ile etkileşimi partikül boyutundan önemli ölçüde etkilenir. Tek dağılımlı mikrokapsüller biyoyararlanımı artırabilir ve istenmeyen yan etkileri sınırlandırabilir. Ayrıca partikül boyutu ve nanopartiküllerin yüzey özellikleri, parenteral uygulamadan sonra hem pasif hem de aktif ilaç hedeflemeyi gerçekleştirmek için basitçe kontrol edilebilir (Gündüz ve diğ., 2013).

Çok işlevli partiküller, ilaç taşıyıcı sistemler için doğal ve sentetik biyopolimerlerden yapılabilir. Sentetik polimerler biyouyumlu, parçalanabilir ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle araştırmalarda genellikle tercih edilir (Cam ve diğ., 2019b; Cesur ve diğ., 2019). Doku mühendisliği, ilaç taşıyıcı sistem ve rejeneratif tıpta önemli bir rol oynar. Polivinil alkol (PVA) düşük toksisite, iyi kimyasal stabilite ve iyi esnekliğe sahip suda çözünür bir sentetik biyopolimerdir (Martínez-Gómez ve diğ., 2017). İlaç taşıyıcı sistemler, yara örtüsü ve yapay kan damarları gibi biyomedikal ve farmasötik alanlarda yaygın olarak kullanılır (Jiang ve diğ., 2011).

Bu çalışmada, PVA biyopolimer esaslı mikrobaloncuklar üretmek için T-bağlantılı mikroakışkan cihaz kullanılmıştır. Daha sonra bu mikrobaloncukların patlamasıyla oldukça düzgün boyut, şekil ve yapıda polimer nanopartikülleri elde edilmiştir. Çözeltinin yoğunluk, viskozite ve yüzey gerilimi gibi fiziksel özellikleri incelenmiştir. Baloncuk ve partiküllerin optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu ve Fourier dönüşümlü

## MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Polivinil alkol (PVA, Molekül ağırlığı=89,000-98,000,% 99 hidrolize) Sigma Aldrich firmasından satın alındı.



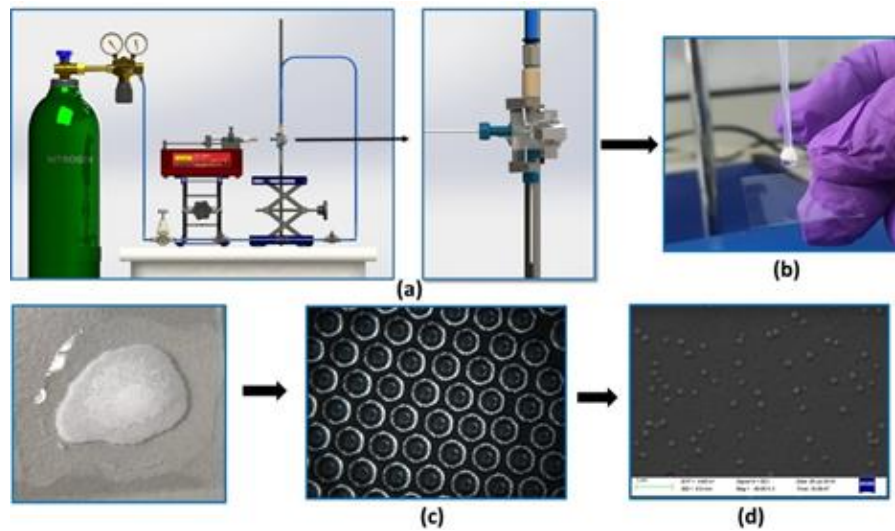
### Çözeltinin Hazırlanması ve Karakterizasyonu (Preparation and Characterization of Solution)

Ağırlıkça % 0.3 PVA, yaklaşık 1 saat süreyle manyetik karıştırıcıda (Wise Stir®, MSH-20 A, Almanya) 120 °C'de sıcaklıkta, 10 ml saf su içerisinde çözüldürüldü.

Çözeltinin fiziksel karakterizasyonu bir viskozimetre, piknometre ve yüzey gerilim cihazı kullanılarak yapıldı. Yoğunluk, standart bir 10 ml lik yoğunluk şişesi (DIN ISO 3507- Boru Cam, Türkiye) kullanılarak ölçüldü. Çözeltinin yüzey gerilimi değerleri, platin halkalı bir kuvvet tansiyometresi (Sigma 703D, Dikkat, Almanya) ile ölçülmüştür. Viskozitesi ise dijital viskozimetre (DV-E, Brookfield AMETEK, ABD) ile ölçüldü. Tüm deneyler, oda sıcaklığında (23°C) yapıldı.

### Cihaz Tasarımı ve Yapımı (Device Design and Construction)

Çalışmada, mikrobaloncuklar/nanopartiküller üretmek için kullanılan T-bağlantı cihazı Şekil 1'de gösterilmektedir. Cihaz, CNC ile işleme kullanılarak polimetilmetakrilat (PMMA) ile imal edilmiştir. Cihaz, mikrobaloncuk üretim işlemi sırasında yüksek basınçlara dayanacak şekilde tasarlanmıştır. İç çapı ID = 100 µm ve dış çapı OD = 1.6 mm olan teflon FEP (florlanmış etilen polipropilen) kılcal borular, PMMA bloğuna (22 × 27 × 15 mm) gömülmüştür.



**Şekil 1.** (a) T-bağlantılı mikroakışkan sistem, (b) mikrobaloncuk üretim aşaması, (c) polivinil alkol (PVA) polimeri kullanılarak üretilen mikrobaloncukların optik mikroskop görüntüleri ve (d) baloncuk patlaması ile elde edilen polimerik nanopartiküller

*Figure 1.* (a) T-junction microfluidic system, (b) microbubble production stage, (c) optical microscope images of microbubbles produced using polyvinyl alcohol (PVA) polymer, and (d) polymeric nanoparticles obtained by bubble burst

### Mikrobaloncuk Üretimi (Microbubble Generation)

Mikrobaloncuk ve nanopartiküllerin üretim aşaması Şekil 1'de gösterilmektedir. Gaz ve çözelti ile beslenen mikro kanalların giriş ve çıkışlarını bağlamak için teflon FEP tüpü (ID = 100 µm) kullanıldı. T-bağlantı cihazının üst borusu, kontrollü basınç altında N<sub>2</sub> sağlayan bir basınç manometresine bağlandı. Çözeltinin akış hızı, dijital olarak kontrol edilen şırınga pompasına (NE-300, New Era Pump Systems, Inc., ABD) monte edilmiş 10 ml'lik bir plastik şırınga kullanılarak kontrol edildi. Çözelti ve gaz, iki dik kılcal kısım arasındaki kesişme noktasında buluşturuldu. Mikrobaloncuklar daha sonra T-bağlantısı altında yer alan kılcal borudan çıkarak üretildi. Baloncuklar cam slaytlar üzerinde toplandı.

### **Baloncuk ve Nanopartikül Karakterizasyonu (Bubble and Nanoparticle Characterization)**

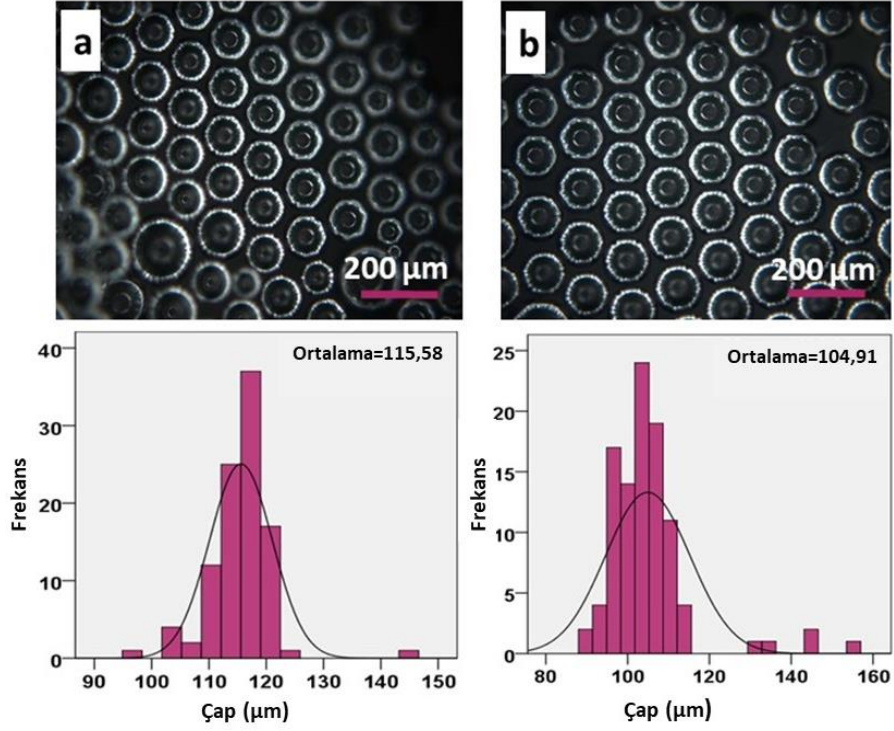
Üretilen mikrobaloncukların ve nanopartiküllerin özelliklerini incelemek için bazı karakterizasyon testleri yapılmıştır. Mikrobaloncukların ve nanopartiküllerin morfolojisi ve yapısı optik mikroskop ve SEM kullanılarak belirlendi. Boyut analizi, mikrobaloncukların morfolojik dağılımı, tek tip olup olmadıkları ve yapıları optik mikroskop altında incelenerek analiz edildi (Olympus AnalySIS, ABD). Cam slaytlar üzerinde toplanan kabarcıklar, ortam koşulları (23 °C) altında kurutuldu. Üretilen nanopartiküllerin boyutunu ve morfolojisini karakterize etmek için taramalı elektron mikroskopisi (SEM, EVO LS 10, ZEISS) kullanıldı. Görüntülemeye önce, nanopartiküllere bir Quorum SC7620 Mini Sprey kaplayıcı kullanılarak altın-paladyum püskürtüldü. Ayrıca PVA nanopartiküllerinin bağlanma yapılarını ve fonksiyonel gruplarını incelemek için Jasco FT/IR-4700 model bir FTIR cihazı kullanıldı. Tüm spektrumlar 4 cm<sup>-1</sup> çözünürlükte 4000-400 cm<sup>-1</sup> çözünürlükte alınmıştır.

### **SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)**

Bir T-bağlantı cihazı kullanılarak mikrobaloncukların patlaması ile çeşitli monodispers polimerik nanopartiküller üretildi. Mikrobaloncuklar elde etmek için, karıştırma alanına iki farklı kanaldan biri polimer çözeltisi diğeri N<sub>2</sub> gazı verilir. Polimer çözeltisinin gazı emmesiyle üretim başlar. Kapsüllenmiş mikrobaloncuklar çıkış kılcal kanalından aşağı akar ve baloncuklar oluşur (Kucuk ve diğ., 2018). Elde edilen baloncukların boyutları gaz ve sıvı akış hızından etkilenir (Gunduz ve diğ., 2012). Bunun yanısıra viskozite ve yüzey gerilimi, monodispers mikrobaloncuk oluşumunu etkileyen en önemli faktörlerdir. Polimer konsantrasyona bağlı olarak değişirler (Parhizkar ve diğ., 2015). Polimer çözeltisinin yüzey gerilimi 42.90 mN/m ve viskozitesi 280 mPa.s olarak ölçüldü.

### **Mikrobaloncukların Optik Mikroskop Sonuçları (Optical Microscope Results of Microbubbles)**

T-bağlantı cihazınının 1. girişine ağırlıkça % 0.3 PVA çözeltisi enjekte edildi, giriş 2'ye ise N<sub>2</sub> gazı pompalandı. Mikrobaloncukların üretiminde, gaz basıncı 40 kPa'da sabit tutuldu ve akış hızları 40'dan 100 µl/dakikaya yükseltildi. Mikrobaloncukların optik mikroskop görüntülerine göre (Şekil 2), akış hızındaki artış mikrobaloncukların çapını 115 ± 50 µm'den 104 ± 91 µm'ye düşürdü. Bu sonuca göre mikrobaloncukların daha düzenli ve monodisperse olduğu gözlenmiştir (Parhizkar ve diğ., 2013).

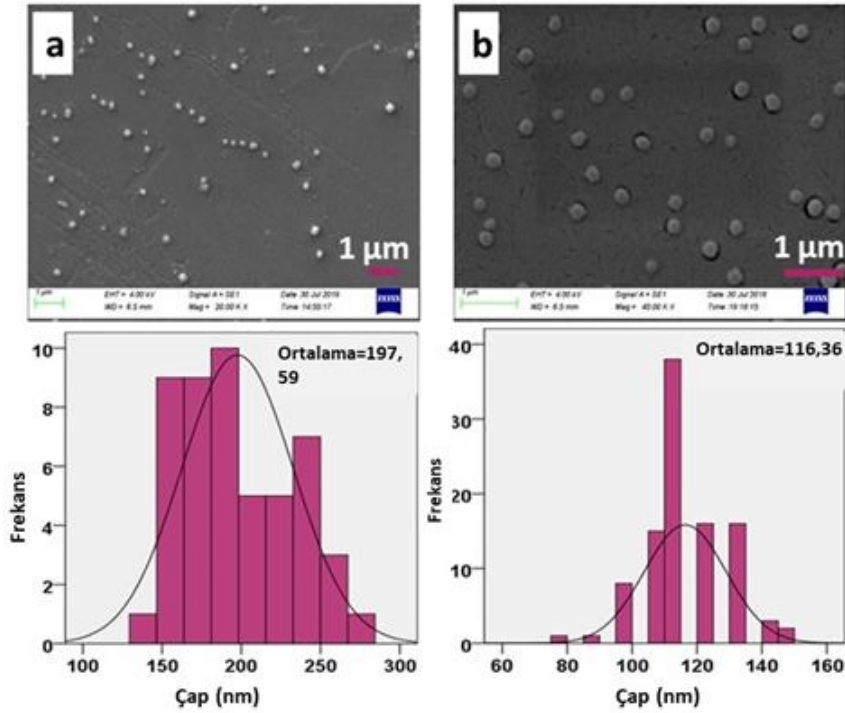


Şekil 2. Farklı akış hızlarında üretilen mikrobaloncukların optik görüntüleri ve çap dağılımı a) 40 µl / dak b) 100 µl / dak

Figure 2. Optical images and diameter distribution of microbubbles produced at different flow rates a) 40 µl / min b) 100 µl / min

### Nanopartiküllerin SEM Sonuçları (SEM Results of Nanoparticles)

Mikrobaloncukların patlaması ile elde edilen nanopartiküllerin SEM görüntülerine (Şekil 3) göre, ortalama çapları sabit 40 kPa gaz basıncında 40 µl/dakika için  $198 \pm 35$  nm ve 100 µl/dakika içinse akış hızının artırılmasının nanopartikül büyüklüğünü azalttığı gözlenmiştir. Bu da yüksek akış hızında üretilen nanopartiküllerin daha homojen ve muntazam boyutta olduğunu gösterdi.

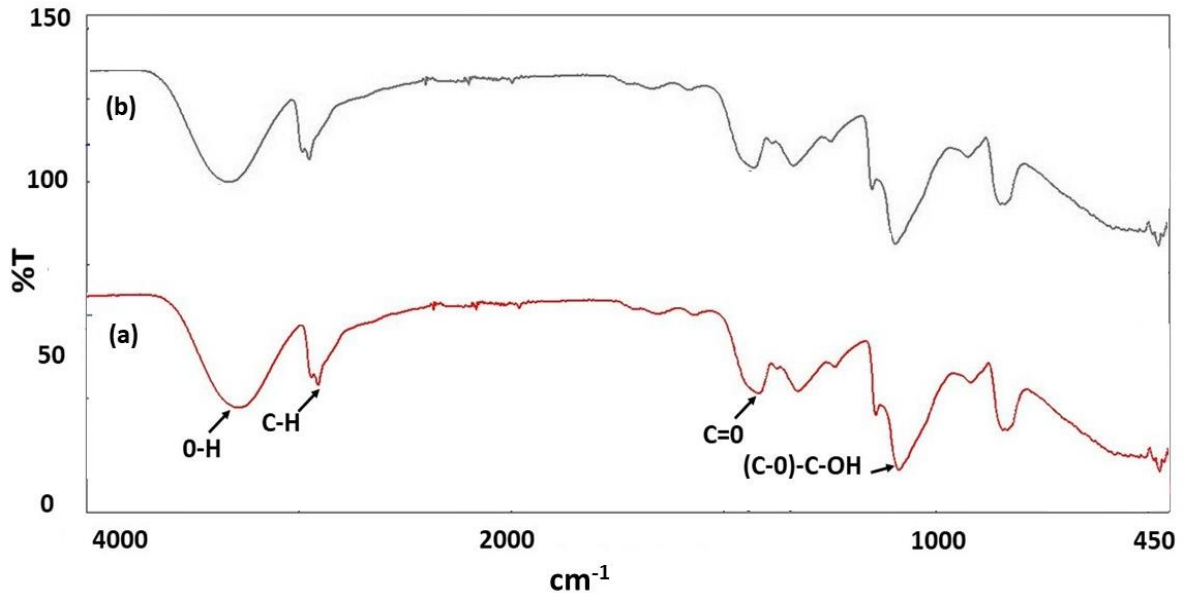


**Şekil 3.** Farklı akış hızlarında üretilen nanopartiküllerin taramalı elektron mikroskopisi (SEM) görüntüleri ve çap dağılımı: a) 40 µl / dak ve b) 100 µl / dak

*Figure 3. Scanning electron microscopy (SEM) images and diameter distribution of nanoparticles produced at different flow rates: a) 40 µl / min and b) 100 µl / min*

#### FTIR Analizi (FTIR Analysis)

Saf PVA polimeri ve elde edilen polimerik nanopartikülün fonksiyonel gruplarını araştırmak için FTIR analizi yapılmıştır (Şekil 4). Saf PVA polimerinin bileşimi, 450-4000  $\text{cm}^{-1}$  aralığında elde edilen FT-IR spektrumları ile teyit edildi. Şekilde görüldüğü gibi, PVA karakteristik kızılötesi bantlar 3286  $\text{cm}^{-1}$ 'de O-H germe ve 1116  $\text{cm}^{-1}$ 'de C=O germe (Roberts ve diğ., 2002) gözlemlendi. Saf PVA tozlarının ve elde edilen nanopartiküllerin spektrumları karşılaştırıldığında, saf PVA ve PVA nanopartiküllerinin spektrumları, bazı ekstra absorpsiyon pikleri dışında büyük ölçüde benzerlik göstermektedir.



Şekil 4. a) Saf PVA tozları b) Elde edilen PVA nanopartiküllerinin FTIR spektrumu

Figure 4. FTIR Spectra of a) pure PVA powders b) the resultant PVA nanoparticles.

#### SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, monodispers polimer kaplı mikrobalonculardan nanopartikül üretmek için T-bağlantılı mikroakışkan cihaz kullandık. Çözeltinin akış hızının nanopartiküllerin çapı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gördük. Mikrobaloncuklar ve nanopartiküllerin optik mikroskop ve SEM görüntüleri incelendiğinde, ağırlıkça % 0.3 PVA çözeltisi, 40 kPa basınç ve 100 µl / dakika akış hızı ile optimize edildi. Mikrobaloncuk ve nanopartiküllerin çapı sırasıyla  $104 \pm 91$  µm ve  $116 \pm 13$  nm idi. Elde edilen bu sonuçlara göre, T-bağlantılı mikroakışkan sistem önümüzdeki çalışmalarda özellikle ilaç taşıyıcı sistemler ile kontrollü salım gibi terapötik uygulamalarda kullanılmak için büyük bir potansiyele sahiptir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Banerjee, A., Qi, J., Gogoi, R., Wong, J., & Mitragotri, S., 2016, "Role of nanoparticle size, shape and surface chemistry in oral drug delivery", *Journal of Controlled Release*, Cilt 238, ss. 176-185.
- Cam, M. E., Zhang, Y., & Edirisinghe, M., 2019a, "Electrosprayed microparticles: a novel drug delivery method" *Expert opinion on drug delivery*, Cilt 16, Sayı 9, ss. 895-901.
- Cam, M. E., Cesur, S., Taskin, T., Erdemir, G., Kuruca, D. S., Sahin, Y. M., & Gunduz, O., 2019b, "Fabrication, characterization and fibroblast proliferative activity of electrospun Achillea lycanica-loaded nanofibrous mats", *European Polymer Journal*, Cilt 120, ss. 109239.
- Cesur, S., Oktar, F. N., Ekren, N., Kilic, O., Alkaya, D. B., Seyhan, S. A., & Gunduz, O., 2019, "Preparation and characterization of electrospun polylactic acid/sodium alginate/orange oyster shell composite nanofiber for biomedical application", *Journal of the Australian Ceramic Society*, ss. 1-11.
- Elsayed, M., Kothandaraman, A., Edirisinghe, M., & Huang, J., 2016, "Porous polymeric films from microbubbles generated using a T-junction microfluidic device", *Langmuir*, Cilt 32, Sayı 50, ss. 13377-13385.
- Fernandez-Fernandez, A., Manchanda, R., & McGoron, A. J., 2011, "Theranostic applications of nanomaterials in cancer: drug delivery, image-guided therapy, and multifunctional platforms", *Applied biochemistry and biotechnology*, Cilt 165, Sayı 7-8, ss. 1628-1651.

- Garstecki, P., Gitlin, I., DiLuzio, W., Whitesides, G. M., Kumacheva, E., & Stone, H. A., 2004, "Formation of monodisperse bubbles in a microfluidic flow-focusing device", *Applied Physics Letters*, Cilt 85, Sayı 13, ss. 2649-2651.
- Gunduz, O., Ahmad, Z., Stride, E., Tamerler, C., & Edirisinghe, M., 2012, "Bioinspired bubble design for particle generation", *Journal of The Royal Society Interface*, Cilt 9, Sayı 67, ss. 389-395.
- Gunduz, O., Ahmad, Z., Stride, E., & Edirisinghe, M., 2013. "Continuous generation of ethyl cellulose drug delivery nanocarriers from microbubbles". *Pharmaceutical research*, Cilt 30, Sayı 1, ss. 225-237.
- Jain, S., Hirst, D. G., & O'sullivan, J. M., 2012, "Gold nanoparticles as novel agents for cancer therapy", *The British journal of radiology*, Cilt 85, Sayı 1010, ss. 101-113.
- Jiang, S., Liu, S., & Feng, W., 2011, "PVA hydrogel properties for biomedical application", *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, Cilt 4, Sayı 7, ss. 1228-1233.
- Kucuk, I., Yilmaz, N. F., & Sinan, A., 2018, "Effects of junction angle and gas pressure on polymer nanosphere preparation from microbubbles bursted in a combined microfluidic device with thin capillaries", *Journal of Molecular Structure*, Cilt 1173, ss. 422-427.
- Kumar, S., Anselmo, A. C., Banerjee, A., Zakrewsky, M., & Mitragotri, S., 2015, "Shape and size-dependent immune response to antigen-carrying nanoparticles", *Journal of Controlled Release*, Cilt 220, ss. 141-148.
- Liu, D., Zhang, H., Fontana, F., Hirvonen, J. T., & Santos, H. A., 2017. "Microfluidic-assisted fabrication of carriers for controlled drug delivery", *Lab on a Chip*, Cilt 17, Sayı 11, ss. 1856-1883.
- Martínez-Gómez, F., Guerrero, J., Matsuhira, B., & Pavez, J., 2017, "In vitro release of metformin hydrochloride from sodium alginate/polyvinyl alcohol hydrogels", *Carbohydrate polymers*, Cilt 155, ss. 182-191.
- McEwan, C., Kamila, S., Owen, J., Nesbitt, H., Callan, B., Borden, M., McHale, A. P., 2016, "Combined sonodynamic and antimetabolite therapy for the improved treatment of pancreatic cancer using oxygen loaded microbubbles as a delivery vehicle", *Biomaterials*, Cilt 80, ss. 20-32.
- Pancholi, K., Stride, E., & Edirisinghe, M., 2008. "Dynamics of bubble formation in highly viscous liquids" *Langmuir*, Cilt 24 Sayı 8, ss. 4388-4393.
- Parhizkar, M., Edirisinghe, M., & Stride, E., 2013, "Effect of operating conditions and liquid physical properties on the size of monodisperse microbubbles produced in a capillary embedded T-junction device", *Microfluidics and nanofluidics*, Cilt 14, Sayı 5, ss. 797-808.
- Parhizkar, M., Edirisinghe, M., & Stride, E., 2015, "The effect of surfactant type and concentration on the size and stability of microbubbles produced in a capillary embedded T-junction device", *Rsc Advances*, Cilt 5, Sayı 14, ss. 10751-10762.
- Peltonen, L., Valo, H., Kolakovic, R., Laaksonen, T., & Hirvonen, J., 2010, "Electrospraying, spray drying and related techniques for production and formulation of drug nanoparticles", *Expert opinion on drug delivery*, Cilt 7, Sayı 6, ss. 705-719.
- Roberts, M. J., Bentley, M. D., & Harris, J. M., 2002, "Chemistry for peptide and protein PEGylation", *Advanced drug delivery reviews*, Cilt 54, Sayı 4, ss. 459-476.
- Xu, R. X., Xu, S., Zuo, T., Huang, T. H., Shen, R., & Tweedle, M. F., 2011, "Drug-loaded biodegradable microspheres for image-guided combinatory epigenetic therapy in cells", *Journal of biomedical optics*, Cilt 16, Sayı 2, ss. 020507.



## FARKLI PUNTA SAYILARININ POLİESTER KUMAŞ ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

<sup>1</sup>Beysim GARİP , <sup>2</sup>Ayten Nur YÜKSEL YILMAZ , <sup>3</sup>Necati ER , <sup>4</sup>Ayşe ÇELİK BEDELOĞLU 

<sup>1,2,4</sup>Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bursa, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, TÜRKİYE

<sup>3</sup>Polyteks Tekstil Sanayi Araştırma ve Eğitim A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Bursa, TÜRKİYE

<sup>1</sup>beysim@bsctekstil.com, <sup>2</sup>ayten.yilmaz@btu.edu.tr, <sup>3</sup>ner@polyteks.com.tr, <sup>4</sup>ayse.bedeloglu@btu.edu.tr

(Geliş/Received: 08.05.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 15.09.2020)

**ÖZ:** Poliester (PES) diğer bir deyişle polietilen tereftalat (PET) tekstil sektöründe önemli yere sahip olan sentetik polimerlerden biridir. Poliester iplik ve kumaşlar, gerilmeye karşı yüksek dayanım, bakterilere ve ısıya karşı direnç, elastiklik, bakım kolaylığı ve yıkama sonrası çabuk kuruma gibi üstün özelliklere sahiptir. Bu çalışmada, aynı iplik numaralarına sahip (167/48 dtex/filament) tam çekimli (fully drawn yarn) (FDY) ve tekstüre kısmen çekilmiş poliester iplikler (partially oriented) (POY), hava ile kaplama (air covering) yöntemiyle farklı punta sayılarında (8, 29, 54, 75, 85 adet/metre) birleştirilerek filament şeklinde üretilmiştir. Daha sonra bu filamentler kullanılarak örme kumaş yüzeyleri oluşturulmuş ve boyama yapılmıştır. Punta sayısının, poliester iplik ve kumaş üzerine etkileri, görsel ve fiziksel performans özellikleri ile değerlendirilmiştir. Farklı punta sayısına sahip ipliklerde, en yüksek ve en düşük mukavemet değeri, sırasıyla 29 punta (3,41 cN/ dtex) ve 8 punta (3,23 cN/ dtex ) sayısına sahip ipliklerde elde edilmiştir. Genel olarak, boyalı kumaşlarda punta sayısının artması sonucunda kumaş kalınlığı artarken hava geçirgenliğinin azaldığı gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Filament, FDY, POY, poliester, punta, tekstüre, hava ile kaplama, puntalı iplik

### Investigation of the Effects of Different Number of Nips on the Properties of Polyester Fabric

**ABSTRACT:** Polyester (PES), in other words, polyethylene terephthalate (PET) is one of the synthetic polymers that have an important position in the textile industry. Polyester yarns and fabrics have superior properties such as high strength to stress, resistance to bacteria and heat, flexibility, maintainability, and quick drying after washing. In this study, fully drawn yarn (FDY) and textured partially drawn polyester (POY) yarn which have the same yarn counts (167/48 dtex/filament) were produced as filaments by combining them in different number of nips (8, 29, 54, 75, 85 number/meter) with the air covering method. Then knitted fabric surfaces were created and dyed using these filaments. The effects of number of nips on polyester yarn and fabric were evaluated with their visual and physical performance characteristics. Maximum and minimum strength values for yarns with different different number of nips were measured as 3.41 and 3.23 cN / dtex for yarns with 29 and 8 number of nips, respectively. It was observed that the air permeability decreases while the fabric thickness increases with the increasing number of nips in dyed fabrics.

**Key Words:** Filament, FDY, POY, polyester, nips, textured, air covering, intermingled yarn

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Plastik endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir polimer olan poliester, tekstil sektöründe de, lif, kumaş ve üretilmiş ürün formunda, konvansiyonel ve teknik tekstiller alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Filament veya kesikli lif formunda kullanımı mevcuttur. Tekstil malzemelerinde poliester lifleri, düşük maliyet, kolay işlenebilirlik, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, güneş ışığı ve kimyasallara karşı dayanımlarının yüksek olması gibi özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Yüksek gerilme değerlerinde, ipliklerin kopmadan, bu gerilmelere dayanmaları beklenmektedir. İpliklere mukavemet kazandırmak için kullanılan haşılama ve büküm gibi konvansiyonel işlemlerin dışında, çeşitli kaynaklarda birleştirme, karıştırma vb. gibi isimlerle anılan puntalama işlemi de mukavemet artırıcı yöntemlerden birisidir (Öztanır ve Yüksekaya, 2014).

Kısmen çekilmiş poliester iplik, poliester ipliğin temel formu olan POY (partially oriented) ismiyle adlandırılır. POY tekstüre edilerek poliester çekimli tekstüre iplikler (DTY) üretilir ve örme ve dokuma kumaş üretiminde atkı-çözgü olarak kullanılır. POY ipliğin, güneş ışığı ve sabuna maruz kaldığında solmaması, yüksek dayanım ve aşınma direnci, kırışıklık giderme gibi avantajları vardır. Ayrıca farklı filament enine kesitleri (yuvarlak, trilobal, kanallı vb.) kullanılarak POY ipliğe farklı görünüm ve parlaklık kazandırılırken, genel olarak mat ve parlak olmak üzere iki türü bulunmaktadır. POY iplikler 3000-4000 m/dk hızla üretildikten sonra, germe işlemi ile 1,20-1,27 oranında çekim işlemi uygulanır. %130 uzamaya sahip bir iplik türüdür (Çirkin, 2006; Garip, 2005). Tam çekimli ipliklerin (fully drawn yarn, FDY) üretimi de POY üretimine benzemektedir fakat FDY iplik üretiminde daha yüksek eğirme hızları (4500-5000 m/dk ve üzeri) kullanılır. Böylece, ipliklerin daha iyi yönlenebilmesi ve kristalizasyonu sağlanır. Kullanılacağı proses için tekrardan çekim işlemi gerektirmeyen bir iplik türüdür (Çirkin, 2006). FDY genellikle kumaşlarda atkı olarak kullanılırken, yarı-mat, parlak, dairesel kesitli ve trilobal parlak olmak üzere farklı tipleri tercih edilmektedir.

Puntalama ve bu işlemin iplik ve kumaş özellikleri üzerine etkisi, literatürde farklı araştırmacılar tarafından çalışılmıştır (Demir, 1990; Miao ve Soong, 1995; Özkan ve Baykal, 2012; Baykal ve Özkan, 2013). Alagirusamy ve arkadaşlarının gerçekleştirdikleri çalışmada, puntalama işleminde hava basıncının etkisi ile artan punta karakterleri incelenmiştir (Alagirusamy ve diğ., 2005). Atasayan, 5 farklı punta sayısına (60, 80, 100, 120, 140 adet/metre) sahip yalancı bükümlü Poliamid 6.6 ipliği üretmiştir. 60 puntalama uygulanan ipliğin mukavemet değerinin en düşük, 120 olanın ise en yüksek değere sahip olduğunu ve punta sayısı 140 olan ipliklerde mukavemet değerinin tekrar düştüğünü belirtmiştir (Atasayan, 2005). Ayrıca, puntalama performansı ile iplik numarası arasındaki ilişkiyi (Webb ve diğ., 2009), puntalama basıncı arttıkça punta sayısının arttığını (Baykal ve Özkan, 2013) ve punta basıncının artırılmasıyla punta kalıcılığının arttığını (Özkan ve Baykal, 2012) gösteren çalışmalar bulunmaktadır. Öztanır ve Yüksekaya, yaptıkları çalışmalarda, puntalamanın (5 bar basınç altında 500, 600 ve 700 m/dk makine hızlarında) farklı iplik tiplerinin (PES (50,70,100 ve 150 denye) ve PA6 (40, 70, 100 ve 140 denye)) mukavemeti üzerinde etkisini (Öztanır ve Yüksekaya, 2014) ve punta miktarı ve makine hızı arasındaki ilişkiyi (Yüksekaya ve Öztanır, 2014) göstermişlerdir. Özkan ve arkadaşları, 283 dtex POY ipliğini farklı punta (5, 23,4, 67,4, 72,2 ve 80,5 adet/metre) sayılarında puntaladıktan sonra, örgü kumaşlar elde etmiş ve boyasız kumaşlarda, punta sayısı ve dolayısıyla tüylülüğünün artması ile kumaşlardaki gözeneklerin azalmasından dolayı L\* ve R (yansıma) değerlerinin arttığı; boyalı kumaşlarda belirli punta sayısından (67,4 ve üstü) sonra bu değerlerin azaldığı belirtilmiştir (Özkan ve diğ., 2018). Bir diğer çalışmada, farklı yapı ve özelliklere sahip FDY ve POY poliester iplikler, tekstüre makinasında farklı kombinasyonlarda birleştirilerek katlı iplikler (farklı çekim oranlarında) üretilmiş ve daha sonra bu ipliklerin mekanik özellikleri ile örme kumaştaki görsel özellikleri incelenmiştir. Çekim oranı arttıkça, kumaşlarda açıklık L\* (açıklık) değeri artarken K/S (boyama kuvveti) değeri azalmıştır (Babaarslan ve diğ., 2019). Çeşitli hibrit ipliklerin puntalanarak kullanımı ve özelliklerinin incelenmesi üzerine de güncel çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin cam elyafın poliamid 6 ile birlikte puntalandığı hibrit iplik çalışmasında, hibrit ipliklerin birleşme kalitesini belirleyebilmek için yeni bir analiz yöntemi geliştirilmiş ve bu yöntemin diğer termoplastik hibrit yapıların birleşme kalitesini belirlemede kullanılabileceği belirtilmiştir (Kravaev ve diğ., 2013). Ayrıca, çeşitli metal ve polimer filamentler, puntalama yöntemiyle birleştirildikten sonra elde edilen metal



takviyeli kompozit ipliklerden farklı formlarda, dokuma (Özkan ve Telli, 2019), örme (Özkan, 2019; Özkan, 2020) ve halı (Özkan ve diğ., 2019; Özkan ve diğ., 2020) numuneleri üretilmiş ve bu malzemelerin elektromanyetik kalkanlama, antimikrobiyel etkinlik gibi çeşitli özellikleri incelenmiştir. Kompozit iplik üretimi için puntalama yöntemi, hem maliyetin düşük olması hem de hızlı üretim imkanı sunmasından dolayı, uygun bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Önceki çalışmalar gözönünde tutulduğunda, farklı ipliklerin bir araya getirilip puntalanmasında, puntanın iplik ve kumaş özellikleri üzerine etkilerinin incelendiği yeterli ayrıntıda bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu yüzden bu çalışmada, tekstüre POY ve FDY olmak üzere iki farklı iplik, farklı punta sayılarında puntalanarak iplik ve örme kumaş numuneler elde edilmiştir. Üretilen iplik ve kumaşların fiziksel, mekanik ve morfolojik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmayla özellikle kumaş üreticilerine puntalanmış ipliklerin görsel efekt yaratarak kullanıma hazır sunulması amaçlanmıştır.

## **MALZEME ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)**

### **Malzeme (Material)**

SASA Polyester Sanayi A.Ş. (Türkiye) ve INDORAMA (Tayland) firmalarından temin edilen parlak ve yarı mat poliester granüller hammadde olarak kullanılmıştır. Granüllerin yoğunluğu 1,18 g/cm<sup>3</sup>, erime sıcaklığı 260 °C ve camsı geçiş sıcaklığı 60-80 °C'dir.

### **Yöntem (Method)**

POLYTEKS firmasında parlak ve yarı mat poliester granüller kullanılarak eriyikten lif çekim yöntemi ile aynı dtex/filament özelliğinde FDY ve POY iplikler üretilmiştir. POY iplik yarı mamul olduğu için tekstüre edilerek, life doğal görünüm kazandırılıp puntalama prosesine hazır hale getirilmiştir. 167/48 süper parlak FDY ve 167/48 POY filament iplikler temel kaynakları oluşturmaktadır. POY iplik tekstüre edilerek 167/48 normal tekstüre iplik elde edilmiştir. Daha sonra, elde edilen 167/48 süper parlak FDY ve 167/48 normal tekstüre iplikler hava jeti kullanılarak puntalama işlemiyle birleştirilmiştir. İpliklere uygulanan punta miktarına göre KNUM1, KNUM2, KNUM3, KNUM4 ve KNUM5 olarak isimlendirilen numuneler çorap örme makinasında örülerek kumaş formuna getirilmiş ve boyanmıştır. İşlem adımları detaylı olarak aşağıda anlatılmıştır:

### **Tam çekimli iplik (FDY) (fully drawn yarn) ve kısmen çekimli iplik (POY) (partially oriented yarn) üretimi (Production of fully drawn yarn (FDY) and partially oriented yarn (POY))**

Parlak poliester granüller kullanılarak eriyik lif çekim ile 167/48 süper parlak FDY filament iplik üretimi Polyteks firması üretim hattında gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda iplik üretimi çok yüksek hızlarda çekilerek yapılmaktadır. FDY iplik üretiminde godetler sıcaktır ve tekstüre olmadan hazır hale gelir, bu yüzden çekimi tam olarak tamamlanır. Çekim ve fikse olabilmesi için sıcaklığın camsı geçiş sıcaklığı üzerinde olması gerekir. Üretimde esnasında kullanılan ilk godetin sıcaklığı 85-90 °C, ikinci godetin sıcaklığı ise 125-130 °C ve çekim hızı 4400-4700 m/dk' dir. Godetlerden geçen ipliğe punta aparatı olan jet ile punta verilir. FDY ipliklerde çift yağlama vardır. FDY iplikleri tekstüreye gitmediğinden burada verilen puntanın amacı filamentleri bir arada tutmak ve kapiler dağılımı önlemektir. Puntalama işleminden sonra filamentler bobinlere sarılarak FDY iplik üretimi tamamlanmıştır.

Yarı mat poliester granüller kullanılarak eriyik lif çekim metodu ile 167/48 dtex POY filament iplik üretilmiştir. POY iplik için üretim hızı 2900-3300 m/ dk'dir. POY üretimindeki iplikler sadece godetlerin etrafında toplanır. İplikler birinci godetten sonra ikinci godetten geçerek bobin sarım ünitesine gelir. Sarım için ipliğe belirli bir gerginlik verilir. POY iplik üretiminde godetler sıcak değildir ve godetlerde çekim işlemi tam gerçekleşmez. POY da yağlama işlemi bir defa yapılmaktadır. Yağlama işlemi iplik düzeden çıktıktan sonra kılavuzlarda gerçekleşir. İplik analiz değerleri kaydedildikten sonra POY ipliği son ürün haline getirmek için Polyteks firmasında ait tekstüre makinasında iplik tekstüre edilmiştir. 167/48 POY

filament ipliklere tekstüre işlemi olarak, yalancı büküm tekstüre işlemi uygulanmıştır. Üretilen 167/48 normal tekstüre ve FDY ipliklerin özellikleri Çizelge 1’de belirtilmiştir.

**Çizelge 1.** 167/48 normal tekstüre ve FDY ipliklerin karakteristik özellikleri

*Table 1. Characteristic properties of 167/48 normal texturized and FDY yarns*

	FDY	POY	Normal Tekstüre
İplik lineer yoğunluğu (dtex)	167.8	269.3	168.6
Filament Sayısı	48	48	48
Lif Enine Kesiti	Trilobal	Yuvarlak	Yuvarlak
Genleşme (%)	32.8	124.5	22.3
Mukavemet (cN/dtex)	3.6	2.2	3.5
Yağ (%)	1.34	0.34	1.68
Punta Sayısı	23.3	13.4	6.07
Kaynama çekme (%)	10.2	65.4	5.9
Uster	0.89	0.8	-

### İpliklerin puntalanması (Intermingling process)

Üretilen 167/48 dtex/filament FDY ve 167/48 dtex/filament tekstüre POY iplikler hava ile kaplama (air covering) metodu ile farklı punta karakterlerinde bir araya getirilerek 334/96 dtex/filament puntalı iplikler elde edilmiştir. 8, 29,54, 75 ve 85 adet/metre olmak üzere 5 farklı punta karakterinde elde edilen numuneler artan punta sayısına göre KNUM1, KNUM2, KNUM3, KNUM4 ve KNUM5 şeklinde numaralandırılmıştır. Puntalama işlemi, ipliklerin jet adı verilen hava üfleme mekanizması içinden geçerken, jet tarafından uygulanan hava basıncı etkisiyle, iplik yapısındaki filamentleri sağa sola dönmeleri sonucunda oluşan filamentlerin birleşmesiyle meydana gelmektedir. İplik puntalama parametreleri Çizelge 2’de verilmiştir.

### Çorap örme (Sock knitting)

334/96 dtex/filament olarak üretilen puntalı iplikler kullanılarak, efektler ve kumaş özelliklerini incelemek amacıyla çorap örme işlemi gerçekleştirilmiştir. İplik olarak üretilen KNUM1, KNUM2, KNUM3, KNUM4 ve KNUM5 numuneler, Harry Lucas TK83 marka çorap örme makinasında örülerek Şekil 1’de gösterilen numuneler elde edilmiştir. Örme işlemi numuneler makineye bağlandıktan sonra otomatik olarak gerçekleştirilmiş ve makine teknik özellikleri Çizelge 3’te belirtilmiştir.

**Çizelge 2.** Üretilen iplik numuneler ve özellikleri

*Table 2. Yarn samples produced and their properties*

Numune	1.iplik (dtex /filament)	2.iplik (dtex /filament)	Jet Tipi	Jet basıncı (bar)	İplik hızı (m/dk)	Punta (adet/metre)	Kalıca punta (adet/metre)
KNUM1	167/48	167/48 FDY SPR	P223	1.5	450	8	3
	tekstüre ekru	parlak ekru	İnsert				
KNUM2	167/48	167/48 FDY SPR	P312	0.55	450	29	18
	tekstüre ekru	parlak ekru	İnsert				
KNUM3	167/48	167/48 FDY SPR	P312	1	450	54	51
	tekstüre ekru	parlak ekru	İnsert				
KNUM4	167/48	167/48 FDY SPR	P312	3	450	75	75
	tekstüre ekru	parlak ekru	İnsert				
KNUM5	167/48	167/48 FDY SPR	P312	5	400	85	85
	tekstüre ekru	parlak ekru	İnsert				

**Çizelge 3.** Çorap örme makinasının teknik özellikleri*Table 3. Technical properties of the sock knitting machine*

Çorap örme makinası	
Marka	Harry Lucas
Model	TK 83
Yıl	1999
Çap Ölçüsü	3 1/2"
Gauge	22
İğne Sayısı	240

### Çoraplara boyama işleminin uygulanması (Application of dyeing process to socks)

Çorap örme işlemi gerçekleştirilen numunelerin efekt özelliklerinin daha belirgin incelenebilmesi amacıyla Polyteks Ar-Ge laboratuvarında numuneler boyanmıştır. Poliester çoraplar 90°C'de 2,5 saat boyanmış ve ardından kurutma fırınında 100°C'de 1 saat tutularak kurutulmuştur. Şekil 1'de boyasız ve boyalı çorap örme kumaş görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 1.** KNUM1, KNUM2, KNUM3, KNUM4 ve KNUM5 iplikler kullanılarak örülen çorap görüntüleri:  
a. boyasız, b. boyalı

*Figure 1. Sock images knitted using KNUM1, KNUM2, KNUM3, KNUM4, and KNUM5 yarns: a. undyed (bare), b. Dyed*

### Testler ve Karakterizasyon (Tests and Characterization)

#### Filament ipliklere uygulanan testler ve karakterizasyon (Tests and characterization applied to filament yarns)

Bu çalışma kapsamında üretilen poliester ipliklerin lineer yoğunlukları, mukavemet özellikleri, kıvrım değerleri, kaynama çekme değerleri ve düzgünsüzlük özellikleri, kesit kontrolü ve UV renk haslığı değerleri aşağıda verilen standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Testlere başlamadan önce numuneler 24 saat kondisyonlanmıştır. İpliğin, belirlenen uzunluğuna ait ağırlığının hesaplanması (iplik numarası) TS 244 ISO 2060 standardına göre yapılmıştır. 500 m iplik, gerilim ve iplik ayar kılavuzlarından geçirilerek çıkırığa bağlanmış ve gerilim 0,05 g/dtex olarak ayarlanmıştır. Ölçümler her bir iplik için 5 kez tekrarlanmıştır. İplik mukavemeti testleri, DIN EN ISO 2062 standardına göre STATIMAT marka test cihazında yapılmıştır. POY ipliklerde, kısıkaçlar arasındaki mesafe 200 mm +/- 1 mm, test hızı 1500 mm/dk, ön gerilim 0,05 g/dtex olacak şekilde ayarlanmıştır. FDY ipliklerde, kısıkaçlar arasındaki mesafe 500 mm

$\pm 1$  mm, test hızı ise ipliğin kopma süresi 20 sn olacak şekilde ayarlanmıştır. Ölçümler her bir iplik için 5 kez tekrarlanmıştır. İplik numunelerinin kaynama çekme test ölçümleri, DIN 53866-1:1979 standardına göre TEXTURMAT test cihazında yapılmıştır. Çıkrıkla çile haline getirilen iplikler, çile magazin aparatına yerleştirildikten sonra, her iplik çilesinin ucuna 2 cN/tex kuvvet uygulanıp ilk uzunluk ( $L_0$ ) ölçülmüştür. Ardından 190°C'de 5 dk fırında bekletildikten sonra fırından çıkarılan ipliklere aynı miktarda kuvvet uygulanıp son boy ( $L_g$ ) ölçülmüştür. İlk uzunluktan, kaynama çekme sonrası ölçülen uzunluk çıkarılıp, ilk uzunluğa bölünerek kaynama çekme değeri bulunmuştur. Ölçümler her bir iplik için 5 kez tekrarlanmıştır. İplik düzgünlük ölçümleri, USTER test cihazında ISO 16549:2004 standardına göre yapılmıştır. Test hızı 50 m/dk ve gerilim kuvvetleri minimum düzgünlük elde edilecek şekilde ayarlanmıştır. Ölçümler her bir iplik için 5 kez tekrarlanmıştır. Olympus SZ61 marka mikroskop ile boyalı ve boyasız olarak üretilen kumaşların efektleri ve ilmek yapıları mikroskop altında görüntülenmiştir.

### **Örme kumaşlara uygulanan testler ve karakterizasyon (Tests and characterization applied to knitted fabrics)**

Çorap örme yöntemi ile elde edilen boyalı ve boyasız kumaş yapılarına, kumaş kalınlık testi, hava geçirgenlik testi, sürtme haslığı testi, Martindale boncuklanma ve patlama mukavemeti testleri yapılmıştır. Kumaş kalınlık testi, TS 7128 EN ISO 5084 numaralı standarda uygun olarak boyalı ve boyasız örme çorap kumaşlar için gerçekleştirilmiştir. Boyalı ve boyasız örme çorap kumaşlar için hava geçirgenlik testi, DEVOTRANS marka test cihazı kullanılarak TS 391 EN ISO 9237 numaralı test standardına göre yapılmıştır. SDL-Atlas Crockmeter test cihazı ile sürtme haslığı testleri yapılmıştır. Test sonucu değerlendirmeleri karanlık odada D65 gün ışığı altında ışık kabini yapılmıştır. Numune, ışık kabini içine 45° açılı yerleştirilerek değerlendirme yapılmıştır. Martindale boncuklanma testi, TS EN ISO 12945-2 standardına uygun olarak TÜBİTAK Bütal laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Patlama mukavemeti ölçümleri, TruBurst Patlama Cihazı kullanılarak TS 393 EN ISO 13938-2 standardına göre Pnömatik diyafram metodu ile gerçekleştirilmiştir. Mikroskop görüntüleri, Leica stereo mikroskop kullanılarak tekstüre, FDY ve puntalı ipliklerin mikroskop görüntüleri elde edilmiştir.

### **ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA (RESEARCH FINDINGS and DISCUSSION)**

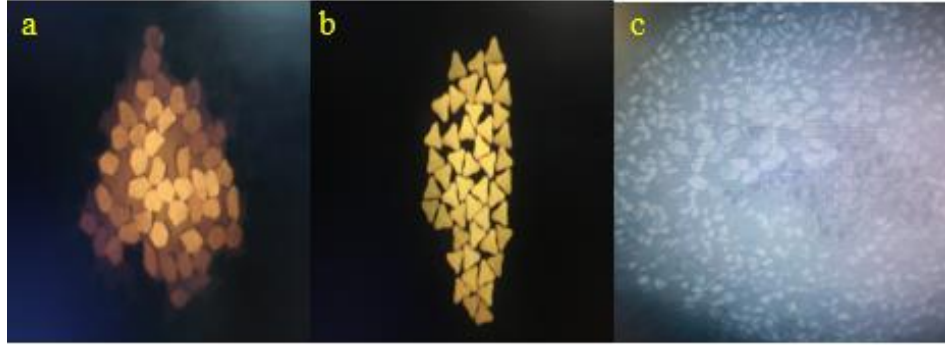
Farklı punta karakterlerinin poliester kumaş efekti üzerindeki etkileri özelliklerine etkilerini incelemek amacıyla yapılan bu çalışmada uygulanan deneysel çalışmalara ait araştırma sonuçları aşağıda verilmiştir.

#### **Puntalı İplik Test Sonuçları (Test Results of Intermingled Yarns)**

Eriyikten çekim yöntemi kullanılarak üretilen tekstüre, FDY ve puntalı ipliklerin mikroskop görüntüleri Şekil 2 ve iplik enine kesitleri Şekil 3'te görülmektedir. Farklı punta karakterine sahip tekstüre ipliklerin dtex, % uzama, mukavemet, yağ, kaynama çekme, punta ve kalıcı punta özellikleri Çizelge 4'te verilmiştir. Puntalama basıncı (jet basıncı)'nın artırılmasıyla punta sayısı ve kalıcı punta sayısının artması sağlanmıştır. Literatürde de puntalama basıncının artmasıyla filamentlerin daha fazla karıştığı ve punta şeklini tam almayan kısımlarında punta oluşturmasıyla punta sayısının arttığı belirtilmiştir (Çirkin, 2006; Özkan ve Baykal, 2012). Puntalı ipliğin hacimli ve tüylü yapısı Şekil 2-c'de görülmektedir. KNUM5 numunesi, yüksek punta sayısı sayesinde, en yüksek iplik numarası değerini (342,4 dtex) vermiştir. Maksimum mukavemet değeri KNUM2 numaralı numunede 3,41 cN/dtex ölçülmüştür ve kaynama çekmesi de bu numunede en düşük elde edilmiştir. En düşük uzama değerini (%21,45) uygulanan punta sayısı en az olan KNUM1 numunesi göstermiştir. Ayrıca kalıcı punta sayılarına bakıldığı zaman, yüksek sayıda punta uygulanmış KNUM4 ve KNUM5 numunelerinde, diğer numunelere göre punta kalıcılığının daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 2. İpliklerin mikroskop görüntüleri (2,5x) a. 167/48 FDY, b. 167/48 tekstüre, c. puntalı iplik  
Figure 2. Microscope images of yarns (2.5x) a.167/48 FDY, b. 167/48 texturized, c. intermingled yarns



Şekil 3. İplik kesit görüntüleri: a. tekstüre iplik b. FDY iplik c. katlanmış iplik  
Figure 3. Images of the cross section of the yarns: a. texturized, b. FDY, c. plied yarn

Çizelge 4. Puntalı iplik test sonuçları

Table 4. Test results of intermingled yarns

	Dtex	Uzama (%)	Mukavemet (cN/dtex)	Yağ (%)	Kaynama Çekme (%)	Punta (adet/metre)	Kalıcı Punta (adet/metre)
KNUM1	340,8	21,45	3,23	2,2	9,38	8	3
KNUM2	342	25,49	3,41	1,8	8,54	29	18
KNUM3	338,8	22,42	3,29	2	9,35	54	51
KNUM4	339,4	22,95	3,31	1,9	9,42	75	75
KNUM5	342,4	23,54	3,26	1,9	9,51	85	85

### Örme Kumaş Test Sonuçları (Test Results of Knitted Fabric)

Boyalı ve boyasız kumaş kalınlık değerleri Çizelge 5'te verilmiştir. Boyalı numunelerin boyasız numunelere göre kalınlıklarının yaklaşık 0,10-0,13 mm daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bu farklılığın sebebi liflerin boya alımı nedeniyle kesitlerinin artmasıdır. Poliesterin boyanması, boya molekülünün poliester amorf bölgesine hapsedilmesine dayanır. Amorf bölgelere nüfuz eden boya molekülleri liflerde kalınlaşmaya yol açar ve bu durum kumaş kalınlığını doğrudan etkiler. Boyalı numunelerde punta sayısı arttıkça kumaş kalınlığı da artarken, boyasız numunelerde bu şekilde doğrusal bir ilişki görülmemiştir. Literatürde, puntalama işlemiyle ipliğin hacim kazanmasından dolayı kalınlığın arttığı ve kalınlık farkının belirgin olabilmesi için punta sayısı arasındaki farkın fazla olması gerektiği belirtilmiştir (Özkan ve diğ., 2015). Buna göre bu çalışmada da, punta sayısı arasındaki farkın daha da artırılmasıyla boyasız ve boyalı numunelerde daha net kalınlık artışı görülebileceği tahmin edilmektedir.

**Çizelge 5.** Kumaşların kalınlık değerleri

Table 5. Thickness values of fabrics

	Boyasız	Boyalı
KNUM1	0,49 mm	0,60 mm
KNUM2	0,50 mm	0,61 mm
KNUM3	0,45 mm	0,61 mm
KNUM4	0,49 mm	0,63 mm
KNUM5	0,49 mm	0,64 mm

Kumaşlara uygulanan hava geçirgenlik test sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. Verilen grafiğe bakıldığı zaman boyalı kumaşların hava geçirgenlik değerlerinin boyasız kumaşlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir. İplik, boyanmanın etkisiyle daha kapalı ve rijit bir yapı oluşturduğu için hava geçirgenliği değerleri, boyasız numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. En düşük hava geçirgenliği değeri, boyanmamış en düşük puntalı KNUM1 numunesinde elde edilirken, en yüksek hava geçirgenliği boyalı kumaş numuneler olan KNUM2 ve KNUM3 ile elde edilmiştir. Punta sayısının artması, iplik yapısındaki lif kıvrım ve iplik hacim miktarını arttırdığından dolayı, bu ipliklerden örülen kumaşlar birbirine daha çok tutunarak kompakt bir yapı oluşturmaktadır. Kıvrım almış lifler, açık gözeneklerin kapanmasını ve daha sıkı olmasını sağlayarak hava geçirgenliğini düşürmektedir (Özkan ve diğ., 2015; Ogulata, 2006). Literatüre uygun olarak, Şekil 4'te boyalı kumaşlarda, punta sayısının artmasıyla hava geçirgenliği değerinin 0,61289 m/s'den 0,61122 m/s'ye düştüğü görülmektedir.

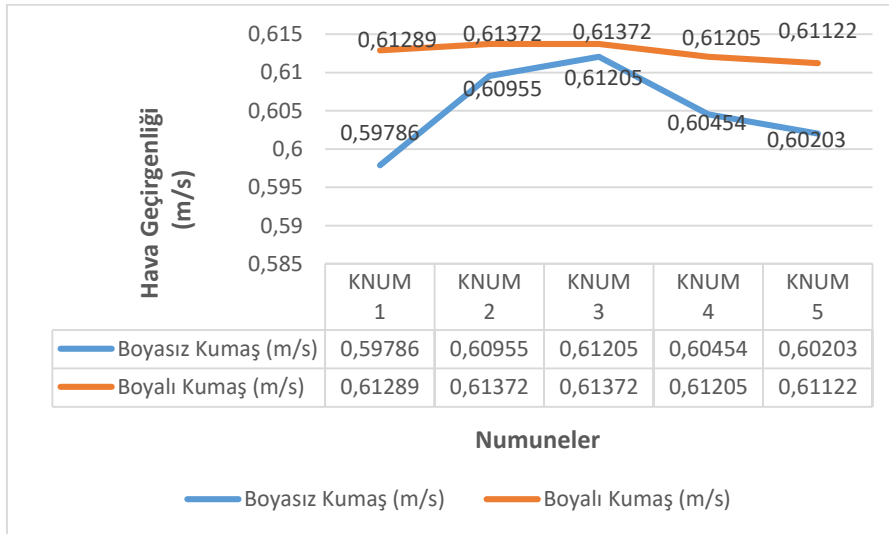
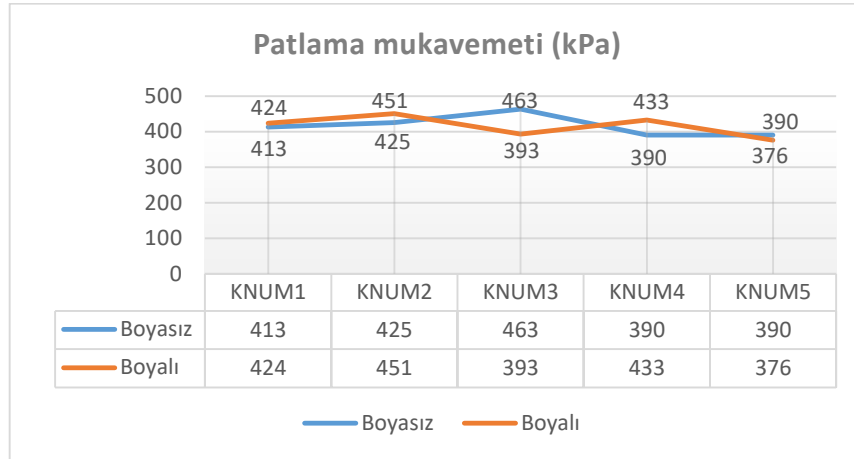
**Şekil 4.** Hava geçirgenlik test sonuçları

Figure 4. Results of air permeability test

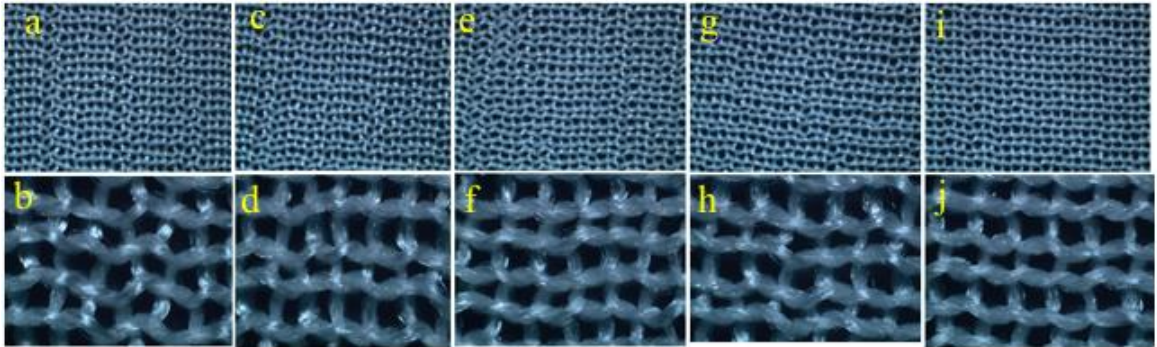
Boyalı ve boyasız kumaşlara yapılan patlama testinden sonra elde edilen sonuçlar Şekil 5'te gösterilmiştir. En yüksek patlama mukavemeti değeri 469 kPa değeri ile KNUM3-boyasız kumaşta elde edilmiş; en düşük değer ise 376 kPa ile KNUM5-boyalı kumaşta görülmüştür. Aynı hammaddeye sahip ipliklerden elde edilen kumaşlarda, iplik kalınlığının artması birim alandaki lif sayısı arttırdığından dolayı kumaş mukavemetinin arttığı bilinmektedir (Tayyar, 2010). Punta sayısındaki artışla, hacim kazanan ipliklerden elde edilen kumaşlarda daha yüksek patlama mukavemeti değeri beklenirken, test sonuçlarında bu şekilde doğrusal bir ilişki gözlenememiştir. Çizelge 4'te de görüldüğü üzere, ölçülen iplik numarası (dtex), mukavemet ve % uzama değerlerinde, punta sayısı artarken, doğrusal bir değişim gerçekleşmediği için, bu değişimler, örme kumaş patlama mukavemeti test sonuçlarına da yansımıştır.



**Şekil 5.** Patlama mukavemeti test sonuçları

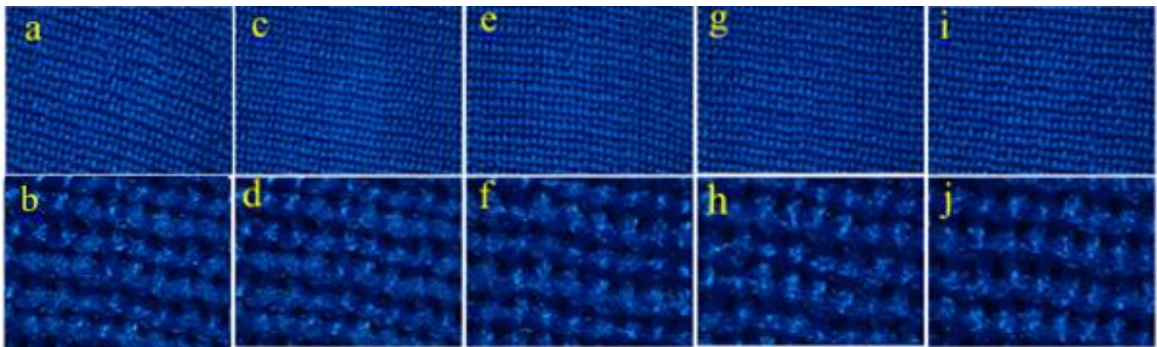
*Figure 5. Results of bursting strength test*

Kumaş yüzeyleri, ilmek yapıları ve efektlerin gözlemlenmesi amacıyla 0,67X ve 2,5X büyütme oranları kullanılarak, boyalı ve boyasız örgü kumaşların mikroskop görüntüleri alınmıştır. Şekil 6 ve 7’de verilen mikroskop görüntülerinde punta karakterleri numuneler üzerinde fark edilmektedir. Boyalı numunelerde örme ilmek yapılarının boyasız numuneler göre dar olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise, boya alımı ile liflerin şişerek hacimlerinin artmasıdır.



**Şekil 6.** Boyasız kumaş ilmek yapıları ve efektler, (sırasıyla 0.67X ve 2.5X büyütme): a-b: KNUM1, c-d: KNUM2, e-f: KNUM3, g-h: KNUM4, i-j: KNUM5

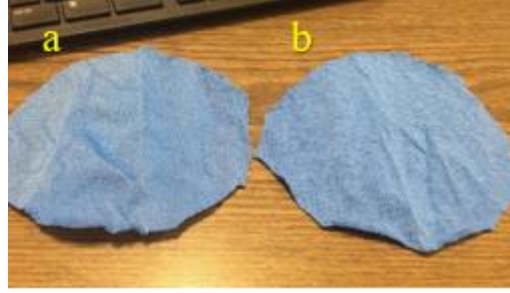
*Figure 6. Loop structures and effects of undyed (bare) fabric (0.67X ve 2.5X magnification, respectively): a-b: KNUM1, c-d: KNUM2, e-f: KNUM3, g-h: KNUM4, i-j: KNUM5*



**Şekil 7.** Boyalı kumaş ilmek yapıları ve efektler, sırasıyla 0.67x ve 2.5x büyütme oranı: a-b: KNUM1 c-d: KNUM2, e-f: KNUM3, g-h: KNUM4, i-j: KNUM5

*Figure 7. Loop structures and effects of dyed fabric (0.67X ve 2.5X magnification, respectively): a-b: KNUM1, c-d: KNUM2, e-f: KNUM3, g-h: KNUM4, i-j: KNUM5*

Sürtme haslığı test sonuçları için numuneler, beş ölçekli gri skala ile karşılaştırılarak lekelenme değerlendirilmesi yapılmıştır. Kumaşların haslık değerleri incelendiği zaman numuneler üzerinde en iyi haslık sonucunun elde edildiği ve boyama işlemi ile lif kalitesinin iyi bir performansta olduğu görülmüştür. Şekil 8’da Martindale boncuklanma testi sonrası, KNUM1 ve KNUM5 numunelerinin görüntüsü verilmiştir. Görsel inceleme sonrası, düşük puntalı ve yüksek puntalı numuneler arasında belirgin bir fark gözlenememiştir. Bu durumun, uygulanan punta miktarlarının birbirine yakın olmasından dolayı olduğu düşünülmektedir (Özkan ve diğ., 2015).



Şekil 8. Martindale boncuklanma testinden sonra boyalı kumaş görünümü: a. KNUM1, b. KNUM5  
Figure 8. Appearance of dyed fabric after Martindale pilling test: a. KNUM1, b. KNUM5

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada FDY ve tekstüre iplikler hava ile kaplama metodu ile bir araya getirildikten sonra farklı punta karakterlerinin iplik ve kumaş üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çorap örme yöntemi ile oluşturulan kumaş yüzeylerine, kumaş kalınlık, hava geçirgenlik, sürtme haslığı, boncuklanma, patlama mukavemeti testleri uygulanmış ve kumaşların mikroskop görüntüleri alınmıştır. Boyalı kumaşlarda punta sayısının artmasıyla kumaş kalınlığının arttığı görülmüştür. Artan kalınlıkla beraber hava geçirgenlik değeri 0,61289 m/s’den 0,61122 m/s’ye düşmüştür.

En yüksek patlama mukavemeti değeri ise 469 kPa değeri ile KNUM3-boyasız kumaşta, en düşük değer ise 376 kPa ile KNUM5-boyalı kumaşta elde edilmiştir. Martindale boncuklanma testi sonrası, kumaşlarda boncuklanma olmamıştır. Sürtme haslığı testleri sonrasında, düşük puntalı ve yüksek puntalı numuneler arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Sonuç olarak, elde edilen tüm sonuçlar incelendiğinde, iki farklı ipliğin (tektüre POY-FDY) birleştirilerek puntalanması ve ardından örme kumaş üretilmesi ve ayrıca, punta sayılarının (8, 29, 54, 75 ve 85 adet/metre) birbirine yakın seçilmesi nedeniyle, özellikle kumaş test sonuçlarında nispeten az ve doğrusal olmayan bir değişim gözlenmiştir. Ancak görsel olarak punta karakterleri kumaşların boyanmasından sonra kumaş üzerinde efektler oluşturmuştur.

## KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)

İpliklerin ve kumaşların üretilmesinde ve testlerinde, yardımlarını esirgemeyen Polyteks Tekstil Sanayi Araştırma ve Eğitim A.Ş. Ar-Ge Merkezi / BURSA firması ve çalışanlarına desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)




- Alagirusamy, R., Ogale, V., Vaidya, A., and Subbarao, P.M.V., 2005, “Effect of Jet Design on Commingling of Glass/Nylon Filaments”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Cilt 18, Sayı 3, ss. 255–268.
- Atasayan, S., 2005, Dikişsiz Örme “Seamless” Teknolojisinde Üretimde Karşılaşılan Kumaş Çekme Sorunları ve Çekmenin Optimizasyonu, Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.



- Babaarslan, O., Telli, A., ve Gören, A.G., 2019, "FDY ile POY, CDPET ve Mikro POY polyester filamentlerin farklı tekstüre şartlarında birleştirilmesiyle elde edilen ipliklerin özellikleri ve örme kumaştaki görsel etkileri", *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt 21, Sayı 62, ss. 409-418.
- Baykal, P.D., & Özkan, İ., 2013, "The effects of intermingling process parameters and number of filaments on intermingled yarn properties", *The Journal of the Textile Institute*, Cilt 104, Sayı 12, ss. 1292-1302.
- Çirkin, S., 2006, *Yalancı Büküm Tekstüre İşleminde Tekstüre Değişkenlerinin İplik Özellikleri Üzerindeki Etkisi*, Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Demir, A., 1990, "Intermingling/ Interlacing- A Survey", *Textile Asia*, Cilt 21, Sayı 9, ss. 114.
- Garip, R., "Korteks İplik Fabrikası Eğitim Notları", Haziran, Bursa, 2005.
- Kravaev, P., Stolyarov, O., Seide, G., and Gries, T., 2013, "A method for investigating blending quality of commingled yarns", *Textile Research Journal*, Cilt 83, Sayı 2, ss. 122-129.
- Miao, M., & Soong, M. C. C., 1995, "Air interlaced yarn structure and properties", *Textile Research Journal*, Cilt 65, Sayı 8, ss. 433-440.
- Ogulata, R. T., 2006, "Air permeability of woven fabrics", *Journal of Textile and Apparel, Technology and management*, Cilt 5, Sayı 2, ss. 1-10.
- Özkan, I., & Telli, A. 2019, "The effects of metal type, number of layers, and hybrid yarn placement on the absorption and reflection properties in electromagnetic shielding of woven fabrics", *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 14, 1558925019860961.
- Özkan, İ., 2019, "Investigation on antimicrobial activity and electromagnetic shielding effectiveness of metal composite single jersey fabrics", *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, Cilt 14, 1558925019895984.
- Özkan, İ., 2020, "Investigation of the technical and physical properties of metal composite 1× 1 rib knitted fabrics", *Industria Textila*, Cilt 71, Sayı 1, ss. 41-49.
- Özkan, İ., Baykal, P. D., & Özdemir, H., 2018, "Effects of intermingled yarn surface characteristics on knitted fabric's color parameters", *Tekstil ve Mühendis*, Cilt 25, Sayı 112, ss. 327-334.
- Özkan, İ., & Baykal, P.D., 2012, "Puntalama işleminde üretim parametrelerinin ve filament özelliklerinin punta kalıcılığına etkisi", *Tekstil ve Mühendis*, Cilt. 19, Sayı 87, ss. 1-6.
- Özkan, İ., Baykal, P. D., ve Kuvvetli, Y., 2015, "Puntalama işleminin örülmüş kumaşların yapısal özellikleri ve hava geçirgenliği üzerindeki etkilerinin araştırılması", *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 30, Sayı 2, ss. 65-72.
- Özkan, İ., Duru Baykal, P., & Gülnaz, O., 2019, "Investigation of antibacterial and antifungal properties of tufting carpets containing metal composite yarns", *The Journal of The Textile Institute*, Cilt 110, Sayı 5, ss. 756-763.
- Özkan, İ., Duru Baykal, P., & Karaaslan, M., 2020, "Investigation of electromagnetic shielding properties of metal composite tufted carpets", *The Journal of The Textile Institute*, Cilt 111, Sayı 4, ss. 476-483.
- Öztanır, İ., & Yüksekaya, M.E., "Puntalama işleminin sentetik ipliklerin sağlamlık ve düzgünlük özellikleri üzerindeki etkisi", *XIII. Uluslararası İzmir Tekstil ve Hazır Giyim Sempozyumu*, İzmir, 216-220, 2-5 Nisan 2014.
- Tayyar, A. E., 2010, "Ev tekstillerinde kumaş özelliklerinin patlama mukavemetine etkileri", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 16, Sayı 2, ss. 165-172.
- Webb, C.J., Waters, G.T., Liu, G.P., and Thomas, C., 2009, "The influence of yarn count on the splicing of simple continuous filament synthetic yarns", *Textile Research Journal*, Cilt 79, Sayı 3, ss. 195-204.
- Yüksekaya, M. E., & Öztanır, İ., 2014, "The effect of intermingling process parameters on the synthetic filament yarn strength", *Tekstil ve Mühendis*, Cilt 21, Sayı 93, ss. 10-17.



## RAYLI SİSTEM TREN EKİPMANLARININ YERLİLEŞTİRME PROBLEMİ İÇİN ÇOK KRİTERLİ BİR KARAR MODELİ

<sup>1</sup>M. Abdullah GENÇER , <sup>2</sup>Evrencan ÖZCAN , <sup>3</sup>Tamer EREN 

<sup>1,2,3</sup>Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, TÜRKİYE

<sup>1</sup>abdullahgencer\_71@hotmail.com, <sup>2</sup>evrencan.ozcan@kku.edu.tr, <sup>3</sup>teren@kku.edu.tr

(Geliş/Received: 07.12.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 16.09.2020)

**ÖZ:** 2012 yılında %51'le başlayan yerli ekipman kullanım oranının Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı 11. Kalkınma Planıyla birlikte tüm raylı sistem ekipmanlarında %80 oranına ulaşması hedeflenmektedir. Yerlileştirme çalışmalarında kalkınma hedeflerinin gerçekleşmesinin en önemli adımlarından birisi raylı sistem ekipmanlarının üretimini gerçekleştirebilmek için öncelikli olarak ekipmanların analizinin uygun şekilde yapılmasıdır. Bu çalışma kalkınma hedeflerine ulaşmada önemli bir adım olan ekipman önceliklendirilmesiyle ilgili bir yöntem sunmaktadır. Bu çalışmada kent içi ağır raylı sistem araçlarında 28 sistem ekipmanı analiz edilerek raylı sistem araçları için bütün ekipmanlar 15 ana ekipmana ayrılmıştır. Raylı sistemler 15 araç ekipmanı için Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri kullanılarak ekipman önceliklendirilmesi yapılmıştır. Kriterlerin belirlenmesinde literatür araştırması ve uzman görüşünden yola çıkılarak 3 ana kriter, 7 alt kriter belirlenmiştir. Kategorize edilen ekipmanlar kriterlere göre ANP ile ağırlıklandırılmıştır. Bu ağırlıklarla TOPSIS yöntemi kullanılarak ana sistem ekipmanlarının yerlileştirilmesinde kullanılacak öncelik sırası elde edilmiştir. Daha sonra ANP ve TOPSIS sonucu tutarlılık için kıyaslanmıştır. Ekipmanların öncelik sıralarına göre yerlileştirme hedefine ulaşmada iki yöntem için de raylı araçların çalışabilmesi ve işletilebilmesi için temel ekipmanlarından biri olan ve en önemli maliyet kalemlerinden birisini oluşturan Tahrik ve Motor Sistemi öncelikli yerlileştirilmesi gereken ekipman olarak belirlenmiştir. Literatürde sürdürülebilir ulaşım için tren ekipmanlarının yerlileştirilmesinde öncelik sırasının belirlenmesiyle ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışmanın bu alanda yapılacak çalışmalara ve ülkelerin yerlileştirme hedeflerine öncü olacağı düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Raylı Sistemler, Yerlileştirme, ANP-TOPSIS, Raylı Sistem Ekipmanları

### A Multi-Criteria Decision Model for the Localization Problem of the Rail System Train Equipment

**ABSTRACT:** Starting from %51 in 2012, the use of domestic equipment is expected to reach 80% with the President the Republic of Turkey 11th Development Plan in all the rail system equipment. One of the most important steps in achieving the development goals in localization studies is the proper analysis of the equipment to realize the production of rail system equipment. This study provides a method for equipment prioritization, which is an important step towards achieving development goals. In this study, 28 system equipment is analyzed in urban heavy rail vehicles and all equipment for rail system vehicles is divided into 15 main type of equipment. Equipment prioritization is made for multi-criteria decision-making methods for 15 vehicles equipment. In the determination of the criteria, 3 main criteria and 7 sub-criteria are determined based on the literature research and expert opinion. The categorized equipment is calculated according to criteria by ANP and priority values are obtained. By using the TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) method with priority values, the priority order to be used in the localization of the main system equipment is obtained. Then, the results of the ANP and TOPSIS is compared for consistency. The Drive and Motor System, which is one of the most important cost items for the operation and operation of rail vehicles for both methods in achieving

the localization goal of the equipment in order of priority, has been determined as the equipment that needs to be localized. There is no study in the literature on determining the priority order for the localization of train equipment for sustainable transport. It is thought that this study will be a pioneer in the studies to be carried out in this field and the targets of the localization of the countries.

**Key Words:** *Rail Systems, Localization, ANP-TOPSIS, Rail System Equipment*

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ulaşım sistemleri içerisinde yolcu taşımacılığında trafik ve kaza riskinin az olması, güvenli ve konforlu, kapasitesinin yüksek olması nedeniyle raylı sistem taşımacılığı payı artmakta olan sektördür (Eren ve Gencer, 2016). Raylı sistemler ile dünyada en fazla yolcu taşıyan ülke yıllık 23 milyar yolcu ile Japonya en yüksek paya sahipken bu ülkeyi sırasıyla Hindistan, Almanya, İngiltere, Çin takip etmektedir. Türkiye’de ise yıllık raylı sistem yolcu sayısı yaklaşık 90 milyondur. Şehirler bazında ise Tokyo (%60), Londra (%22), Paris (%25) ve New York (%31) raylı sistem kullanım oranıyla ülkeler arasında başı çekmektedir. Türkiye’de ise bu oran diğer ülkelerle kıyaslandığında çok daha düşüktür. Yalnızca İstanbul bu konuda son yıllarda yapılan çalışmalarla birlikte dünyadaki raylı sistem kullanım oranını yakalamayı başarmıştır (Demir, 2015). Türkiye’de yaklaşık 12.740 km olan raylı sistem hatları sürdürülebilir ulaşım ve 11.kalkınma planı hedefleri doğrultusunda toplam 25 bin km, kentiçi yaklaşık 200 km olan raylı sistem hatlarının 2023 yılı hedefleriyle birlikte 740 km’ye ulaşması hedeflenmektedir. Böylelikle hedeflenen rakamlara ulaşırsa raylı sistem taşımacılığının ulaşım türleri içerisindeki oranı 2023 yılında %10 olacaktır (Pektaş, 2019).

Dünya raylı sistemler pazarında toplam 176 milyar avro payın %30’unu hızlı trenler, %16’lık payı ise ağır ve hafif raylı sistemler oluşturmaktadır. Toplam pay içerisinde dünya raylı sistemler ihracatı 2018 yılı itibarıyla 40 milyar dolar olmakla birlikte Çin 13 milyar dolarla başı çekmektedir. İthalatta ise Almanya, İngiltere ve ABD en büyük paya sahiptir. Ülkemizin ithalatında %30’ a yakın payla Çin ilk sırada, Çekya yaklaşık %20 pay ile ikinci daha sonra Avusturya, Almanya sırasıyla takip etmektedir (Demir, 2015). Ülkelerin raylı sistem ekipman yerleşirme çalışmasında Türkiye de yer almış, %51 yerli katkıyı ilerleyen süreçte %80 yerli katkıya kadar yükseltmeyi hedeflemiştir (11.Kalkınma Planı, 2018). Raylı sistem araçları içerisindeki pay oranlarında CRRC (China Railway Rolling Stock Corporation) araçlarıyla yıllık geliri yaklaşık 26 milyar avro ile en büyük pay Çinde, 16 milyar avro ile Siemens-Alstom ve Kanada firması olan Bombardier 7 milyar avro ile takip etmektedir (Pektaş, 2017). Yerli katkı oranının artırılmasıyla birlikte katkı oranı kadar parasal tutar Türkiye’de kalacaktır (Pektaş, 2019).

Son yıllarda Türkiye’de önemli raylı sistem projeleri planlanmakta ve planlanmaya devam etmektedir (Baştürk, 2014). 11. Kalkınma planı doğrultusunda raylı sistem hatlarının artırılması, raylı sistem araç ve ekipmanlarının yerleştirilmesi hedeflenmektedir. Böylece dünyadaki raylı sistem örneklerini yakalama noktasında önemli bir adım atılmıştır. Özellikle nüfustaki sürekli artış yeni projeler ve kentsel altyapı çalışmaları yapmayı zorunlu kılmaktadır. İstanbul, Ankara gibi kentsel raylı sistem ağının fazla olduğu illerde belediye bütçesinin önemli kısmı bu projelere ayrılmaktadır. Raylı sistem projeleri ve yatırımları arttıkça ulaşım ağı çeşitlenmekte ve yeni raylı sistem araçları alınmaktadır. Türkiye’de mevcut raylı sistem araçları 3500 civarında olmakla birlikte projelerin ve çalışmaların artmasıyla, 11. kalkınma planında yer alan yerleşirme hedeflerine ulaşılmasıyla birlikte bu sayı daha da artacaktır. Ayrıca sertifikasyon, belgelendirme ve test süreçlerinin ve raylı sistem ekipmanlarının proje, tasarım ve üretimi de yerli imkanlarla sağlanacaktır. (Pektaş, 2019).

Bu çalışmada 11. Kalkınma planı ve yerleşirme hedefleri doğrultusunda yapılacak çalışmalara yol göstermesi açısından ağır raylı sistem araçlarının ekipmanları ele alınmıştır. Ana ve alt kriterler arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi ve hesaplanmasında kullanışlı yöntem olduğundan ANP (Analitik Ağ Süreci), alternatiflerin önceliklendirme ve sıralanmasında etkili yöntem olup literatürde en çok kullanılan yöntemlerden birisi olduğundan TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), yöntem olarak tercih edilmiştir. Yöntemde, ekipmanlar ANP yöntemiyle ana ve alt

kriterlere ayrılarak ikili kıyaslama ile ağırlıklandırılmış ve bu ağırlıklar TOPSIS yöntemi kullanılarak önceliklendirilmiştir. Tutarlılık için ANP ve TOPSIS yöntemleri kıyaslanmış önceliklendirme sıralamasının tutarlılığı gösterilmiştir. Çalışmanın sonucunda kent içi ağır raylı sistem 28 ekipman türü arasından belirlenen 15 ekipman türü için kriterlere göre hangi ekipmanın yerleştirme açısından önemli olduğu belirlenmiş ve öncelik ekipman öncelik sırası oluşturulmuştur. Tahrik ve Motor Sistemi en öncelikli yerleştirilmesi gereken ekipman olarak belirlenmiştir. Böylelikle bu çalışma, yerleştirme faaliyetinde öncelikli yapılması gereken çalışmaların temel yapısını oluşturmuş ve nasıl yol izleneceğini belirlemiştir. Bu çalışmada giriş bölümünde raylı sistemlerin dünyadaki ve Türkiye'deki durumu, ülkelerin raylı sistemler gelecek hedefleri ve mali değerleri konu edilmiştir. Kullanılan yöntemler bölümünde bu çalışma için kullanılan ANP ve TOPSIS yöntemlerinin içeriğinden bahsedilmiştir. Uygulama bölümünde raylı sistem araçlarındaki ekipmanlar için belirlenen alternatif ve kriterler açıklanmış, ANP ile ağırlıklandırma ve TOPSIS ile önceliklendirme hesaplamaları gösterilmiş, yöntemin sonuçları değerlendirilmiştir. Sonuç ve öneriler bölümünde bu çalışmanın 11. Kalkınma planına, yerleştirmeye ve sürdürülebilirliğe sosyal ve ekonomik katkısı belirtilmiştir.

Yerleştirme ve millileştirme kavramları ülkemizde özellikle tartışılmaya başlanması çok yeni konudur. Raylı sistemlerin yerleştirme konusunda yerli oranı belirlenmesi hedefi 11. Kalkınma planı ile ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla bu konuda ülkemizde ekipmanların yerleştirilmesiyle ilgili konunun son yıllarda önemine binaen raylı sistemlerde millileştirme çalışmaları az da olsa yer almaya başlamıştır. Raylı sistemlerin ve trenlerin yerleştirilmesi probleminde ele alınacak en önemli konu trenlerin ekipmanlarını oluşturmaktadır. Dolayısıyla raylı sistemlerde ekipmanların yerleştirme problemi üzerine literatür araştırması neticesinde çok kriterli karar verme yöntemleriyle öncelik sırasının belirlenmesi ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma kapsamında olan ANP, TOPSIS, önceliklendirme, sürdürülebilirlik ve yerleştirme ile ilgili farklı sektörlerde farklı yöntemlerle ilgili çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. Awasthi ve diğ. (2011) sürdürülebilir ulaşım sistemlerinde 3 aşamalı model sunmuşlardır. İlk adımda alternatifler için kriterler belirlenmiş, ikinci aşamada bulanık TOPSIS yöntemiyle sürdürülebilir en iyi alternatif seçimi için puanlama kullanılmış ve üçüncü adımda duyarlılık analiziyle kriterlerin ağırlığının belirlenmesi değerlendirilmiştir. Paasha (2014) 39 yakıt zengini ülkeler için millileştirme ve yasal düzenlemelerle ilgili verileri analiz ederek bayesle ilişkili regresyon yöntemi kullanmıştır. Demir (2015) raylı sistem araçlarında milli marka oluşturma üzerine çalışmıştır. Karadere ve Kantarcı (2015) raylı sistem araçlarında Cer motorlarının dizayn parametrelerini belirleyerek yerli imkanlarla üretilmesini araştırmışlardır. Zaliaeva (2016) Rusya'da Gazprom işletmesinde hem olasılıksal hem de bulanık model kullanarak risk ve değişkenlik varlıklarının millileştirilmesi çalışmasını yapmıştır. Nalcioğlu (2016) çelik sektöründe malzeme tedarikinin yerleştirilmesi için yalın altı sigma uygulaması yapmıştır. Krmac ve diğ. (2017) sürdürülebilir demiryolları için incelenen makaleler Temel Performans Temalarının (KPT) değerlendirmelerinde ve etkilerinin sıralamasında Analitik Hiyerarşik Proses (AHP) ana kriter olarak kullanılarak en önemli Tren Kontrol Bilgi Sistemi (TCIS) konularını belirlemişlerdir. Özcan ve diğ. (2017) ANP-PROMETHEE (The Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) yaklaşımı ile CSP teknoloji güneş enerjisi santralleri için seçim yapmışlardır. Özcan ve diğ. (2017) ANP ve TOPSIS yöntemlerini kullanarak yenilenebilir yatırım alternatiflerini değerlendirmişlerdir. Evelin ve Djordjević (2018) grup analitik hiyerarşik proses yöntemiyle 44 gösterge için sürdürülebilir 2 ana kriter belirleyerek raylı akıllı ulaşım sistemini değerlendirmişlerdir. Özcan ve diğ. (2018) hidroelektrik santrallerin ana sistemlerinin yerleştirilmesi problemi için analitik ağ süreci ile öncelik analizi yapmışlardır. Hamurcu ve Eren (2018) hızlı tren projelerinin önceliklendirilmesinde AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci) yöntemini kullanmışlardır. Cürebal ve diğ. (2019) ANP ve PROMETHEE yöntemleri ile teknoloji yöneticisi seçim problemini çözümlenmişlerdir. Özcan ve diğ. (2019) hidroelektrik santrallerde bakım optimizasyonu için kritik ekipmanların AHP-TOPSIS yöntemiyle önceliklendirilmesini çalışmışlardır.

## KULLANILAN YÖNTEMLER (METHODS)

Çok kriterli karar verme yöntemleri alternatifler arasında sıralama, seçim, sınıflandırma yapmak için belli ölçütler kullanan yöntemdir. Çok kriterli karar verme, karar vericinin belli seçenekler arasından birden fazla kritere göre seçim yapmasına olanak sağlar. Birçok çok kriterli karar verme yöntemi olmakla birlikte bunlar arasından problem tipine en uygun yöntemi belirlemek karar vericiye aittir. Problemi etkileyen çok fazla kriter olabilir ancak burada öncelikli olarak problemi en çok etkiye sahip kriterler olarak indirgemek gerekir. Karar verici en uygun alternatifi belirlediği kriterlerin birbirlerine önem dereceleriyle sıralar ve değerlendirir. Bu değerlendirmede en yüksek puana sahip alternatif seçimimizi oluşturur (Özcan ve diğ., 2017). Yerleştirme çalışmasında Çok kriterli karar verme yöntemlerinden ANP ve TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada, ana ve alt kriterler arasındaki ilişkileri dikkate alarak analitik hesaplama yapmasından dolayı ANP ve uygulanmasının kolay olması, literatürde en çok kullanılan yöntemlerden biri olması ve daha etkin sonuçlar vermesinden dolayı TOPSIS yöntemi kullanılmıştır.

## ANALİTİK AĞ SÜRECİ (ANALYTICAL NETWORK PROCES)

Analitik Hiyerarşi Süreci gibi Analitik Ağ Süreci de Thomas L. Saaty tarafından geliştirilmiştir (Saaty, 1980). ANP, AHP yönteminden farklı olarak kriterler arasındaki bağımlılığı ve ilişkiyi de değerlendiren daha genel bir yapıdır. ANP kriterler arasındaki ilişkiyi dikkate aldığından gerçek hayat problemlerinde daha etkilidir. Kriterler ve alt kriterler arasında etkileşim belirlendikten sonra faktör ve küme bağlantıları için etki ağı içermektedir. Sayısal değerlerle ifade edilemeyen ve karmaşık problemlerin çözümünde etkindir. ANP'nin uygulama adımları kısaca aşağıda belirtilmiştir (Özcan ve diğ., 2017).

Adım 1: Problem karar verici tarafından açık ve net bir şekilde tanımlanır ve ağ yapısı oluşturulur.

Adım 2: Kriterler ve alternatifler belirlendikten sonra birbirleri arasındaki etkileşimler ve bağlantılar ifade edilir.

Adım 3: Problem belirlendikten ve ağ yapısı oluşturulduktan sonra karar vericinin tercihlerini ortaya koyan ve önem derecesini gösteren AHP'de olduğu gibi 1-9 skalasını kullanan ikili karşılaştırmalar kriterlerin birbirlerine üstünlük derecesine göre puan verilerek aşağıdaki şekilde yapılır. Örneğin, teknik ana kriterinden ulaşım alt kriteri, aydınlatma ve batarya ekipmanının ulaşımının birbirlerine üstünlüklerine göre eşit derecede önemliyse 1 puanı verilerek uygulanır.

Önem Derecesi	Tanım	Açıklama
1	Eşit derecede önem	İki faaliyet amaca eşit düzeyde katkıda bulunuyor.
3	Orta derecede önem	Tecrübe ve yargı bir faaliyeti diğerine orta derecede tercih ettiriyor.
5	Kuvvetli derecede önem	Tecrübe ve yargı bir faaliyeti diğerine kuvvetli bir şekilde tercih ettiriyor.
7	Çok kuvvetli derecede önem	Bir faaliyet güçlü bir şekilde tercih ediliyor ve baskınlığı uygulamada rahatlıkla görülüyor.
9	Mutlak derecede önem	Bir faaliyetin diğerine tercih edilmesine ilişkin kanıtlar büyük güvenilirliğe sahip.
2, 4, 6, 8	Ara değerler	Uzlaşma gerektiğinde kullanılmak üzere iki ardışık yargı arasındaki değerler.

Adım 4: İkili karşılaştırma matrisinin tutarlılık oranı (CR) aşağıdaki formülle hesaplanır ve bu değer 0,1'den küçük olması tutarlı olduğunu Denklem 1'de hesaplamayla göstermektedir. Tutarlı değilse ikili kıyaslamalar tekrar gözden geçirilir. Ağırlık vektörü (W) ve karar matrisi (A) çarpılarak ağırlıklı toplam D vektörü elde edilir. Bu D vektörünün elemanlarının W ağırlık vektörü elemanlarına bölünmesiyle E vektörünün her bir değeri için Denklem 2'e göre  $e_1, e_2, e_3, \dots, e_m$  değerleri elde edilir.  $\lambda_{\max}$  buradaki e değerlerinin maksimum değeridir. Tutarlılık indeksinin (CI) formülü Denklem 3'te gösterilmiştir.

$$\text{Tutarlılık oranı (CR)} = \frac{\text{Tutarlılık İndeksi (CI)}}{\text{Rassal Tutarlılık İndeksi (RCI)}} < 0,1 \quad (1)$$

$$A \times W = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_m \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} d_1/w_1 \\ d_2/w_2 \\ \vdots \\ d_m/w_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\lambda_{\max} = \max(e_1, e_2, e_3, \dots, e_m) \quad e_1 = \frac{d_1}{w_1}$$

$$\text{Tutarlılık İndeksi (CI)} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (3)$$

L. Saaty tarafından alınan n kriter sayısı olmak üzere rassal alınan örneklemeler (100 den 1000 e kadar değişen) arasından belirlenen hata oranları olarak literatürde Random Consistency Index (RCI) olarak kabul gören değerlerdir (Donegan ve Dodd, 1991). Tutarlılık indeksleri Çizelge 1.'de gösterilmiştir.

**Çizelge 1.** Rassal Tutarlılık İndeksleri

*Table 1. Random Consistency Indexes*

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
RCI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56

Adım 5: Alternatifler, kriterler ve alt kriterler arasındaki ilişkilerin hesaplamaya dahil edilmesiyle üstünlük vektörlerinden oluşan bir kare matris olan ağırlıklandırılmamış süpermatris oluşturulur. Bu matrisin her bir sütun toplamı 1'e eşitlenerek ağırlıklandırılmış süper matris oluşturulur. Ağırlıklandırılmış süpermatrisin birçok üssü alınarak satırlarındaki değer sabit kalana kadar devam ettirilerek limit süpermatris elde edilir.

Adım 6: Limit süpermatris ile alternatiflere veya karşılaştırılan faktörlere ilişkin ağırlıklar belirlendikten sonra en yüksek ağırlığa sahip olan alternatif en iyi alternatif olarak belirlenir.

#### TOPSIS (TECHNIQUE FOR ORDER PREFERENCE BY SIMILARITY TO IDEAL SOLUTION)

1981 yılında Hwang ve Yoon tarafından geliştirilen pozitif ideal çözüme en yakın ve negatif ideal çözüme en uzak çözümü seçme hedefli yaklaşımdır (Hwang and Yoon, 1981). Bu yöntem ile alternatif seçeneklerin kriterlerin alabileceği maksimum ve minimum değerler arasında ideal çözüme uzaklıkları değerlendirilerek sıralandırma yapılır (Uyguntürk ve Korkmaz, 2012). TOPSIS yönteminde karar verici tarafından seçilen alternatif, ideal sonuca en yakın ve negatif-ideal sonuca en uzak olan alternatiftir (Özcan ve diğ., 2017). TOPSIS yöntemi adımları aşağıda gösterilmektedir.

Adım 1: Karar matrisi oluşturulduktan sonra matris normalize edilir. Karar matrisinin satırlarında üstünlükleri sıralanmak istenen alternatifler, sütunlarında ise karar vermede kullanılacak değerlendirme kriterleri yer alır.

Adım 2: Standart karar matrisi, karar matrisinin elemanlarından yararlanarak ve aşağıdaki Denklem 4 kullanılarak hesaplanır.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad i=1, \dots, m \quad j=1, \dots, n \quad (4)$$

$a_{ij}$  = Karar matrisinin elemanı  $r_{ij}$  = Standart karar matrisinin elemanları

Adım 3: Değerlendirme faktörlerine ilişkin ağırlık değerleri belirlendikten sonra her ağırlık değerleri standart karar matrisinin her bir sütunundaki değer ile çarpılarak Ağırlıklı Standart Karar Matrisi oluşturulur.

Adım 4: Ağırlıklandırılmış matriste her bir maksimum ve minimum değerler tespit edilerek İdeal ( $A^+$ ) ve Negatif İdeal ( $A^-$ ) çözümü belirlenir.

Adım 5: İdeal noktaların tanımlanmasının ardından maksimum ve minimum ideal noktalara olan uzaklık değerleri aşağıdaki Denklem 5 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (5)$$

$v_{ij}$  = Ağırlıklı standart karar matrisi elemanları

$v_j^+$  = Pozitif ideal çözüm setinde  $v_{ij}$  ağırlıklandırılmış değerlerin en büyüğü

$v_j^-$  = Negatif ideal çözüm setinde  $v_{ij}$  ağırlıklandırılmış değerlerin en büyüğü

Adım 6: Her bir karar noktasının ideal çözüme göreli yakınlığının hesaplanmasında ideal ve negatif ideal ayırım ölçülerinden yararlanılır. Burada kullanılan ölçüt, negatif ideal ayırım ölçüsünün toplam ayırım ölçüsü içindeki payıdır. İdeal çözüme göreli yakınlık değerinin hesaplanması aşağıdaki Denklem 6 yardımıyla gerçekleştirilmektedir.

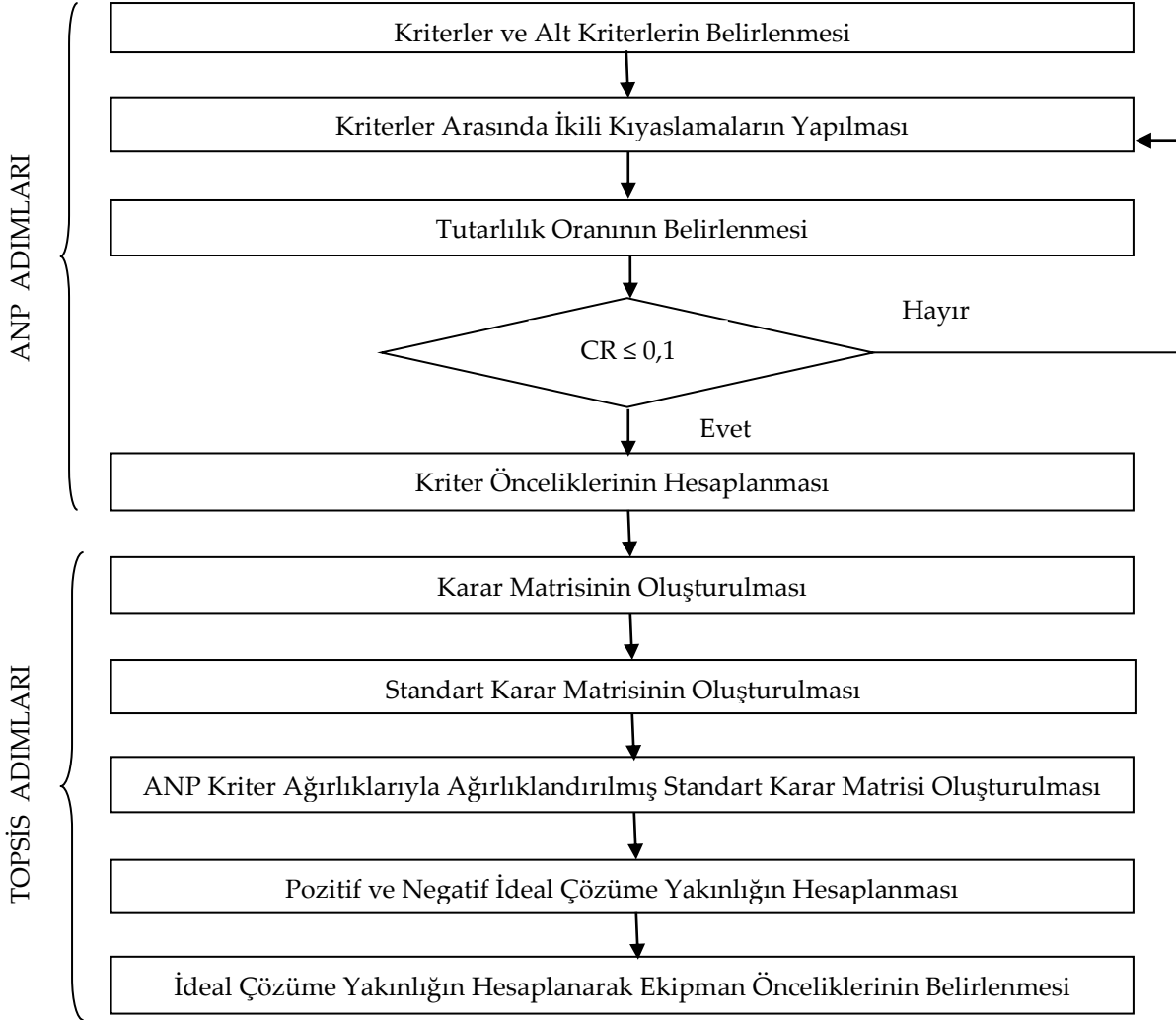
$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

Formüldeki  $C_i^+$  değeri  $0 \leq C_i^+ \leq 1$  aralığında değer almaktadır.  $C_i^+=1$  ilgili karar noktasının ideal çözüme,  $C_i^-=0$  ilgili karar noktasının negatif ideal çözüme mutlak yakınlığını göstermektedir. Son olarak elde edilen değerler, büyüklük sırasına göre dizilerek karar noktalarının (alternatiflerin) önem sıraları belirlenmektedir.

## UYGULAMA (CASE STUDY)

Türkiye’de sürdürülebilir ulaşım ve kalkınma planı hedefleri doğrultusunda Ankara metrosunda bulunan ağır raylı araç ekipmanları analiz edilmiştir. Araçlarda bulunan ekipmanların hepsi yabancı menşeli markadan ya da firmadan tedarik edilmektedir. Son yıllarda Metro filosuna dahil edilen CRRC Çin menşeli araçların yerlilik oranı %20’dir. Yerli pay belirlenmesiyle birlikte ekipman ve yedek parçalarının belli oranı Türkiye’de üretilmeye başlanmıştır. Ego Genel Müdürlüğü 2019 verilerine göre aylık 11-12 milyon yolcunun Ankara’da ağır ve hafif raylı sistemleri kullandığı düşünüldüğünde ekipman kullanımı daha da önem kazanmaktadır (Ego Genel Müdürlüğü, 2019). Ankara metrosunda toplam 55,8 km hat boyunca işletilen 108 tren seti bulunmaktadır. Araç tipine göre ekipmanların sayısı değişmektedir. Genel olarak bakıldığında bütün sistem açısından 28 ekipman bulunmaktadır. Ekipmanların büyük bir kısmı aylık olarak yıpranmadan ya da arızadan kaynaklı değişmektedir. Ancak tren işletmesinin ana kısmını oluşturan bakım için bu ekipman sayısı oldukça fazladır. Dolayısıyla Kalkınma planı, yerleştirme hedefleri ve bakım sistemi göz önünde tutularak 15 ana ekipman

belirlenmiştir. Literatür doğrultusunda raylı sistem işletme, hat ve bakım mühendislerinin uzman görüşleriyle 3 ana 7 alt kriter belirlenmiştir. Uygulamanın aşamaları Şekil 1. de gösterilmektedir.



Şekil 1. Uygulama Aşamaları

Figure 1. Application Steps

Ankara Metro işletmesinde mevcut CRRC (Çin), Bombardier (Kanada) olmak üzere iki araç tipi bulunmaktadır. Bu iki araç tipinin ekipmanlarının büyük çoğunluğu aynıdır ve aynı işlevi görmektedir. Bu çalışma işletmede kullanılan yeni CRRC trenleri üzerine yapıldığından bu tren ekipmanları üzerinden değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın konusu ekipman listesi Çizelge 2.'de gösterilmiştir.



**Çizelge 2.** Ekipman Listesi*Table 2. Equipment List*

Sıra	Ekipman Adı
1	Araç Gövde ve Donanımları
2	Araç İletişim Sistemi
3	Aydınlatma
4	Batarya Sistemi
5	CBTC Sinyalizasyon Sistemi
6	Elektrik Besleme Sistemi
7	Fren Sistemi ve Ekipmanları
8	HVAC Sistemi
9	Kabin Sinyal ve Kumanda Sistemi
10	Kapı Ekipmanları
11	Kollektör Ekipmanları
12	Kuplör Ekipmanları
13	Tahrik ve Motor Sistemi
14	Tekerlek Ekipmanları
15	Yolcu ve Sürücü Koltukları

### DEĞERLENDİRME KRİTERLERİ (EVALUATION CRITERIA)

Kalkınma planındaki hedefler temel alınarak raylı sistem ekipman yerleştirilmesi için öncelikle ekipmanların iyi analizi ve önceliklendirilmesi gereklidir. Ankara Metrosunda bulunan 28 ekipman öncelikle analiz edilip uzman kişilere (bakım, işletme ve hat bölümünde çalışan mühendisler) danışılarak literatür incelemesi sonucunda 3 ana ve 7 alt kriter belirlenmiştir. Kriterlerin açıklamaları aşağıda belirtilmiştir.

#### Çevresel Kriterler (Environmental Criteria)

Raylı sistem araç ekipmanları belgelendirme ve test, diğer ekipmanları etkileme düzeyi, güvenlik ve risk faktörü, teknik detay açısından değerlendirilmiştir. Ekipmanda belgelendirme ve test zorunluluk düzeyine, ekipmanların birbirleriyle etkileşim düzeylerine, ekipmanın güvenlik ve risk faktörü oluşturma düzeyine ve ekipmanın teknik açıdan karmaşıklık düzeyine göre 1 ile 9 arasında önem derecesi skalasıyla kıyaslanmıştır.

**Belgelendirme ve Test Gerekliği:** Ekipmanlar tedarik edilirken veya edildikten sonra ekipmanların istenilen düzeyde olup olmadığıyla ilgili uluslararası kabul görmüş sertifikalar ya da testler gereklidir.

**Diğer Ekipmanları Etkileme Düzeyi:** Trenlerde elektrik, elektronik ve mekanik sistemler birbiriyle etkileşimli çalıştığından dolayı bir ekipman diğer ekipmanları etkileyebilmektedir. Bir ekipmandaki arıza, ekipmanın tedariki gibi durumlar diğer ekipmanı da etkileyebilir.

**Güvenlik ve Risk Faktörü:** Günümüzde iş güvenliğine, olası arıza kaynaklı kaza durumuna önem verilmekte olduğundan trende bu tür kazaya sebebiyet verecek bir ekipman kontrolü işletme, iş ve işçi açısından önemlidir.

**Teknik Detay (Karmaşıklık seviyesi):** Ekipmanlardan bazılarının tedarik edilmesi veya montajı proje çizimi ya da mühendislik çalışması gibi ayrı bir çalışma gerektirmektedir.

#### Teknik Kriterler (Technical Criteria)

Ekipmanın yedek parçasının tedariki ya da dış kaynaktan kullanım gereksinimi ve ulaşım durumuna göre 1 ile 9 arasında önem skalasıyla kıyaslama yapılmıştır.

Yedek Parça Tedariği (Dış kaynak kullanım gereksinimi): Bir ekipmanın içeriğinde farklı ekipmanlar olabilmektedir. Dolayısıyla bu ekipmanın temin edilmesi içeriğinde var olan diğer ekipmanların temin edilmesiyle de ilişkidir.

Ulaşım: Her ekipmanın işletmeye, bakım yerine ulaştırılma durumu ekipmanların ağırlıkları, kapladığı alan farklı olduğundan birbirinden farklıdır.

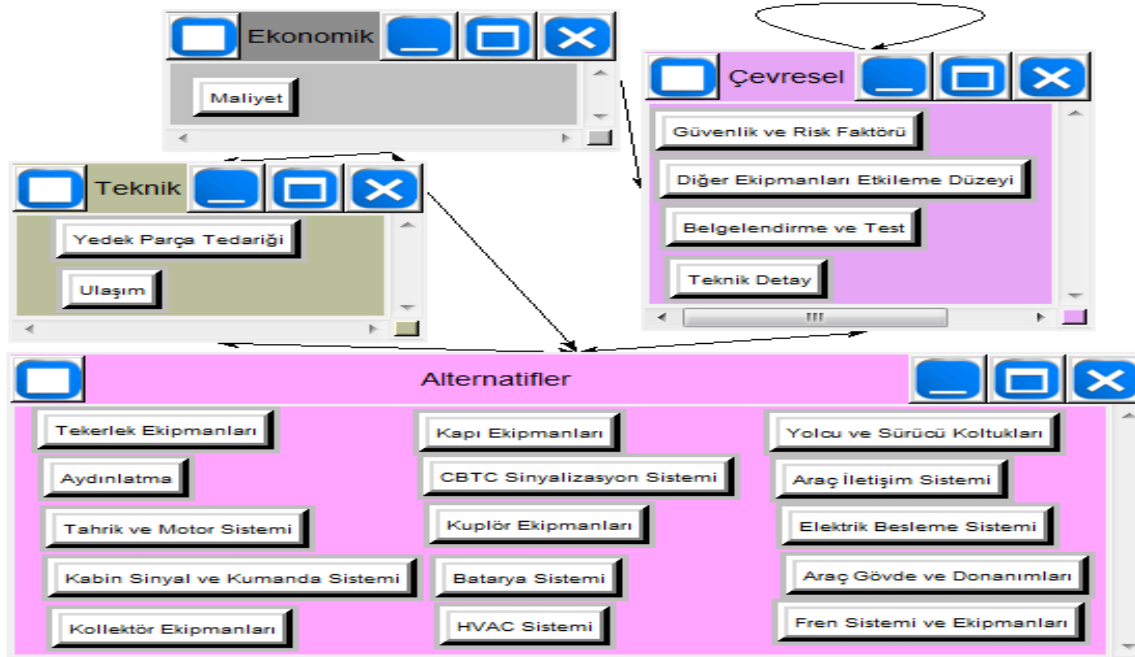
#### Ekonomik Kriter (Economic Criterion)

Ekipmanların işletme, bakım, işçilik ve stokta bekleme maliyetine göre 1 ile 9 arasında önem derecesi skalasıyla belirlenmiştir.

Maliyet (Sabit ve değişken maliyet): Ekipmanların tedarikine, ekipmanda kullanılan malzemelere, işçilik düzeyine ve stokta bekletilme durumuna göre maliyetleri değişmektedir.

#### KRİTERLERİN AĞIRLIKLANDIRILMASI (CRITERIA WEIGHTING)

Ekipmanlar teknik ve çevresel ana kriterlere ayrılarak 7 alt kriter belirlenmiştir. Ana kriterlere eşit ağırlık verilmiş, alt kriterler ikili olarak kıyaslanmıştır. Her bir alternatif için ikili karşılaştırma matrisini burada göstermek uzun olacağından (15 alternatifin sadece 7 kritere göre kıyaslanması 7 tane 5x5 boyutunda ikili karşılaştırma matrisi oluşturacağından) verilmemiştir. Ana ve alt kriterlerin de kendi içinde kıyaslaması düşünüldüğünde çok büyük matris boyutları ortaya çıkacaktır. Problemin şebeke yapısı Şekil 2. de gösterilmiş, çözüm için super decision paket programı kullanılmıştır.



Şekil 2. Şebeke Yapısı

Figure 2. Network Structure

ANP'de kriterlerin ağırlıklarına göre önem seviyelerine bakıldığında yedek parça tedariği 0,51152 ağırlıkla en önemli kriter olduğu görülmüştür. Daha sonra önem sırasını ulaşım 0,48848 ağırlıkla ulaşım ve 0,39900 ağırlıkla maliyet kriteri takip etmektedir. Şebeke yapısına göre ikili kıyaslama sonucu elde edilen kriterlerin ağırlıkları hesaplanmış ve hesaplama sonucundaki ağırlıklar Çizelge 3.'te gösterilmiştir.

**Çizelge 3. Kriter Ağırlıkları***Table 3. Criteria Weights*

Ana Kriterler	Alt Kriterler	Ağırlıklar
Teknik	Belgelendirme ve Test Gerekliliği	0,18958
	Diğer Ekipmanları Etkileme Düzeyi	0,17856
	Güvenlik ve Risk Faktörü	0,13801
	Teknik Detay	0,09486
Çevresel	Yedek Parça Tedariği	0,51152
	Ulaşım	0,48848
Ekonomik	Maliyet	0,39900

Çizelge 3'te Çevresel ve Ekonomik etkinin daha fazla çıkması ekipmanları oluşturan parçalara ihtiyaç duyulması halinde bunun temin edilmesi ve işletmeye ulaştırılmasıyla ilgilidir. Dolayısıyla yedek parça tedariğinin ve ulaşımın ağırlık değerinin fazla olması bu kriterlerin etki değerlerinin diğerlerinde fazla olduğunu göstermektedir.

#### **EKİPMANLARIN SIRALANMASI (RANKING THE EQUIPMENT)**

ANP hesaplaması sonucunda alternatifler arasından Tahrik ve Motor Sistemi 0,17997 ağırlık değeriyle en öncelikli yerleştirilmesi gereken ekipman olarak belirlenmiştir. Tahrik ve Motor Sisteminden sonra Elektrik Besleme Sistemi ekipmanı 0,10481 ağırlık değeriyle öncelikli yerleştirilmesi gereken ikinci ekipman olarak ön plana çıkmıştır.

Çizelge 4'te ANP yöntemine göre Tahrik ve motor sisteminin ilk sırada ve Elektrik besleme ve kuplör sisteminin ikinci sırada olması gerçek hayat problemi olarak düşünüldüğünde mantıklı sonuçlar verdiği görülmektedir. Tahrik ve motor sistemi tren hareketini sağlayan ana ekipmandır. Bunun karşılığını otobüs veya arabada motor olarak düşünüldüğünde önemi daha net anlaşılacaktır. Otobüste motor olmadan aracın hareket etmesi düşünülemezse tren için de aynı şekilde tahrik ve motor sistemi ana hareketi sağlayan ekipman olduğundan ANP sonucunda ilk sırada çıkmasının makul olduğu görülecektir. Elektrik besleme sistemi ekipmanı ise trenler elektrikle çalışan sistemler olduğundan elektriği aktaran ve dağıtımını sağlayan ekipman olarak düşünüldüğünde ikinci olması makuldür. Trenin hareketi için ana ekipman olan tahrik ve motor sistemine elektriği ulaştırması sadece trenin hareketi için yeterlidir. Kuplör ekipmanı trenlerin birbiriyle elektriksel veya iletişim bağlantısının sağlandığı birçok küçük elektronik bağlantısı bulunan bir ekipmandır. Alternatifler, ANP sonucunda belirlenen ağırlık değerleri ve hesaplanan ağırlıklara göre öncelik sırası Çizelge 4.'te gösterilmiştir.

**Çizelge 4.** ANP ile Öncelik Sıralaması*Table 4. Priority Ranking with ANP*

Alternatifler	Ağırlıklar	Öncelik Sırası
Tahrik ve Motor Sistemi	0.17997	1
Elektrik Besleme Sistemi	0.10481	2
Kuplör Ekipmanları	0.09786	3
Tekerlek Ekipmanları	0.09225	4
CBTC Sinyalizasyon Sistemi	0.09039	5
Fren Sistemi ve Ekipmanları	0.07560	6
Kollektör Ekipmanları	0.06307	7
HVAC Sistemi	0.04967	8
Kapı Ekipmanları	0.04700	9
Araç Gövde ve Donanımları	0.04314	10
Araç İletişim Sistemi	0.04131	11
Batarya Sistemi	0.03864	12
Kabin Sinyal ve Kumanda Sistemi	0.03302	13
Yolcu ve Sürücü Koltukları	0.02795	14
Aydınlatma	0.01530	15

ANP'de belirlenen Çizelge 4.'te gösterilen ağırlıklar TOPSIS yönteminde ağırlıklandırılmış karar matrisinde kullanılmıştır. İdeal ve Negatif İdeal çözüm kümeleri oluşturularak, bu kümelere yakınlıklar belirlenmiştir. TOPSIS yöntemi sonucuna göre ideal çözüme yakınlık ve buna göre ekipmanların öncelik sıralaması Çizelge 5.'te gösterilmiştir.

**Çizelge 5.** Alternatiflerin Sıralanması*Table 5. Ranking the Alternatives*

Alternatifler	İdeal Çözüme Yakınlık	Sıralama
Tahrik ve Motor Sistemi	0,935526	1
Tekerlek Ekipmanları	0,540436	2
Kuplör Ekipmanları	0,451110	3
CBTC Sinyalizasyon Sistemi	0,418380	4
Elektrik Besleme Sistemi	0,338343	5
Fren Sistemi ve Ekipmanları	0,337094	6
Kapı Ekipmanları	0,304578	7
Araç Gövde ve Donanımları	0,280944	8
HVAC Sistemi	0,278235	9
Kollektör Ekipmanları	0,205273	10
Kabin Sinyal ve Kumanda Sistemi	0,184678	11
Araç İletişim Sistemi	0,177366	12
Yolcu ve Sürücü Koltukları	0,165773	13
Batarya Sistemi	0,128596	14
Aydınlatma	0,009925	15

ANP yönteminin sonucunda Tahrik ve Motor Sistemi en öncelikli ekipman daha sonra önem derecesine göre sırasıyla tekerlek ekipmanları ve kuplör ekipmanları yerleştirilmesi gereken ekipman olarak belirlenmiştir. TOPSIS yöntemi sonucunda yerleşmesi gereken öncelikli ekipman, ideal uzaklığa

en yakın 0,935526 değeriyle Tahrik ve Motor Sistemi olarak belirlenmiştir. ANP ve TOPSIS yöntemlerinin sonuçları kıyaslandığında benzer önem sıralamasının olduğu görülmüştür. Burada önemli farklılığı oluşturan ekipmanlardan Elektrik besleme sistemi ANP’de 2. öncelikli ekipman sırasında olmasına rağmen TOPSIS’te bu sıraya tekerlek ekipmanları gelmiştir. Çizelge 5’te TOPSIS sonucu olarak tahrik ve motor sisteminin ilk çıkması ANP sıralamasında da açıklanmıştır. Ancak TOPSIS yönteminde ANP den farklı olarak, Çizelge 3’te belirtilen ANP’nin ağırlıkları kullanılarak ideal yakınlık, uzaklık değerlerine göre hesaplama yapılmıştır. Bu yöntemlerin birbirinden farklı hesaplama yöntemi olması; ANP ikili kıyaslama yöntemine göre ağırlıklandırılması, TOPSIS yönteminin ideal yakınlık-uzaklık değerlerine göre sıralama yöntemi ekipman sıralamalarının iki yöntemde birbirinden farklı sonuçlar olmasının ana sebebidir. Literatürde bu tür ikili yöntemlerin sıralamaları kıyaslandığında sıralama sonuçlarının farklılık gösterdiği görülmektedir. TOPSIS ve ANP yöntemlerinin sonuçlarına göre alternatiflerin önem sıralaması Çizelge 6.’da gösterilmiştir.

**Çizelge 6.** TOPSIS ve ANP Sonuçlarının Kıyaslaması

*Table 6. Comparison for TOPSIS and ANP Results*

<b>Alternatifler</b>	<b>TOPSIS Ekipman Sıralaması</b>	<b>ANP Ekipman Sıralaması</b>
Araç Gövde ve Donanımları	8	10
Araç İletişim Sistemi	12	11
Aydınlatma	15	15
Batarya Sistemi	14	12
CBTC Sinyalizasyon Sistemi	4	5
Elektrik Besleme Sistemi	5	2
Fren Sistemi ve Ekipmanları	6	6
HVAC Sistemi	9	8
Kabin Sinyal ve Kumanda Sistemi	11	13
Kapı Ekipmanları	7	9
Kollektör Ekipmanları	10	7
Kuplör Ekipmanları	3	3
Tahrik ve Motor Sistemi	1	1
Tekerlek Ekipmanları	2	4
Yolcu ve Sürücü Koltukları	13	14

## SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATION)

Türkiye’de sürdürülebilirlik ve 11. Kalkınma planında belirlenen hedefler doğrultusunda raylı sistem araç ve ekipmanlarının yerleştirilmesi sosyal ve ekonomik gelişme açısından önem arz etmektedir. Yerleştirme hedeflerine ulaşabilmek için öncelikle yerleştirilmesi gereken araç ve ekipmanların önem dereceleri belirlenmelidir. Yerleştirmede hangi raylı sistem ekipmanının öncelikli olarak üretileceğini belirlemek ve buna göre yatırımlar yapmak, yapılacak yatırımların atıl kalmamasını ayrı maliyet faktörü oluşturmamasını sağlayacaktır. Ekipmanların öncelik sıralarını belirlemek için kullanılabilir birçok yöntem bulunmaktadır. Çok kriterli karar verme yöntemleri bu tür çoktan seçimli sıranın belirlenmesinde çok fazla kullanılan ve etkin sonuçlar veren yöntemlerden birisi olduğundan tercih edilmiştir. Bu çalışmada, yukarıda belirtilen hedeflere ulaşmak için yapılması gereken temel çalışmalardan birisi olarak ekipmanların yerleştirme sırasına bir çözüm önerisi getirmiştir.

Literatür araştırması ve sektörde aktif olarak devam eden uzman görüşleri neticesinde teknik ve çevresel olarak 3 ana kriter 7 alt kriter belirlenmiştir. ANP ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak elde edilen

sonuçlar birbiriyle kıyaslanmış tutarlı sonuç verdiği görülmüştür. Ekipmanların öncelik sıralarına göre yerleştirme hedefine ulaşmada Tahrik ve Motor Sistemi öncelikli yerleştirilmesi gereken ekipman olarak belirlenmiştir. Tahrik ve Motor Sistemi raylı araçların çalışabilmesi ve işletilebilmesi için temel görev ekipmanlarından biridir. Dünyada ve Türkiye’de tarihsel sürece baktığımızda genel olarak ilk üretilen ekipmanlardan birisi Tahrik, Motor ya da Cer sistemidir. Aynı zamanda bakımı ve maliyeti de ciddi bir yük oluşturan Tahrik ve Motor Sistemi ekipmanı bu maliyeti ve yükü ortadan kaldırmada temel önem sırasında başı çekmesinin makul olduğu görülmektedir. Elektrik sistemi ekipmanı ANP’de 2. öncelikli olmasına rağmen TOPSIS’de tekerlek ekipmanları 2. öncelik sırasında yer almıştır. Bu farklılığın ana sebebi kriterlerin ANP ve TOPSIS hesaplama yöntemi farklılığından kaynaklanmaktadır. ANP, kriterler arasındaki ilişkileri ve hiyerarşik yapıyı belirleme ve hesaplamada, TOPSIS ise alternatiflerin ideal çözüme uzaklıklarını, önceliklerini ve sıralamasını belirlemede etkin ve gerçek hayata daha yakın sonuçlar veren yöntemlerdir. Dolayısıyla ANP-TOPSIS yönteminin yerleştirme öncelik sırasının belirlenmesinde ve yerleştirme alternatiflerinin değerlendirilmesinde, analiz edilmesinde yöntem olarak ANP’ye göre daha makul ve tutarlı sonuç verdiği söylenebilir. Teknik olarak değerlendirildiğinde tekerlek ekipmanı elektrik sistemine göre öncelikli yerleştirilmesi gereken ekipman olması daha mantıklı görünmektedir. Tekerlek ekipmanı trenin işletilmesini sağlayan ana ekipmanlardan birisidir. Tekerlek ekipmanı, sürekli işletilmesinden kaynaklı düzenli olarak bakım yapılması ve satın alınması gereken ekipmanlardandır. Tekerlek ekipmanında işletilmesinden kaynaklı belli zaman sonra aşınma oluşmakta ve tolerans değerlerinin dışına çıkmaktadır. Tolerans değerlerinin dışına çıktığında ya aşınmanın mekanik işlemle giderilmesi ya da değişmesi gerekmektedir. Elektrik sistemi ekipmanlarında ise her ne kadar belli aralıklarla kontrolü ve bakımı gerekse bile başka ekipmandan kaynaklı sıra dışı bir arıza olmadığı müddetçe kullanım süresi daha uzun olabilmektedir.

Literatür araştırması neticesinde raylı sistem ekipman önceliklendirilmesi ve yerleştirmeye ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. Literatürde konuyla ilgili ilk olacak çalışmanın 11.kalkınma hedeflerine, bunla ilgili gelecek çalışmalara ön ayak olacağı ve ekonomik, sosyal, kalkınma ve stratejik planlara konu oluşturacağı düşünülmektedir.

#### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- Ankara Büyükşehir Belediyesi EGO Genel Müdürlüğü, Raylı Sistemler 2019 İstatistikleri, <https://www.ego.gov.tr/dosya/indir/18516.pdf>, Ziyaret tarihi: 14 Kasım 2019.
- Awasthi, Anjali, Satyaveer S. Chauhan, and Hichem Omrani., 2011, "Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems.", *Expert systems with Applications* 38.10, 12270-12280.
- Baştürk, G., 2014, "Kent içi raylı toplu taşıma sistemleri incelemesi ve dünya örnekleri ile karşılaştırılması." Ulaştırma Haberleşme Uzmanlığı Tezi.
- Cürebal A., Eren T., Özcan E.C., 2019, "Solutions of technology manager selection problem with ANP and PROMETHEE methods", *International Conference on Data Science, Machine Learning and Statistics – Van*, 26-28 June, 171-173.
- Demir A., 2015, "Raylı sistem araçlarında milli marka oluşturma yaklaşımı", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul.
- Donegan, H. A., and F. J. Dodd., 1991, "A note on Saaty's random indexes." *Mathematical and computer modelling* 15.10: 135-137.
- Eren, T., and Gencer, M.A., 2016, "Ankara metrosu M1 (Kızılay-Batıkent) hattı hareket saatlerinin çizelgelenmesi." *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4.2.
- Evelin K., Djordjević B., 2018, "An Evaluation of Indicators of Railway Intelligent Transportation Systems using the Group Analytic Hierarchy Process.", *Electronics Science Technology and Application* 4.2.

- Hamurcu M., Eren T., 2018, "Prioritization of high-speed rail projects.", *International Advanced Researches and Engineering Journal* 2.2, 98-103.
- Hwang, C. L., and Yoon, K. S., 1981, "Multiple attribute decision making: Methods and applications", New York: Springer-Verlag.
- Karadere M., Kantarcı M., 2015, "Raylı Sistem Araçları Cer Motorlarının Dizayn Parametrelerinin Belirlenmesi Ve Yerli İmalat İmkanlarının Araştırılması", Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu.
- Krmaç, Evelin, and Boban Djordjević., 2017, "An evaluation of train control information systems for sustainable railway using the analytic hierarchy process (AHP) model.", *European Transport Research Review* 9.3, 35.
- Nalcioğlu H., 2016, "Lean Six Sigma Based Methodology For The Localization Of Material Supply: An Application In Steel Industry", Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- Özcan, E.C., Avşar Özcan N., Eren T., 2017, "Selection of the solar power plants with CSP technologies by combined ANP-PROMETHEE approach", *Başkent University Journal of Commercial Sciences*, 1(1), 18-44.
- Özcan E.C., Danışan T., Eren T., 2019, "Hidroelektrik santrallerin en kritik elektriksel ekipman gruplarının bakım stratejilerinin optimizasyonu için matematiksel bir model önerisi.", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 25.4, 498-506.
- Özcan, E.C., Demirelli B., Özder E.H., Eren, T., 2018, "Hidroelektrik santrallarda ana sistemlerin yerleştirilmesi problemi için analitik ağ süreci ile öncelik analizi", *Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi, Kırıkkale ve İstanbul Kültür Üniversitesi, Ürgüp, Nevşehir*, 5-8 Temmuz, 680-683.
- Özcan E.C., Ünlüsoy S., Eren T., 2017, "ANP ve TOPSIS Yöntemleriyle Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Yatırım Alternatiflerinin Değerlendirilmesi", *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5.2, 204-219.
- Paasha M., 2014, "Extortion in the oil states: Nationalization, regulatory structure, and corruption.", UCLA manuscript.
- Pektaş İ., 2019, "Raylı Ulaşım Sistemleri Sektör Analizi", Anadolu Raylı Ulaşım Sistemleri Kümelenmesi (ARUS), <https://www.anadoluraylisistemler.org/content/upload/document-files/rayli-sistemler-sektor-an-20190722120532.pdf>, Ziyaret Tarihi: 17.09.2020
- Pektaş, İlhami, Anadolu Raylı Ulaşım Sistemleri Kümelenmesi, 2017, "Raylı Ulaşım Sistemleri Sektör Analizi 2017."
- Saaty, T. L., 1980, "The Analytic Hierarchy Process", USA: Mcgraw-Hill International Book Company.
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2019-2023 11.Kalkınma planı, <http://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2019/07/OnbirinciKalkinmaPlani.pdf>, Ziyaret tarihi: 8 Ekim 2019.
- Uyguntürk, H., Korkmaz, T., 2012, "Finansal Performansın TOPSIS Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi İle Belirlenmesi: Ana Metal Sanayi İşletmeleri Üzerine Bir Uygulama", *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, 7(2), 95-115.
- Zaliaeva, A. F., 2016, "Nationalization of key production assets of core Russian industries as a fuzzy-logic scientific task.", 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), IEEE.



## EARLY DETECTION OF ALZHEIMER'S DISEASE USING DATA MINING: COMPARISON OF ENSEMBLE FEATURE SELECTION APPROACHES

Selim BUYRUKOĞLU

Çankırı Karatekin University, Computer Engineering Department, Çankırı, TURKEY  
[sbuyrukoglu@karatekin.edu.tr](mailto:sbuyrukoglu@karatekin.edu.tr)

(Geliş/Received: 04.05.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 29.09.2020)

**ABSTRACT:** Early Alzheimer's disease detection has become an important research area for many years. Various studies in the field of Alzheimer's disease detection have focused on applying individual feature selection methods. In addition to individual feature selection methods, the ensemble feature selection approach has become a creative field. It advocates the combination of the ranked features from various feature selection methods to obtain better results than the current approaches. Thus, this study aims to build a predictive model for early diagnosis of Alzheimer's disease using the ensemble feature selection approaches. Also, Alzheimer's disease dataset consists of three target classes: Normal (CN), Mild Cognitive Impairment (MCI) and Alzheimer's disease (AD). In this study, homogeneous and heterogeneous ensemble approaches have been applied in the feature selection process. Two feature subsets are created based on these ensemble feature selection approaches. A predictive model for early diagnosis of Alzheimer's disease has been build applying Random Forest, Artificial Neural Network, Logistic Regression, Support Vector Machine, and Naïve Bayes data mining algorithms. The predictive model uses the two feature subsets applying these algorithms separately. Then, the performance results are compared to determine which ensemble feature selection approach performs better than the other. This study revealed that better performance result is provided applying Random Forest algorithm with feature subset obtained using the heterogeneous ensemble feature selection approach (91%).

**Key Words:** Alzheimer's disease prediction, Heterogeneous, Random forest, Data mining, Early diagnosis

### Veri Madenciliği Kullanılarak Alzheimer Hastalığının Erken Tespiti: Topluluk Özellik Seçim Yaklaşımlarının Karşılaştırılması

**ÖZ:** Erken Alzheimer hastalığı tespiti uzun yıllardır önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Alzheimer hastalığı tespiti alanında yapılan çeşitli çalışmalar, bireysel özellik seçme yöntemlerini uygulamaya odaklanmıştır. Bireysel özellik seçme yöntemlerine ek olarak, topluluk özellik seçme yaklaşımı yaratıcı bir alan haline gelmiştir. Bu yaklaşım, mevcut yaklaşımlardan daha iyi sonuçlar elde etmek için çeşitli özellik seçim yöntemlerinden sıralanan özelliklerin kombinasyonunu savunur. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, topluluk özellik seçim yaklaşımlarını kullanarak Alzheimer hastalığının erken teşhisi için bir öngörücü model oluşturmaktır. Ayrıca, Alzheimer hastalığı veri seti üç hedef sınıftan oluşur: Normal (CN), Hafif Bilişsel Bozukluk (MCI) ve Alzheimer hastalığı (AD). Bu çalışmada, özellik seçim sürecinde homojen ve heterojen topluluk yaklaşımları uygulanmıştır. Bu topluluk özellik seçim yaklaşımlarına dayanarak iki özellik alt kümesi oluşturulmuştur. Rastgele Orman, Yapay Sinir Ağı, Lojistik Regresyon, Destek Vektör Makinesi ve Naïve Bayes veri madenciliği algoritmaları uygulanarak Alzheimer hastalığının erken teşhisi için bir tahmin modeli oluşturulmuştur. Bu tahmin modeli yukarıda bahsedilen algoritmaları her iki özellik alt kümesini de ayrı ayrı kullanarak bir tahminde bulunmuştur. Ardından, hangi topluluk özellik seçim yaklaşımının diğerinden daha iyi performans gösterdiğini belirlemek için performans sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, heterojen topluluk özellik seçim yaklaşımı



kullanılarak elde edilen özellik altkümesi ile Rastgele Orman algoritması uygulanarak daha iyi performans sonucunun sağlandığını ortaya koymuştur (% 91).

**Anahtar Kelimeler:** Alzheimer hastalığı tahmini, Heterojen, Rastgele orman, Veri madenciliği, Erken tanı

## 1. INTRODUCTION

Alzheimer's disease (AD) is widespread worldwide and is usually seen in elderly people (Stamps *et al.*, 2010). It is possible to reduce the number of AD as a result of early and accurate detection (Lee *et al.*, 2019). Chaves *et al.*, (2013) points out that almost half of the early AD diagnoses are incorrect, and also the number of AD or a kind of dementia in the world is nearly forty-four million. Recently, researchers have investigated a variety of data mining methods to accomplish early and accurate AD detection (Zhang *et al.*, 2017; Supekar *et al.*, 2008; Farhan *et al.*, 2014; Dallora *et al.*, 2017). Classification can be defined as a function that is used to assign items to target classes. One could say that early detection is a classification problem. The overall structures of the prediction systems take the patient data as an input and then the systems provide output to determine whether the patient is Normal (CN), Mild Cognitive Impairment (MCI) or Alzheimer's disease (AD). If the output for a patient is recognised as MCI, then this means that early detection of AD is achieved in this study. However, the prediction systems have produced mostly biased classification results which are higher for the majority of the class. (Khan and Usman, 2019). Thus, the major objective of this study is to build an early and accurate AD detection model using the dataset of Alzheimer's disease. The dataset consists of three target classes: Normal (CN), Mild Cognitive Impairment (MCI) and Alzheimer's disease (AD).

Numerous studies have attempted to detect AD applying data mining methods (Williams *et al.*, 2013; Bhagyashree *et al.*, 2018; Shankle *et al.*, 1997; Chen and Herskovits, 2010; Klöppel *et al.*, 2008; Zhang and Shen, 2011; Khazaei *et al.*, 2016; Wee *et al.*, 2013). Williams *et al.*, (2013) implemented four models to predict clinical diagnosis. These models are SVM, DT, ANN, and NB. Missing values have been replaced with mean values, and, Williams *et al.*, (2013) found that NB shows the most accurate result on the prediction of clinical diagnosis. Bhagyashree *et al.*, (2018) has compared the NB, J48, and RF to detect dementia. Bhagyashree's *et al.*, (2018) comparative study has revealed that J48 provides the least accuracy in detecting. A study carried out by Maroco *et al.*, (2011) examined the performance of different models (SVM, RF, RBF neural networks and MLP neural network etc.) in the prediction of AD. The study demonstrated that RF performs strong accuracy and sensitivity. DT and NB have been identified as the two most effective methods for AD detection by Shankle *et al.*, (1997). Elsewhere, a different research has developed a model for predicting AD using 24 various neuropsychology attributes is a comparative study (Bhagyashree and Sheshadri, 2014). Four different methods have been compared using these attributes, and the research highlighted that NB is better in all. Machine learning methods (SVM, NB, DT, and MLP) and statistical methods (logistic regression and discriminant analysis) have been compared in a different study on MRI images (Chen and Herskovits, 2010). Similarly, Klöppel *et al.*, (2008) used MRI images for early AD detection with SVM in their study. Different studies also examined the performance of different models, and each of them obtained the highest accuracy results on AD detection with SVM (Zhang and Shen, 2011; Khazaei *et al.*, 2016; Wee *et al.*, 2013).

In different studies, Naïve Bayes (Nunes *et al.*, 2013), Logit Boost (Munteanu *et al.*, 2015), Support Vector Machines (Liu *et al.*, 2014; Moradi *et al.*, 2015; Maroco *et al.*, 2011; Zhao and He, 2014; Westman *et al.*, 2012), and Deep learning (Moradi *et al.*, 2015; Jo *et al.*, 2019) methods have also been used in early detection of AD. However, several important limitations need to be considered and four of them will be presented in this study. First of all and the most important limitation lies in the fact that these studies used feature selection methods neglecting rich attributes (Wordoffa and Wangoria, 2012; Escudero *et al.*, 2013). The second limitation is that datasets consist of missing values (Campos *et al.*, 2015). Thirdly, small sample sizes have been a serious limitation for many studies (Supekar *et al.*, 2008; Bookheimer *et al.*, 2000). Finally, much of the current literature on AD detection pays particular attention to evaluate the measurement of the accuracy of the classifiers while neglecting sensitivity and Area Under the Curve AUC (Zhang *et al.*,

2017). A prediction model is considered efficient if it provides satisfactory sensitivity and AUC rates (Huang *et al.*, 2017).

In addition to data mining methods, feature selection is also an important process in the prediction systems and plays a key role in the evaluation measure of the systems, such as accuracy, time and cost etc. (Seijo-Pardo *et al.*, 2017). The feature selection methods use variable ranking techniques to select the highly ranked features which make an important contribution to the performance of the prediction systems (Sana *et al.*, 2019). Feature selection methods can be divided into three main categories: filter, wrapper, and embedded methods (Seijo-Pardo *et al.*, 2017). Note that fast evaluation functions are used in filter-based methods. Additionally, this approach requires fewer computational resources than wrapper based methods (Seijo-Pardo *et al.*, 2017). On the other hand, the embedded methods can be seen as the intermediate of the others. The filter-based methods are chosen for this study because there are important advantages, such as the computational cost, fast evaluation functions, and independence of specific learners (Trambaiolli *et al.*, 2019).

It has been specified in the previous paragraphs that the performance of a model is dependent on the dataset and features used in the model. Although various feature selection methods are proposed in the literature, there appears to be some agreement by researchers that there are no ideal feature selection methods in the literature. The ensemble approaches have been applied to this situation, and therefore this (current) study concentrates on the two kinds of ensemble approaches, namely homogeneous and heterogeneous (Hand, 2007). The application of these ensemble approaches aims to determine highly ranked features to early AD detection and to compare these approaches in terms of performance evaluation. In a homogeneous approach, the same feature selection method is applied for generated models, but different training data need to be used for each model. That is, the number of models depends on the used different training data. The same feature selection method is executed to obtain highly ranked features and then these features are combined through a combination method. In contrast to the homogeneous approach, models are formed using more than one (various) feature selection method with the same training data in the heterogeneous approach. The process of the combination of the obtained features is the same as a homogenous approach.

To overcome the aforementioned limitations, an early AD detection model using data mining based on ensemble approaches has been proposed. The objectives of this study based on the factor are listed below.

- a. To determine the significant feature selection methods based on the filter approach.
- b. To create different feature sets applying the determined feature selection methods.
- c. To create models using the feature sets based on the homogeneous and heterogonous ensemble. In this sense, two different feature sets are created (one for each approach).
- d. To compare the models' performances in terms of accuracy, sensitivity, AUC.

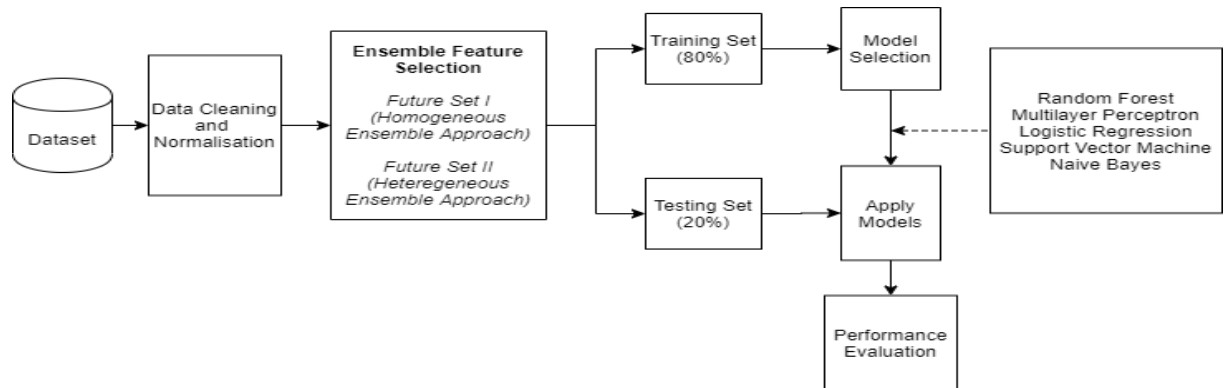
Although all the previously mentioned studies achieve to predict AD so far, they do suffer from several drawbacks. A serious drawback with some of these studies is that the dataset did not pre-processed. In this case, models' performances are negatively affected since they take unnecessary data, garbage, and noise values into account. On the other hand, if the dataset has been pre-processed, complexity would be reduced while the good results would be obtained with higher accuracy. An arguable weakness is that to the best of our knowledge, these two homogeneous and heterogonous ensemble feature selection approaches have never been compared in terms of evaluation measure in a single study for the early AD detection. Thus, this study aims to build a predictive model for early diagnosis of Alzheimer's disease comparing the ensemble feature selection approaches. These studies would have been more useful if researchers had focused on both approaches. The reason for this is that different feature sets would be obtained applying both homogeneous and heterogeneous approaches, and then different models could be built based on the feature sets. At the end of this argument, model performance could be compared to decide which approach is better. This study has proposed a predictive model of AD based on the drawbacks presented in the light of the above.

The structure of the paper is as follows: the next section introduces material and method which

can be listed under two headings: dataset and system framework. Section 3 presents results and discussion and the final section provides conclusions and outlines the potential for future work in this area.

## 2. MATERIAL AND METHOD

This section may be divided into six subsections: the dataset, data cleaning and transformation, ensemble feature selection, sizes of training and testing sets, model selection and application, and also performance evaluation. Figure 1 presents the framework of early Alzheimer's Disease prediction.



**Figure 1.** Framework of AD prediction

### 2.1. Dataset

Dataset was obtained from the Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative (ADNI) database (adni.loni.usc.edu). It was established in 2003 and its main goal was to measure the proceeding of early Alzheimer's disease (AD) and Mild Cognitive Impairment (MCI) of patients. Table 1 illustrates the details of the dataset used in this study. The baseline combined dataset consisted of 819 instances, 229 is CN, 402 MCI, and 188 AD. The sample size used in this study (819) is adequate to obtain reliable results. The third limitation mentioned in Section 1 is overcome using a large sample size.

**Table 1.** Dataset used in this study

Data Set (Baseline combined data)			Number of Instances	Number of Attributes		Number of Classes
				Raw Dataset	After Cleaning Process	
CN	MCI	AD	819	113	35	3
229	402	188				

The raw dataset consists of 113 attributes which include both 57 attributes are double recorded and 21 attributes include more than 50% missing value. The 78 (57+21) attributes have been considered as unnecessary data in the current study. On the other hand, the rest of the 35 attributes have been used for the objectives of this study. More information about whether the attributes are continuous or discrete is presented in Table 3.

### 2.2. Data cleaning and normalization

During the process of data cleaning, 57 unnecessary data, garbage, and noise values has been

removed from the dataset as highlighted in Section 3.1. Additionally, 21 attributes including more than 50% missing value were removed from the dataset. Thus, the second limitation mentioned in Section 1 is eliminated without using redundant missing values. The main motivation for removing these attributes was to obtain correct classification and unbiased results. After applying this process, the rest of the data (35 attributes) consists of enough quality content to meet the demands of this study. In other words, rich attributes have been used in this study, and so the first limitation mentioned in Section 1 section is eliminated. On the other hand, if the attributes include more than 50% missing value, mean imputation method, where the missing observations are replaced by the mean of the available cases, is applied. The data were normalized using z-score normalization which means that values of attributes ranged from 0 – 1 (Little and Rubin, 2019).

### 2.3. Ensemble feature selection

Ensemble feature selection approach advocates the output combination of various feature selection methods to obtain the most appropriate feature set; it enables researchers to get better results than the output which has been generated from any single model. As explained in the introduction, this study uses the homogeneous and heterogeneous approaches applying the filter-based methods. The methods order all features using feature selection methods and then rank them based on their importance. However, threshold values should be particularly used before the ranked features are combined. Note that highly ranked features are used in models enabling significant results.

Two different models have been created based on the homogeneous and heterogeneous ensemble approaches. Most popular feature selection methods were chosen in filter-based methods. In this study, the total number of used feature selection methods for both the models are four, namely Gain Ratio, ReliefF, Chi-Square, and Fast Correlation Based Filter (FCBC). In Gain Ratio, a feature value is evaluated measuring the gain ratio (Kumar and Vanaja, 2014). Also, it is a modified version of the information gain which aims to reduce its bias. A feature score is calculated for each feature to rank and select the highest features by ReliefF. Additionally, an instance from the dataset is randomly sampled and then its nearest neighbour is determined from the same and different class (Tang *et al.*, 2014; Kumar and Vanaja, 2014). Chi-square is a key method for categorical features, and also Chi-square is calculated between each feature and the target to select the top features (Kumar and Vanaja, 2014). FCBC is used to find a set of principles features for the class conception (Aldehim, 2015).

Moreover, a small case study has been carried out on choosing feature selection methods. The detail of this case study is specified below.

- Model 1 (Homogeneous Ensemble): Training data is divided into four main parts based on the homogeneous ensemble approach, each of which has the same size. In a case study, various feature selection methods (Gain Ratio, ReliefF, Chi-Square, and FCBC) were applied to the dataset to obtain an optimal method. Chi-Square feature selection method was chosen for this model (Model 1) based on the case study result. That is, this model provided the best accuracy result using the attributes which are ranked from the Chi-Square. Then, from each part, the top 25% of the features were selected and combined. Note that different threshold values (10%, 25% and 50%) were applied to obtain the best feature set. The best result was achieved from the feature set created with the 25% threshold value.

- Model 2 (Heterogamous Ensemble): These four feature selection methods are used in this model. In the same vein, the reason for choosing the methods is that this model provided the best accuracy result using the attributes which are ranked from the Gain Ratio, ReliefF, Chi-Square, and FCBC, respectively. As in Model 1, the top 25% of the features were selected providing from each feature selection method and then they were combined. Then, Feature Set II was formed which is presented in Table 3.

To conclude, models 1 and 2 have been built based on homogeneous and heterogeneous approaches. The threshold value is set as 25% in these models which means the top 25% of the most applicable features are selected. The selected features are shown in Table 3.

## 2.4. Determining the size of training and testing set

Dataset is divided depending on the holdout method into a training and testing set (Bookheimer *et al.*, 2000). In the literature, many researchers agreed that 20% of the dataset (as a testing set) is enough to reach reliable results (Huang *et al.*, 2017; Seijo-Pardo *et al.*, 2017). Additionally, a small case study was carried out by taking different sizes data set such as 60%/40%, 70%/30%, and 80%/20% applying RF and SVM methods. As a result, the size of training and testing set to obtain the best result was to 80%/20%. Therefore, the prediction model has been built by taking these sizes.

## 2.5. Model selection and performance evaluation

To date, various data mining methods have been used to measure early AD detection. In this study, a comparative analysis has been done with well-known methods using Orange Data Mining platform (<https://orange.biolab.si/>). Naïve Bayes, SVM, Multilayer Perceptron (MLP), Random Forest, and Logistic Regression are one of the most widely used methods on early AD detection (Khan and Usman, 2019; Seijo-Pardo *et al.*, 2017; Bansal *et al.*, 2018; Farid *et al.*, 2020). The rest of this section provides brief information on the chosen methods (Vapnik, 1995; Patel *et al.*, 2015; Balakrishnan and Puthusserypady, 2005; Patil and Shimpi, 2011).

- Naïve Bayesian classifier: This classifier is used for probabilistic learning in machine learning. It provides high accuracy results when features are independent (Patel *et al.*, 2015).
- Support Vector Machines (SVM): Its main purpose is to simplify the data and provide more understandable information to the user. Support Vector Machines are used to separate the data of the two classes in the most appropriate way (Patel *et al.*, 2015).
- Random Forest (RF): The main process with this algorithm is that it creates a great number of decision trees based on the random selection of data and variables. Individually created decision trees compose decision forest. Results are obtained during the creation of decision forests that are combined for the latest estimates (Patel *et al.*, 2015).
- Logistic Regression: It has been used to classify data based on historical data. This regression aims to determine a relationship between historical and output data and finally makes a prediction of the probabilities of events (Muralidharan *et al.*, 2018).
- Multilayer Perceptron: MLP consists of one input layer, one or more hidden layers, and one output layer. The information in the input layer is transmitted to the output of the network by processing each cell individually (Patel *et al.*, 2015; Muralidharan *et al.*, 2018).

The results are evaluated with unseen data (20% - testing set). The evaluation metrics in this study are Accuracy, Sensitivity, Specificity, and Area under the curve (AUC). Moreover, this study evaluates the threshold factor for the prediction of AD on the models. This study also compares the current models and the proposed model in terms of Accuracy, Sensitivity, and Specificity. Table 2 provides information on the terms used to define sensitivity, specificity, and accuracy. Accuracy, sensitivity, and specificity are described in terms of TP, TN, FN, and FP as follows.

- Accuracy =  $(TN + TP)/(TN+TP+FN+FP)$
- Sensitivity =  $TP/(TP + FN)$
- Specificity =  $TN/(TN + FP)$

**Table 2.** Terms used to define sensitivity, specificity, and accuracy

Outcome of the diagnostic test	Positive	Negative	Row Total
Positive	TP	FP	TP+FP (Total number of subjects with a positive test)
Negative	FN	TN	FN + TN (Total number of subjects with negative test)
Column total	TP+FN (Total number of subjects with the given condition)	FP+TN (Total number of subjects without given condition)	N = TP+TN+FP+FN (Total number of subjects in study)

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Obtaining of feature sets

Table 3 presents the results obtained from the homogeneous and heterogeneous ensemble feature selection approaches. As was mentioned in Section 3.3, Gain Ratio, ReliefF, Chi-Square, and FCBC are feature selection methods in the ranking of features with a 25% threshold value. While Chi-Square has been used on both homogeneous and heterogeneous approaches, ReliefF, Gain Ratio, and FCBC have been used on only a heterogeneous approach. In Table 3, continuous and discrete attributes are represented by 'C' and 'D' signs respectively.

**Table 3.** Feature subsets based on the ensemble approaches

Ensemble Approach	Ranker Feature (Selection Method)	Threshold Value	Ranking Combination (Ranking of Features)
Homogenous	Chi-Square	25%	<b>CDRSB (D), ADAS11 (C), ADAS13 (C), MMSE (D), RAVLT perc. Forgetting (C), FAQ (C), AGE (C), SITE (D), PTGENDER (D)</b>
Heterogeneous	ReliefF Gain Ratio Chi-Square FCBF	25%	<b>CDRSB (D), MMSE (D), APOE4 (D), ADAS13 (C), RAVLT forgetting (D), ADAS11 (C), RAVLT immediate (C), EXAM DATE (C), PTMARRY (D), RAVLT perc. Forgetting (C)</b>

Abbreviations: CDRSB, Clinical Dementia Rating Sum of Boxes; ADAS, Alzheimer's disease assessment scale; MMSE, Mini-Mental Scale Examination; RAVLT, Rey Auditory Verbal Learning Test; FAQ, Functional Assessment Questionnaire; PTGENDER, participant's gender; APOE4, APOE e4 allele; PTMARRY, participant's marital status.

Before applying these ensemble feature selection approaches to the ADNI dataset (see Table 1 for detail), there were 35 features are available after the data cleaning process. Nine and ten features were selected after applying homogeneous and heterogeneous approaches respectively. Also, note that five features were mutual for both approaches which are signalled by the words in bold in Table 3.

#### 3.2. Comparison of classification accuracy

For this study, the RF, ANN, LR, SVM, and NB algorithms were used to classify ADNI dataset.

Table 4 provides information on the measurement of these algorithms. The used feature selection methods have been highlighted in the previous section. Firstly, classification accuracy has been measured without feature selection. Then, the accuracy has been measured again with feature subsets I and II, respectively. In other words, the classification algorithms are compared by non-applied and applied (homogeneous and heterogeneous ensemble) feature selection approaches. The classification accuracy was performed according to the sizes of training (80%) and testing (20%) set. From Table 4 we can see that the highest classification accuracy result is obtained applying the Random Forest algorithm with feature set II (heterogeneous ensemble feature selection approach). In addition to this, Table 5 depicts the evaluation measure for this study in terms of Precision, Sensitivity, Specificity, and Area under the curve (AUC). This study provides information on AUC values (see Table 5) of algorithms in opposition to current studies presented in Section 1. Thus, the fourth limitation mentioned in Section 1 is overcome.

**Table 4.** Comparison of classification accuracy based on ensemble approaches

Classification Algorithm	Classification Accuracy (%)	Accuracy after Feature Selection (%)	
		Feature Set I (Chi-Square)	Feature Set II (Relif, Gain Ratio, Chi-Square)
Random Forest	0.83	<b>0.88</b>	<b>0.91</b>
Multilayer Perceptron	0.71	0.82	0.87
Logistic Regression	0.61	0.78	0.81
SVM	0.74	0.85	0.86
Naïve Bayes	0.70	0.82	0.83

**Table 5.** Evaluation of applied ensemble approaches for Alzheimer dataset

Ensemble Approach	Classification Algorithm	Precision (%)	Sensitivity (%)	Specificity (%)	AUC (%)
Homogenous (Feature Set I)	RF	<b>0.88</b>	<b>0.88</b>	<b>0.90</b>	<b>0.91</b>
	MLP	0.83	0.82	0.82	0.83
	LR	0.78	0.79	0.79	0.81
	SVM	0.85	0.85	0.88	0.90
	NB	0.82	0.82	0.86	0.89
Heterogeneous (Feature Set II)	RF	<b>0.91</b>	<b>0.91</b>	<b>0.92</b>	<b>0.94</b>
	MLP	0.87	0.87	0.90	0.92
	LR	0.81	0.82	0.84	0.88
	SVM	0.87	0.87	0.90	0.92
	NB	0.83	0.84	0.89	0.91

From the data in Table 5, it is apparent that the Random Forest algorithm (heterogeneous ensemble feature selection approach) performs better than the other algorithms on early AD prediction. These findings help us to highlight that a heterogeneous ensemble feature selection approach provides significantly better results than the homogeneous ensemble feature selection approach. This approach can be considered helpful for the people studying Alzheimer's Data in the early AD prediction.

### 3.3. Comparison of previous studies and the proposed model

Table 6 compares the results obtained from the previous studies and the proposed model for early detection of Alzheimer's disease, MCI diagnosis, and CN. The purpose of the studies is the same as our study. Zhang and Shen, (2011) applied the Support Vector Regression (SVR) algorithm to early AD detection and achieved 85% accuracy. However, they did not provide any information for sensitivity and specificity. On the other hand, the study of Khazaee *et al.* (2016) provided a higher accuracy value (87%), but the used data set was small (168 instances). Additionally, the used feature selection methods are

presented in Table 6. The study of Wee *et al.*, (2013) presented the best result applying the SVM algorithm with Support Vector Machine Recursive Feature Elimination (SVM-RFE) on the classification accuracy (92%).

**Table 6.** Comparisons of the proposed model and previous studies

REF (Authors)	Target	Best Classifier	Data set Sample	ACC (%)	Sen (%)	Spe (%)	FSM
Zhang and Shen, 2011	CN, MCI, AD	SVR	42 CN, 99 MCI, 51 AD	85	-	-	MTFS
Ahmed <i>et al.</i> , 2015	CN, MCI, AD	SVM	162 CN, 210 MCI, 137 AD	84	79	88	-
Zhang <i>et al.</i> , 2015	CN, MCI, AD	SVM	97 CN, 57 MCI, 24 AD	81	-	-	PCA
Quintana <i>et al.</i> , 2012	CN, MCI, AD	ANN	346 CN, 79 MCI, 97 AD	66	-	-	-
Khazaei <i>et al.</i> , 2016	CN, MCI, AD	SVM	45 CN, 89 MCI, 34 AD	87	-	-	SFS
Suk <i>et al.</i> , 2015	CN, MCI, AD	SVM	52 CN, 99MCI, 51 AD	55	-	-	LBFS
Lama <i>et al.</i> , 2017	CN, MCI, AD	SVM	70 CN, 74 MCI, 70 AD	77	62	79	PCA
Tong <i>et al.</i> , 2017	CN, MCI, AD	PCA+RELM	35 CN, 37 AD, 75 MCI	60	-	-	-
Cuingnet <i>et al.</i> , 2011	CN, MCI, AD	SVM	81 CN, 68 AD, 104 MCI	87	91	95	V_Std & V_Com
Teipel <i>et al.</i> , 2007	CN, MCI, AD	Logistic regression	18 CN, 32 AD, 24 MCI	83	88	78	PCA
Wee <i>et al.</i> , 2013	CN, MCI, AD	SVM	200 CN, 198 AD, 200 MCI	92	90	94	SVM-RFE
Proposed Model (Heterogeneous Feature Set II)	CN, MCI, AD	RF	229 CN, 402 MCI, 188 AD	91	91	92	HEFS

\*ACC: Accuracy, Sen: Sensitivity, Spe: Specificity, FSM: Feature Selection Method, MTFS: Multi-Task Feature Selection, PCA: Principal Component Analysis, SFS: Sequential Forward Selection, Lasso-Based Feature Selection, V\_Std: Voxel-STAND, V\_Com: Voxel-COMPARE, SVM-RFE: Support Vector Machine Recursive Feature Elimination, HEFS: Heterogeneous Ensemble Feature Selection

As shown in Table 6, the authors obtained the best results in their studies mostly using the SVM algorithm. In the current study, the proposed early AD detection model obtained better results applying the RF algorithm with a heterogeneous ensemble feature selection approach. We believe that a heterogeneous ensemble feature selection approach plays an important role in obtaining the highest measurement results.

#### 4. CONCLUSIONS

The use of data mining methods has increased to provide prediction models in recent years in various areas such as health, education, and real estate, etc. Datasets may consist of many features, but it may also contain unnecessary data, garbage, and noise values. Features can be chosen using significant feature selection methods to build a well predictive model. The reason for this is that all feature selection methods cannot take into account important features to enhance the predicting process. Note that significant features are used to build well predictive models that help healthcare professionals to treat



patients.

A reasonable approach to tackle this issue could be to describe different feature selection approaches. In this case, a predictive model has been built based on two different ensemble feature selection approaches, namely homogeneous and heterogeneous. Features were ranked using various feature ranking methods and then the ranked different features were combined to obtain different feature subsets applying a threshold value (25%). In this case, two different feature subsets were obtained based on the homogeneous and heterogeneous approaches. Five different data mining methods applied to the feature subsets and then their performances were compared to reveal which approach is better on the early AD detection. This study revealed that the best classification accuracy is obtained by applying the Random Forest algorithm with feature set generating from the heterogeneous approach. Overall, these results indicate that ensemble feature selection approaches enable them to obtain significant performance comparison.

Our future research will be about the combination of different data mining methods to improve classification accuracy applying the heterogeneous approaches.

## REFERENCES

- Ahmed O.B., Mizotin, M., Benois-Pineau, J., Allard, M., Catheline, G., Amar, C. B., Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative., 2015, "Alzheimer's disease diagnosis on structural MR images using circular harmonic functions descriptors on the hippocampus and posterior cingulate cortex", *Computerized Medical Imaging and Graphics*, Vol. 44, pp. 13-25.
- Aldehim, G., 2015, *Heuristic ensembles of filters for accurate and reliable feature selection*, Doctoral dissertation, University of East Anglia.
- Balakrishnan, D., Puthusserypady, S., "Multilayer perceptrons for the classification of brain-computer interface data", *In Proceedings of the IEEE 31st Annual Northeast Bioengineering Conference*, 118-119, 2005.
- Bansal, D., Chhikara, R., Khanna, K., Gupta, P., 2018, "Comparative analysis of various machine learning algorithms for detecting dementia", *Procedia computer science*, 132, 1497-1502.
- Bhagyashree, S.R., Nagaraj, K., Prince, M., Fall, C.H., Krishna, M., 2018, "Diagnosis of Dementia by Machine learning methods in Epidemiological studies: a pilot exploratory study from south India", *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology*, Vol. 53, No. 1, pp.77-86.
- Bhagyashree S.R., Sheshadri H.S., "An initial investigation in the diagnosis of Alzheimer's disease using various classification techniques", *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*, 2014.
- Bookheimer, S.Y., Strojwas, M.H., Cohen, M.S., Saunders, A.M., Pericak-Vance, M.A., Mazziotta, J.C., Small, G. W., 2000, "Patterns of brain activation in people at risk of Alzheimer's disease", *New England journal of medicine*, Vol. 343, No. 7, pp.450-456.
- Campos, S., Pizarro, L., Valle, C., Gray, K.R., Rueckert, D., Allende, H., "Evaluating Imputation Techniques for Missing Data in ADNI: A Patient Classification Study", *In Iberoamerican Congress on Pattern Recognition*, 3-10, November 2015.
- Chaves, R., Ramírez, J., Gorriz, J. M., 2013, "Integrating discretization and association rule-based classification for Alzheimer's disease diagnosis", *Expert Systems with Applications*, Vol. 40, No. 5, pp.1571-1578.
- Chen, R., Herskovits, E.H, 2010, "Machine-learning techniques for building a diagnostic model for very mild dementia", *Neuroimage*, Vol. 52, No. 1, pp.234-244.
- Cuingnet, R., Gerardin, E., Tessieras J., Auzias, G., Lehéricy, S., Habert, M.O., Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative, 2011, "Automatic classification of patients with Alzheimer's disease from structural MRI: a comparison of ten methods using the ADNI database," *NeuroImage*, Vol. 56, No. 2, pp.766-781.
- Dallora, A.L., Eivazzadeh, S., Mendes, E., Berglund, J., Anderberg, P., 2017, "Machine learning and microsimulation techniques on the prognosis of dementia: A systematic literature review", *PloS*

- one, Vol. 12, No. 6.
- Escudero, J., Ifeachor, E., Zajicek, J.P., Green, C., Shearer, J., Pearson, S, 2013, "Machine learning-based method for personalized and cost-effective detection of Alzheimer's disease", *IEEE transactions on biomedical engineering*, Vol. 60, No. 1, pp.164-168.
- Farhan, S., Fahiem, M.A., Tauseef, H., 2014, "An Ensemble-of-Classifiers Based Approach for Early Diagnosis of Alzheimer's Disease: Classification Using Structural Features of Brain Images", *Computational and mathematical methods in medicine*.
- Farid, A.A., Selim, G., Khater, H., 2020, "Applying Artificial Intelligence Techniques to Improve Clinical Diagnosis of Alzheimer's disease".
- Hand, D.J., 2007, "Principles of data mining", *Drug Safety*, 30(7), 621-622. Vol. 30, No. 7, pp.621-622.
- Huang, M., Yang, W., Feng, Q., & Chen, W., 2017, "Longitudinal measurement and hierarchical classification framework for the prediction of Alzheimer's disease". *Scientific reports*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-13.
- Jo, T., Nho, K., Saykin, A.J., 2019, "Deep Learning in Alzheimer's disease: Diagnostic Classification and Prognostic Prediction using Neuroimaging Data", *Frontiers in aging neuroscience*, Vol. 11, pp.272.
- Khan, A., Usman, M., 2019, "Alzheimer's Disease Prediction Model Using Demographics and Categorical Data", *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, Vol. 15, No. 15, pp.96-109.
- Khazaei, A., Ebrahimzadeh, A., Babajani-Feremi, A., 2016, "Application of advanced machine learning methods on resting-state fMRI network for identification of mild cognitive impairment and Alzheimer's disease", *Brain imaging and behavior*, Vol. 10, No. 3, pp.799-817.
- Klöppel, S., Stonnington, C.M., Chu, C., Draganski, B., Scahill, R. I., Rohrer, J.D., Frackowiak, R.S., 2008, "Automatic classification of MR scans in Alzheimer's disease", *Brain*, Vol. 131, No. 3, pp.681-689.
- Kumar, K.R., Vanaja, S., 2014, "Analysis of feature selection algorithms on classification: a survey".
- Lama, R.K., Gwak, J., Park, J.S., Lee, S.W., 2017, "Diagnosis of Alzheimer's disease based on structural MRI images using a regularized extreme learning machine and PCA features", *Journal of healthcare engineering*.
- Lee, G., Nho, K., Kang, B., Sohn, K.A., Kim, D, 2019, "Predicting Alzheimer's disease progression using multi-modal deep learning approach", *Scientific reports*, Vol. 9, No. 1.
- Little, R.J., Rubin, D.B., 2019, "Statistical analysis with missing data ", *John Wiley & Sons*, Vol. 793.
- Liu, S., Liu, S., Cai, W., Pujol, S., Kikinis, R., Feng, D., "Early diagnosis of Alzheimer's disease with deep learning", *IEEE 11th international symposium on biomedical imaging (ISBI)*, 1015-1018, 2014.
- Maroco, J., Silva, D., Rodrigues, A., Guerreiro, M., Santana, I., de Mendonça, A., 2011, "Data mining methods in the prediction of Dementia: A real-data comparison of the accuracy, sensitivity and specificity of linear discriminant analysis, logistic regression, neural networks, support vector machines, classification trees and random forests", *BMC research notes*, Vol. 4, No. 1, pp.299-
- Moradi, E., Pepe, A., Gaser, C., Huttunen, H., Tohka, J., 2015, "Machine learning framework for early MRI-based Alzheimer's conversion prediction in MCI subjects", *Neuroimage*, Vol. 104, pp. 398-412.
- Munteanu, C.R., Fernandez-Lozano, C., Abad, V.M., Fernández, S.P., Álvarez-Linera, J., Hernández-Tamames, J.A., Pazos, A., 2015, "Classification of mild cognitive impairment and Alzheimer's Disease with machine-learning techniques using 1 H Magnetic Resonance Spectroscopy data", *Expert Systems with Applications*, Vol. 42, No. 15, pp.6205-6214.
- Muralidharan, S., Phiri, K., Sinha, S.K., Kim, B., 2018, "ANALYSIS AND PREDICTION OF REAL ESTATE PRICES: A CASE OF THE BOSTON HOUSING MARKET", *Issues in Information Systems*, Vol. 19, No. 2, pp. 109-118.
- Nunes, C., Silva, D., Guerreiro, M., de Mendonça, A., Carvalho, A. M., Madeira, S. C., "Class Imbalance in the Prediction of Dementia from Neuropsychological Data", *In Portuguese Conference on Artificial Intelligence, Springer Berlin Heidelberg*, 138-151, 2013.
- Patel, J., Shah, S., Thakkar, P., Kotecha, K., 2015, "Predicting stock and stock price index movement using trend deterministic data preparation and machine learning techniques", *Expert Systems with Applications*, Vol. 42, No. 1, pp. 259-268.

- Patil, V., Shimpi, S., 2011, "Handwritten English character recognition using neural network", *Elixir Comput Sci Eng*, Vol. 41, pp. 5587-5591.
- Quintana, M., Guàrdia, J., Sánchez-Benavides, G., Aguilar, M., Molinuevo, J.L., Robles, A., Fernández, M., 2012, "Using artificial neural networks in clinical neuropsychology: High performance in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease", *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, Vol. 34, No. 2, pp. 195-208.
- Sana, B., Siddiqui, I.F., Arain, Q. A., 2019, "Analyzing Students' Academic Performance through Educational Data Mining", *3c Tecnología: glosas de innovación aplicadas a la pyme*, Vol. 8, No. 29, pp. 402-421.
- Seijo-Pardo, B., Porto-Díaz, I., Bolón-Canedo, V., Alonso-Betanzos, A., 2017, "Ensemble feature selection: homogeneous and heterogeneous approaches", *Knowledge-Based Systems*, Vol. 118, pp. 124-139.
- Shankle, W.R., Mani, S., Pazzani, M.J., Smyth, P., "Detecting very early stages of dementia from normal aging with machine learning methods", *In Conference on Artificial Intelligence in Medicine in Europe Springer, Berlin, Heidelberg*, 71-85, 1997.
- Stamps, J.J., Bartoshuk, L.M., Heilman, K.M., 2013, "A brief olfactory test for Alzheimer's disease", *Journal of the neurological sciences*, Vol. 333, No. 1-2, pp. 19-24.
- Suk, H.I., Lee, S.W., Shen, D., 2015, "Latent feature representation with stacked auto-encoder for AD/MCI diagnosis.", *Brain Structure and Function*, Vol. 220, No. 2, pp. 841-859.
- Supekar, K., Menon, V., Rubin, D., Musen, M., Greicius M.D., 2008, "Network analysis of intrinsic functional brain connectivity in Alzheimer's disease", *PLoSComputBiol*, Vol. 4, No. 6, pp. 1-11.
- Tang, J., Alelyani, S., Liu, H., 2014, "Feature selection for classification: A review.", *Data classification: Algorithms and applications*, 37.
- Teipel, S.J., Born, C., Ewers M. 2007, "Multivariate deformation based analysis of brain atrophy to predict Alzheimer's disease in mild cognitive impairment", *NeuroImage*, Vol. 38, No. 1, pp. 13-24.
- Tong, T., Gray, K., Gao, Q., Chen, L., Rueckert, D., 2017, "Multi-modal classification of Alzheimer's disease using nonlinear graph fusion", *Pattern recognition*, Vol. 63, pp. 171-181.
- Trambaiolli, L.R., Spolaôr, N., Lorena, A.C., Anghinah, R., Sato, J.R., 2019, "Feature selection before EEG classification supports the diagnosis of Alzheimer's disease", *Clinical Neurophysiology*, 128(10), 2058-2067. Vol. 128, No. 10, pp. 2058-2067.
- Vapnik, V.N., 1995, "The Nature of Statistical Learning", *Theory*.
- Wee, C.Y., Yap, P.T., Shen, D., 2013, "Prediction of Alzheimer's disease and mild cognitive impairment using cortical morphological patterns", *Human Brain Mapping*, Vol. 34, No. 12, pp. 3411-3425.
- Westman, E., Muehlboeck, J.S., Simmons, A., 2012, "Combining MRI and CSF measures for classification of Alzheimer's disease and prediction of mild cognitive impairment conversion.", *Neuroimage*, Vol. 62, No. 1, pp. 229-238.
- Williams, J.A., Alyssa W., Diane J.C, Maureen S., "Machine learning techniques for diagnostic differentiation of mild cognitive impairment and dementia.", *In Workshops at the Twenty-Seventh AAAI Conference on Artificial Intelligence*, pp.71-76, 2013.
- Wordoffa, H., Wangoria, E., 2012, "Alzheimer's Disease Stage Prediction using Machine Learning and Multi-Agent System".
- Zhang, R., Simon, G., Yu, F, 2017, "Advancing Alzheimer's research: A review of big data promises", *International Journal of medical informatics*, Vol. 106, pp. 48-56.
- Zhang D, Shen D, 2011, "Multi-modal multi-task learning for joint prediction of multiple regression and classification variables in Alzheimer's disease", *NeuroImage*, Vol. 59, No. 2, pp. 895-907.
- Zhang, Y., Wang, S., Phillips, P., Dong, Z., Ji, G., Yang, J., 2015, "Detection of Alzheimer's disease and mild cognitive impairment based on structural volumetric MR images using 3D-DWT and WTA-KSVM trained by PSOTVAC", *Biomedical Signal Processing and Control*, Vol. 21, pp. 58-73.
- Zhao, Y., He, L., "Deep learning in the EEG diagnosis of Alzheimer's disease. In Asian Conference on Computer Vision", Springer International Publishing, pp. 340-353, November 2014.



## FREN DİSK-BALATA MEKANİZMASININ ÜÇ BOYUTLU GERİLME ANALİZİ

Mehmet Nurullah BALCI

<sup>1</sup>Hacettepe University, Department of Mechanical Engineering, Beytepe Campus, Ankara, TURKEY  
[mehmetbalci@hacettepe.edu.tr](mailto:mehmetbalci@hacettepe.edu.tr)

(Geliş/Received: 18.04.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 09.10 2020)

**ÖZ:** Bu çalışmada bir otomobil disk fren mekanizması için üç boyutlu termoelastik gerilme analizi yapılmıştır. Disk/balata çifti için silindirik koordinatlarda ısı iletim denklemi türetilmiştir. Isı iletim denklemini balata ve disk için çözebilmek için sınır ve ilk şartlar belirlenmiştir. Balata ve disk arasındaki sürtünme katsayısı sıcaklığa ve zamana bağlıdır. Sıcaklığa ve zamana bağlı sürtünme katsayısını dikkate almak için termal analizde iteratif bir yöntem geliştirilmiştir. Hareket denklemi türetilmiş, sabit hızda giden aracın frenleme anından itibaren doğrusal olmayan şekilde yavaşlayarak durma anına ulaştığı görülmüştür. Sıcaklığın artması sürtünme katsayısında azalmaya ve durma zamanında artışa sebep olmuştur. Balata ve disk arasında sürtünme nedeniyle oluşan toplam ısı akısı hesaplanmıştır. Isı akısı balata ve disk yüzeylerine ısı paylaşım oranı düşünülerek uygulanmıştır. Silindirik koordinatlarda termoelastik gerilme-gerinim bağıntıları türetilmiştir. Bu bağıntıların denge denklemi içerisine konulması ile birlikte Navier denklemleri elde edilmiştir. Isı iletim ve Navier denklemlerinin hesaplamalı olarak çözülebilmesi için sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Disk/balata çifti için sıcaklık dağılımları ve eşdeğer von-Mises gerilmeleri hesaplanmıştır. Frenleme basıncının ve balata fiziksel özelliklerinin disk/balata fren mekanizmasında oluşan sıcaklık ve eşdeğer gerilme değerlerine olan etkileri incelenmiştir. Sonuçlar balata malzemesi özelliklerinin disk/balata çifti için sıcaklık ve gerilmeleri dikkate değer ölçüde etkilediğini göstermiştir. Isı iletim katsayısı, yoğunluğu ve ısı kapasitesi yüksek olan bir balata malzemesi kullanımı disk üzerindeki gerilmeleri azaltarak aşınma ve kırılma gibi durumların önlenmesinde önemli rol oynayabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Disk-balata mekanizması, Sürtünme ısı üretimi, Sonlu Elemanlar Analizi, Sıcaklık dağılımı, von-Mises gerilmesi.

### Three Dimensional Stress Analysis of a Brake Disc-Pad Mechanism

**ABSTRACT:** In the present study, three-dimensional thermoelastic stress analysis is carried out for the automobile disc brake mechanism. Heat conduction equation is derived at cylindrical coordinate system for the disc/pad couple. In order to solve the heat conduction equation for the pad and disc, boundary and initial conditions are specified. The coefficient of friction between the pad and disc is temperature and time dependent. In order to take into account temperature and time dependent coefficient of friction, iterative method is developed in thermal analysis. Equation of motion is derived and it is observed that vehicle travelling at constant speed reaches the moment of stop with decelerating nonlinearly. Total heat flux due to the friction between pad and disc is calculated. Heat flux is applied to the surface of the pad and the disc considering heat partition ratio. Thermoelastic stress-strain relations are derived at cylindrical coordinates. Navier equations are obtained by substituting these relations into equations of equilibrium. In order to solve the heat conduction and Navier equations computationally, the finite element method is used. Temperature distributions and equivalent von-Mises stresses for the disc/pad couple are calculated. Influences of brake pressure and physical properties of the pad upon the values of temperature and equivalent stress are examined. Results indicate that properties of pad material lead to remarkable

influence on temperature and stress for disc/pad couple. Utilization of pad material with high conductivity, density and specific heat capacity may play a significant role on avoiding wear and fracture situations by reducing stresses on the disc.

**Key Words:** *Disc-pad mechanism, Frictional heat generation, Finite Element Analysis, Temperature distribution, von-Mises stress.*

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Disk fren sistemleri araçların seyir halindeki güvenliği açısından önemli bir makine elemanıdır. Bu tip fren sistemlerinin performansı balata-disk yüzeyi arasındaki temas şartlarına oldukça bağlıdır. Sürücünün fren pedalına basması ile fren hidroliği kaliper pistonuna aktararak balatanın disk yüzeyine bir baskı kuvveti ile teması sonucu sürtünmeli baskılama sağlanır. Bu kaymalı temasta, balata ve disk arasındaki sürtünme kuvveti diskin bağlı bulunduğu rotorun dönme hareketini yavaşlatmaya başlar. Aracın kinetik enerjisi ısı enerjisine dönüştürülür ve bu ısının büyük kısmı fren balatası ve disk tarafından emilir (Söderberg ve Andersson, 2009). Frenleme sırasında ısıya dönüşen mekanik enerji kaymalı sürtünmeye maruz balata ve diskte sıcaklık yükselmesine sebep olur (Mahmoudi ve diğ., 2015). Fazla yüklenmiş sürtünme çiftleri çoğu zaman müsaade edilen maksimum sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Bu termal deformasyonlara, sürtünme katsayısında dalgalanmalara, fren kayıpları oluşmasına, aşırı aşınmalara ve termal çatlak oluşumlarına sebep olabilmektedir (Yevthusenko ve Grzes, 2014). Choi ve Lee (2004) homojen ve Karbon-Karbon kompozit disk fren için sürtünme ısısı üretimi olan zamana bağlı termoelastik temas problemini iki-boyutta sonlu elemanlar analizi kullanarak incelemiş, tekrarlanan frenleme için sürtünme yüzeylerinde basınç ve sıcaklık dağılımları ile oluşan termoelastik kararsızlık olgusunu çalışmasında sunmuştur. Cho ve Ahn (2002) bir fren diski için zamana bağlı termoelastik analizi Fourier dönüşümü tekniği ve sonlu elemanlar metodu kullanarak gerçekleştirmiştir. Grzes (2014) tekil bir frenleme anında fren diski üzerinde oluşan sıcaklık değerlerini frenleme basıncının temas alanında uniform olduğunu kabul ederek sonlu elemanlar metodu vasıtası ile bulmuştur.

Wolff (2010) fren balataları için günümüzdeki termal analiz modelleme yaklaşımlarını araştırmış, bu yaklaşımların bir-boyutlu modeller, iki-boyutlu modeller ve daha karmaşık olan üç-boyutlu modeller kullanılarak yapıldığını belirtmiştir. Zhu ve diğ. (2009) acil bir frenleme anında fren balatasında üç-boyutlu zamana bağlı sıcaklık dağılımını çözmek için sonlu elemanlar metodu, yaklaşık integral metodu, Green fonksiyonları metodu, Laplace dönüşüm metodu ve İntegral dönüşüm metodu üzerine odaklanmıştır. İntegral dönüşüm metodunun diğer yöntemlere göre daha doğru ve güvenilir sonuçlar ürettiğini belirtmişlerdir. Disk/balata fren sistemleri için disk üzerinde oluşan sıcaklık dağılımları ve araç durma mesafesi sürtünme ve aşınma katsayılarının sıcaklığa bağlı fonksiyonlar ile modellenmesiyle bulunmuştur (Yevtushenko ve Grzes, 2012; Yevtushenko ve diğ., 2013; Yevtushenko ve Grzes, 2014; Yevtushenko ve Grzes, 2015). Zamana bağlı farklı sürtünme gücü profillerinin fren diski ve balata üzerindeki sıcaklık dağılımına etkisi Yevtushenko ve diğ. (2019) tarafından analitik olarak araştırılmış, kesin çözümler Duhamel teorisi kullanılarak üretilmiştir. Yevtushenko ve diğ. (2018) değişen zamana bağlı sürtünme gücü profillerine maruz fren disk/balata çiftinde termal gerilme dağılımlarını incelemek için analitik bir yöntem geliştirmiş, farklı zamana bağlı sürtünme gücü profillerinin fren diskinin sürtünme yüzeyi üzerinde çekme yönünde gerilmelere neden olduğu ve çevresel yönde oluşan çekme gerilmelerinin termal mikro çatlaklara yol açtığı sonucuna varmıştır.

Üç boyutta tekil frenleme için aşınma ve sürtünme ısı dinamiği denklemlerinin sonlu elemanlar metodu ile çözümü Grzes (2018) tarafından sunulmuş, temas yüzeyindeki pürüz etkisi de dikkate alınmıştır. Akhtar ve diğ. (2013) bir debriyaj sistemi için zamana bağlı sürtünme ısısı içeren termoelastik analizleri kuru sürtünme kabulü ile sonlu elemanlar metodu kullanarak gerçekleştirmiş, elde edilen temas yüzeyi basıncını, ısı akısını ve yüzey sıcaklıklarını sunmuştur. Grzes (2019) tekrar eden frenleme uygulamalarında fren diskinde görülen maksimum sıcaklığın bulunabilmesi için zamana bağlı eksenel-simetrik bir disk/balata modeli geliştirmiş, bu modeli sonlu elemanlar metodu kullanarak çözmüştür. Katı

model veya havalandırma kanalcıklarına sahip homojen veya homojen olmayan fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeden (FDM) imal edilmiş fren disklerinde termal veya termoelastik analizler sonlu elemanlar metodu kullanılarak birçok araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiştir (Söderberg ve Andersson, 2009; Shahzamanian ve diğ., 2010a; Shahzamanian ve diğ., 2010b; Adamowicz ve Grzes, 2011; Tehrani ve Talebi, 2012; Belhocine ve Bouchetara, 2012a; Belhocine ve Bouchetara, 2012b; Belhocine ve Bouchetara, 2013; Narayana ve diğ., 2014; Mahmoudi ve diğ., 2015; Belhocine ve diğ., 2014; Belhocine ve diğ., 2016; Belhocine, 2017).

Fren diskleri için yeni malzemelerin test edilmesi ve fren performanslarının yapılması araştırmacılar için önemli bir konudur. Karbon-Karbon (C-C) kompozit fren diskleri geliştirilmiş malzeme performansına sahip olduklarından uçak fren disklerinde, roket uçlarında ve hızlı tren frenlerinde kullanım alanı bulabilmektedir (Choi ve Lee 2004). Karbon-Karbon (C-C) kompozit malzemelerin termofiziksel özelliklerinin tahmini ve bu malzemelerin fren diskinde kullanılmasının değerlendirilmesi üzerine çoklu ölçekte modelleme tekniği Guo ve diğ. (2020) tarafından sunulmuştur. Balata malzemesi özelliklerinin fren performansına etkisi de araştırılmıştır. Palmiye çekirdeği kabuğu tabanlı frenleme balatalarının termal kalitesini arttırmak için termal gerilme davranışı benzetimleri kullanan Matlab ortamında yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir (Fono-Tamo, 2018). Yeni tasarlanan balata malzemelerinin sürtünme performansı Liew ve Nirmal (2013) tarafından incelenmiş, sürtünme katsayısı ve aşınma katsayıları farklı hız ve temas basıncı değerleri için sunulmuştur. Frenleme sırasında oluşan sürtünme kaynaklı ısı nedeniyle rotor yüzeyi ile rotor içerisi arasında sıcaklık farkı meydana gelir. Yüzey, iç kısımlara göre oldukça fazla ısınır ve ısınan yüzey iç bölgelere göre daha fazla genişir. Soğuma sırasında rotor yüzeyinde ısıl büzülme oluşur ve basma yönünde plastik deformasyon oluşabilir. Bunun sonucunda rotor içerisinde çekme gerilmeleri oluşur ve bu yüzey çatlaklarını meydana getirir. Bu olayın birçok kez tekrar etmesi oluşan çatlakların ilerlemesine yol açar. Bu nedenle, frenlemenin ilk evresinde yüzey ve iç bölgeler arasındaki sıcaklık farkını düşürmek yüzey çatlaklarının oluşumunun engellenmesi için verimli bir yol olarak düşünülebilir (Jimbo ve diğ. 1990).

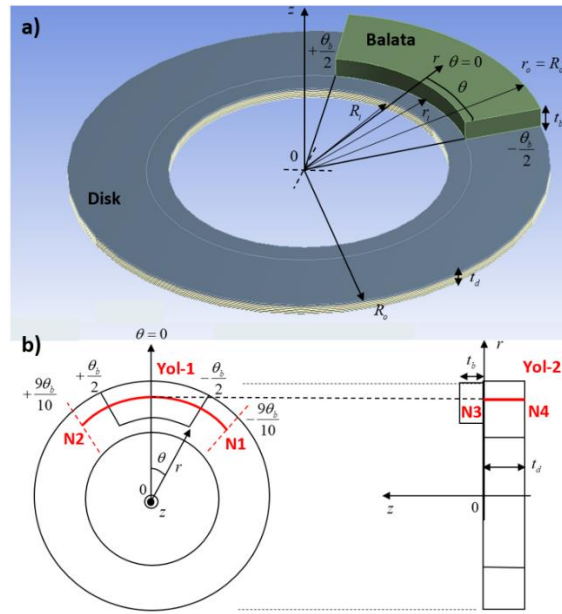
Yapılan literatür araştırması, disk/balata fren sistemlerinin termoelastik analizleri için analitik ve/veya hesaplamalı olarak yapılan birçok çalışma olduğunu göstermektedir. Ancak üç boyutlu bir modelde frenleme basıncı ve balata malzemesi fiziksel özelliklerindeki parametrik değişimin üretilen ısı akısı ve bu ısı akısının paylaşımı, disk-balata çiftinde görülen sıcaklık ve eşdeğer von-Mises gerilmelerine olan etkileri henüz net bir biçimde sunulmamıştır. Sürtünme katsayısının sıcaklığa ve zamana bağlı değişimi termal analizde dikkate alınmıştır. Bunun için iteratif bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde termal analiz sonucunda oluşan sıcaklık değerlerine göre sürtünme katsayısı değişmektedir. Zamana göre sürtünme katsayısı dağılımı, disk-balata çiftinde sıcaklık-zaman eğrileri yakınsayana kadar tekrar hesaplanmıştır. Termal analizlerde 4 iterasyon sonucunda yakınsayan sıcaklık-zaman eğrilerine ulaşılmıştır. Daha sonra sürtünme katsayısı-zaman ilişkisi eğri uydurma yöntemi ile modellenerek termal analiz tekrarlanmış, sıcaklık dağılımı bulunmuştur. Elde edilen sıcaklık dağılımı yapısal analize aktarılmış, gerekli sınır şartları uygulanarak eşdeğer von-Mises gerilmeleri bulunmuştur. Frenleme basıncının ve balata fiziksel özelliklerinin sonuçlar üzerindeki etkileri parametrik olarak incelenmiştir. Frenleme basıncı ve balata malzemesinin seçiminin diskte görülen gerilmeleri azaltmada önemli rol oynadığı görülmüştür. Bu çalışmanın sonuçlarının fren sistemleri için malzeme tasarlayan araştırmacılara yol gösterici olacağına inanılmaktadır.

## PROBLEM TANIMI (PROBLEM DEFINITION)

Kütlesi  $m = 1016$  kg olan otomobil sabit  $V_0 = 100$  km/h hızıyla hareket etmektedir. Hareket halindeki otomobilde  $t=0$  anında dört tekerlekten eşit oranda frenlemenin başladığı ve balata ile disk arasındaki sürtünme nedeniyle araç hızının  $t_s$  anında sifıra düştüğü kabul edilmiştir. Frenleme işlemi aracın kinetik enerjisinin ısıya çevrilmesi ile sağlanır. Bu ısı balata ve disk arasındaki sürtünmeli temas yüzeyinde üretilir. Balata ve disk fren mekanizması şematik olarak Şekil 1(a)'da gösterilmiştir. Disk geometrisi olduğu için silindirik koordinat sistemi  $(r, \theta, z)$  kullanımı daha uygun bulunmuştur.  $r_i$  ve  $r_o$  sırasıyla

balatanın iç ve dış yarıçapını göstermektedir. Benzer şekilde  $R_i$  ve  $R_o$  sırasıyla fren diskinin iç ve dış yarıçaplarını ifade etmektedir.  $\theta = 0$  düzlemi balatanın tam ortasından geçmekte,  $\theta = -0.5\theta_b$  balatanın başladığı düzlemi,  $\theta = +0.5\theta_b$  ise balatanın sonlandığı düzlemi göstermektedir. (b) ve (d) alt indisleri sırasıyla balata ve diski işaret etmekte,  $t_b$  balata kalınlığını  $t_d$  ise disk kalınlığını göstermektedir. Şekil 1(b) balata disk fren sisteminin üst ve sol yan görünüşlerini göstermektedir. Burada Yol-1 ve Yol-2 olarak tanımlanmış iki adet iz bulunmaktadır. Fren mekanizması için termal analizler üç boyutta ve zamana bağlı şekilde yapılmıştır. Bu sebeple sıcaklık alanı  $T(r, \theta, z, t), (r, \theta) \in \Omega$  şeklinde ifade edilebilir. Burada  $\Omega$  temas alanı olup denklem (1)'de ifade edilmiştir.

$$\Omega \in \{ \text{Alan} \mid r_i \leq r \leq r_o = R_o, -0.5\theta_b \leq \theta \leq 0.5\theta_b \}. \quad (1)$$



**Şekil 1.** Disk-balata fren mekanizması için şematik resim (a) 3 Boyutlu katı model, (b) Üst görünüş, (c) Sol-yan görünüş.

*Figure 1.* Schematic view for the disc-pad brake mechanism (a) 3D Solid model, (b) Top view, (c) Left-side view.

Yol-1, balata ve diskin temas yüzeyi üzerinde  $\theta = -0.9\theta_b$  düzleminden başlayıp,  $\theta = +0.9\theta_b$  düzleminde sonlanmaktadır. Başlangıç ve bitiş noktaları sırasıyla N1 ve N2 şeklinde gösterilmiştir. Sol-yan görünüşte ise Yol-2 gösterilmiştir. Yol-2 ise  $\theta = 0$  düzleminde disk ve balata temas yüzeyinden başlayıp, disk arka yüzeyine kalınlık yönünde giden bir izdir. Başlangıç ve bitiş noktaları sırasıyla N3 ve N4 olarak gösterilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri Yol-1 ve Yol-2 üzerinde alınarak grafiksel olarak sunulmuştur. Çizelge 1 fren disk ve balatası için kullanılan boyutları ve parametreleri göstermektedir (Talati ve Jalalifar, 2009; Yevtushenko ve Grzes, 2012).

**Çizelge 1.** Disk ve balata için boyutlar ve operasyon parametreleri.*Table 1. Dimensions and operation parameters for disc and pad.*

Parametre	Balata (b)	Disk (d)
İç yarıçap, $r_i, R_i$ (mm)	76.6	66
Dış yarıçap, $r_o, R_o$ (mm)	113.5	113.5
Kalınlık $t_b, t_d$ (mm)	10	5.5
Başlangıç açısal hızı $\omega$ (rad/s)	-	88.464
Isıl taşıyım katsayısı $h$ (W/m <sup>2</sup> K)	60	60
İlk sıcaklık $T_0$ (°C)	20	20
Ortam sıcaklığı $T_a$ (°C)	20	20

Disk-balata fren sisteminin termoelastik analizinde aşağıda belirtilen kabuller yapılmıştır (Yevtushenko ve Grzes, 2015):

- Temas yüzeyi üzerindeki frenleme basıncı aracın her bir diski üzerinde eşit ve  $p_0$  basıncı ile gösterilmektedir.
- Disk üzerindeki termal yük bu diskin yarı-düzlemine göre simetriktir. Bu yüzden hesaplamalı bölge diskin yarısını içerecek şekilde  $\frac{1}{2}$  modellenmiştir.
- Sürtünme katsayısı temas alanında farklılık gösterebilmekte, zamanın ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ifade edilebilmektedir. Sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısının temas alanında integralinin temas alanına bölünmesi zamana bağlı ortalama sürtünme katsayısını verir.

$$\eta_{ort}(t) = \frac{1}{A_b} \iint_{\Omega} \eta(T(r, \theta, z, t)) d\Omega, \quad 0 \leq t \leq t_s. \quad (2)$$

- Balata ve disk fren sistemi ile dış yüzeyler arasında olan taşıyım ısı transferi Newton'un soğuma yasası ile modellenmiştir. Burada  $h$  sabit taşıyım ısı transferi katsayısını ifade etmektedir.
- Işıyım ısı transferi ihmal edilmiştir. İlk başta balata ve disk eşit koşulda ortam sıcaklığındadır.
- Balata ve disk yüzeyi arasında mükemmel ısı iletim olduğu varsayılmış, balata ve disk yüzeyine normal yönde akan ısı ve depolanan ısı üretilen toplam sürtünmeli ısıya eşittir.
- Fren balatası ve disk arasındaki temas alanı  $\Omega$  aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\Omega = \{r_i \leq r \leq r_o, -0.5\theta_b \leq \theta \leq 0.5\theta_b, z = 0\} \quad (3)$$

$$A_b = 0.5 (R_o^2 - r_i^2) \theta_b. \quad (4)$$

Frenleme sırasında araç hızındaki değişim aşağıdaki diferansiyel denklem ile ifade edilebilir (Yevtushenko ve Grzes 2014; Yevtushenko ve Grzes, 2015):

$$m \frac{dV(t)}{dt} = -F(t), \quad 0 \leq t \leq t_s. \quad (5)$$

İlk durumda araç hızı  $V(0) = V_0 = 100$  km/h 'tir. Araç tekerlek dış yarıçapı  $R_w = 0.314$  m ve disk rotorunun ilk açısal hızı  $\omega_0 = 88.464$  rad/s 'dir. Zamana bağlı sürtünme kuvveti aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$F(t) = 8\eta(t) p_0 A_b R_w^{-1} r_{eq}, \quad (6)$$

Denklem (6)'da temas yüzeyi eşdeğer yarıçapı aşağıdaki formül ile ifade edilebilir (Yevtushenko ve Grzes, 2014; Yevtushenko ve Grzes, 2015):



$$r_{eq} = \frac{1}{A_p} \int_{-0.5\theta_b}^{+0.5\theta_b} \int_{r_i}^{r_o} r^2 dr d\theta = \frac{2(r_o^3 - r_i^3)}{3(R_o^3 - R_i^3)}. \quad (7)$$

Denklem (5) ile gösterilen diferansiyel denklemin çözümünden zamana göre aracın hızı aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$V(t) = V_0 - \frac{16\pi(r_o^3 - r_i^3)P_0}{3m R_w} \int_0^t \eta_{orn}(\tau) d\tau, \quad 0 \leq t \leq t_s. \quad (8)$$

Aracın duruş zamanı  $t_s$ , Denklem (8)'de  $V(t) = 0$  işlemi yapılarak elde edilebilir. Disk/balata fren sistemi için zamana bağlı sıcaklık alanı  $T(r, \theta, z, t)$  üç boyutlu zamana bağlı ısı iletimi denkleminin çözümünden elde edilir (Yevtushenko ve Grzes, 2015). Disk için oluşturulan ısı iletim denkleminde diskin dönme hızına bağlı oluşan katı konveksiyon terimi  $C_d \rho_d (\partial T / \partial \theta)$  ihmal edilmiştir. Toplam üretilen ısı miktarı  $Q_{Toplam} = Q_{Transfer} + Q_{Depolanan} + Q_{İsimm}$  şeklinde ifade edilebilir. Burada  $Q_{Transfer}$  balata ve diske transfer edilen sürtünmeli ısıyı göstermektedir.

$$k_b \left[ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] T = \rho_b C_b \frac{\partial T}{\partial t},$$

$$r_i \leq r \leq r_o,$$

$$-0.5\theta_b \leq \theta \leq +0.5\theta_b,$$

$$0 \leq z \leq t_b,$$

$$0 \leq t. \quad (9)$$

$$k_d \left[ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] T = \rho_d C_d \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \omega \frac{\partial T}{\partial \theta} \right),$$

$$R_i \leq r \leq R_o,$$

$$0 \leq \theta \leq 2\pi,$$

$$-t_d \leq z \leq 0,$$

$$0 \leq t. \quad (10)$$

Balata için termal sınır ve ilk şartlar aşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$k_p \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_i} = h [T(r_i, \theta, z, t) - T_a], \quad -0.5\theta_b \leq \theta \leq 0.5\theta_b, \quad 0 \leq z \leq t_p, \quad 0 \leq t, \quad (11)$$

$$k_p \left. \frac{\partial T}{\partial \theta} \right|_{r=r_o} = h [T_a - T(r_o, \theta, z, t)], \quad -0.5\theta_b \leq \theta \leq 0.5\theta_b, \quad 0 \leq z \leq t_p, \quad 0 \leq t, \quad (12)$$

$$k_p \left. \frac{\partial T}{\partial \theta} \right|_{\theta=-0.5\theta_b} = h [T(r, -0.5\theta_b, z, t) - T_a], \quad r_i \leq r \leq r_o, \quad 0 \leq z \leq t_p, \quad 0 \leq t, \quad (13)$$

$$k_p \left. \frac{\partial T}{\partial \theta} \right|_{\theta=0.5\theta_b} = h [T_a - T(r, 0.5\theta_b, z, t) - T_a], \quad r_i \leq r \leq r_o, \quad 0 \leq z \leq t_p, \quad 0 \leq t, \quad (14)$$

$$k_p \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=t_b} = h [T_a - T(r, \theta, t_b, t)], \quad (r, \theta) \in \Omega, \quad 0 \leq t, \quad (15)$$

$$k_p \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0^+} = (1 - \gamma) q_f, \quad r_i \leq r \leq r_o, \quad -0.5\theta_b \leq \theta \leq 0.5\theta_b, \quad 0 \leq t \leq t_s, \quad (16)$$

$$T(r, \theta, z, 0) = T_a, \quad r_i \leq r \leq r_o, \quad -0.5\theta_b \leq \theta \leq 0.5\theta_b, \quad 0 \leq z \leq t_b, \quad (17)$$

Disk için termal sınır ve ilk şartlar aşağıdaki gibi yazılır:

$$k_d \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_i} = h [T(R_i, \theta, z, t) - T_a], \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi, \quad -t_d \leq z \leq 0, \quad 0 \leq t, \quad (18)$$

$$k_d \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_o} = h [T_a - T(R_o, \theta, z, t)], \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi, \quad -t_d \leq z \leq 0, \quad 0 \leq t, \quad (19)$$

$$k_d \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0^-} = h [T_a - T(r, \theta, 0^-, t)], \quad R_i \leq r \leq r_i, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi, \quad 0 \leq t, \quad (20)$$

$$k_d \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=-t_d} = 0, \quad R_i \leq \theta \leq R_o, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi, \quad t \geq 0, \quad (21)$$

$$T(r, \theta, z, 0) = T_a, \quad R_i \leq r \leq R_o, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi, \quad -t_d \leq z \leq 0. \quad (22)$$

$$k_d \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0^-} = \begin{cases} g(t) \gamma q_f & , \quad r_i \leq r \leq R_o, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi, \quad 0 \leq t \leq t_s \\ \left[ (1 - g(t)) h [T_a - T(r, \theta, 0^-, t)] \right] & , \quad r_i \leq r \leq R_o, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi, \quad t \geq 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq t_s \\ 0 & t > t_s \end{cases} \quad (24)$$

$g(t)$  boyutsuz bir fonksiyondur ve zamana göre 0 veya 1 değerlerini alır. Bu fonksiyon frenleme esnasında  $0 \leq t \leq t_s$  diske ısı akısını sağlamak için 1 değerini alır. Frenleme zamanı bittikten sonra  $t \geq t_s$  dış ortam ile taşınım ısı transferini sağlamak için 0 değerini alır (Yevtushenko ve diğ. 2013).  $q_f$  disk ve balata yüzeyi arasında üretilen ısı akısını göstermekte olup bu ısı aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$q_f(t) = \eta(t) p_0 r R_w^{-1} V(t), \quad r_i \leq r \leq R_o, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi, \quad 0 \leq t \leq t_s. \quad (25)$$

Burada  $\gamma$  ısı paylaşım oranı olarak adlandırılır (Charron, 1943) ve bu katsayı aşağıdaki formül ile hesaplanır (Yevtushenko ve Grzes, 2011; Yevthusenko ve diğ., 2013; Grzes, 2019):

$$\gamma = \frac{\sqrt{k_d \rho_d C_d}}{\sqrt{k_d \rho_d C_d} + \sqrt{k_b \rho_b C_b}}. \quad (26)$$

Burada  $k$ ,  $\rho$  ve  $C$  sırasıyla ısı iletim katsayısını, yoğunluğu ve özgül ısı kapasitesini gösterir. Disk yüzeyine doğru uygulanan ısı akısı  $Q_d = \gamma q_f$ , balata yüzeyine doğru uygulanan ısı akısı ise  $Q_b = (1 - \gamma) q_f$  formülü ile hesaplanır. Balata ve disk üzerinde oluşan gerilmeler silindirik koordinatlarda termoelastik bağıntılar kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir (Eslami, 2013):

$$\sigma_{rr}^{(i)} = 2\mu^{(i)} \varepsilon_{rr}^{(i)} + \lambda^{(i)} e^{(i)} - \beta^{(i)} T^{(i)}, \quad (27)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^{(i)} = 2\mu^{(i)} \varepsilon_{\theta\theta}^{(i)} + \lambda^{(i)} e^{(i)} - \beta^{(i)} T^{(i)}, \quad (28)$$

$$\sigma_{zz}^{(i)} = 2\mu^{(i)} \varepsilon_{zz}^{(i)} + \lambda^{(i)} e^{(i)} - \beta^{(i)} T^{(i)}, \quad (29)$$

$$\sigma_{r\theta}^{(i)} = 2\mu^{(i)} \varepsilon_{r\theta}^{(i)}, \quad (30)$$

$$\sigma_{\theta z}^{(i)} = 2\mu^{(i)} \varepsilon_{\theta z}^{(i)}, \quad (31)$$

$$\sigma_{rz}^{(i)} = 2\mu^{(i)} \varepsilon_{rz}^{(i)}, \quad (32)$$

$$\sigma_{\theta_z}^{(i)} = 2\mu^{(i)} \varepsilon_{\theta_z}^{(i)}, \quad (33)$$

$$\sigma_{zr}^{(i)} = 2\mu^{(i)} \varepsilon_{zr}^{(i)}, \quad (34)$$

Burada  $i$  indeksi balata veya disk malzemesini simgelemektedir  $i = \{b, d\}$ .  $\mu$  malzemenin kayma modülü olmak üzere Denklem (27)-(34)'de gösterilen değişkenler aşağıda verilmiştir.

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (35)$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad (36)$$

$$\beta = \frac{\alpha E}{1-2\nu} = \alpha(3\lambda + 2\mu). \quad (37)$$

$$e = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z}. \quad (38)$$

Silindirik koordinat sisteminde cisim yükünün olmadığı durumda Navier denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilir (Eslami, 2013):

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial e}{\partial r} - 2\mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \omega_z}{\partial \theta} - \frac{\partial \omega_\theta}{\partial z} \right) - \beta \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (39)$$

$$(\lambda + 2\mu) \frac{1}{r} \frac{\partial e}{\partial \theta} - 2\mu \left( \frac{\partial \omega_r}{\partial z} - \frac{\partial \omega_z}{\partial r} \right) - \beta \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0, \quad (40)$$

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial e}{\partial z} - \frac{2\mu}{r} \left( \frac{\partial(r\omega_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial \omega_r}{\partial \theta} \right) - \beta \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad (41)$$

$$\omega_r = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} - \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right), \quad (42)$$

$$\omega_\theta = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r} \right), \quad (43)$$

$$\omega_z = \frac{1}{2r} \left( \frac{\partial(ru_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right). \quad (44)$$

Eşdeğer von-Mises gerilmesi aşağıdaki formül ile hesaplanır (Benslimane ve diğ., 2018):

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \overline{\overline{\sigma^D}} : \overline{\overline{\sigma^D}}}, \quad (45)$$

$$\overline{\overline{\sigma^D}} = \overline{\overline{\sigma}} - \frac{1}{3} \text{tr}(\overline{\overline{\sigma}}) \overline{\overline{\mathbf{I}}}, \quad (46)$$

$\overline{\overline{\mathbf{I}}}$  birim matrisi göstermekte,  $\overline{\overline{\sigma^D}}$  deviatoric gerilme bileşenini simgelemektedir. Burada,

$$\sigma_{rr}^D = \frac{1}{3} (2\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz}), \quad (47)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^D = \frac{1}{3} (-\sigma_{rr} + 2\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz}), \quad (48)$$

$$\sigma_{zz}^D = \frac{1}{3}(-\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta} + 2\sigma_{zz}). \quad (49)$$

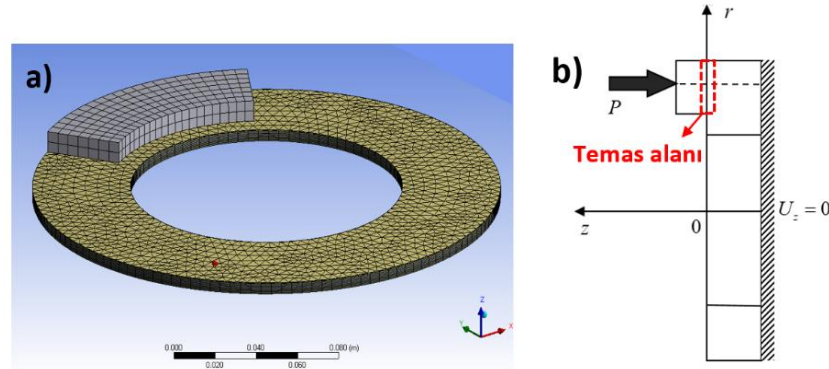
$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \text{tr}(\bar{\sigma})^2 - \frac{1}{2} \text{tr}(\bar{\sigma})^2}. \quad (50)$$

## ÇÖZÜM METODU (SOLUTION METHOD)

Diskte elde edilen sıcaklık dağılımları ve disk/balata çifti için hesaplanan gerilmeler termoelastik analizlerin sonlu elemanlar metodu ile yapılmasından elde edilir. Üç boyutlu disk ve balata için sonlu elemanlar modeli ANSYS (2016) programı kullanılarak oluşturulmuştur. Analizler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Öncelikle zamana bağlı termal analizler yapılmış, diskte oluşan sıcaklık değerleri  $t \in (0, 10s)$  aralığı için elde edilmiştir.

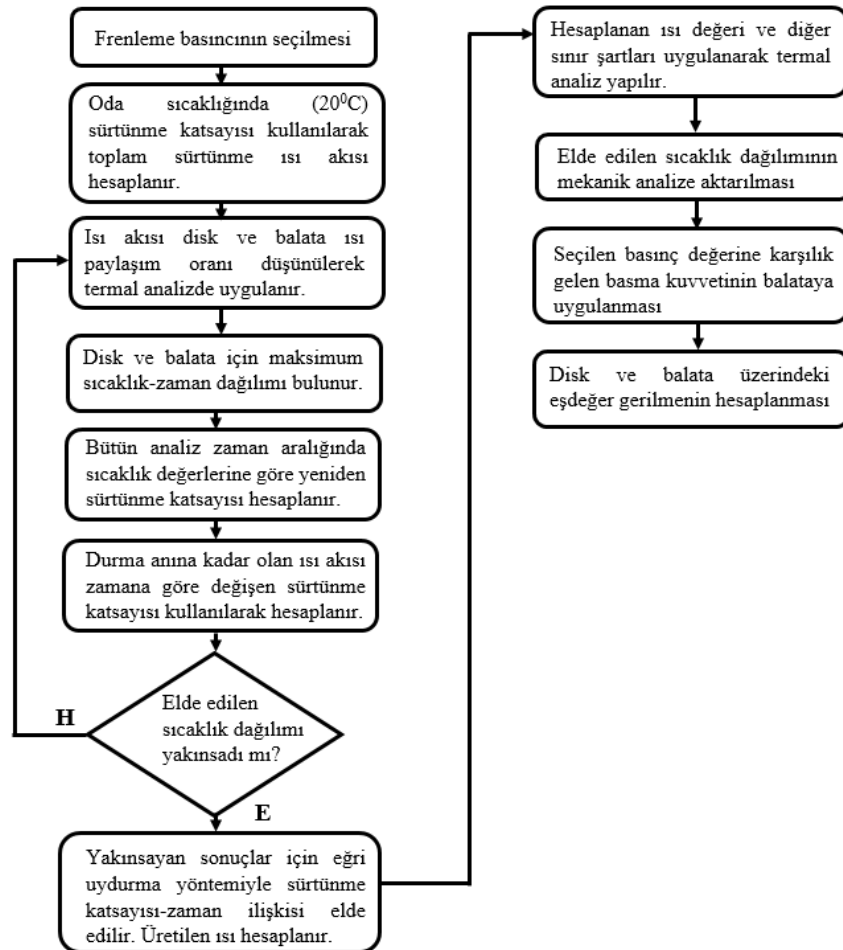
Frenleme anından arta kalan zamanda disk hava ile ısı taşınım yoluyla soğumaktadır.  $t = 0s$  frenleme anı ve  $t = t_s$  durma anını göstermektedir. Balata ve disk arasındaki temas yüzeyi hesaplanarak, frenleme basıncı balata üst yüzeyinden basma ( $-z$ ) yönünde  $P$  kuvveti ile balataya uygulanmıştır. Fren balatası ve disk temas yüzeyi  $39.57 \text{ cm}^2$  olarak bulunmuştur. Buna göre frenleme basıncı ( $p_0$ ) 0.59, 0.78, 1.18 ve 1.47 MPa için uygulanması gereken kuvvet sırasıyla  $P = 2334.63 \text{ N}$ ,  $P = 3086.46 \text{ N}$ ,  $P = 4669.26 \text{ N}$  ve  $P = 5816.79 \text{ N}$  olarak elde edilir. Bu basınç değerleri Yevtushenko ve diğ. (2013) ve Yevtushenko ve Grzes (2015) 'de kullanılmıştır. Disk-balata çiftinin  $z$ -eksenine göre simetrik olduğu düşünüldüğünden  $\frac{1}{2}$  model oluşturulmuştur. Bu yüzden disk arka yüzeyinde ısı geçişi olmayıp  $z$ -ekseninde yer-değiştirmeye izin verilmemektedir. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli ve bu modele mekanik olarak uygulanan sınır şartları ve yüklemeler Şekil 2'de gösterilmiştir. Termal analizde 103428 düğüm noktası içeren 18756 üç boyutlu termal eleman, elastik analizde ise 38786 düğüm noktası içeren 6837 üç boyutlu yapısal eleman kullanılmıştır.

Sürtünme katsayısı sabit olmayıp sıcaklığa ve zamana göre değişmektedir. Bu değişimi dikkate alabilmek için iteratif bir yöntem geliştirilmiştir. Bir frenleme basıncı seçilir. Bu frenleme basınç değeri için öncelikle oda sıcaklığında ( $T_a = 20^\circ \text{C}$ ) sürtünme katsayısı kullanılarak termal çözüm yapılır. Zamana karşı disk ve balata çiftinde oluşan sıcaklık dağılımı için sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değerleri hesaplanır. Böylece her bir zaman değerine karşılık gelen sıcaklık için yeniden sürtünme katsayısı hesaplanır. Bu işlem disk balata çiftinde sıcaklık-zaman eğrileri yakınsayana kadar iteratif olarak devam eder. Yakınsayan sıcaklık dağılımı elde edildiğinde eğri uydurma yöntemi kullanılarak durma anına kadar sürtünme katsayısı-zaman fonksiyonu elde edilir. Bu fonksiyon kullanılarak hesaplanan ısı akısı termal analizde disk ve balata mekanizmasına uygulanır ve nihai sıcaklık dağılımı elde edilir. Bulunan sıcaklık değerleri kararlı rejim yapısal analize aktarılır ve referans sıcaklığa göre ( $T_a = 20^\circ \text{C}$ ) eşdeğer gerilmeler hesaplanır. Geliştirilen yöntemin akış şeması Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 2. (a) Disk ve balata için sonlu elemanlar modeli (ANSYS, 2016), (b) Yapısal analizde uygulanan sınır şartları ve yüklemeler.

Figure 2. (a) Finite element model for disc and pad (ANSYS, 2016), (b) Applied boundary conditions and loads in structural analysis.



Şekil 3. Geliştirilen yöntemin akış şeması.

Figure 3. Flowchart of developed method.

## SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (NUMERICAL RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu bölümde fren disk mekanizması için sıcaklık dağılımı sonuçları ile beraber balata ve disk temas yüzeylerinden alınmış von-Mises gerilmeleri dağılımları da sunulmuştur. Parametrik olarak frenleme basıncı  $p_0$  değişimi ve balata malzemesi fiziksel özellikleri  $k_b$ ,  $\rho_b$ ,  $C_b$  değişiminin oluşan sıcaklık dağılımına ve eşdeğer von-Mises gerilmeleri üzerine olan etkileri incelenmiştir. Analizin başlangıcında

ortam sıcaklığı balata ve disk için  $20^{\circ}C$ 'dir. Disk ve balatada oluşan sıcaklık değerleri zamana bağlı ısı iletim denkleminin sonlu elemanlar metodu ile çözülmesinden elde edilmektedir. Daha sonra sonlu elemanların her bir düğüm noktasında elde edilen bu sıcaklık değeri kararlı rejim yapısal analize aktarılmıştır. Zamana bağlı termal analizler otomobilin durma süresini içerecek şekilde 10 s olarak ayarlanmıştır. Durma süresinden arta kalan zamanda  $t_s \leq t \leq 10s$  dış ortam ile taşınım yoluyla soğuma gerçekleşmiştir. Buna benzer bir yaklaşım Belhocine ve Bouchetara (2012a) ve Bouchetara ve Belhocine (2014) tarafından bir fren diskinde termal analiz yapılırken benimsenmiştir. Çizelge 2'de balata ve disk için kullanılan malzeme özellikleri verilmiştir (Belhocine ve Bouchetara, 2013; Bouchetara ve Belhocine, 2014; Belhocine ve diğ. 2014; Belhocine ve diğ. 2016).

**Çizelge 2.** Fren balatası ve disk için termoelastik özellikler.

*Table 2. Thermoelastic properties for the brake pad and disc.*

Termal özellikler	Balata <sup>(b)</sup>	Disk <sup>(d)</sup>
Isı iletim katsayısı, $k$ [ $W/m^{\circ}C$ ]	5	57
Yoğunluk, $\rho$ [ $kg/m^3$ ]	1400	7250
Özgül ısı kapasitesi, $C_p$ [ $J/kg^{\circ}C$ ]	1000	460
Ortam sıcaklığı, $T$ [ $^{\circ}C$ ]	20	20
Isıl genleşme katsayısı, $\alpha$ [ $10^{-6}/^{\circ}C$ ]	10	10.85
Poisson oranı, $\nu$ [-]	0.25	0.28
Elastik modül, $E$ [GPa]	1	138

#### Frenleme basıncının sıcaklık ve gerilme üzerine etkisi (Influence of brake pressure on temperature and stress)

Bu bölümde frenleme basıncının  $p_0$  otomobil durma zamanına  $t_s$ , disk ve balata yüzeylerine uygulanan ısı akılarına  $Q_d$ ,  $Q_b$ , zamana bağlı sıcaklık değerine, Yol-1 ve Yol-2 üzerinde görülen sıcaklık dağılımlarına olan etkileri incelenmiştir. Daha sonra balata ve disk için eşdeğer von-Mises gerilmeleri hesaplanmıştır. Frenleme basıncı 0.5 ile 1.5 MPa değerleri arasında seçilmiştir (Choi ve Lee, 2004; Soderberg ve Anderssen, 2009; Yevthusenko ve Grzes, 2014; Yevthusenko ve Grzes, 2015). Bu çalışmada Yevtushenko ve diğ. (2013)'de kullanıldığı gibi frenleme basınçları sırasıyla 0.59 MPa, 0.78 MPa, 1.18 MPa ve 1.47 MPa kullanılmıştır. Bu basınçlarda sürtünme katsayısının sıcaklığa göre değişim fonksiyonları aşağıda verilmiştir:

$$\eta(T) = 6.35 \times 10^{-3} + \frac{0.762}{1 + [0.19 \times 10^{-2} (T + 180)]^2}, \quad p_0 = 0.59 \text{ MPa}, \quad (51)$$

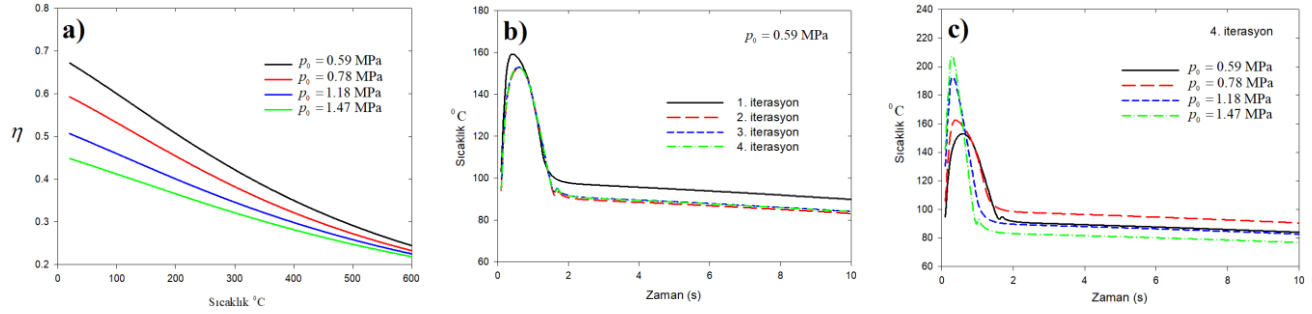
$$\eta(T) = 0.0321 + \frac{0.642}{1 + [0.19 \times 10^{-2} (T + 180)]^2}, \quad p_0 = 0.78 \text{ MPa}, \quad (52)$$

$$\eta(T) = 0.0285 + \frac{0.57}{1 + [0.162 \times 10^{-2} (T + 250)]^2}, \quad p_0 = 1.18 \text{ MPa}, \quad (53)$$

$$\eta(T) = 0.036 + \frac{0.48}{1 + [0.15 \times 10^{-2} (T + 250)]^2}, \quad p_0 = 1.47 \text{ MPa}. \quad (54)$$

Bu basınç değerleri için oda sıcaklığında ( $20^{\circ}C$ ) sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0.672, 0.593, 0.507 ve 0.448 olarak bulunur. Şekil 4(a) artan sıcaklığa göre sürtünme katsayısının değişimini göstermektedir. Şekil 4(b) iteratif çözümler sonucu elde edilen sıcaklık-zaman eğrilerini göstermektedir. Burada 4. iterasyon sonucunda sıcaklık dağılımının yakınsadığı görülebilir. Şekil 4(c) ise 4. iterasyon

sonucunda çeşitli frenleme basınçları sonucu elde edilen sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Değişen frenleme basınçlarında iteratif çözümler sonucu elde edilen araç durma zamanı  $t_s$ , Çizelge 3'de gösterilmiştir. Frenleme basıncı arttıkça aracın durma süresi  $t_s$  azalmaktadır. İteratif çözümler sonucu aracın durma zamanının arttığı görülmüştür. Bunun nedeni sürtünme katsayısının artan sıcaklığa göre azalması ve durma süresini arttırmasıdır. Yakınsayan sıcaklık dağılımı sonuçları ile durma süresine kadar sürtünme katsayısı-zaman ilişkisi eğri uydurma yöntemi ile belirlenir ve doğrusal olmayan ısı akısı disk-balata çiftine uygulanır.



Şekil 4. (a) Sürtünme katsayısının sıcaklığa göre değişimi, (b) İterasyonların sıcaklık-zaman eğrisine olan etkisi, (c) Sıcaklığın zamana göre değişimi (4. iterasyon).

Figure 4. (a) Variation of coefficient of friction with respect to temperature, (b) The influence of iterations on temperature-time curve, (c) Temperature change with respect to time (4<sup>th</sup> iteration).

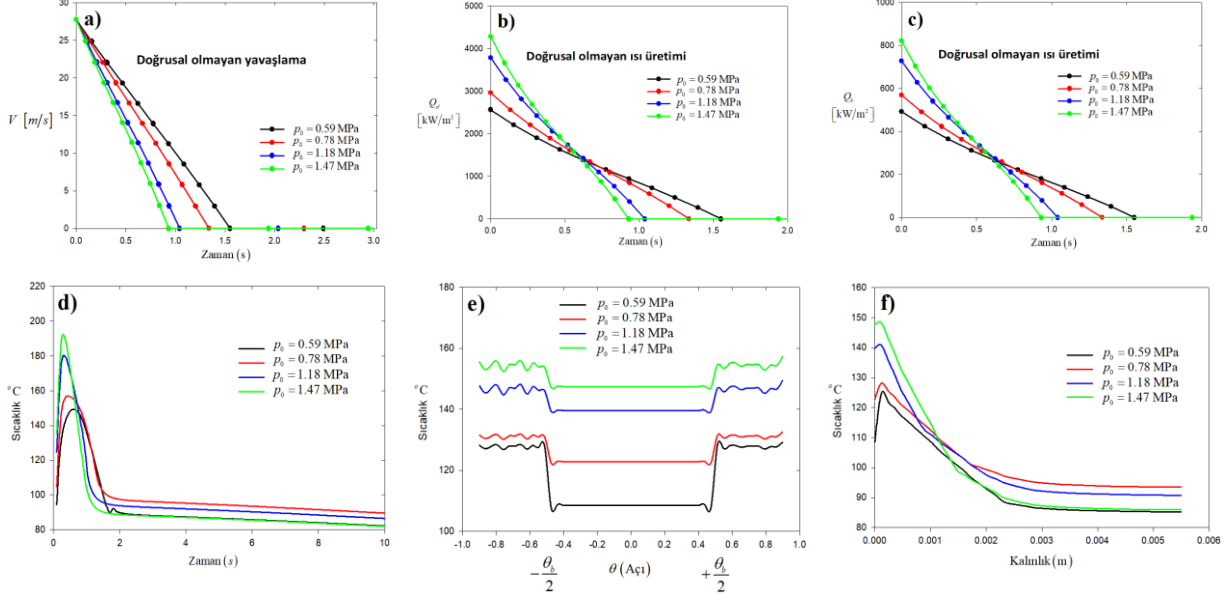
Çizelge 3. Değişen frenleme basınç değerlerine göre durma zamanı.

Table 3. Stopping time for various values of brake pressure.

Frenleme Basıncı $p_0$ (MPa)	Sürtünme katsayısı (20 °C)	Durma zamanı ( $t_s$ )	Durma zamanı ( $t_s$ )	Durma zamanı ( $t_s$ )	Durma zamanı ( $t_s$ )
		1. iterasyon	2. iterasyon	3. iterasyon	4. iterasyon
0.59	0.672	1.315s	1.487s	1.472s	1.552s
0.78	0.593	1.127s	1.267s	1.270s	1.336s
1.18	0.507	0.872s	0.956s	0.962s	1.040s
1.47	0.448	0.792s	0.859s	0.857s	0.930s

Disk ve balataya uygulanan ısı akıları Denklem (23) - (26) vasıtası ile hesaplanır. Frenleme basıncı arttıkça disk ve balataya uygulanan ısı akısı miktarı artmaktadır. Durma süresine kadar olan ısı akısı sürtünme katsayısındaki değişim nedeniyle doğrusal değildir ve bu durum Şekil 5(b) ve Şekil 5(c)'de görülebilir. Disk yüzeyindeki sıcaklığın zamana göre değişimi Şekil 5(d)'de görülmektedir. Frenleme basıncı arttıkça disk yüzeyindeki sıcaklık değerleri artmakta,  $p_0 = 1.47$  MPa için durma süresi içinde  $0 \leq t \leq t_s = 0.930$  s olduğu durumda  $200$  °C'ye yaklaştığı görülmüştür.  $p_0 = 0.59$  MPa için durma süresi  $0 \leq t \leq t_s = 1.552$  s içerisinde sıcaklık azami olarak  $150$  °C'ye ulaşmıştır. Durma anında ( $t = t_s$ ), değişen frenleme basınçları için Yol-1 ve Yol-2 üzerindeki sıcaklık değerleri hesaplanmış sonuçlar Şekil 5(e) ve Şekil 5(f)'de sunulmuştur. Frenleme basıncı arttıkça Yol-1 üzerindeki sıcaklık değerleri artmakta,  $p_0 = 1.47$  MPa olduğunda  $150$  °C'ye ulaşmaktadır. Basınç arttıkça disk/balataya temas yüzeyindeki sıcaklık

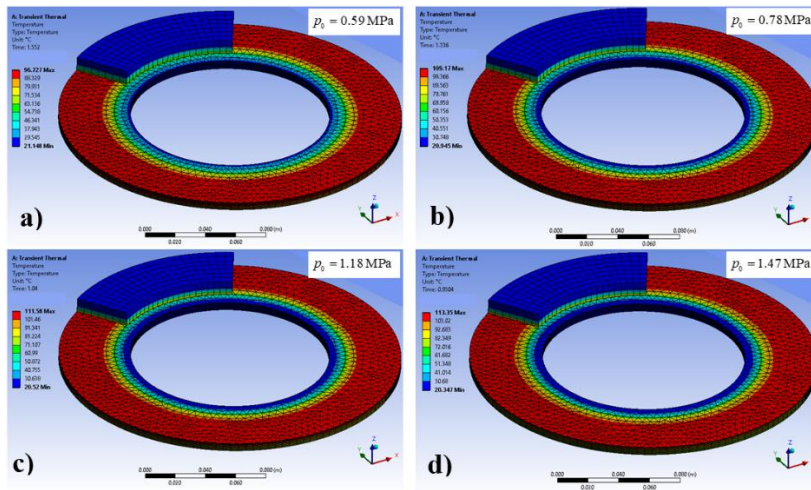
ile temas yüzeyi dışında görülen sıcaklık arasındaki fark azalmaktadır. Yol-2 temas yüzeyinden kalınlık yönünde disk arka yüzeyine giden izdir. Şekil 5(f) durma zamanında  $t_s$  frenleme basıncı arttıkça disk yüzeyine doğru sıcaklıkların arttığını göstermektedir.



**Şekil 5.** Frenleme basıncının etkisi (a) Hız-zaman, (b) Diske uygulanan ısı akısı-zaman, (c) Balataya uygulanan ısı akısı-zaman, (d) Sıcaklık-zaman, (e) Sıcaklığın durma anında Yol-1 üzerindeki dağılımı, (f) Sıcaklığın durma anında Yol-2 üzerindeki dağılımı.

*Figure 5.* Influence of brake pressure (a) Velocity-time, (b) Heat flux applied to disc-time, (c) Heat flux applied to pad-time, (d) Temperature-time, (e) Distribution of temperature on Yol-1 at stop time, (f) Distribution of temperature on Yol-2 at stop time.

Her bir frenleme basıncı için durma anında elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 6'da gösterilmiştir. Disk iç çevresi taşınım yoluyla soğumaya maruz olduğu için bu kısımlarda sıcaklık değeri balatanın temas ettiği yere göre düşüktür. Frenleme basıncı arttıkça durma anlarında sıcaklık değerlerinin arttığını görülmüştür. Ancak, bütün durumlarda diskte maksimum sıcaklığa durma anından önce ulaşıldığı Şekil 5(d)'den anlaşılabilir.



**Şekil 6.** Değişen frenleme basınçları için durma anlarında disk/balata çiftindeki sıcaklık dağılımı.

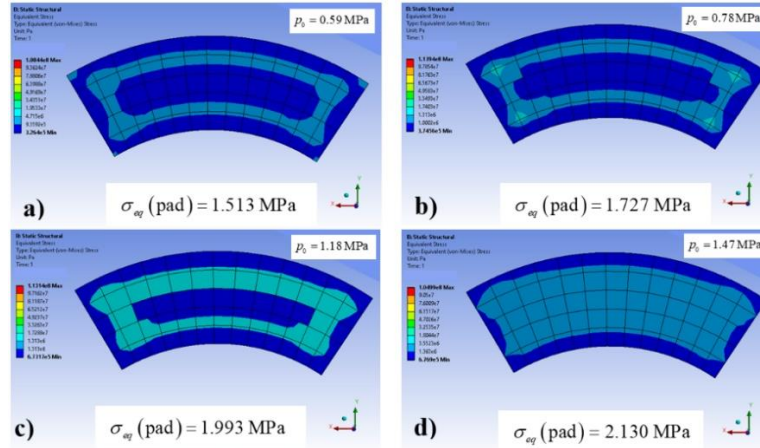
*Figure 6.* Temperature contours in disc/pad couple at stop time for varying brake pressures.

Şekil 7 ve Şekil 8 sırasıyla balata ve disk üzerindeki durma anında ( $t = t_s$ ), eşdeğer von-Mises



gerilmelerini göstermektedir. Frenleme basıncı artarken balata üzerinde görülen gerilme değerinin de arttığı görülmüştür.

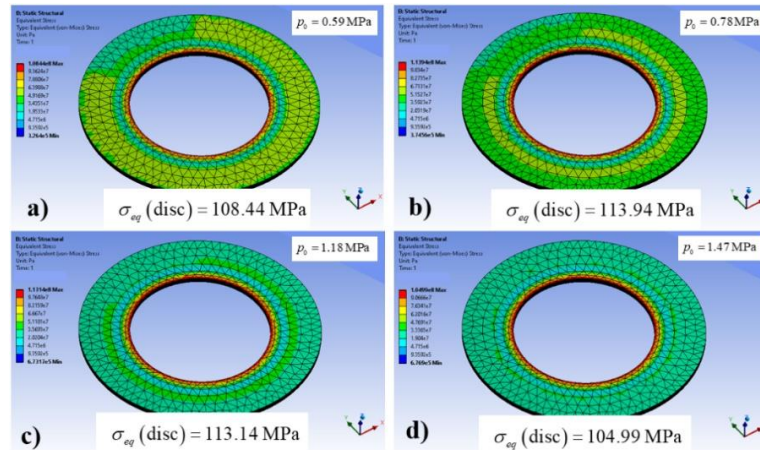
Düşük fren basınçlarında maksimum gerilme orta bölge çevresinde görülmekte iken, basınç değerinin artması ile birlikte maksimum gerilme diskin orta bölgesine yayılı bir hale gelmiştir. Gerilmelerin en az olduğu yerler ise balatanın kenarlarıdır. Gerilme değerleri 1.5 ile 2.1 MPa seviyesinde elde edilmiştir. Balata üzerindeki gerilme sonuçlarının Belhocine ve Bouchetara (2013) ve Mumtaz Jamil Akhtar ve diğ. (2013)'de elde edilen sonuçlar ile benzer düzeyde olduğu görülmüştür.



Şekil 7. Frenleme basıncının balata üzerindeki eşdeğer von-Mises gerilmesine etkisi (a)  $p_0 = 0.59$  MPa, (b)  $p_0 = 0.78$  MPa, (c)  $p_0 = 1.18$  MPa, (d)  $p_0 = 1.47$  MPa.

Figure 7. Influence of brake pressure on equivalent von-Mises stress on pad (a)  $p_0 = 0.59$  MPa, (b)  $p_0 = 0.78$  MPa, (c)  $p_0 = 1.18$  MPa, (d)  $p_0 = 1.47$  MPa.

Frenleme basıncı arttıkça disk üzerindeki gerilme öncelikle artmaktadır. Ancak basınçtaki daha fazla artış disk üzerindeki gerilmeye azalmaya sebep olmaktadır. Bunun temel sebebi yüksek frenleme basıncında disk ve balata arasındaki sürtünme katsayısının azalmasıyla termal gerilme seviyesinin düşmesidir.

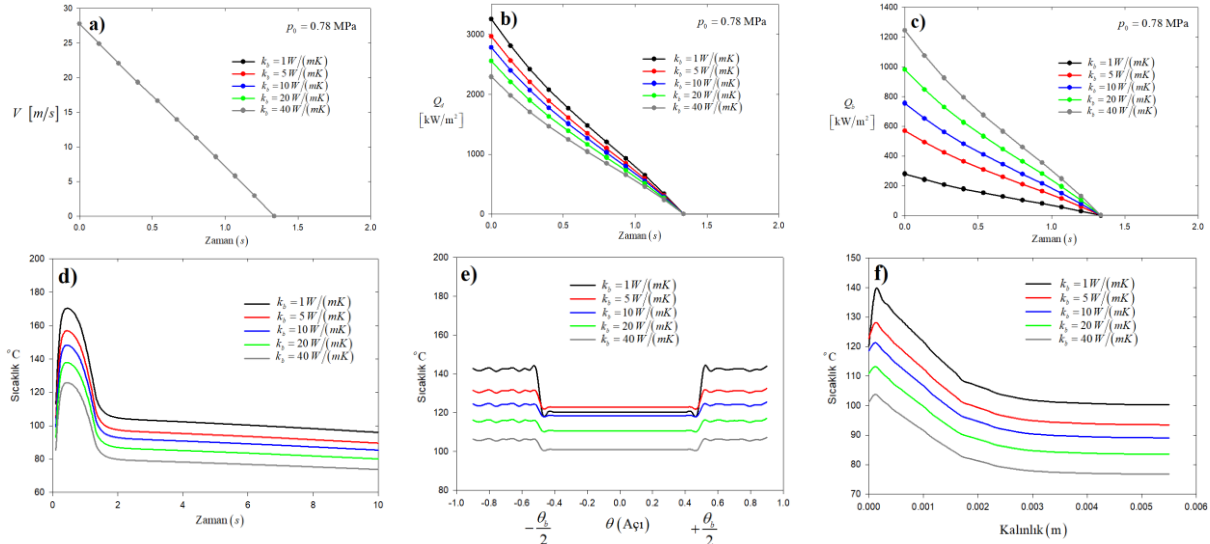


Şekil 8. Frenleme basıncının disk üzerindeki eşdeğer von-Mises gerilmesine etkisi (a)  $p_0 = 0.59$  MPa, (b)  $p_0 = 0.78$  MPa, (c)  $p_0 = 1.18$  MPa, (d)  $p_0 = 1.47$  MPa.

Figure 8. Influence of brake pressure on equivalent von-Mises stress on disc (a)  $p_0 = 0.59$  MPa, (b)  $p_0 = 0.78$  MPa, (c)  $p_0 = 1.18$  MPa, (d)  $p_0 = 1.47$  MPa.

### Balata ısı iletkenliğinin sıcaklık ve gerilme üzerine etkisi (Influence of thermal conductivity of the pad on temperature and stress)

Bu bölümde balata malzemesinin ısı iletim katsayısındaki değişimin  $k_b$ , durma zamanına  $t_s$ , disk ve balata yüzeylerine uygulanacak ısı akısı miktarlarına  $Q_d$ ,  $Q_b$ , zamana bağlı sıcaklık değerine ve Yol-1 ile Yol-2 üzerinde görülen sıcaklık dağılımlarına olan etkileri araştırılmıştır. Sıcaklık sonuçları üretildikten sonra balata ve disk için eşdeğer von-Mises gerilmeleri hesaplanmıştır. Literatürdeki bazı çalışmalarda seramik içerikli FC-16L ve FMC-11 adında iki tip fren balatası malzemesi kullanmış, bu malzemelerin ısı iletim katsayısı sırasıyla 0.79 W/mK ve 34.3 W/mK olarak belirtilmiştir (Yevthuschenko ve Grzes 2012; Yevthuschenko ve Grzes 2014; Yevthuschenko ve Grzes 2015). Bazı çalışmalarda ise balata malzemesi iletkenlik değeri 1 W/mK - 5 W/mK seçilmiştir (Akhtar ve diğ. 2013; Belhocine ve Bouchetara, 2012a,b; Belhocine ve diğ. 2016). Bu nedenle balata ısı iletim katsayıları parametrik olarak  $k_b = 1$  W/mK,  $k_b = 5$  W/mK,  $k_b = 10$  W/mK,  $k_b = 20$  W/mK ve  $k_b = 40$  W/mK seçilmiştir. Isı iletim katsayısı  $k_b$  dışındaki diğer balata ve disk termoelastik özellikleri için Çizelge 2'deki değerler kullanılmıştır. Şekil 9(a) balata malzemesinin ısı iletim katsayısının durma zamanına olan etkisini göstermektedir. Balatanın iletkenliğinin durma zamanına bir etkisi yoktur. Balata malzemesinin iletkenliği arttıkça disk yüzeyine uygulanan ısı akısı azalmakta, balata yüzeyine uygulanan ısı akısı artmaktadır. Bu durum Şekil 9(b) ve Şekil 9(c)'den görülebilir. Şekil 9(d)'den de görülebileceği gibi balata iletkenliği arttıkça disk yüzeyinde zamana göre maksimum sıcaklık değeri düşmektedir. Yol-1 üzerindeki sıcaklık değerleri Şekil 9(e)'de gösterilmiştir. Balata malzemesi için ısı iletim katsayısı  $k_b = 1$  W/mK'den  $k_b = 5$  W/mK'e artarken Yol-1 üzerindeki sıcaklık değeri bir miktar artmış, iletim katsayısının artan değerleri için  $k_b = 10-40$  W/mK sıcaklık değeri giderek azalmıştır. Isı iletim katsayısının yüksek olduğu durumlarda balata/disk temas yüzeyi ile bu yüzey dışında kalan sıcaklık farkı azalmaktadır. Diskin arkasına doğru kalınlık yönünde alınan sıcaklık değerleri Yol-2'de gösterilmiş, balata malzemesinin ısı iletim katsayısındaki artışın disk kalınlığı yönündeki sıcaklıkların azalmasında etkili olduğu görülmüştür. Bu sonuç Şekil 9(f)'de sunulmuştur.

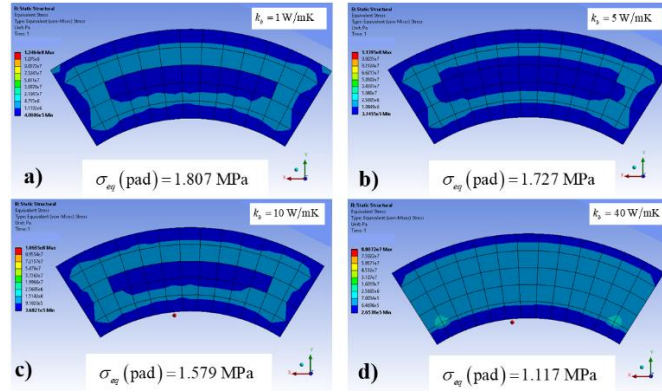


**Şekil 9.** Balata iletkenliğinin etkisi  $p_0 = 0.78$  MPa, (a) Hız-zaman, (b) Diske uygulanan ısı akısı-zaman, (c) Balataya uygulanan ısı akısı-zaman, (d) Sıcaklık-zaman, (e) Sıcaklığın durma anında Yol-1 üzerindeki dağılımı, (f) Sıcaklığın durma anında Yol-2 üzerindeki dağılımı.

**Figure 9.** Influence of thermal conductivity of the pad  $p_0 = 0.78$  MPa (a) Velocity-time, (b) Heat flux applied to disc-time, (c) Heat flux applied to pad-time, (d) Temperature-time, (e) Distribution of temperature on Yol-1 at stop time, (f) Distribution of temperature on Yol-2 at stop time.

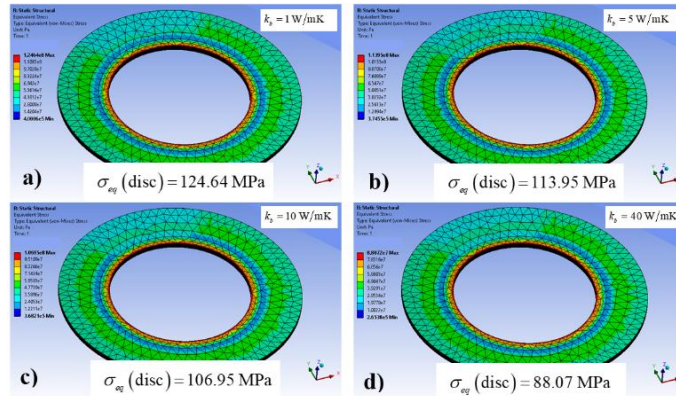
Balata ısı iletim katsayısındaki değişimin durma anında fren balatası yüzeyinde hesaplanan eşdeğer von-Mises gerilmelerine olan etkileri Şekil 10'da verilmiştir. Isı iletim katsayısı arttıkça balata yüzeyindeki

eşdeğer von-Mises gerilmeleri azalmaktadır.  $k_b = 1 \text{ W/mK}$  için gerilme değeri 1.807 MPa iken,  $k_b = 10 \text{ W/mK}$  için gerilme 1.579 MPa seviyesine ve  $k_b = 40 \text{ W/mK}$  için gerilme değeri 1.117 MPa değerine düşmüştür. Şekil 11'de durma anında disk üzerindeki eşdeğer von-Mises gerilmeleri sunulmuştur. Benzer biçimde, balata ısı iletim katsayısındaki artış disk üzerinde gerilmelerin azalmasına sebep olmaktadır.  $k_b = 1 \text{ W/mK}$  için disk üzerindeki gerilme değeri 124.64 MPa olarak gözlemlenmiş,  $k_b = 10 \text{ W/mK}$  değerinde gerilme değeri 106.95 MPa olmuş ve  $k_b = 40 \text{ W/mK}$  için gerilme değeri 88.07 MPa değerine düşmüştür.



Şekil 10. Balata iletkenliğinin balata üzerindeki eşdeğer von-Mises gerilmesine etkisi  $p_0 = 0.78 \text{ MPa}$ , (a)  $k_b = 1 \text{ W/mK}$ , (b)  $k_b = 5 \text{ W/mK}$ , (c)  $k_b = 10 \text{ W/mK}$ , (d)  $k_b = 40 \text{ W/mK}$ .

Figure 10. Influence of thermal conductivity of the pad on equivalent von-Mises stress on pad  $p_0 = 0.78 \text{ MPa}$ , (a)  $k_b = 1 \text{ W/mK}$ , (b)  $k_b = 5 \text{ W/mK}$ , (c)  $k_b = 10 \text{ W/mK}$ , (d)  $k_b = 40 \text{ W/mK}$ .



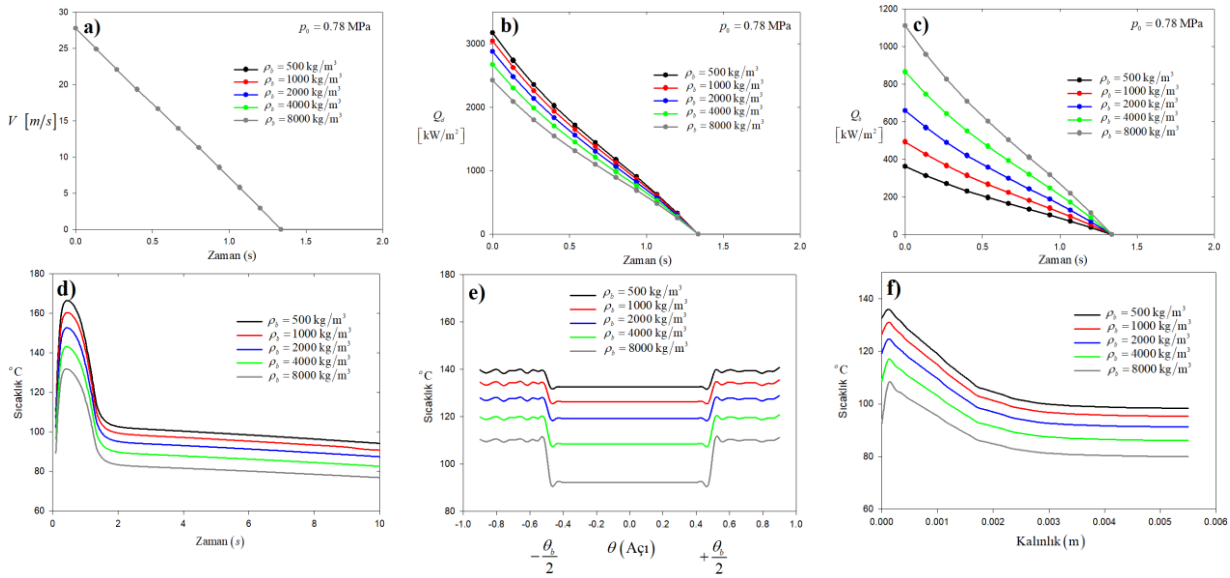
Şekil 11. Balata iletkenliğinin disk üzerindeki eşdeğer von-Mises gerilmesine etkisi  $p_0 = 0.78 \text{ MPa}$ , (a)  $k_b = 1 \text{ W/mK}$ , (b)  $k_b = 5 \text{ W/mK}$ , (c)  $k_b = 10 \text{ W/mK}$ , (d)  $k_b = 40 \text{ W/mK}$ .

Figure 11. Influence of thermal conductivity of the pad on equivalent von-Mises stress on disc  $p_0 = 0.78 \text{ MPa}$ , (a)  $k_b = 1 \text{ W/mK}$ , (b)  $k_b = 5 \text{ W/mK}$ , (c)  $k_b = 10 \text{ W/mK}$ , (d)  $k_b = 40 \text{ W/mK}$ .

### Balata yoğunluğunun sıcaklık ve gerilme üzerine etkisi (Influence of mass density of the bad on temperature and stress)

Bu bölümde balata yoğunluğunun  $\rho_b$  durma zamanına  $t_s$ , disk ve balata yüzeylerine uygulanan ısı akısı miktarlarına  $Q_d$ ,  $Q_b$ , sıcaklık-zaman ilişkisine ve Yol-1 ile Yol-2 üzerindeki sıcaklık dağılımlarına olan etkileri incelenmiştir. Sıcaklık sonuçları bulunduktan sonra balata ve disk için eşdeğer von-Mises gerilmeleri de hesaplanmıştır. Seramik içerikli aşındırıcı balata malzemeleri olan FC16-L ve FMC-11 için yoğunlukların sırasıyla  $2500 \text{ kg/m}^3$  ve  $4700 \text{ kg/m}^3$  olduğu belirtilmiştir (Yevthusenko ve diğ. 2013;

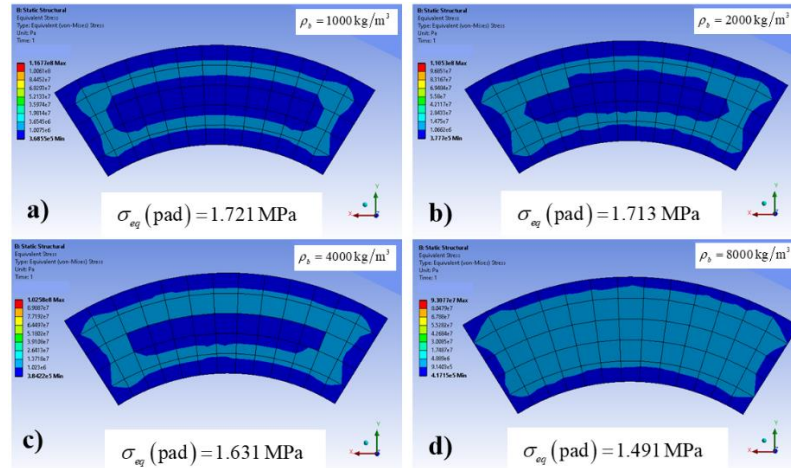
Yevtushenko ve Grzes, 2014). Bu nedenle, balata yoğunluğu 500 ile 8000  $kg/m^3$  değerleri arasında parametrik olarak değiştirilmiştir. Değiştirilen balata yoğunluğu dışında kalan diğer termoelastik özellikler Çizelge 2’de belirtilen özelliklerdir. Şekil 12(a)’dan da anlaşılacağı üzere balata yoğunluğunda değişimin durma zamanına bir etkisi yoktur. Ancak sürtünme kaynaklı üretilen ısının balata ve diske ne kadarının aktarılacağı malzeme özelliğine göre değişmektedir. Balata malzemesinin yoğunluğu arttıkça disk yüzeyine uygulanan ısı akısı azalmakta, balata yüzeyine aktarılan ısı akısı artmaktadır. Bu durum Şekil 12(b) ve Şekil 12(c)’den görülebilir. Balata yoğunluğu arttıkça Şekil 12(d)’den görüldüğü gibi diskte zamana göre maksimum sıcaklık değerleri düşmektedir. Yol-1 üzerindeki sıcaklık değerleri Şekil 12(e)’de verilmiştir. Balata yoğunluğu arttıkça Yol-1 üzerinde görülen sıcaklıklar azalmaktadır. Ayrıca, balata/disk temas yüzeyi ile bu yüzey dışında kalan alandaki sıcaklık değerleri arasındaki fark artmaktadır. Şekil 12(f)’den de görüleceği gibi disk kalınlığı yönündeki iz olan Yol-2 üzerindeki sıcaklık değerleri balata yoğunluğu arttıkça azalmaktadır.



**Şekil 12.** Balata yoğunluğunun etkisi  $p_0 = 0.78$  MPa, (a) Hız-zaman, (b) Diske uygulanan ısı akısı-zaman, (c) Balataya uygulanan ısı akısı-zaman, (d) Sıcaklık-zaman, (e) Sıcaklığın durma anında Yol-1 üzerindeki dağılımı, (f) Sıcaklığın durma anında Yol-2 üzerindeki dağılımı.

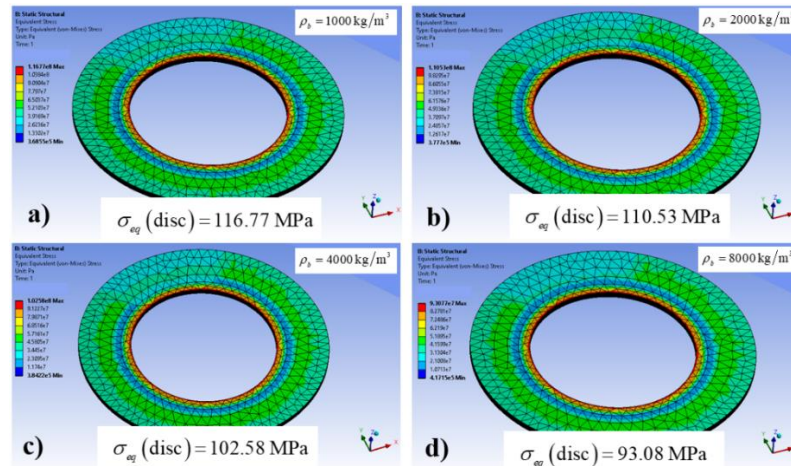
**Figure 12.** Influence of mass density of the pad  $p_0 = 0.78$  MPa (a) Velocity-time, (b) Heat flux applied to disc-time, (c) Heat flux applied to pad-time, (d) Temperature-time, (e) Distribution of temperature on Yol-1 at stop time, (f) Distribution of temperature on Yol-2 at stop time.

Balata yoğunluğundaki değişimin durma anında balata yüzeyinde hesaplanan eşdeğer von-Mises gerilmesine olan etkisi Şekil 13’de gösterilmiştir. Yoğunluk  $\rho_b = 1000$   $kg/m^3$  için gerilme değeri 1.721 MPa iken,  $\rho_b = 4000$   $kg/m^3$  için gerilme 1.631 MPa,  $\rho_b = 8000$   $kg/m^3$  için 1.491 MPa seviyesine düşmektedir. Şekil 14’de durma anında disk üzerinde görülen von-Mises gerilmesi dağılımı görülmektedir. Yoğunluk  $\rho_b = 1000$   $kg/m^3$  için disk üzerindeki eşdeğer von-Mises gerilmesi 116.77 MPa iken,  $\rho_b = 4000$   $kg/m^3$  için 102.58 MPa,  $\rho_b = 8000$   $kg/m^3$  için 93.08 MPa değerine düşmektedir. Böylece, balata yoğunluğunun artmasının balata ve disk üzerindeki gerilmeleri düşürdüğü söylenebilir.



Şekil 13. Balata yoğunluğunun balata üzerindeki eşdeğer von-Mises gerilmesine etkisi  $p_0 = 0.78$  MPa, (a)  $\rho_b = 1000$  kg/m<sup>3</sup>, (b)  $\rho_b = 2000$  kg/m<sup>3</sup>, (c)  $\rho_b = 4000$  kg/m<sup>3</sup>, (d)  $\rho_b = 8000$  kg/m<sup>3</sup>.

Figure 13. Influence of mass density of the pad on equivalent von-Mises stress on pad  $p_0 = 0.78$  MPa, (a)  $\rho_b = 1000$  kg/m<sup>3</sup>, (b)  $\rho_b = 2000$  kg/m<sup>3</sup>, (c)  $\rho_b = 4000$  kg/m<sup>3</sup>, (d)  $\rho_b = 8000$  kg/m<sup>3</sup>.



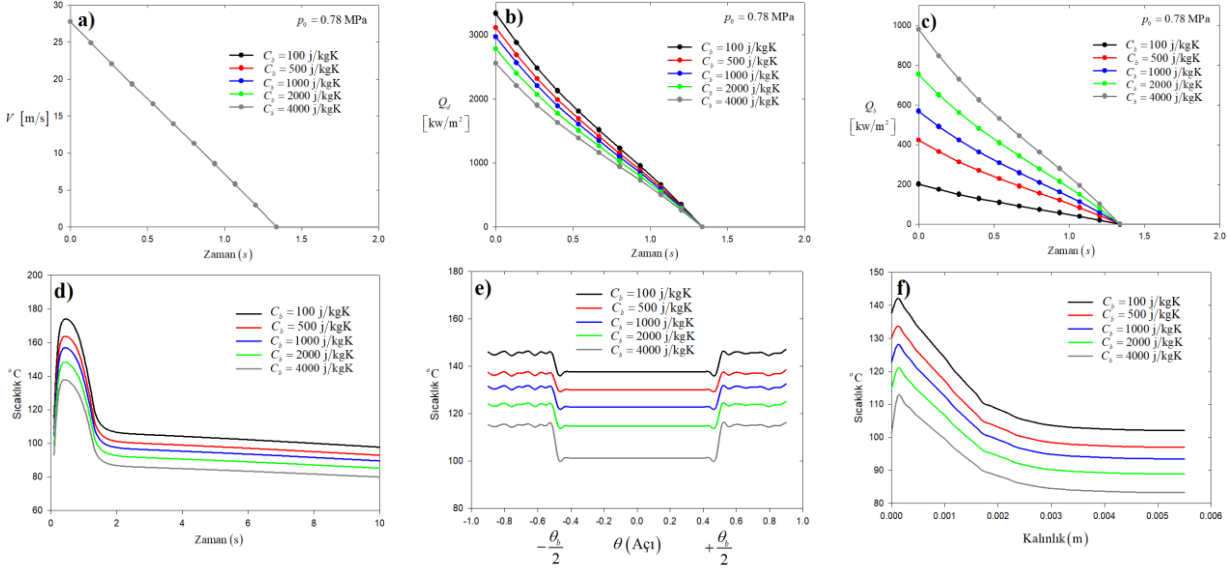
Şekil 14. Balata yoğunluğunun disk üzerindeki eşdeğer von-Mises gerilmesine etkisi  $p_0 = 0.78$  MPa, (a)  $\rho_b = 1000$  kg/m<sup>3</sup>, (b)  $\rho_b = 2000$  kg/m<sup>3</sup>, (c)  $\rho_b = 4000$  kg/m<sup>3</sup>, (d)  $\rho_b = 8000$  kg/m<sup>3</sup>.

Figure 14. Influence of mass density of the pad on equivalent von-Mises stress on disc  $p_0 = 0.78$  MPa, (a)  $\rho_b = 1000$  kg/m<sup>3</sup>, (b)  $\rho_b = 2000$  kg/m<sup>3</sup>, (c)  $\rho_b = 4000$  kg/m<sup>3</sup>, (d)  $\rho_b = 8000$  kg/m<sup>3</sup>.

### Balata özgül ısı kapasitesinin sıcaklık ve gerilme üzerine etkisi (Influence of specific heat capacitance of the pad on temperature and stress)

Bu bölümde balata malzemesi özgül ısı kapasitesindeki değişimin  $C_b$ , durma zamanına  $t_s$ , disk ve balata için uygulanacak ısı akısı miktarlarına  $Q_d$ ,  $Q_b$ , zamana göre sıcaklık değerine ve Yol-1 ile Yol-2 üzerindeki sıcaklık dağılımlarına olan etkileri araştırılmıştır. Sonra, eşdeğer von-Mises gerilmeleri hesaplanmıştır. Seramik içerikli aşındırıcı balata malzemeleri olan FC-16L ve FMC-11 için özgül ısı kapasitesi değerleri sırasıyla 961 j/kg K ve 500 j/kg K olarak verilmiştir (Yevtushenko ve diğ. 2013; Yevtushenko ve Grzes, 2014). Bu bölümde balata özgül ısı kapasitesi değeri parametrik olarak  $C_{pb} = 100$  j/kg K ile  $C_{pb} = 4000$  j/kg K arasında değiştirilmiştir. Balata ve diskte özgül ısı kapasitesi dışındaki diğer termoelastik özellikler için Çizelge 2 verileri kullanılmıştır. Şekil 15(a)'dan da görüleceği gibi balata malzemesinin özgül ısı kapasitesinin değişiminin durma zamanına bir etkisi yoktur. Ancak, özgül ısı kapasitesi arttıkça disk yüzeyine doğru uygulanan ısı akısı miktarı azalmakta, balata yüzeyine

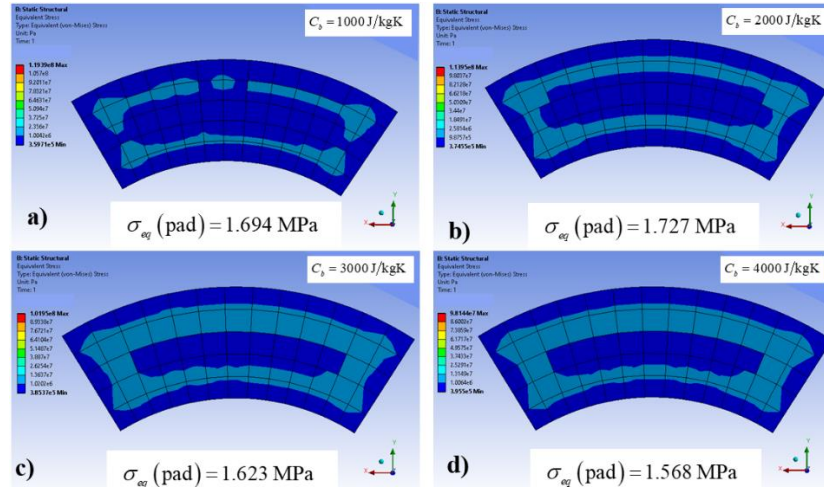
doğru uygulanan ısı akısı miktarı ise artmaktadır. Bu durum Şekil 15(b) ve Şekil 15(c)'den görülebilir. Şekil 15(d)'de zamana bağlı sıcaklık değeri verilmiştir. Balata özgül ısı kapasitesi arttıkça zamana bağlı maksimum sıcaklık değeri azalmaktadır. Benzer şekilde Yol-1 üzerinde sıcaklık değerleri de balata özgül ısı kapasitesinin artması ile azalmaktadır. Balata/disk temas yüzeyi ile temas yüzeyi dışındaki sıcaklık arasındaki fark özgül ısı kapasitesi yüksek olduğunda artmaktadır. Bu durum Şekil 15(e)'de görülmektedir. Şekil 15(f) disk kalınlığı yönünde Yol-2 üzerindeki sıcaklık dağılımlarını göstermekte, artan  $C_b$  değeri için bu yol üzerinde sıcaklığın düştüğü görülmektedir.



**Şekil 15.** Balata özgül ısı kapasitesinin etkisi  $p_0 = 0.78$  MPa, (a) Hız-zaman, (b) Diske uygulanan ısı akısı-zaman, (c) Balataya uygulanan ısı akısı-zaman, (d) Sıcaklık-zaman, (e) Sıcaklığın durma anında Yol-1 üzerindeki dağılımı, (f) Sıcaklığın durma anında Yol-2 üzerindeki dağılımı.

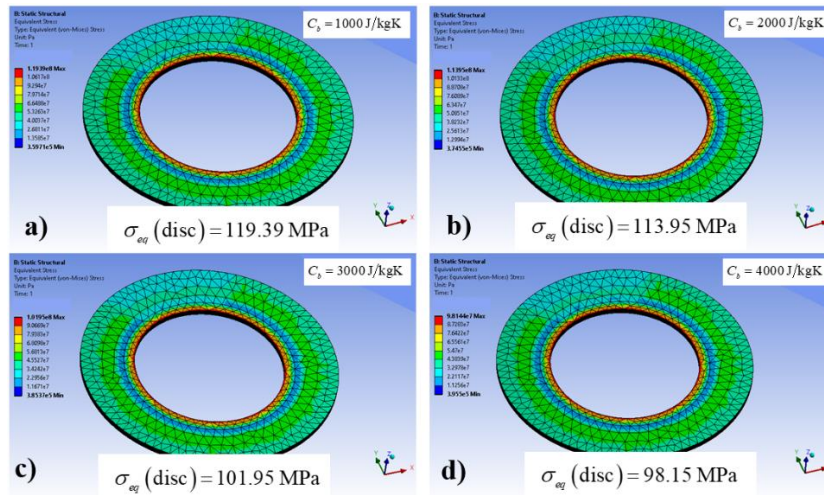
**Figure 15.** Influence of specific heat capacitance of the pad  $p_0 = 0.78$ , (a) Velocity-time, (b) Heat flux applied to disc-time, (c) Heat flux applied to pad-time, (d) Temperature-time, (e) Distribution of temperature on Yol-1 at stop time, (f) Distribution of temperature on Yol-2 at stop time.

Şekil 16 ve Şekil 17'de sırasıyla balata ve disk için eşdeğer von-Mises gerilmeleri sunulmuştur. Balata özgül ısı kapasitesi  $C_b = 1000$  j/kg K için gerilme değeri 1.694 MPa,  $C_b = 2000$  j/kg K iken gerilme değeri 1.727 MPa ve  $C_b = 4000$  j/kg K olduğunda gerilme değeri 1.568 MPa olmaktadır. Balata için gerilmeler önce artmakta sonra ise azalma eğilimi göstermektedir. Gerilmenin balata yüzeyinde en fazla olduğu yerler iç kısımlardır. Gerilmenin en az olduğu yerler ise balata kenarlarıdır. Disk üzerindeki gerilmeye bakılacak olursa,  $C_{pb} = 1000$  j/kg K için eşdeğer von-Mises gerilmesi 119.39 MPa,  $C_{pb} = 2000$  j/kg K için 113.95 MPa ve  $C_{pb} = 4000$  j/kg K için bu değer 98.15 MPa olmaktadır. Balata özgül ısı kapasitesindeki artışın disk yüzeyindeki von-Mises gerilmelerinde azalmaya sebep olduğu söylenebilir.



Şekil 16. Balata özgül ısı kapasitesinin balata üzerindeki eşdeğer von-Mises gerilmesine etkisi  $p_0 = 0.78$  MPa, (a)  $C_b = 1000$  j/kg K, (b)  $C_b = 2000$  kg/m<sup>3</sup>, (c)  $C_b = 3000$  kg/m<sup>3</sup>, (d)  $C_b = 4000$  j/kg K.

Figure 16. Influence of specific heat capacitance of the pad on equivalent von-Mises stress on pad  $p_0 = 0.78$  MPa, (a)  $C_b = 1000$  j/kg K, (b)  $C_b = 2000$  kg/m<sup>3</sup>, (c)  $C_b = 3000$  kg/m<sup>3</sup>, (d)  $C_b = 4000$  j/kg K.



Şekil 17. Balata özgül ısı kapasitesinin disk üzerindeki eşdeğer von-Mises gerilmesine etkisi  $p_0 = 0.78$  MPa, (a)  $C_b = 1000$  j/kg K, (b)  $C_b = 2000$  kg/m<sup>3</sup>, (c)  $C_b = 3000$  kg/m<sup>3</sup>, (d)  $C_b = 4000$  j/kg K.

Figure 17. Influence of specific heat capacitance of the pad on equivalent von-Mises stress on disc  $p_0 = 0.78$  MPa, (a)  $C_b = 1000$  j/kg K, (b)  $C_b = 2000$  kg/m<sup>3</sup>, (c)  $C_b = 3000$  kg/m<sup>3</sup>, (d)  $C_b = 4000$  j/kg K.

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada bir otomobil disk fren mekanizması için üç boyutlu termoelastik gerilme analizi yapılmıştır. Termoelastik analiz için silindirik koordinatlarda disk ve balata için ısı iletim denklemi türetilmiştir. Isı iletim denklemini çözebilmek için balata ve diske uygulanan sınır ve ilk şartlar belirlenmiştir. Silindirik koordinatlarda gerilme-gerinim ilişkisi elastisite teorisi kullanılarak belirlenir. Termoelastik çözümler sonlu elemanlar analizi vasıtası ile yapılmıştır. Disk ve balata sonlu elemanlara bölünmüş, önce zamana bağlı termal ve ardından kararlı rejim yapısal analizler yapılmıştır. Sürtünme katsayısı değişen frenleme basınçları için farklılık göstermekte ve ayrıca sıcaklığa ve zamana bağlıdır. Sürtünme katsayısı değişimini analize dahil etmek için termal çözümde iteratif bir yöntem geliştirilmiştir. Böylece zamana bağlı sıcaklık dağılımı yakınsayana kadar sürtünme katsayısı zamanın bir fonksiyonu olarak değiştirilmiştir. Sürtünme katsayısı sıcaklık ile azalan bir eğilim gösterdiğinden araç durma zamanı

iterasyonlar sonucunda artmıştır. Her bir düğüm noktasında öncelikle sıcaklık elde edilmiş ardından yapısal analizde von-Mises gerilmesi hesaplanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Frenleme basıncının artması, aracın daha kısa sürede durmasına neden olur. Sürtünme katsayısı değişen basınçlar için farklılık göstermekte, kabul edilen modelde sıcaklık artışı sürtünme katsayısının azalmasına neden olmaktadır. Frenleme basıncı artarken, disk ve balata için daha kısa bir zaman aralığında daha fazla ısı akısı uygulaması gerçekleşir. Bu durum disk üzerinde kısa sürede daha fazla sıcaklık oluşmasını ve ardından soğumayı sağlar. Frenleme basıncının artması balata yüzeyinde daha büyük eşdeğer von-Mises gerilmelerine neden olurken, disk üzerindeki gerilmelerde önce artma sonra azalma meydana gelir. Bunun temel nedeni daha yüksek frenleme basıncında sürtünme katsayısının azalmasıdır.
- Balata ısı iletim katsayısı arttıkça disk yüzeyine uygulanan ısı akısı azalmakta, balata yüzeyine uygulanan ısı akısı artmaktadır. Bu nedenle disk üzerinde görülen sıcaklık değerleri düşmektedir. Balata ısı iletim katsayısının artması balata ve disk yüzeylerinde hesaplanan eşdeğer von-Mises gerilmelerinde azalmaya neden olur.
- Balata yoğunluğu artarken disk yüzeyine uygulanan ısı akısı azalmakta, balata yüzeyine uygulanan ısı akısı artmaktadır. Bu nedenle disk üzerinde daha düşük sıcaklıklar oluşur. Yoğunluğun artması, balata ve disk yüzeyinde hesaplanan eşdeğer von-Mises gerilmelerinde azalmaya neden olur.
- Balata özgül ısı kapasitesi artarken, disk yüzeyine uygulanan ısı akısı azalmakta, balata yüzeyine uygulanan ısı akısı ise artmaktadır. Bu nedenle disk yüzeyinde daha düşük sıcaklık dağılımları gözlenir. Balatanın özgül ısı kapasitesinin artması balatada gerilmelerin önce artmasına sonra azalmasına sebep olurken, diskte görülen eşdeğer von-Mises gerilmesinde azalmaya sebep olur.
- Analizler sonucu en yüksek eşdeğer von-Mises gerilmesi balata iç kısımlarında, en düşük gerilmeler ise balata dış çevresinde görülmektedir. Diskte görülen gerilmeler balatada görülen gerilme değerlerine göre daha büyüktür. Bunun temel nedeni ise balata malzemesinin elastik modülünün disk malzemesine göre oldukça düşük olmasıdır.
- Disk yüzeyinden iç kısma doğru giden yolda sıcaklıkların ve yüzey gerilmelerinin düşürülmesi diskte oluşacak aşınma ve çatlakların önlenmesi ve mevcut çatlakların ilerlemesinin yavaşlamasına olanak tanıdığından, frenleme basıncı ve balata malzemesi seçimi fren disk tasarımında oldukça önemlidir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Adamowicz, A., Grzes, P., 2011, "Analysis of disc brake temperature distribution during single braking under non-axisymmetric load", *Applied Thermal Engineering*, 31, 1003-1012.
- Akhtar, M.M.J., Abdullah, O.I., Schlattmann, J., 2013, "Transient Thermoelastic analysis of dry clutch system", *Machine Design*, 5(4), 141-150.
- ANSYS Inc., 2016, "ANSYS Basic Analysis Procedure Guide, Release 17.1", Canonsburg, PA, USA.
- Belhocine, A., 2017, "FE prediction of thermal performance and stresses in an automotive disc brake system", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89, 3563-3578.
- Belhocine, A., Abu Bakar, A., Bouchetara, M., 2014, "Structural and contact analysis of disc brake assembly during single stop braking event", *American Journal of Mechanics and Applications*, 2(3), 21-28.
- Belhocine, A., Abu Bakar, A., Bouchetara, M., 2016, "Thermal and structural analysis of disc brake assembly during single stop braking event", *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 14(1), 26-38.
- Belhocine, A., Bouchetara, M., 2012a, "Thermal analysis of a solid brake disc", *Applied Thermal Engineering*, 32, 59-67.
- Belhocine, A., Bouchetara, M., 2012b, "Thermomechanical modelling of dry contacts in automotive disc brake", *International Journal of Thermal Sciences*, 60, 161-170.



- Belhocine, A., Bouchetara, M., 2013, "Investigation of temperature and thermal stress in ventilated disc brake based on 3D thermomechanical coupling model", *Ain Shams Engineering Journal*, 4, 475-483.
- Benslimane, A., Bouzidi, S., Methia, M., 2018, "Displacements and stresses in pressurized thick-walled FGM cylinders: Exact and numerical solutions", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 168, 219-224.
- Bouchetara, M., Belhocine, A., 2014, "Thermoelastic Analysis of Disk Brakes Rotor", *American Journal of Mechanical Engineering*, 2(4), 103-113.
- Charron, F., 1943, "Partage de la chaleur entre deux corps frottants", *Publ. scient. et techn. Ministere air*, 182.
- Cho, C., Ahn, S., 2002, "Transient thermoelastic analysis of disc brake using the Fast Fourier Transform and finite element method", *Journal of Thermal Stresses*, 25(3), 215-243.
- Choi, J.-H., Lee, I., 2004, "Finite element analysis of transient thermoelastic behaviors in disc brakes", *Wear*, 257, 47-58.
- Eslami, M.R. et al., 2013, "Theory of Elasticity and Thermal Stresses", Solid Mechanics and Its Applications, 197, DOI: 10.1007/978-94-007-6356-2 16, Springer Science+Business Media Dordrecht.
- Fono-Tamo, R.S., 2018, "A Mathematical Model for the purpose of analysing the Thermal Stress Characteristics Of PKS-Based Brake Pad with MATLAB", *Materials Today: Proceedings*, 5, 12534-12544.
- Grzes, P., 2014, "Numerical Analysis of Temperature Field in a Disc Brake at Different Cover Angle of the Pad", *Acta mechanica et automatica*, 8(4), 185-188.
- Grzes, P., 2018, "Finite element solution of the three-dimensional system of equations of heat dynamics of friction and wear during single braking", *Advances in Mechanical Engineering*, 10(11), 1-15.
- Grzes, P., 2019, "Maximum temperature of the disc during repeated braking applications", *Advances in Mechanical Engineering*, 11(3), 1-13.
- Guo, F., Yan, Y., Hong, Y., Li, Y., 2020, "Multiscale modeling: Prediction for thermophysical properties of needled carbon/carbon composite and evaluation of brake disk system", *Materials Today Communications*, 22, 100685.
- Jimbo Y., Mibe, T., Mihe T., Akiyama, K., Matsui H., Yoshida M., Ozawa A., 1990, "Development of High Thermal Conductivity Cast Iron for Brake Disc Rotors", *Journal of Materials and Manufacturing SAE Transactions*, 99(5), 1-7.
- Liew, K.W., Nirmal, U., 2013, "Frictional performance evaluation of newly designed brake pad materials", *Materials and Design*, 48, 25-33.
- Mahmoudi, T., Parvizi, A., Poursaidi, E., Rahi, A., 2015, "Thermo-mechanical analysis of functionally graded wheel-mounted brake disc", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(10), 1-8.
- Mumtaz Jamil Akhtar, M., Abdullah, O.I., Schlattmann, J., 2013, "Transient Thermoelastic Analysis of Dry Clutch System", *Machine Design*, 5(4), 141-150.
- Narayana, K.S., Rao, G.U., Simhachalam, D., Nagaraju, B., 2014, "Finite Element Analysis of Solid and Ventilating Disc Brake", *International Journal of Science and Research*, 3(9), 875-882.
- Shahzamanian, M.M., Sahari, B.B., Bayat, M., Ismarrubie, Z.N., Mustapha, F., 2010a, "Transient and thermal contact analysis for the elastic behavior of functionally graded brake discs due to mechanical and thermal loads", *Materials and Design*, 31, 4655-4665.
- Shahzamanian, M.M., Sahari, B.B., Bayat, B.B., Mustapha, F., Ismarrubie, Z.N., 2010b, "Finite element analysis of thermoelastic contact problem in functionally graded axisymmetric brake disks", *Composite Structures*, 92, 1591-1602.
- Söderberg, A., Andersson, S., 2009, "Simulation of wear and contact pressure distribution at the pad-to-rotor interface in a disc brake using general purpose finite element analysis software", *Wear*, 267, 2243-2251.
- Talati, F., Jalalifar, S., 2009, "Analysis of heat conduction in a disk brake system", *Heat and Mass Transfer*, 45(8), 1047-109.

- Tehrani, P.H., Talebi, M., 2012, "Stress and Temperature Distribution Study in a Functionally Graded Brake Disk", *International Journal of Automotive Engineering*, 2(3), 172-179.
- Wolff, A., 2010, "A Method to Achieve Comparable Thermal States of Car Brakes during braking on the road and on a high-speed roll-stand", *The Archives of Transport*, 22(2), 10.2478/v10174-010-0016-z.
- Yevtushenko, A.A., Adamowicz, A., Grzes, P., 2013, "Three-dimensional FE model for the calculation of temperature of a disc brake at temperature-dependent coefficients of friction", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 42, 18-24.
- Yevtushenko, A., Grzes, P., 2011, "Finite element analysis of heat partition in a pad/disc brake system", *Numerical Heat Transfer Part-A Applications*, 59(7), 521-542.
- Yevtushenko, A.A., Grzes, P., 2012, "Axisymmetric FEA of temperature in a pad/disc brake system at temperature –dependent coefficients of friction and wear", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, 1045-1053.
- Yevtushenko, A.A., Grzes, P., 2014, "Mutual influence of the velocity and temperature in the axisymmetric FE model of a disc brake", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57, 341-346.
- Yevtushenko, A.A., Grzes, P., 2015, "3D FE model of frictional heating and wear with a mutual influence of the sliding velocity and temperature in a disc brake", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 62, 37-44.
- Yevtushenko, A., Kuciej, M., Topczewska, K., 2018, "Analytical model to investigate distributions of the thermal stresses in the pad and disk for different temporal profiles of friction power", *Advances in Mechanical Engineering*, 10(10), 1-10.
- Yevtushenko, A., Kuciej, M., Topczewska, K., 2019, "Effect of the temporal profile of the friction power on temperature of a pad-disc brake system", *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 57(2), 461-473.
- Zhu, Z.-C., Peng, Y.-X., Shi, Z.-Y., Chen, G.-A., 2009, "Three-dimensional transient temperature field of brake shoe during hoist's emergency braking", *Applied Thermal Engineering*, 29, 932-937.



## ARAÇ SÜSPANSİYON SİSTEMİNİN NÜMERİK ve DENEYSEL DİNAMİK ANALİZİ

<sup>1</sup>Himmet OKUTURLAR , <sup>2</sup>Mustafa TINKIR 

<sup>1</sup>Otokoc Otomotiv Tic. ve San. AŞ, SSH Departmanı, Bursa, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Necmettin Erbakan Üniversitesi, Müh. ve Mim. Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

<sup>1</sup>[himmeto@birmot.com.tr](mailto:himmeto@birmot.com.tr), <sup>2</sup>[mtinkir@erbakan.edu.tr](mailto:mtinkir@erbakan.edu.tr)

(Geliş/Received: 09.08.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 11.10.2020)

**ÖZ:** Bu çalışmada bir binek araç süspansiyon sisteminin nümerik ve deneysel dinamik analizi incelenmiştir. Öncelikle gerçek bir araca ait MacPherson tip süspansiyon sisteminin matematiksel modeli Newton-Lagrange yasaları, MATLAB/Simulink/SimMechanics yazılımı ve katı model kullanılarak oluşturulmuştur. Farklı modelleme yaklaşımlarından elde edilen sistemin hareket davranışları farklı yol girdilerine göre simule edilmiş ve modelleme sonuçları karşılaştırılmıştır. Modelleme çalışmalarının doğrulanması amacı ile gerçek bir aracın hem ön hem arka süspansiyon sisteminin dinamik davranışı deneysel olarak ölçülmüştür. Deneysel çalışmalarda yol girdisine göre aracın deplasman davranışının ölçülmesinde görüntü işleme metodu kullanılmıştır. Görüntü işleme prosesleri MATLAB/Computer Vision System Toolbox yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nümerik ve deneysel sonuçlara göre süspansiyon sistemindeki yay (k) ve sönüm (b) katsayıları karşılaştırılmış ve nümerik modellerde kullanılan bu katsayılar deneysel sonuçlara göre irdelenmiştir. Sonuç olarak bu araştırma kapsamında, görüntü işleme sonucu ile modelleme yöntemleri arasında elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca deneysel ve teorik sonuçlar arasında sistemin ortalama deplasman davranış farkı ön süspansiyon için minimum  $7.92 \times 10^{-8}$  mm. ve arka süspansiyon için  $1.12 \times 10^{-7}$  mm. olarak bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** MacPherson süspansiyon sistemi, matematiksel model, nümerik ve deneysel yaklaşımlar, dinamik analiz, yay ve sönüm katsayıları

### Numerical and Experimental Dynamic Analysis of Vehicle Suspension System

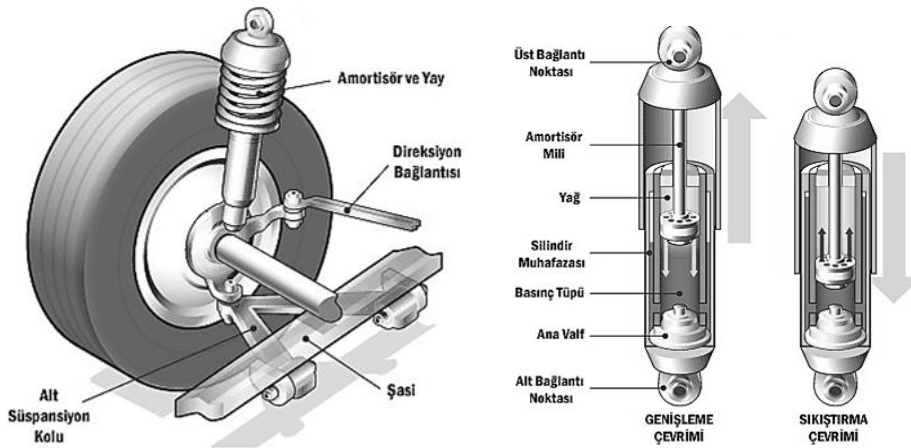
**ABSTRACT:** In this study, numerical and experimental dynamic analysis of a vehicle suspension system is investigated. Firstly, mathematical model of MacPherson type suspension system of a real vehicle is created by using Newton-Lagrangian laws, MATLAB/Simulink/SimMechanics software and solid model. The motion behaviors of the system obtained from different modeling approaches are simulated according to different road inputs and modeling results are compared. The dynamic behavior of both the front and rear suspension systems of a real vehicle is measured experimentally for verifying modeling studies. In experimental works, image processing method is used in measuring of vehicle displacement behavior according to the road input. Image processing processes are performed using the MATLAB/MATLAB/Computer Vision System Toolbox software. According to the numerical and experimental results, the spring (k) and damping (b) coefficients in the suspension system are compared and these coefficients used in the numerical models are examined according to the experimental results. Consequently, the scope of this research, it is observed that the results obtained between image processing and modeling methods are very close to each other. In addition, the average displacement

behavior difference of the system between the experimental and theoretical results are obtained as minimum  $7.92 \times 10^{-8}$  mm for the front suspension and  $1.12 \times 10^{-7}$  mm for the rear suspension.

**Key Words:** MacPherson suspension system, mathematical model, numerical and experimental approaches, dynamic analysis, spring and damping coefficients.

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Motorlu taşıtlarda sürüş güvenliği ve konforun sağlanması için birçok farklı teknik uygulanmaktadır. Gelişen taşıt teknolojisiyle birlikte araç süspansiyon sistemleri üzerinde yapılan çalışmaların sayısı da gün geçtikçe artmaktadır. Otomotiv teknolojisi gelişmesine rağmen içten yanmalı, hibrit ve elektrikli motorlara sahip araçların ortak noktası süspansiyon sistemlerinin hemen hemen aynı olmasıdır. Günümüz taşıtlarının sahip olduğu üstün motor teknoloji ile birlikte hız performanslarının artması taşıtların sürüş güvenliğinin ve konforunun sağlanmasını güçleştirmektedir. Motorlu taşıtlar ve kullanıcılar değişken yol profillerinde ve sürüş dinamiklerinden dolayı farklı frekans değerlerinde gürültü ve mekanik titreşimlere maruz kalmaktadır. Sürüş konforu ve güvenliğinin optimumunu yakalamak amacıyla farklı süspansiyon sistemlerinin tasarımı ve adaptif kontrol teknikleri geliştirilmiştir. Bu tasarım sürecinde karşılaşılan en büyük güçlük; taşıtların çok sayıda bağlı hareketi bir arada gerçekleştirmesidir. Tasarım sürecinin en önemli problemlerinden birisi de sağlanması istenilen ölçütlerin kendi aralarında bir uyumsuzluk içerisinde olmalarıdır. Örneğin yüksek sürüş konforu sürüş güvenliğini azaltırken, sürüş güvenliğini arttırmak amacıyla yapılan müdahaleler de sürüş konforunu azaltmaktadır. Otomobillerdeki süspansiyon sisteminin amacı, lastiklerle yol arasındaki sürtünmeyi maksimum yaparak, sürüş dengesini optimum seviyeye çıkartmak ve kusursuz yol tutuşu sağlayabilmektir. Newton'un hareket kanununa göre bütün kuvvetlerin yön ve büyüklük bileşenleri vardır. Tekerlek bir tümsekten geçerken, yukarı yönde bir ivmelenme söz konusudur. Bu ivmelenme neticesinde eğer süspansiyon olmasa aracın yerle bağlantısı kesilerek son derece stabil olmayan bir durum oluşacaktır. İşte bu noktada süspansiyonun yukarı ivmelenmeyi sönmüleyip tekerleğin yol ile olan bağlantısını sürdürmesini sağlaması gerekmektedir.



**Şekil 1.** MacPherson tip süspansiyon sistemi ve amortisör çalışma prensibi.

*Figure 1. MacPherson type suspension system and shock absorber working principle.*

Bir süspansiyon sistemini oluşturan kısımlar; şasi, tekerlek ile şasi arasındaki bağlantıyı sağlayan parçalar, yay ve amortisör, direksiyon sistemi, teker ve lastik şeklinde söylenebilir. Süspansiyon sistemindeki en önemli parçalar ise yay ve amortisördür. Süspansiyon sisteminde kullanılan yaylar tekerlekler hariç aracın bütün yükünü üzerlerinde taşırlar. Esnek yapıları sayesinde tekerleğin tümseklerde şasiye yaklaşıp, çukurlarda şasiden uzaklaşmasını sağlarlar. Kısaca üzerlerine gelen yükü yumuşatarak ters yönde iletme görevini üstlenirler. Yani tümsekten geçen araçta tekerlek şasiye yaklaşır

ve yay iyice sıkışır, yay eski haline dönerken büyük bir kuvvetle tekerleği geri iter ve yukarı doğru seken araç yerçekimiyle tekrar yere konar ve yayı sıkıştırır. Bu salınımlar (titreşimler) hiç durmadan devam eder. Bu salınımları sönümleyen ise amortisörlerdir. Şekil 1’de MacPherson tip süspansiyon sistemi ve amortisör çalışma prensibi verilmiştir (Okuturlar, 2018). Taşıtlarda meydana gelen titreşimler hem kullanıcı hem de taşıtı oluşturan elemanlar için önemli bir problem teşkil etmektedir. Literatürde bu problemleri gidermek amacı ile birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların ana hedefi ise taşıtlarda optimum konfor seviyesinin ve sürüş karakteristiğinin sağlanması olmuştur. Bu nedenle yapılan çalışmaların bir çoğunda süspansiyon sisteminin nümerik modellenmesi ve deneysel çalışmalar ile optimum süspansiyon parametrelerinin gerçeğe uygun şekilde seçilmesi amaçlanmıştır. Diğer yapılan çalışmalarda ise farklı yol girdilerine göre süspansiyon sisteminin aktif kontrolü amaçlanmış ve bu anlamda farklı kontrolcü tasarımları gerçekleştirilmiştir. Süspansiyon sistemlerini pasif, yarı aktif ve tam aktif olmak üzere üç farklı şekilde sıralamak mümkündür. Bu çalışmanın yapılmasında yararlanılan ve çalışmaya ışık tutan literatürdeki çalışmaların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

Yıldırım bir otobüs süspansiyon sisteminin kontrolünü yapay sinir ağları kullanarak gerçekleştirmiştir. Çalışmada çeyrek taşıt süspansiyon sistemini kullanılmıştır. Tasarlanan kontrolcünün performansı PID, PI ve PD kontrolcü sonuçlarına göre irdelenmiştir. Karşılaştırmalar sonucunda yapay sinir ağı tabanlı kontrolcünün oldukça başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir (Yıldırım, 2004). Eski ve arkadaşları yol profillerinden kaynaklanan araç titreşimlerinin sönümlenmesi amaçlı yapay sinir ağı tabanlı kontrolcü geliştirmişlerdir. Çalışmada tam araç modeli kullanılmış ve aracın x eksenini etrafındaki açısal değişimi ve y eksenini etrafındaki açısal varyasyonu dikkate alınmıştır. Rastgele verilen yol profilleri sistemde bozucu etki olarak modellenmiştir. Çalışmada PID kontrolcü performansı da denenmiş ve elde edilen sonuçlar yapay sinir ağı tabanlı kontrolcü performansı ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda yapay sinir ağı tabanlı kontrolcünün oldukça başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir (Eski ve Yıldırım, 2009). Williams ise çalışmasında oleo-pnömatik adı altında yeni bir eyleyici yapısı ortaya koymuştur. Bu eyleyici tipinde akışkan olarak yağ ve hava birlikte kullanılmıştır. Eyleyici içerisinde yağ tarafından sıkıştırılmış durumda olan hava bir nevi yay etkisi göstermektedir. Sönümleyici içerisindeki yağ akışı ise sönümlenme etkisini oluşturmaktadır (Williams, 1997).

Ramsbottom ve Crolla ise çalışmalarında pnömatik sönümleyicilere yer vermişlerdir. Bu sistemlerde sönümlenme kuvveti, körük adı verilen bölmelere seviye kontrol valfleri üzerinden hava basılması ya da tahliye edilmesi sayesinde elde edilmektedir. Burada körükler standart süspansiyon sistemlerindeki yay elemanının seviye kontrol valfleri ise sönümleyici elemanının işlevini yerine getirmektedir (Ramsbottom ve Crolla, 1997). Diğer yapılan bir çalışmada ise (Bannatyne, 1998); eyleyici yapısında sadece hidrolik akışkan malzeme kullanılmıştır. Bu türden bir sistemde yay ve sönümleyicinin işini eyleyici tek başına üstlenmektedir. Eyleyici içerisindeki akışkan miktarı harici bir pompa tarafından sağlanmaktadır. Böylece taşıt üzerindeki her bir süspansiyon grubunun sönümlenme değeri ve taşıt sürüş yüksekliği birbirinden bağımsız olarak sağlanabilmektedir. Avesh ve Srivastava araç süspansiyon sistemini Matlab/Simulink ortamında modellemişler ve süspansiyon sisteminin performansını arttırmak için PID (oransal türevsel ve integral) kontrolcü tasarımlar ve optimize ederek uygun kontrolcüyü tasarlamışlardır. Sistemin dinamik performansı kullanılan kontrolcünün etkisiyle yüksek seviyelere ulaşmıştır (Avesh ve Srivastava, 2012). Nawawi’ye göre dikey şekilde hareket eden süspansiyon yaylanan ve yaylanmayan iki kütle oluşmaktadır ve sistem iki serbestlik derecesine sahiptir. Bu iki serbestlik dereceli araç modelini Matlab/Simulink kullanarak geliştirmişlerdir. Bu dikey hareketin gerçek davranışını incelemek amacıyla bir deney düzeneği oluşturmuşlardır. Deneysel ve simulasyon sonuçlarını karşılaştırmışlardır ve sonuçların birbirleriyle örtüştüğünü gözlemlemişlerdir (Nawawi, 2012). Fayyad çalışmasında sisteminin transfer fonksiyonunu elde etmiş ve Matlab programı kullanarak kontrol uygulamıştır. Aktif süspansiyon sisteminin sürüş konforunu rezonans frekansında dahi arttırdığını gözlemlemiştir. Basamak girişi için yapılan kontrolde yaylanan kütlede deplasmanının ve ivmesinin azaldığını gözlemlemiştir (Fayyad, 2012).

Aldair ve Wang çalışmalarında güçlü bir kontrolcü tasarlamak için yapay zeka tabanlı bulanık mantık kontrolcü kullanmışlardır. Bu kontrolcü doğrusal olmayan sistemlerde diğer kontrolcülere göre

daha hızlı kontrol sağlamaktadır. Bu kontrolcüyle aracın her köşesindeki titreşimi minimum seviyeye getirmeyi hedeflemişlerdir. Uyguladıkları bu güçlü kontrolcüyü PID kontrolcü ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlarda yapay zeka tabanlı bulanık mantık kontrolcünün etkisinin daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir (Aldair ve Wang, 2012). Çakan bir kara taşıtının çeyrek araç süspansiyon sistemini Newton ve Lagrangian yasalarına göre modellemiştir. Daha sonra sistemin açık ve kapalı çevrim pasif mod davranışı incelenmiş, sistemin kararlılık, frekans cevabı ve kök yer eğrileri elde etmiştir. Sistemin dinamik davranışını ifade eden matematiksel denklemleri ve simülasyon modelini Matlab/Simulink ve ADAMS programları kullanarak oluşturmuştur. Her iki programda oluşturulan modeller doğrulanmış ve bu modeller kullanılarak sistemin aktif titreşim kontrolünü farklı türde kontrolcüler kullanarak yapmıştır. Bu kontrolcülerin tasarımında ve uygulanmasında yine MATLAB/Simulink programı kullanılmıştır. Çalışmada PID kontrol (Orantı+İntegral+Türev) ve Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık Kontrol (YSABM) türünde kontrolcülerin performansları simule edilmiş ve başarılı sonuçlar bulunmuştur (Çakan, 2013). Shehata ve arkadaşları çeyrek araç süspansiyon sisteminin aktif kontrolü için bulanık mantık tabanlı kontrolcü geliştirmişlerdir. Sistemin matematiksel modelini Matlab/Simulink yazılımını kullanarak simule etmişlerdir. Bulanık mantık kontrolcü tasarımında trapez ve üçgen üyelik fonksiyonları kullanmışlar ve dokuz, yirmi beş ve kırk dokuz kuraldan oluşan farklı kural tabloları oluşturmuşlardır. Her üyelik fonksiyonu ve kural tablosuna göre sistemin kapalı çevrim kontrolünü gerçekleştirmişler ve kontrolcünün performansını irdelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları pasif sistem sonuçları ile karşılaştırmışlar ve en başarılı sonucu trapez üyelik fonksiyonlarının kullanıldığı 25 kuraldan oluşan bulanık mantık kontrolcünün gerçekleştirdiği sonucuna varmışlardır (Shehata ve diğ., 2014). Erol çeyrek taşıt süspansiyon sisteminin modelini sistem kestirim teknikleriyle çıkarılmasından sonra bu model üzerinden durum uzay tabanlı standart tam dereceden ve çok terimli tabanlı  $H^\infty$  kontrolcü kullanarak kontrolünü gerçekleştirmiştir. Çok terim tabanlı tasarımın temelinde bulunan konveks olmayan yapı kesin pozitif gerçel lemma ile konveks bir şekle indirgenmiştir (Erol, 2015). Yin ve arkadaşları araç süspansiyon sistemleri için arıza tespiti ve izolasyonu üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Önerilen yöntem üç aşamaya ayrılmıştır: 1) ana bileşen analizine dayanan küme sayısını doğrulamak; 2) bulanık pozitifistik C-araçları kümeleme ve hata hatları ile arızaların tespit edilmesi ve 3) Fisher diskriminant analiz tekniğini kullanarak hataların kök nedenlerini izole etmektir. Diğer şemalardan farklı olarak, bu yöntem sadece bir araç süspansiyonunun dört köşesine sabitlenen ivme ölçerlerin ölçümlerine ihtiyaç duymaktadır. Yöntemin etkinliğini göstermek için tam araç modelini kullanmışlardır (Yin ve Huang, 2015).

Zhou ve arkadaşları yaprak yaylı süspansiyon sistemi için amortisör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu nedenle, aracın sürüş konforu ve sürüş güvenliğine sahip olması için optimum sönümleme tasarımını elde etmek amacıyla çeyrek araç modelini kullanmışlardır. Sürüş güvenliğine dayalı süspansiyonun optimal sönümleme oranının matematiksel modeli oluşturmuşlar ve buna dayanarak, süspansiyonlu dinamik sapmanın kök ortalama kare değeri, araç sürüşü için gerçek yol koşulları altında elde edilen yaprak yaylı titreşim genliği ve araç için gerçek yol koşulları altında elde edilen süspansiyon titreşim hızının kök ortalama kare değeri olarak almışlardır. Sonuç olarak amortisör için teorik tasarım yönteminin kullanılmasının, vücut dikey titreşim ivmesinin kök ortalama kare değerinin, geleneksel deneyim yöntemine göre % 7.67 oranında azaldığını gösterilmiştir. Ayrıca, sonucun doğruluğunu göstermek için araç sürüş konfor testi yapmışlardır (Zhou ve diğ., 2016). Putgül ve arkadaşları aracın dinamik hareketi, güvenliği ve konforunu ele alarak tasarlanan ön düzen süspansiyon geometrisinin yapısal özelliklerini incelenmişlerdir. Süspansiyon sistemlerinin taşıt hareketleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Farklı mekanizmalar incelenmiş ve bunların birbirlerine göre üstün ve eksik yönlerinin neler olduğu belirlenmiştir. Tüm bu çalışmaların sonucunda ideal bir ön düzen geometrisinde süspansiyon sisteminin sahip olması gereken nitelikler ortaya koyulmuştur (Putgül ve Altıparmak, 2016). Gönen ve arkadaşları bir midibüsün konfor özelliğini sağlayan ön ve arka aks dikey doğal frekanslarını farklı yay katsayıları için hesaplamış, ön ve arka aks doğal frekanslarının birbirlerine olan oranlarını sabit tutarak aracın viraj dönme karakteristiğini incelenmişlerdir. MSC Adams yazılımında tam araç modelini oluşturmuşlar ve viraj senaryosu ile aracın farklı süspansiyon parametreleri için yalpa

karakteristiğini belirlemişlerdir. Viraj dönme esnasında oluşan yanal ivmenin yalpa açısına oranı aynı kalacak şekilde viraj denge çubuğu kullanımının araç dinamiğine olan etkisi incelenmiş, konfor ve yol tutuş arasındaki ilişki ortaya koyulmuştur (Gönen ve diğ., 2017).

Literatürde yer alan benzer bir çalışmada ise MacPherson tip süspansiyon sistemine sahip çeyrek araç modelinin farklı yol yüklerine göre süspansiyon sistemi parçalarında meydana gelen gerilme ve deplasman davranışlarını ölçebilen hidrolik tahrikli bir test makinasının tasarımı gerçekleştirilmiştir (Risaliti ve diğ., 2019). Ayrıca bu çalışmada test sonuçlarının tahmin edilmesi için Kalman filtreleme yöntemiyle simülasyon modeli oluşturulmuş ve elde edilen test sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Başka bir çalışmada ise yarı aktif süspansiyon sistemine sahip bir aracın modellenmesi ve bulanık mantık yöntemiyle kontrolü gerçekleştirilmiştir (Desikan ve Kalaichelvi, 2015). Ayrıca çalışmada gerçek bir yol tümseğinin MATLAB görüntü işleme yazılımı kullanılarak 2 boyutlu modellenmesi yapılmış ve tümseğin sönümleme davranışı tahmin edilmiştir. Çalışma sonunda pasif süspansiyon sistemi sonuçları ile yarı aktif süspansiyon sistemi sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında ise MacPherson tip süspansiyon sistemine sahip bir binek aracın nümerik ve deneysel dinamik analizi yapılmıştır. Çalışmada gerçek bir araca ait süspansiyon sisteminin matematiksel modeli Newton-Lagrange yasaları, MATLAB/SimMechanics programı ve katı model kullanılarak oluşturulmuş, sistemin hareket davranışları farklı yol girdilerine göre simule edilmiş ve farklı modelleme yaklaşımlarının sonuçları karşılaştırılmıştır. Modelleme çalışmalarının doğrulanması amacı ile gerçek bir aracın hem ön hem arka süspansiyon sisteminin dinamik davranışı görüntü işleme metodu kullanılarak deneysel olarak ölçülmüştür. Nümerik ve deneysel sonuçlara göre süspansiyon sistemindeki yay ( $k$ ) ve sönüm ( $b$ ) katsayıları karşılaştırılmış ve nümerik modellerde kullanılan bu katsayılar deneysel sonuçlara göre irdelenmiştir. Çalışma sonunda, deneysel ve teorik elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.

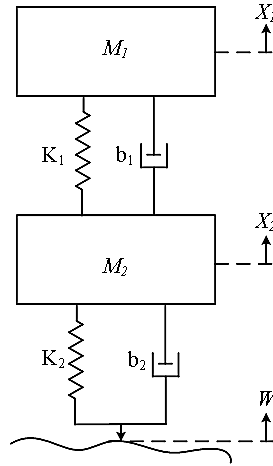
## SÜSPANSİYON SİSTEMİNİN MODELLENMESİ (MODELING of SUSPENSION SYSTEM)

Çalışma kapsamında öncelikle çeyrek araç süspansiyon sisteminin matematiksel modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Matematiksel modelin oluşturulmasında Şekil 2'de verilen fiziksel sistem modeli kullanılmıştır. Bu sistem üzerindeki parametreler Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Fiziksel modelde kullanılan parametreler

*Table 1. Parameters used in the physical model*

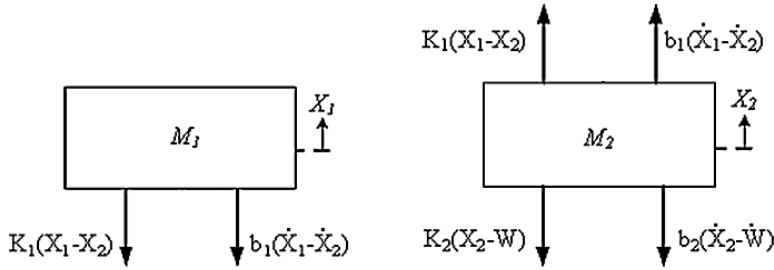
$M_1$	Çeyrek Araç Kütlesi
$M_2$	Tekerlek ve Buna Bağlı Parçaların Kütlesi
$K_1$	Süspansiyon Sisteminin Yay Katsayısı
$K_2$	Lastiğin Yay Katsayısı
$b_1$	Süspansiyon Sisteminin Sönüm Katsayısı
$b_2$	Lastiğin Sönüm Katsayısı



Şekil 2. Çeyrek araç süspansiyon sistemin fiziksel modeli.

Figure 2. Physical model of quarter vehicle suspension system.

Bu modelde  $M_1$  ile gösterilen yaylı kütle tüm araç ağırlığının dörtte birine eşit alınmaktadır.  $M_2$  ile gösterilen yaysız kütle ise tekerlek ve buna bağlı olan aks grubunun ağırlığıdır.  $k$  katsayıları ve  $b$  katsayıları ise sırasıyla yaylanma ve sönümlenme katsayılarıdır.  $X_1$  ve  $X_2$  ise  $W$  yol girişinin etkisiyle oluşan düşey doğrultulu yer değiştirmelerdir. Taşıtın düşey doğrultudaki titreşim hareketlerinin incelenmesi için seçilen fiziksel model yeterli kabul edilmiştir. Şekil 2’de verilen fiziksel modele göre önce sistemin serbest cisim diyagramları oluşturulmuştur. Şekil 3’de verilen serbest cisim diyagramlarına göre Newton’un ikinci yasası ve Lagrange yasası uygulanmış ve sisteme ait hareket denklemleri elde edilmiştir.



Şekil 3 Serbest cisim diyagramları

Figure 3. Free body diagrams.

Lagrange “ $L$ ” hareket denklemleri, sistemin potansiyel enerjisi “ $V$ ” ve kinetik enerjisi “ $T$ ” arasındaki fark olarak tanımlanır (Çakan, 2013).

$$L = T - V \quad (1)$$

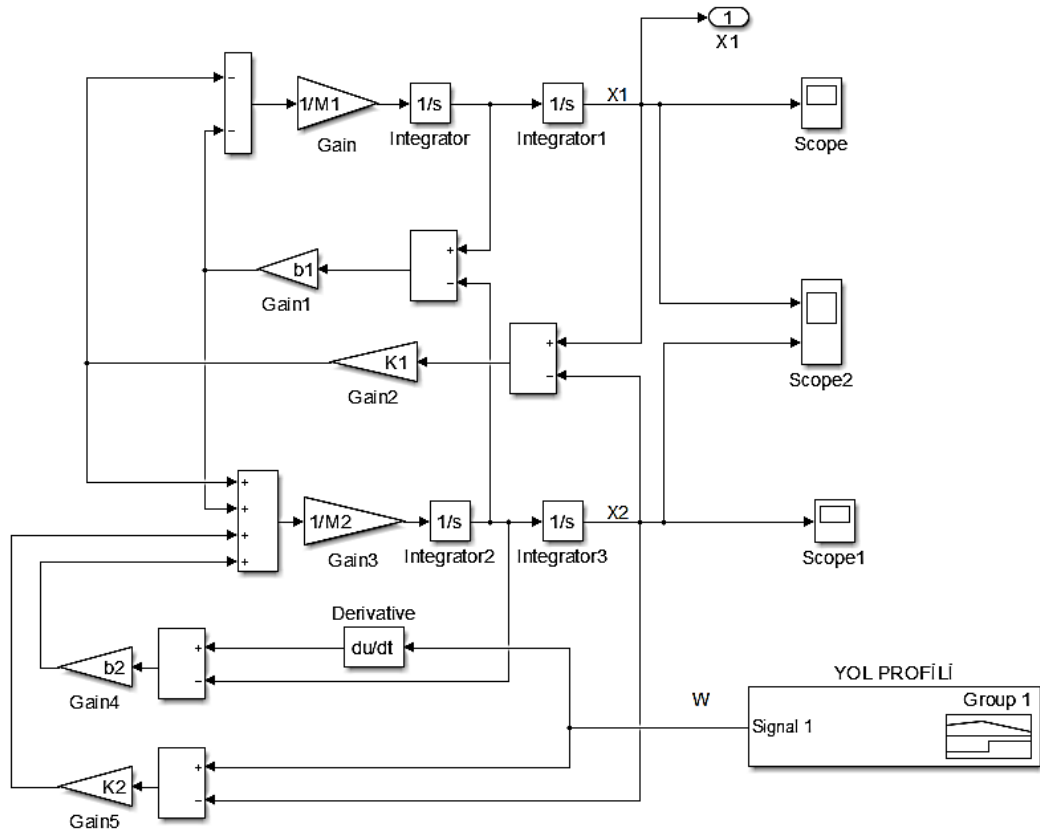
Lagrange sonrası bulunan hareket denklemleri Denklem 2 ve 3’de verilmiştir.

$$M_1 \ddot{X}_1 = -b_1(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) - K_1(X_1 - X_2) \quad (2)$$

$$M_2 \ddot{X}_2 = b_1(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) + K_1(X_1 - X_2) + b_2(\dot{X}_2 - \dot{W}) + K_2(W - X_2) \quad (3)$$

Denklem 2 ve 3’e göre sistemin matematiksel modeli MATLAB/Simulink programında Şekil 4’de görüldüğü gibi oluşturulmuştur.





Şekil 4. Sistemin MATLAB/Simulink programında oluşturulan simülasyon modeli.

Figure 4. The simulation model of the system created in MATLAB / Simulink program.

Araştırma kapsamında yapılan modelleme çalışmalarının doğrulanması amaçlı gerçek araç üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle simülasyon modellerinde deneysel ölçümlerin gerçekleştiği aracın parametreleri kullanılmıştır. Simülasyon çalışmalarında kullanılan k yay ve b sönüm katsayıları ilk başta literatürde yer alan çalışmalara göre belirlenmiştir. Özellikle lastiğin modellenmesine hem yayın hem de sönümün olduğu kabulü yapılmıştır. Hem fiziksel sistem modelinde hem de elde edilen hareket denklemlerinden lastik modeli için bu şekilde bir kabulün yapıldığı görülmektedir. Çalışmanın gerçek araç üzerinden ölçümlerinde Şekil 5'de verilen C segmentinde yer alan VW marka 2017 model 1.2 TSI motora sahip Jetta marka (1325 kg.) araç kullanılmıştır.



Şekil 5. Çalışmada kullanılan gerçek araç modeli.

Figure 5. The actual vehicle model used in the study.

Bu araç modeline göre M1 ve M2 kütleleri belirlenmiştir. Yay ve sönüm sabitlerinin gerçeğe yönelik belirlenmesinde karşılaştırmalar yapılmış, teorik sonuçlar deneysel sonuçlardan elde edilenlere göre revize edilmiştir. Buna göre simülasyon modellerinde kullanılan sistem parametreleri Çizelge 2'de

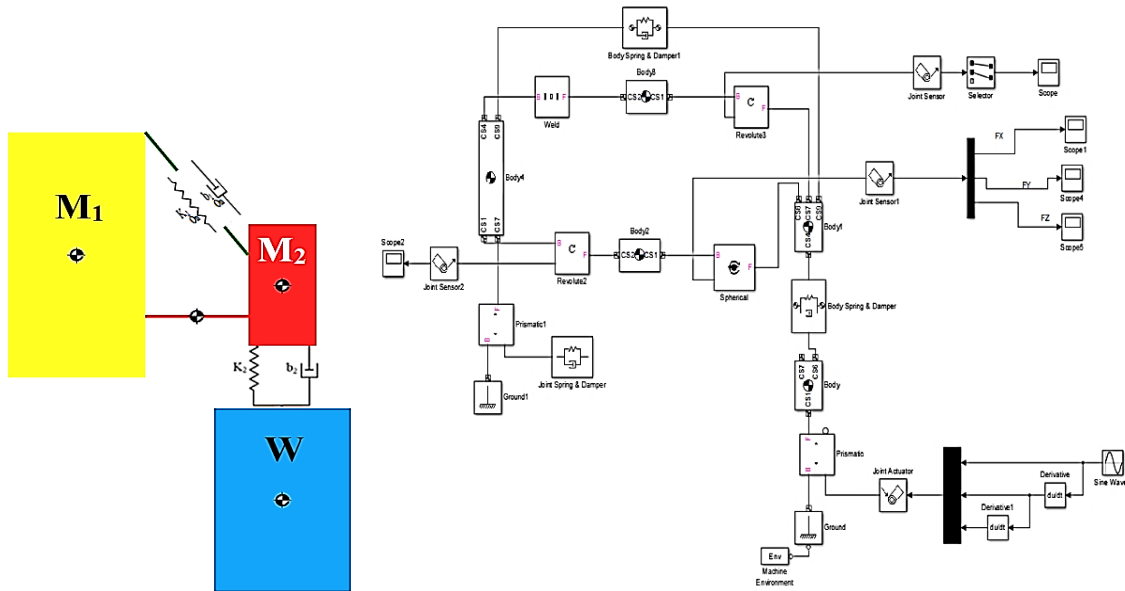
verilmiştir. Çeyrek araç kütlesi kullanıcı kütlesi (75 kg.) dahil edilerek alınmıştır. Yay ve sönüm katsayıları literatürde yer alan çalışmalara göre belirlenmiştir (Çakan, 2013).

**Çizelge 2.** Simülasyon modelinde kullanılan parametrelerin sayısal karşılığı

*Table 2. Numerical equivalent of parameters used in the simulation model*

$M_1$	Çeyrek Araç Kütlesi (Kullanıcı+araç)	350 kg.
$M_2$	Tekerlek ve Buna Bağlı Parçaların Kütlesi	40 kg.
$K_1$	Süspansiyon Sisteminin Yay Katsayısı	15000 N/m
$K_2$	Lastiğin Yay Katsayısı	200000 N/m
$b_1$	Süspansiyon Sisteminin Sönüm Katsayısı	800 Ns./m
$b_2$	Lastiğin Sönüm Katsayısı	1000 Ns./m

Çalışma kapsamında MATLAB/SimMechanics programı ile çeyrek araç süspansiyon sisteminin modellenmesi yapılmıştır. Bu modelleme mantığında Macpherson tip süspansiyon sisteminin çeyrek araç modeli için oluşturulması amaçlanmıştır. Modellemede kullanılan sistem parametreleri Çizelge 2’de verilen değerler ile aynıdır. Sistem parametrelerin aynı olmasındaki amaç, Newton ve Lagrange yasalarından elde edilen modelleme sonuçları ile SimMechanics modelinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve doğrulanmasıdır. Şekil 6’da sistemin MATLAB/SimMechanics kullanılarak oluşturulan modeli verilmiştir. Bu modelde MacPherson tip süspansiyon sistemi oluşturulmak istenmiştir. Modelde lastik Şekil 6’da olduğu gibi yay ( $K_2$ ) ve sönüm ( $b_2$ ) elemanı şeklinde oluşturulmuştur. Lastiğin bağlı olduğu jant ve porya parçaları  $M_2$ , çeyrek aracın kütlesi ise  $M_1$  şeklinde modellenmiştir. Süspansiyon sistemindeki amortisör ise  $K_1$  ve  $b_1$  sönüm elemanı şeklinde modele dahil edilmiştir.



**Şekil 6.** MATLAB/SimMechanics de oluşturulan çeyrek araç süspansiyon sistemi modeli.

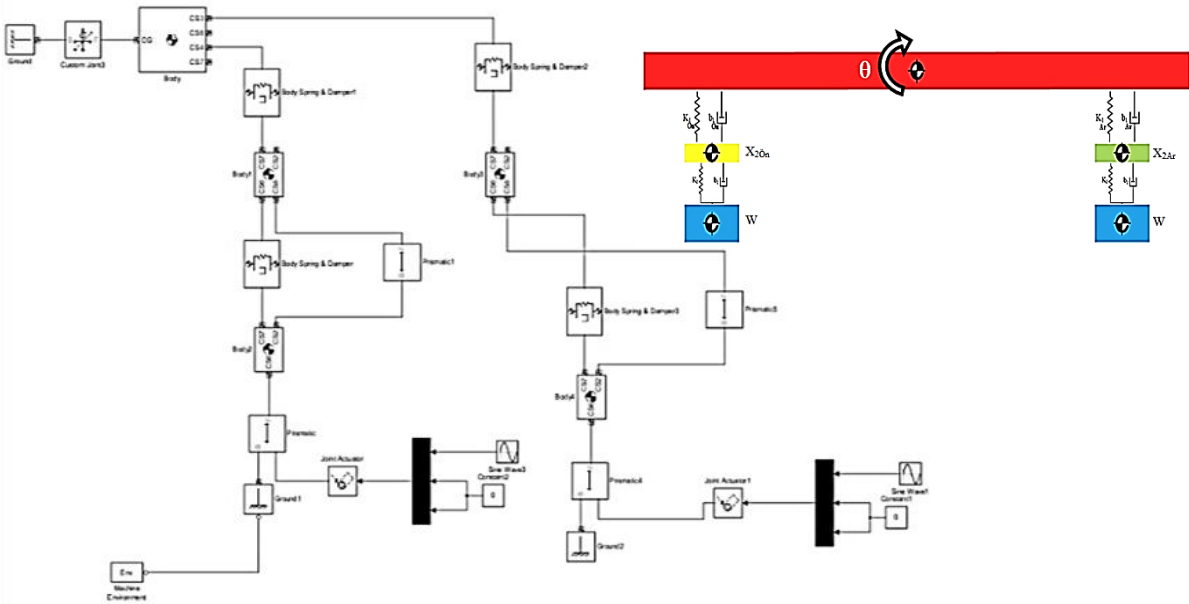
*Figure 6. Quarter vehicle suspension system model created in MATLAB / SimMechanics.*

Kısacası Şekil 6’da ele alınan çeyrek taşıt süspansiyon sistemin farklı bir şekilde modellenmesi amaçlanmıştır. Bu modelin Şekil 4’de verilen Simulink modelinden farklı alt salıncak kolunun da modele dahil edilmesi olmuştur. Ayrıca amortisörü şase ile poryaya bağlayan parçada modellenmiştir. Alt salıncak kolunu poryaya küresel mafsallarla şaseye ise döner mafsallarla bağlanmıştır. Gerçek araç süspansiyon modelinde de durum bu şekildedir. Ayrıca amortisörü şase ile poryaya bağlayan parça; poryaya döner mafsallarla, şaseye ise kaynaklı birleştirme şeklinde bağlanmıştır. Bu modelin Newton ve

Lagrange yasalarından elde edilen hareket denklemlerinden ayrılan özelliği, dinamik yük altında sistemin deplasman, hız, ivme sonuçlarının belirlenmesini sağlamak aynı zamanda mafsallara gelen yüklerinde ölçülmesine imkan kılmasıdır. Bu modele ilave olarak yine MATLAB/SimMechanics programı kullanılarak yarım araç modeli oluşturulmuştur. Bu modelin oluşturulmasındaki amaç araçlardaki ön ve arka süspansiyon sistemlerinin farklı olmasıdır.

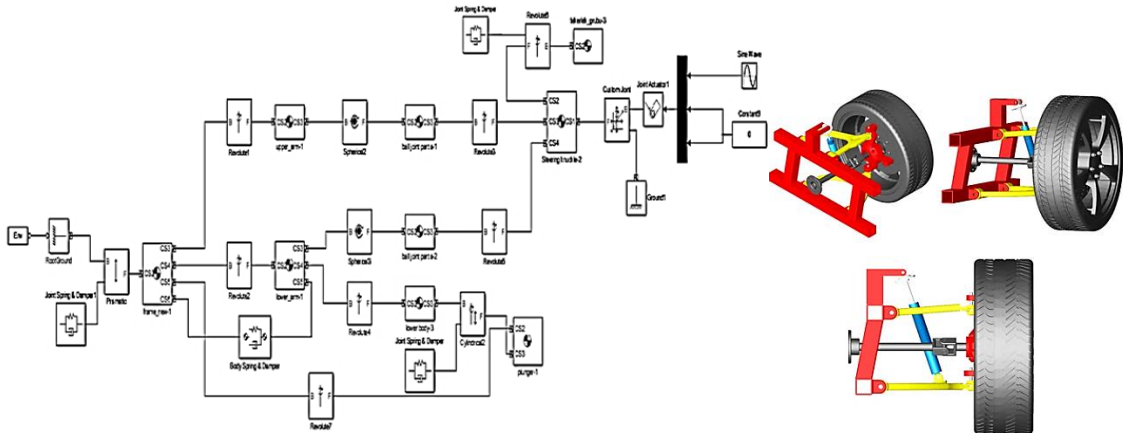
Çalışma kapsamında deneysel ölçümlerin yapıldığı gerçek araç ölçümlerinin teorik yaklaşım sonuçları ile karşılaştırılması için yarım araç modeli de oluşturulmuştur. Şekil 7'de yarım araç modeli verilmiştir. Bu modelde ön ve arka lastiklerin yay ve sönüm katsayıları Çizelge 2'de verilen değerler ile aynı alınmıştır. Ön süspansiyon sistemi yay ve sönüm katsayıları da Çizelge 2 verilenlere göre modele dahil edilmiştir. Ancak arka süspansiyon sisteminin yay katsayısı  $K_{1Ar} = 25000$  N/m, sönüm katsayısı ise  $b_{1Ar} = 1100$  N.s/m şeklinde modellenmiştir.

Simulink ve SimMechanics modellerine ilave olarak sistemin SolidWorks programında katı modeli (Cad) oluşturulmuştur. Bu katı model MATLAB/SimMechanics modeline dönüştürülmüştür. Sistem parametreleri diğer modellerde olduğu gibi Çizelge 2'e göre alınmıştır. Şekil 8'de katı modele göre oluşturulan SimMechanics modeli ve blok şeması verilmiştir.



Şekil 7. MATLAB/SimMechanics de oluşturulan yarım araç süspansiyon sistemi modeli.

Figure 7. Half vehicle suspension system model created in MATLAB / SimMechanics.



Şekil 8. Katı modele göre oluşturulan SimMechanics modeli ve blok şeması.

Figure 8. SimMechanics model and block diagram created according to the solid model.

Çalışmada kullanılan gerçek araca ait ön ve arka süspansiyon sisteminin görüntüleri Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Aracın ön ve arka süspansiyon sistemi.

*Figure 9. Front and rear suspension system of the vehicle.*

### GÖRÜNTÜ İŞLEME İLE MODELLEME (MODELING WITH IMAGE PROCESSING)

Görüntü işleme; görüntüyü dijital form haline getirmek ve bazı işlemleri gerçekleştirmek için geliştirilmiş, spesifik görüntü elde etmek veya ondan bazı yararlı bilgiler çıkarmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışma kapsamında dijital görüntü işleme yöntemi kullanılmıştır. Süspansiyon sisteminin davranışını belirlemek için gerçek aracın dinamik davranışının video görüntüsü alınmış ve MATLAB/Computer Vision System Toolbox'ında bu görüntü işlenmiştir. Görüntü işlemenin daha kolay yapılabilmesi için beyaz renge sahip bir araç seçilmiştir. Aracın ön-arka tekerleri ve davlumbazları da beyaz renge kaplanmıştır. Ölçümlerin alınacağı tekerlek merkezi ve bunun doğrultusundaki şaseye ait çamurluk üzerine 4 cm çapında dairesel siyah nokta şeklinde şeritler yapıştırılmıştır. Aşağıda video işleme için araç üzerinde yapılan hazırlıklara ait resimler Şekil 10 ve Şekil 11' de verilmiştir.



Şekil 10. Görüntü işleme prosesi için aracın hazırlanması.

*Figure 10. Preparation of the vehicle for image processing.*



**Şekil 11.** Görüntü işleme prosesi için kameranın konumlandırılması.

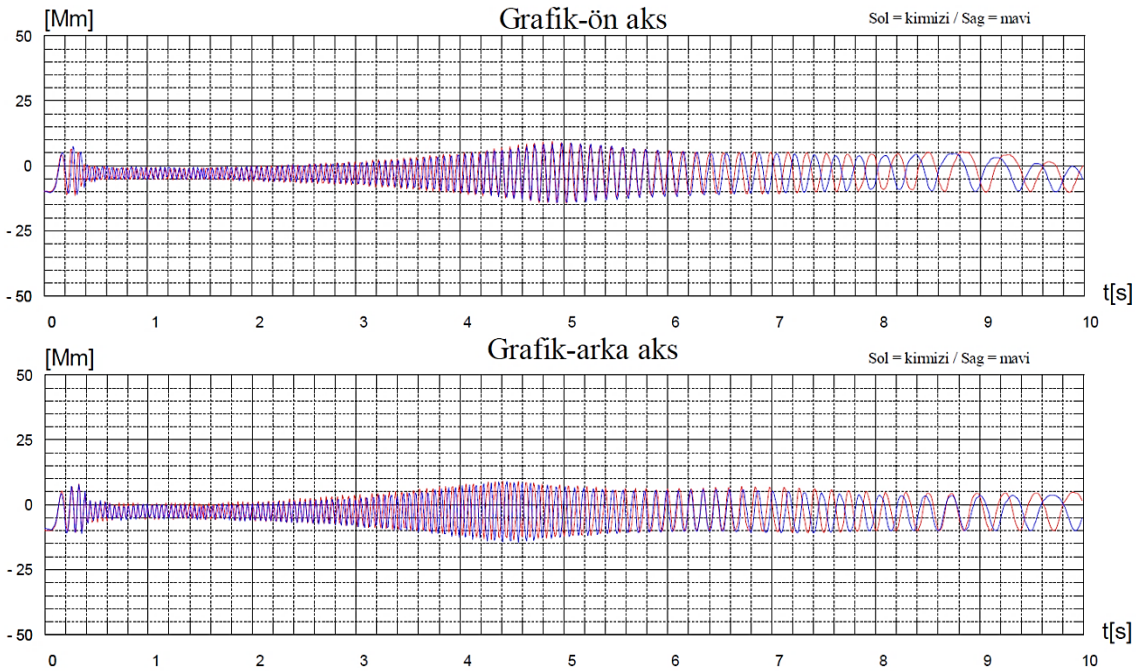
*Figure 11.* The positioning of the camera for image processing process.

Ayrıca yol profilinin (W) verildiği mekanik ve yazılım sisteminin görüntüsü Şekil 12’de verilmiştir. Bu sistemin esas amacı değişken genlikte ve frekansta deplasman vererek araçların süspansiyon sisteminin kontrolünü sağlamaktır. Mekanik sistemin vermiş olduğu deplasmana göre aracın süspansiyon sisteminin senkronizasyonu irdelenmektedir. Saha çalışması kapsamında bu cihaz kullanılmış ve verilen sinüzoidal yol profiline ait grafik Şekil 13’de verilmiştir. Simülasyon çalışmalarında da aynı yol girdisi uygulanmış ve şasenin hareketi incelenmiştir. Saha çalışmasında şasenin hareketinin belirlenmesinde yukarıda bahsedilen görüntü işleme yöntemi kullanılmıştır. Hem teorik simülasyonlardan hem de saha çalışmasından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve irdelenmiştir. Elde edilen sayısal bulgular bir sonraki bölümde ayrıntılı verilmiştir.



**Şekil 12.** Yol profilinin (W) verildiği mekanik ve yazılım sistemi.

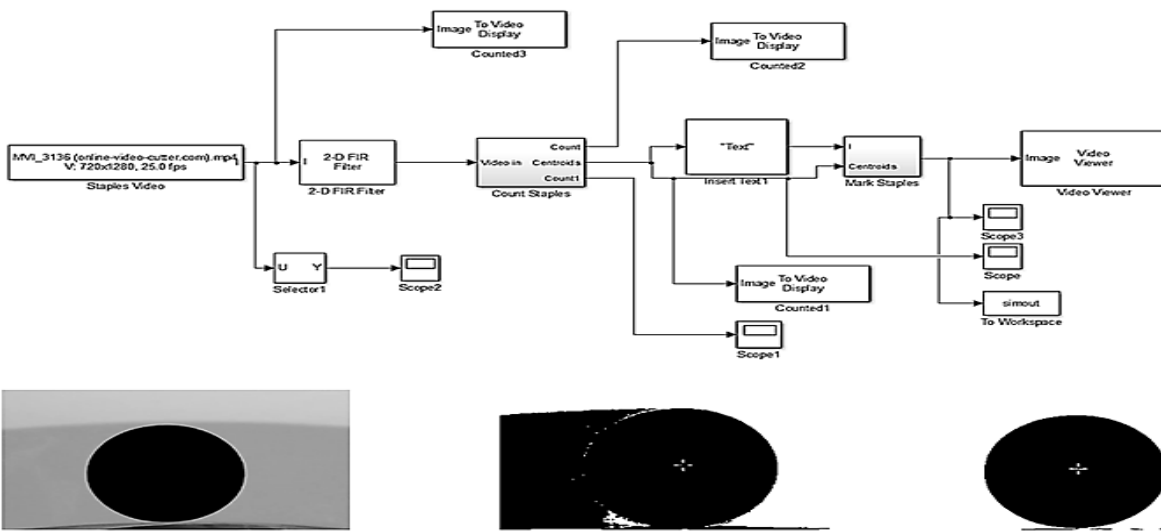
*Figure 12.* Mechanical and software system in which the road profile (W) is given.



Şekil 13. Değişken genlikte ve frekansta verilen yol deplasman (W) giriş sinyali.

Figure 13. The road displacement (W) input signal given at variable amplitude and frequency.

Şekil 14’de MATLAB/Simulink/Computer Vision System Toolbox’ında gerçekleştirilen görüntü işleme bloğu verilmiştir. Görüntü işleme için ilk önce aracın çamurluğuna (şase) yapıştırılan siyah noktanın deplasman (W) girişine karşın kamera görüntüsü alınmış, görüntünün netleştirilmesi için korelasyon filtresi ve karakteristik özelliklerin ayrılması yapılmıştır. Daha sonra nokta merkezinin bulunmasını ve nesnelerin sayılması işlemi için eş merkezlilik uygulanmıştır. Son olarak merkez noktasının işaretlenmesi (+) yapılmış ve çekilen görüntüye göre noktanın yer değiştirmesi incelenmiştir. Görüntü işlemede Canon EOS 600D marka ayaklı kamera kullanılmıştır. Kamera ait özellikler Çizelge 3’de verilmiştir.



Şekil 14. MATLAB/Computer Vision System Toolbox’ında oluşturulan görüntü işleme modeli.

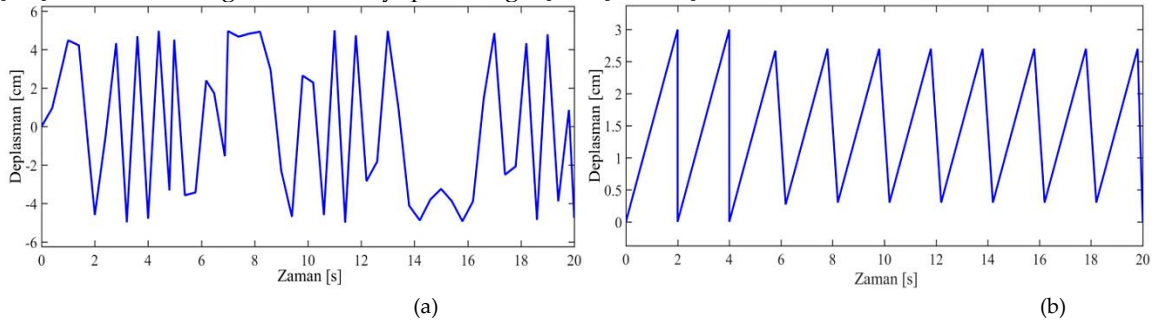
Figure 14. Image processing model created in MATLAB / Computer Vision System Toolbox.

**Çizelge 3.** Görüntü işlemede kullanılan kamera özellikleri*Table 3. Camera features used in image processing*

Çerçeve Genişliği	1280
Çerçeve Yüksekliği	720
Veri Hızı	46085 kb/s
Toplam Bit Hızı	47613 kb/s
Resim Karesi Hızı	50.000 kare/s

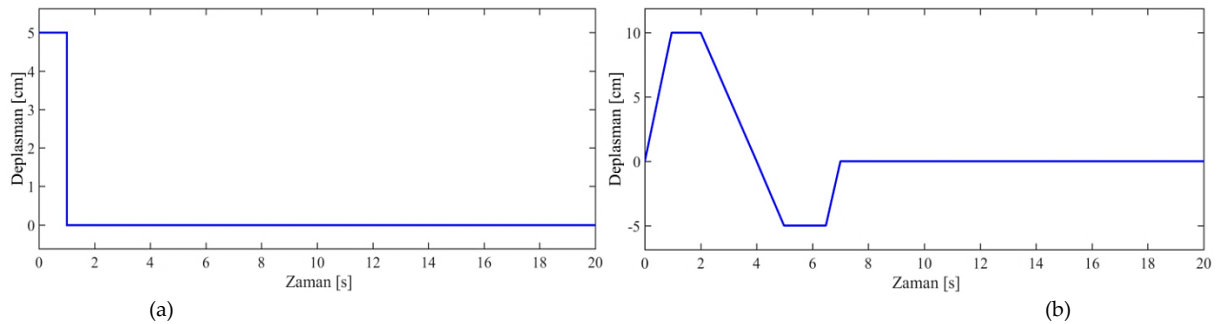
**SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)**

Çalışmanın bulgular kısmında Newton-Lagrange, SimMechanics ve Cad model yaklaşım yöntemleri ile modellenen sistemin farklı yol deplasman giriş sinyallerine göre davranışı karşılaştırılmıştır. Farklı modelleme simülasyon sonuçlarının irdelenmesi yapıldıktan sonra gerçek araç üzerinden yapılan görüntü işleme prosesi ile simülasyon modellerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Öncelikle ön süspansiyon sisteminin farklı yol giriş (W) profillerine göre simülasyonları yapılmıştır. Yol deplasman profili olarak dört farklı giriş sinyali seçilmiş ve Şekil 15 ve Şekil 16'da verilmiştir. Şekil 17'de bu sinyallere örnek olarak hazırlanan simülasyon blok şeması görülmektedir. Yol profillerinin belirlenmesinde literatürde yer alan çalışmalardan (Çakan, 2013), (Wang ve diğ., 2019) yararlanılmış ve farklı frekans ve genliklerde sisteme bozucu giriş şeklinde bu sinyaller tanımlanmıştır. Bu şekilde modelleme yöntemlerinin farklı bozucu giriş sinyallerine göre cevaplarının karşılaştırılması ve doğrulamaların yapılması gerçekleştirilmiştir.



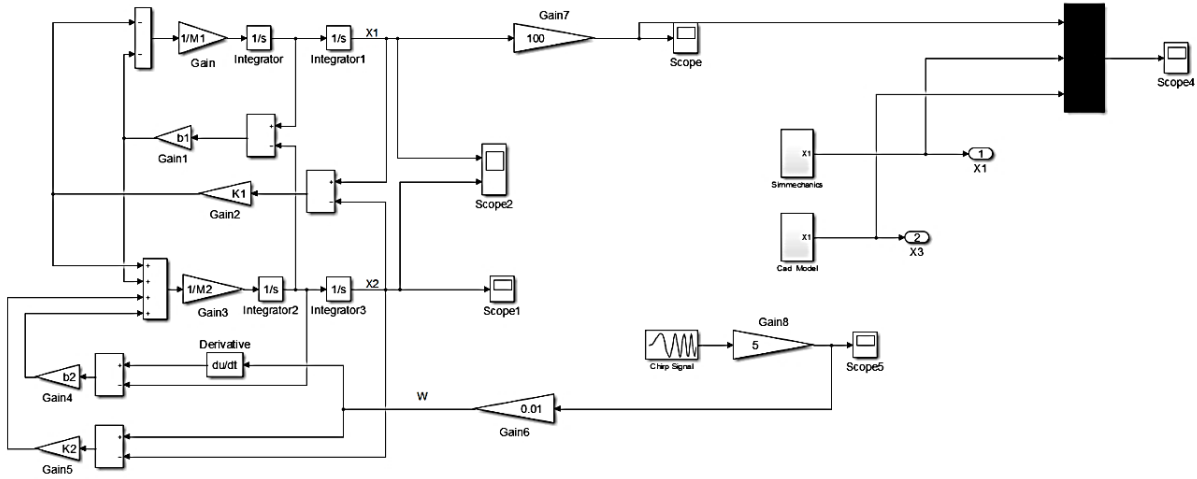
**Şekil 15.** (a) Değişken frekans ve genlikte yol profili (Maks. 4 cm genliğinde, 0.01 Hz-10 Hz.)  
 (b) Değişken genlikte tekrarlamalı yol profili (Maks. 3 cm genliğinde, 0.5 Hz.)

*Figure 15.* (a) Variable frequency and amplitude road profile (Max.4 cm width, 0.01 Hz-10 Hz.)  
 (b) Variable amplitude repetitive road profile (Max.3 cm width, 0.5 Hz.)



**Şekil 16.** (a) Basamak giriş yol profili (Baş:5 cm, Bitiş: 0)  
 (b) İkili trapez yol profili (10 cm Kasis ve 5 cm Çukur).

*Figure 16.* (a) Step input road profile (Head: 5 cm, End: 0)  
 (b) Double trapezoidal road profile (10 cm Bump and 5 cm Pit).



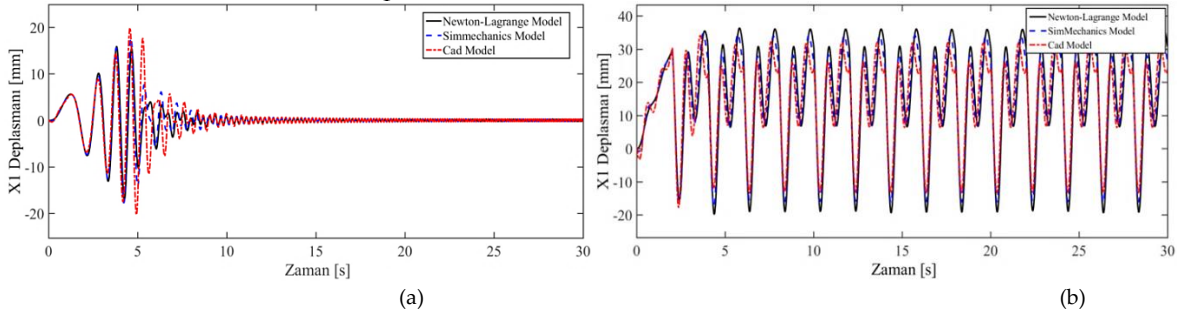
Şekil 17. Simülasyon modellerinin aynı anda simüle edilmesi.

Örn: Şekil 15 (a) Chirp sinyalinin uygulanması

Figure 17. Simulation of simulation models at the same time.

Example: Figure 15 (a) Application of chirp signal

Dört farklı yol deplasman ( $W$ ) giriş sinyaline göre farklı modelleme metotları ile matematiksel modeli elde edilen çeyrek araç ön süspansiyon sisteminin  $X_{1\text{ön}}$  deplasman cevapları bulunmuş ve aynı grafiklerde karşılaştırılmıştır. Bulunan sonuçlar sırası ile Şekil 18 ve Şekil 19'da verilmiştir.  $X_{2\text{ön}}$  deplasmanının değişimi yol deplasman giriş sinyallerine benzer çıktığı için bulgular kısmına konulmamıştır. Bunun nedeni ise sistemin giriş sinyalinin deplasman olması ve ilk etki ettiği kütle (M<sub>2</sub>) yani tekerlek grubunun hareket girişine karşı aynı tepkiye benzer şekilde hareket göstermesidir. Süspansiyon sisteminin amacı üst kütle (M<sub>1</sub>) yani şase'nin yol girişine karşı sönümlenmesidir. Bu nedenle grafiklerde M<sub>1</sub> kütle için  $X_{1\text{ön}}$  deplasman sonuçları irdelenmiştir.



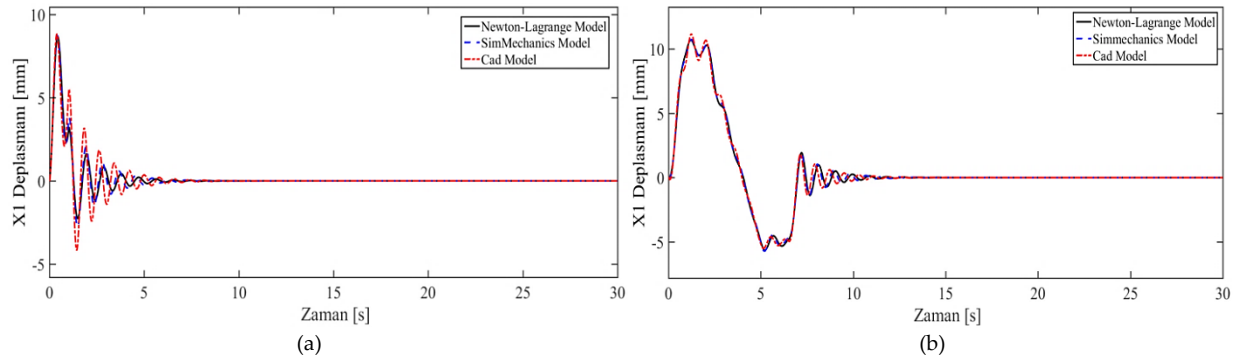
Şekil 18. (a) Şekil 15-(a) da verilen yol profiline göre sistemin  $X_{1\text{ön}}$  deplasman cevabı.

(b) Şekil 15-(b) de verilen yol profiline göre sistemin  $X_{1\text{ön}}$  deplasman cevabı.

Figure 18. (a)  $X_{1\text{Front}}$  displacement response of the system according to the road profile given in Figure 15- (a).

(b)  $X_{1\text{Front}}$  displacement response of the system according to the road profile given in Figure 15- (b).





Şekil 19. (a) Şekil 16-(a) da verilen yol profiline göre sistemin  $X_{1ön}$  deplasman cevabı.

(b) Şekil 16-(b) de verilen yol profiline göre sistemin  $X_{1ön}$  deplasman cevabı.

Figure 19. (a)  $X_{1Front}$  displacement response of the system according to the road profile given in Figure 16- (a).

(b)  $X_{1Front}$  displacement response of the system according to the road profile given in Figure 16- (b).

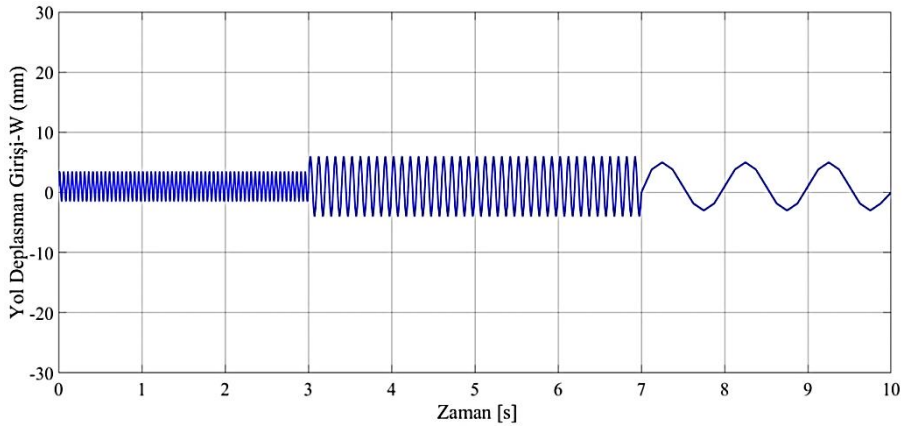
Simülasyon sonuçlarına göre dört farklı yol girişine karşın sistemin  $X_{1ön}$  davranış cevaplarının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise farklı modelleme yöntemlerinin çeyrek taşıt modeline uygun bir şekilde oluşturulması ve modellerde kullanılan sistem parametrelerinin aynı olmasıdır. Sonuçlara bakıldığında Newton-Lagrange modeli ile SimMechanics sonuçlarının birbirine çok benzer olduğu görülmektedir. Cad model davranışının ise diğer sonuçlardan biraz farklı çıkmasının nedeni ise katı modeldeki kütle merkezlerinin ve ataletlerin daha gerçekçi modele dahil edilmesindedir. Ayrıca lastiğin yay ve sönüm parametreleri porya ile lastik arasında alınmış ve bu durum da sistem davranışına etki etmiştir. Bu modelin diğer modellere göre daha gerçekçi olduğunu söylemek mümkündür. Ancak tüm modelleme sonuçlarının yakın çıkması modelleme yöntemlerinin doğruluğunu göstermektedir. Örnek olarak Şekil 15'e göre simülasyon sonuçlarının birbirine ortalama yakınlığı Çizelge 4'de verilmiştir. Ortalama yakınlık hesaplamasında iki fonksiyon zamana bağlı olarak birbirinden çıkarılmış ve toplam veri sayısına bölünmüştür. Referans bir fonksiyon olmadığı için modelleme sonuçları ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Modelleme sonuçları karşılaştırıldıktan sonra saha testlerinde kullanılan süspansiyon sistemi test cihazının oluşturmuş olduğu yol deplasman giriş sinyaline benzer bir giriş sinyalinin MATLAB/Simulink ortamında oluşturulması yapılmıştır.

Çizelge 4. Modelleme sonuçlarının karşılaştırılması

Table 4. The comparison of the modeling results

Modelleme Yöntemleri	Ortalama Deplasman Davranış Farkı
Newton-Lagrange Model ile SimMechanics Modelinin Yakınlığı	$3.38 \times 10^{-7}$ mm.
Newton-Lagrange Model ile Cad Modelinin Yakınlığı	$2.66 \times 10^{-6}$ mm.
SimMechanics Model ile Cad Modelinin Yakınlığı	$2.32 \times 10^{-6}$ mm.

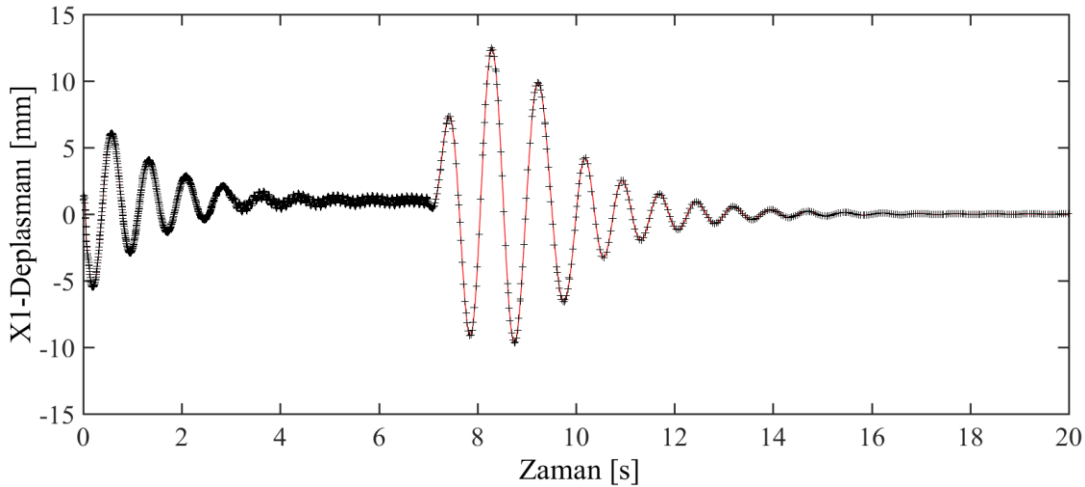
Şekil 13'de verilen test cihazına ait deplasman-zaman grafiği incelenmiş ve bu sinyale benzer değişken frekans ve genlikte bir yol deplasman giriş sinyali üretilmiştir. Bu türde bir yaklaşımın nedeni ise test cihazında verilen giriş sinyalinin cihazın yazılımından sayısal veri olarak alınamamasındandır.



**Şekil 20.** Gerçek yol deplasman giriş sinyaline göre oluşturulan simülasyon giriş sinyali.

*Figure 20.* Simulation input signal generated based on real road displacement input signal.

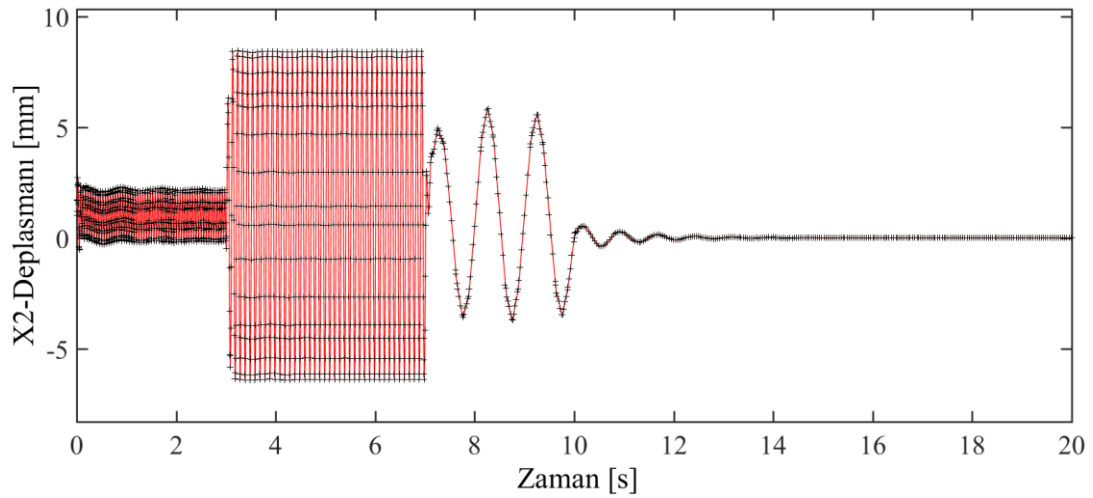
Bu nedenle simülasyon sonuçlarının görüntü işleme sonuçları ile karşılaştırılabilmesi için Şekil 20’de verilen sinyal elde edilmiştir. Bu sinyal üç farklı genlik ve frekansta sinüs fonksiyonun (5 mm-20 Hz, 10 mm-10 Hz ve 8 mm-2 Hz) birleştirilmesinden meydana gelmiştir. Şekil 21’de görüntü işleme sonucunda elde edilen ön süspansiyon sisteminin  $X_{1\text{Ön}}$  deplasmanının değişimi görülmektedir. Buna göre  $X_{1\text{Ön}}$  deplasmanının değişimi sıfırcı konumdan başlamamıştır. Bu nedenle sistemin davranışını bozmayacak şekilde ilk başlangıç değeri sıfıra çekilmiştir. Bunun nedeni ise görüntü işleme meydana gelen gürültü sinyalleri ve kamera açısının değişimi olduğunu söylemek mümkündür. Son olarak da markerların (+) üzerine uygun yörünge (kırmızı) eklenmiştir.



**Şekil 21.** Görüntü işleme sonucundan elde edilen  $X_{1\text{Ön}}$  deplasmanının değişimi.

*Figure 21.* The change of  $X_{1\text{Front}}$  displacement obtained from the image processing result.

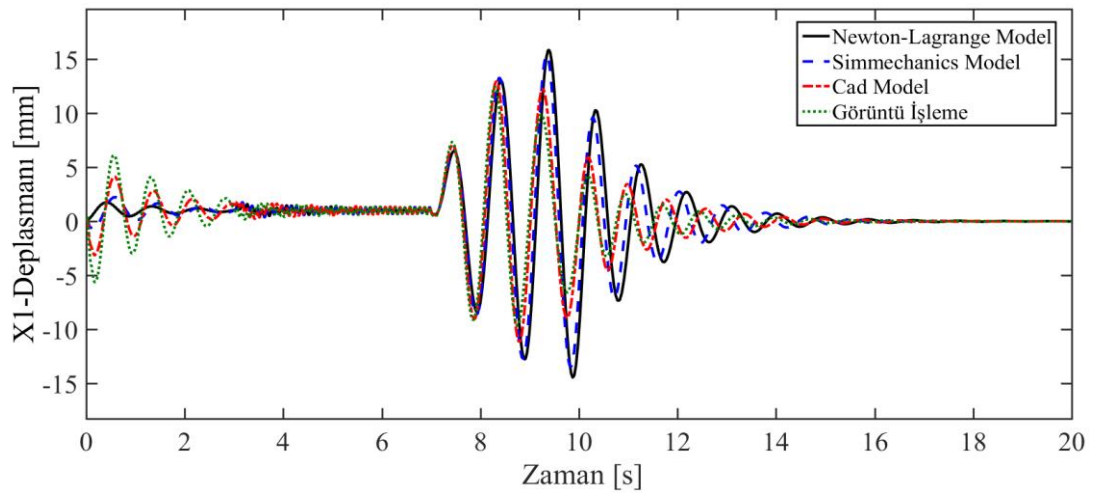
Şekil 22’de görüntü işleme sonucunda elde edilen  $X_{2\text{Ön}}$  deplasmanının değişimi verilmiştir. Grafiğe bakıldığında  $X_{2\text{Ön}}$  deplasmanın yol giriş sinyaline benzer şekilde değiştiği görülmektedir. Bunun nedeni ise yol girişinin deplasman şeklinde olması ve bu nedenle tekerlek grubunun deplasman girişine benzer davranış sergilemesindedir. Markerların başlangıcı Şekil 21’de olduğu gibi sıfır konumundan başlamamaktadır. Dolayısıyla Şekil 21’dekine benzer filtreleme yapılmıştır.



Şekil 22. Görüntü işleme sonucundan elde edilen  $X_{2ön}$  deplasmanının değişimi.

Figure 22. The change of  $X_{2Front}$  displacement obtained from the image processing result.

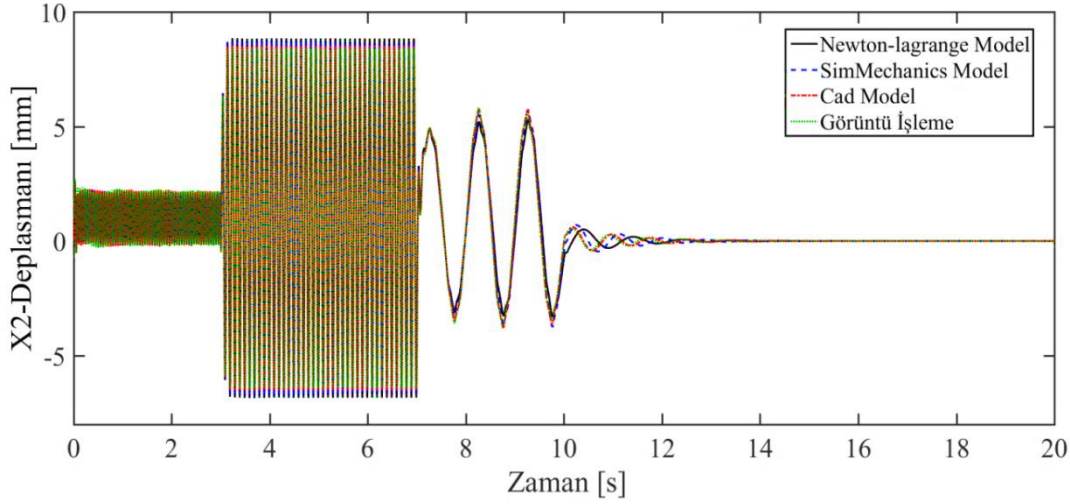
Şekil 20’de verilen yol deplasman girişine göre çalışmada kullanılan farklı modelleme yöntemleri ve gerçek araç üzerinden ölçülen  $X_1$  deplasmanının değişimi Şekil 23’de verilmiştir.



Şekil 23. Simülasyon ve görüntü işlemeden elde edilen  $X_{1ön}$  deplasmanının karşılaştırılması.

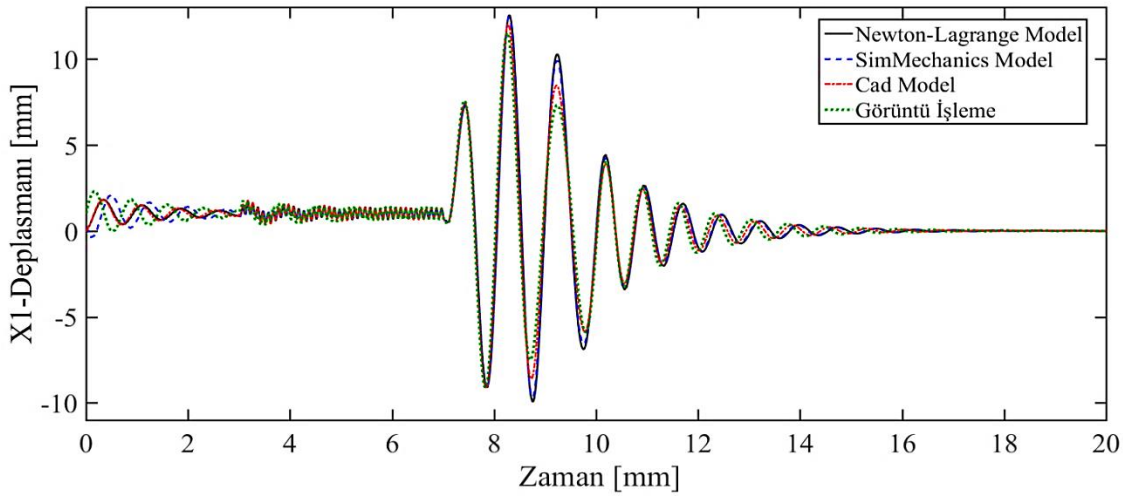
Figure 23. The comparison of  $X_{1Front}$  displacement obtained from simulation and image processing.

Giriş deplasmanı on saniye sonra gerçekte olduğu gibi sıfırlanmaktadır. Bu nedenle Şekil 23’de sönümlenmenin görülebilmesi için yirmi saniyelik zaman aralığı sonucunda  $X_{1ön}$  deplasmanının değişimi verilmiştir. Simülasyonlar ve gerçek ölçümler sonucunda  $X_{1ön}$  deplasmanın yirmi saniye içinde sönümlendiği tespit edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında görüntü işleme ile elde edilen  $X_1$  deplasmanının değişiminin diğer simülasyon modelleri sonuçlarına çok yakın çıktığı görülmektedir. İlk etki esnasında gerçek araç ölçümünde diğer modellere göre biraz daha fazla aşma olmasına rağmen zaman ilerledikçe süspansiyon sistemi davranışının diğer modellerle aynı eğilimde olduğu söylenebilir. Özellikle gerçek araç süspansiyon sistemi modelinin Cad modelleme sonucuna daha yakın bir davranış sergilediği görülmektedir. Bu nedenle Cad modelleme yaklaşımı ile yapılan simülasyonların gerçek sonuçlara daha yakın çıktığını söylemek mümkündür. Oluşan sapmaların ise gerçek araç üzerindeki mafsallı sürtünmelerinden ve ataletlerden dolayı olduğu söylenebilir. Ancak grafiğin tümüne bakıldığında, simülasyon modellerinde sistem davranışına etkisi oldukça fazla olan yay ( $K_1$  ve  $K_2$ ) ve sönüm katsayılarının ( $b_1$  ve  $b_2$ ) seçiminin uygun olduğunu söylemek mümkündür. Şekil 24’de simülasyonlar ve görüntü işleme sonucunda ön süspansiyon sisteminde tekerlek grubunun deplasmanını temsil eden  $X_{2ön}$ ’ün Şekil 20’de verilen yol profil girişine göre karşılaştırılması verilmiştir.



**Şekil 24.** Simülasyon ve görüntü işlemeden elde edilen  $X_{2\text{Ön}}$  deplasmanının karşılaştırılması.  
*Figure 24.* The comparison of  $X_{2\text{Front}}$  displacement obtained from simulation and image processing.

Şekil 24’de, hem simülasyon hem de görüntü işleme yöntemlerine göre ön süspansiyon sistemi tekerlek grubunun  $X_{2\text{Ön}}$  deplasman cevabı  $X_{1\text{Ön}}$  deplasman cevabına nazaran daha küçük genliklerde olduğu görülmektedir. Şekil 25’de arka süspansiyon sisteminin  $X_{1\text{Ar}}$  deplasman cevabının karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 25’e göre  $X_{1\text{Ar}}$  deplasman cevaplarının tüm yaklaşım modellerinde birbirine yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca ön süspansiyon sistemine ( $X_{1\text{Ön}}$ ) göre aynı yol giriş sinyali etkisi altında daha küçük titreşim hareketi yapmaktadır. Bunun nedeni ise arka süspansiyon sistemindeki yay ve sönüm katsayılarının öne göre daha rijit olmasındandır. Elde edilen sonuçların sayısal olarak karşılaştırılması Çizelge 5’de verilmiştir.



**Şekil 25.** Simülasyon ve görüntü işlemeden elde edilen  $X_{1\text{Ar}}$  deplasmanının karşılaştırılması.  
*Figure 25.* The comparison of  $X_{1\text{Rear}}$  displacement obtained from simulation and image processing.

**Çizelge 5.** Farklı modelleme yaklaşımlarının sayısal karşılaştırılması.*Table 5. The numerical comparison of the different modeling approaches.*

Modelleme Yöntemleri	Maksimum Genlik	Sönümlenme Zamanı	Kalıcı Durum Hatası	Görüntü İşleme Sonucuna Göre Ortalama Deplasman Davranış Farkı (mm)
	$X_{1\text{Ön}}$	$X_{1\text{Ön}}$	$X_{1\text{Ön}}$	$X_{1\text{Ön}}$
Newton-Lagrange Model	15.1 mm	19.6 sn.	0	$4.61 \times 10^{-7}$
SimMechanics Model	14.7 mm.	19.5 sn.	0	$4.18 \times 10^{-7}$
Cad Model	13.2 mm.	19.3 sn.	0	$7.92 \times 10^{-8}$
Görüntü İşleme	12.4 mm.	19 sn.	0	0
Modelleme Yöntemleri	Maksimum Genlik	Sönümlenme Zamanı	Kalıcı Durum Hatası	Görüntü İşleme Sonucuna Göre Ortalama Deplasman Davranış Farkı (mm)
	$X_{2\text{Ön}}$	$X_{2\text{Ön}}$	$X_{2\text{Ön}}$	$X_{2\text{Ön}}$
Newton-Lagrange Model	9 mm.	15.2 sn.	0	$1.97 \times 10^{-7}$
SimMechanics Model	8.8 mm.	14.9 sn.	0	$1.96 \times 10^{-7}$
Cad Model	8.6 mm.	14.8 sn.	0	$1.94 \times 10^{-7}$
Görüntü İşleme	8.5 mm.	14.7 sn.	0	0
Modelleme Yöntemleri	Maksimum Genlik	Sönümlenme Zamanı	Kalıcı Durum Hatası	Görüntü İşleme Sonucuna Göre Ortalama Deplasman Davranış Farkı (mm)
	$X_{1\text{Ar}}$	$X_{1\text{Ar}}$	$X_{1\text{Ar}}$	$X_{1\text{Ar}}$
Newton-Lagrange Model	12.3 mm.	18.8 sn.	0	$1.98 \times 10^{-7}$
SimMechanics Model	12.3 mm.	18.5 sn.	0	$1.34 \times 10^{-7}$
Cad Model	12 mm.	18.3 sn.	0	$1.12 \times 10^{-7}$
Görüntü İşleme	11.8 mm.	18.1sn.	0	0

**YORUMLAR ve ÖNERİLER (COMMENTS AND SUGGESTIONS)**

Literatürde araç süspansiyon sistemleri üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar pasif, yarı aktif ve tam aktif süspansiyon sistemlerinin dinamik davranışı üzerine gerçekleştirilmiştir. Pasif süspansiyon sistemleri hakkında yapılan çalışmalarda süspansiyon sisteminin farklı yol profilleri karşısında davranışı matematiksel olarak modellenmiş ve incelenmiştir. Aktif süspansiyon sistemleri üzerine yapılan çalışmalarda araştırmacılar özellikle kontrolcü tasarıma yoğunlaşmışlardır. Araştırmaların bir kısmında sadece simülasyon modelleri ile teorik yaklaşımlar yapılmıştır. Geri kalan çalışmalarda ise farklı türde tasarlanan test düzenekleri kullanılmış ve elde edilen teorik sonuçlar ile test sonuçları karşılaştırılmıştır.

Yapılan bu çalışmanın amacı ise; farklı nümerik modelleme yaklaşımlarının doğruluğunu irdelemek ve deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçları karşılaştırıp teorik modellerin gerçekliğini tespit etmektir. Bu amaç doğrultusunda çalışmada; bir binek aracın pasif süspansiyon sisteminin nümerik ve deneysel dinamik analizi yapılmıştır.

Çalışma sonunda;

- Çalışmanın ilk kısmında; üç farklı nümerik modelleme yönteminin aynı sistem parametreleri ve aynı giriş sinyalleri kullanılarak elde edilen sonuçları karşılaştırılmış ve sunulmuştur.

- Nümerik yaklaşımlarda; tüm modelleme yöntemlerinin sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Ancak Newton-Lagrange yasaları kullanılarak elde edilen model ile MATLAB/SimMechanics programı kullanılarak yapılan modelleme sonuçlarının daha yakın olduğu görülmüştür.

- Görüntü işleme yöntemi ile süspansiyon test makinası girişine karşın gerçek bir aracın şase hareketi ölçülmüş ve sunulmuştur.

- Nümerik modelleme ve görüntü işleme sonuçları karşılaştırılmış ve sunulmuştur.

- Çalışmada kullanılan araç dikkate alındığında, süspansiyon sisteminin nümerik modellenmesinde seçilen yay ( $K_{1Ön-Ar}$ ,  $K_{2Ön-Ar}$ ) ve sönüm ( $b_{1Ön-Ar}$ ,  $b_{2Ön-Ar}$ ) katsayılarının aracın amortisör parametrelerine yakın olduğunu söylemek mümkündür.

- Ayrıca katı modelleme yaklaşımının birçok benzer sistemin modellenmesinde kullanılması mümkündür.

- Yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçların gerçek çalışmalarda kullanılabileceğini, ayrıca bulunan sonuçların gelişmeye yönelik olduğunu, kullanılan modelleme yaklaşımlarının benzer çalışmalara ve literatüre ışık tutacağını söylemek mümkündür.

Çalışma kapsamında yapılan farklı nümerik modelleme yöntemleri benzer ayırık sistemlerin modellenmesinde kullanılabilecek yaklaşımlar olup, literatüre katkı sağlamaktadır. Çalışmada süspansiyon sisteminin modellenmesinde kullanılan bu yaklaşımlar ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca görüntü işleme yöntemi ile daha ekonomik ölçüm sonuçlarının elde edilmesi mümkündür. Süspansiyon sistemi davranışlarının belirlenmesinde seyir halinde araç üzerinden yapılacak deplasman ve kuvvet verileri ile daha gerçekçi yaklaşımlar yapılabilir. Bu çalışmada kullanılan test makinası yerine farklı genlikte ve frekansta yol giriş sinyalleri üretebilen test makinaları ile daha farklı dinamik davranışların tespit edilmesi mümkündür.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Çalışmaya katkılarından dolayı Volkswagen AG Yetkili Bayisi Gökmen Otomotiv Tic. A.Ş.'ne teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aldair, A.A., Wang, W.J., 2012, A neurofuzzy controller for full vehicle active suspension systems, *Journal of Vibration and Control*, Vol 18, Issue 12, pp. 1837-1854.
- Avesh, M., Srivastava, R., 2012, Modeling simulation and control of active suspension system in Matlab Simulink environment, *IEEE Students Conference on Engineering and Systems*, 978-1-4673-0455-9/12.
- Bannatyne, R., 1998, Future Developments in Electronically Controlled Steering and Suspension Systems. In: R.K.Jurgen (Editor), *Electronic Steering and Suspension Systems (1999)*, Society of Automotive Engineers, Warrendale-PA, USA, p. 539-557.
- Çakan A., 2013, *Karayolu Taşıtları Süspansiyon Sisteminde Aktif Titreşim Kontrolü*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Makine Müh. ABD, 80 s.
- Desikan, A., Kalaichelvi, V., 2015, Design for a Preview Control of Semi-Active Suspension System using Fuzzy-Logic and Image Processing techniques, *IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, Shenyang, China, p. 224-229.
- Erol B., 2015, *Çeyrek Taşıt Aktif Süspansiyon Modeli Çıkarımı ve Kontrolü*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği ABD., 105 s.
- Eski, İ., Yıldırım, Ş., 2009, Vibration control of vehicle active suspension system using a new robust neural network control system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(5), 778-793.

- Fayyad, M.S.,2012, Constructing Control System for Active Suspension System, Contemporary Engineering Sciences, Vol. 5, no. 4, 189 – 200.
- Gönen E., Sert, E., Tutu, G., 2017, Aracın Yalpa Karakteristiğinin Taşıt Dinamiğine Olan Etkisinin Analitik ve Nümerik Yöntemlerle İncelenmesi. Mühendis ve Makine, 58(689), 49-61.
- Nawawi, B., Z., 2012, Vibration Investigation For Passenger Car With Different Damping Characteristic On Car Suspension Systems, Faculty of Mechanical Engineering, Unversiti Malaysia Pahang, Thesis of Bachelor Degree.
- Okuturlar, H., 2018, Bir Binek Araç Süspansiyon Sisteminin Nümerik ve Deneysel Dinamik Analizi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Yüksek Lisans Tezi, 57 sayfa.
- Putgöl, Y., Altıparmak, D., 2016, Taşıt Süspansiyon Sistemi Çeşitleri ve Ön Düzen Geometrisine Etkileri. Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi, 19(2), 195-202.
- Ramsbottom, M., D.A. Crolla, 1997, Development and Analysis of a Prototype Controllable Suspension, 972691. In: R.K.Jurgen (Editor), Electronic Steering and Suspension Systems (1999), Society of Automotive Engineers, Warrendale-PA, USA, p. 383-391.
- Risaliti, E., Tamarozzi, T., Vermaut, M., Cornelis, B., Desmet, W, 2019, Multibody model based estimation of multiple loads and strain field on a vehicle suspension system, Mechanical Systems and Signal Processing, 123, 1-25.
- Shehata A., Metered H., Oraby W., A., H., 2014, Vibration Control of Active Vehicle Suspension System Using Fuzzy Logic Controller. Vibration Engineering and Technology of Machinery, 23(2), 389-399.
- Wang, Q., Zhao, Y., Xu, H., Deng, Y., 2019, Adaptive backstepping control with grey signal predictor for nonlinear active suspension system matching mechanical elastic wheel, Mechanical Systems and Signal Processing, 131, p. 97-111.
- Williams, R.A., 1997, Automotive Active Suspensions, Part.1: Basic Principles. Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, vol.211, part.D, p.415-426.
- Yıldırım, Ş., 2004, Vibration control of suspension systems using a proposed neural network. Journal of sound and vibration. 277 (4-5), 1059-1069.
- Yin, S., Huang, Z., 2015, Performance Monitoring for Vehicle Suspension System via Fuzzy Positivistic C-Means Clustering Based on Accelerometer Measurements. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 20(5), 2613- 2620.
- Zhou, C., Pan, L., Yu, Y., Zhao, L., 2016, Optimal damping matching for shock absorber of vehicle leaf spring suspension system. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 32(7), 106-113.



## FABRICATION OF UNDERCOOLED BISMUTH TIN LIQUID METAL PARTICLES WITH HIGH YIELD

Simge ÇINAR

<sup>1</sup> Middle East Technical University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Ankara, TURKEY  
[csimge@metu.edu.tr](mailto:csimge@metu.edu.tr)

(Geliş/Received: 09.07.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 28.10.2020)

**ABSTRACT:** Despite increasing attention to the liquid metals, most of the studies in this field have focused on the gallium-based alloys due to their low melting points. The examples of metastable undercooled liquid metal particles are rare due to the thermodynamic challenges in achieving significant level of undercooling. In this study, the fabrication of undercooled bismuth-tin (BiSn) liquid metal micro-/nano-particles at eutectic composition was studied. The droplet emulsion technique was used for particle formation in broad size range. The effects of the particle size and the shell formation reactions on the yield of undercooled particles were investigated. The fabricated particles were characterized using back-scattered scanning electron microscopy (BSE-SEM) and differential scanning calorimetry (DSC). The particle size distribution and the ratio of undercooled particles were statistically analyzed. Optimization of the processing conditions and the successful selection of oxidants enabled undercooling of BiSn liquid metal particles. In doing so, both micro- and nano-size particles could be fabricated with high yield ( $\geq 97\%$ ). The crystallization temperature was measured to be  $0.37 T_m$  and the particles could preserve their liquid state at room temperatures for months.

**Key Words:** Liquid metals, bismuth-tin particles, undercooled particles, droplet emulsion technique, yield of undercooled particles

### Aşırı Soğumuş Bizmut Kalay Sıvı Metal Parçacıklarının Yüksek Verimle Üretimi

**ÖZ:** Sıvı metallere artan ilgiye rağmen, bu alandaki çalışmaların çoğu düşük erime noktaları nedeniyle galyum bazlı alaşımlara odaklanmıştır. Yarı-kararlı aşırı-soğumuş sıvı metal parçacık örnekleri yüksek seviyelerde aşırı-soğuma elde edilmesindeki termodinamik zorluklardan ötürü oldukça nadirdir. Bu çalışmada, ötektik kompozisyonda aşırı-soğumuş bizmut kalay (BiSn) sıvı metal mikron/nano parçacıklarının üretimi incelenmiştir. Geniş boyut aralığında parçacık üretimi için damlacık emülsiyon tekniği kullanılmıştır. Parçacık boyutu ve kılıf oluşum tepkimelerinin aşırı-soğumuş parçacık verimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Üretilen parçacıklar geri saçılımlı taramalı elektron mikroskobu (BSE-SEM) ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) kullanılarak analiz edilmiştir. Parçacık boyut dağılımı ve aşırı-soğumuş parçacık oranı istatistiksel olarak karakterize edilmiştir. Üretim koşullarının optimizasyonu ve başarılı oksidan seçimi BiSn sıvı metal parçacıklarının aşırı-soğutulmasını sağladı. Bunu yaparken hem mikro hem de nano boyutlu parçacıklar yüksek verimle ( $\geq 97\%$ ) üretilebildi. Kristalleşme sıcaklığı  $0.37 T_e$  olarak ölçüldü ve parçacıklar sıvı hallerini oda sıcaklığında aylarca koruyabildiler.

**Anahtar Kelimeler:** Sıvı metaller, bizmut-kalay parçacıkları, aşırı-soğumuş parçacıklar, damlacık emülsiyon tekniği, aşırı-soğumuş parçacıkların verimi



## 1. INTRODUCTION

Liquid metals are emerging class of materials with an enormous potential in the research fields of physical chemistry, material synthesis, composites, electronics, energy, nanotechnology and biotechnology (Wang *et al.*, 2018a; Chen *et al.*, 2020; Daeneke *et al.*, 2018; Mahmood *et al.*, 2019; Kalantar-Zadeh *et al.*, 2019; Malakooti *et al.*, 2020; Yuan *et al.*, 2020; Wang and Liu 2013; Xu *et al.*, 2020). Liquid metals owe this interest mainly to their extraordinary properties stemming from being both metallic and liquid. Being flexible and electrically conductive enables their use in flexible composites, transient and self-healing electronics, microfluidic chips and robotics (Wang *et al.*, 2018b; Silva *et al.*, 2020; Idrus-Saidi *et al.*, 2020; Chang *et al.*, 2018; Kalantar-Zadeh *et al.*, 2019). Due to their ability to respond to external stimuli such as light, pH, chemicals, and/or temperature, they can be applied to theranostics, sensors, batteries and conductor-insulator transition materials (Idrus-Saidi *et al.*, 2020; Ding *et al.*, 2020). Moreover, liquid metals are commonly covered by native, self-limiting oxide layers which are almost atomically thin, therefore liquid metals have been used as a platform to fabricate low dimensional materials (Idrus-Saidi *et al.*, 2020; Wang and Liu 2013; Yuan *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2020; Mahmood *et al.*, 2019). Utilizing the flexibility of a liquid metal core, these ultrathin materials can find applications in heterostructured optoelectronics, photodetectors, catalysis, and energy storage. Even though liquid metals can be present in both bulk or particle forms; due to the high surface to volume ratio, particle form is commonly preferred and the fabrication of liquid metal micro or nanoparticles become a crucial step to realize many of the aforementioned applications.

Liquid metals are commonly defined as the metals that are liquid at temperatures below 300 °C (Kalantar-Zadeh *et al.*, 2019). Even though the liquid metal particles can be used at broad temperature ranges, the ones that are liquid around room temperature have attracted significant attention due to the wider possibilities of potential applications. Daeneke *et al.* listed the metals and alloys that are commonly known with low melting points. (Daeneke *et al.*, 2018) In this list, mercury is liquid at room temperature, but its use is avoided due to health concerns. Gallium and its alloys remain as the only metal group which are liquid around room temperature under equilibrium conditions and that is why the current studies on liquid metals are commonly focused on, but also limited to the Ga-based materials (Kalantar-Zadeh *et al.*, 2019; Lin *et al.*, 2020).

To extend the material portfolio for room temperature-liquid metals, metastable metallic particles, particularly undercooled (a.k.a. supercooled) particles, are a promising option, but their current examples are rare mostly because of the thermodynamic constraints (Kalantar-Zadeh *et al.*, 2019). One example of metastable liquid metals reported in the literature is the undercooled Field's metal (a eutectic alloy composed of bismuth, indium and tin). Even though the equilibrium melting point of Field's metal is 62 °C, its solidification could be retarded down to the temperatures below the room temperature by optimizing its core-shell structure, therefore it became possible to store Field's metal in its liquid state at room temperatures. In this study, the shell structure around Bi-In-Sn particles was obtained by fabrication of Field's metal particles in slightly acidic media obtained using acetic acid. Manipulation of crystallization process allowed the use of such particles to form complex three-dimensional structures (Çınar *et al.*, 2016; Martin *et al.*, 2019) and as heat-free micro- or nano-solders (Çınar *et al.*, 2016; Qu *et al.*, 2015). Bismuth-tin at eutectic composition is another example of room temperature undercooled alloy reported in the same study, yet it has not been demonstrated in any application. That is probably because of its low yield of undercooling, which is the number of undercooled particles with respect to the solid particles prepared in the same batch, to enable any feasible application.

The equilibrium melting temperature for the bismuth-tin system at the eutectic composition is 139 °C (Şekil 5b), that is much higher compared to that of Field's metal. Since the driving force of crystallization is increasing significantly as getting far from the equilibrium conditions, it is even more challenging to keep undercooled bismuth tin (BiSn) at this metastable state long enough to enable any application. However, if it can be achieved, it will not only make the applications of liquid BiSn micro-/nano-particles possible at room temperatures, but also will pave way for the fabrication of other metastable liquid metals

with relatively high melting points and extend the liquid metal particle portfolio. Moreover, undercooled particles may offer far-from-equilibrium properties, thus may enable many unprecedented applications. In this study, with this motivation, we aimed to investigate the effect of shell formation on the fabrication and undercooling of BiSn micro-/nano-particles. With this, we also focused on fabricating undercooled BiSn micro-/nano-particles with high yield, thus enable its use as the room-temperature liquid metal alloy. BiSn particles can be a strong material candidate in this field, because the eutectic BiSn is one of the alloys having higher melting point than Fields metal and lower melting point than many other low temperature alloys. Moreover, its superior properties have received increased attention to in recent years and found use as energy materials (Wang and Liu 2013; Niu *et al.*, 2018; Niu *et al.*, 2019), catalyst (Allioux *et al.*, 2020), lead-free solder (Firdaus *et al.*, 2020; Felton *et al.*, 1993; Kang and Sarkhel, 1994), X-Ray radiation shield (Kim *et al.*, 2020).

Undercooling (a.k.a. supercooling) phenomenon plays critical role in the solidification process and directly affects the microstructure, hence the material properties, of an alloy, therefore it has attracted significant attention in the recent literature (Thompson and Spaepen 1983; Greer 2010; Liu *et al.*, 2019; Zahir *et al.*, 2019; Schüllli *et al.*, 2010; Herlach 1991). Droplet emulsion technique (DET) is commonly used to prepare undercooled liquid metal droplets in large scale (Herlach *et al.*, 1993). In DET, metal/alloy melt is separated into smaller units using high speed stirring in a carrier fluid which is slightly oxidizing (Rasmussen and Loper 1975; Herlach *et al.*, 1993). In this process, high speed stirring provides the energy to break the metal droplets into smaller pieces and to create new surfaces. Because of the oxidative environment of the reaction media, which is commonly a slightly acidic environment, a very thin surface layer is formed around each particle during stirring, and this oxide encapsulation protects the particles from re-coalescence even after the stirring process. During the droplet emulsion process, among all the fabricated particles, the impurities act as catalytic nucleation sites for crystallization, and are enclosed in a small fraction of the particles. The remaining particles become free from internal nuclei and surface nucleation sites, the crystallization mechanism switches from the heterogeneous nucleation toward the homogeneous nucleation, therefore the particles undercool due to the retardation of crystallization to the temperatures lower than the equilibrium solidification temperature of the metal.

DET results in particles with diameters around 10 – 20  $\mu\text{m}$  and allows to achieve the undercooling range around 0.3 – 0.4  $T_m$  (Perepezko 1984; Herlach *et al.*, 1993). In order to obtain such a high undercooling ( $\Delta T = T_m - T_c$ , where  $T_m$  is the equilibrium melting point and  $T_c$  is the crystallization temperature of undercooled particles), a number of processing parameters including size refinement and powder surface coating, have been experimentally identified. It has been reported that as the particle size gets smaller, the possibility for heterogeneous nucleation will be lower, thus the level of undercooling will be higher (Perepezko and Wilde 2016; Herlach 1991). At the same time, since the possibility of impurity being in one particle will be less, the fraction of undercooled particles in a batch, i.e. the yield of undercooling, will increase. As cooling gets faster, which is also the case in particles with smaller size, the particles tend to undercool more (Perepezko and Paik 1981; Zhai *et al.*, 2006). The formation of the protective layer is still a key challenge in fabrication of liquid micro- or nano- particles (Daeneke *et al.*, 2018; Kalantar-Zadeh *et al.*, 2019), and it is even more critical for fabrication of undercooled particles (Bogatyrenko *et al.*, 2018; Çınar *et al.*, 2016; Perepezko and Wilde 2016; Perepezko and Paik 1981; Rasmussen and Loper 1975). The protective shell layer encapsulating the internal nuclei-free metals/alloys should be design in such a way that it should be almost perfectly smooth to eliminate any potent nucleation points, and should be thick, thus strong and/or flexible, enough to be mechanically stable, but should not be too thick to prevent initiation of nucleation on oxide walls. Droplet undercooling behavior can be controlled by size variation, but the achievable level of undercooling is often set by the surface coating, which is consistent with the classical nucleation theory (Perepezko, 1984). Therefore, the design of the particle shell is vital for fabrication of undercooled particles with high yield.

There are two common approaches to form protective shell layer for stabilization of liquid droplets: formation of a self-limiting oxide layer and utilization of ligands adsorbing on the surface of liquid metal particles. The properties of the protective layer and interactions between the substrate (the power coating)

and the metal melt governs the possibility and the state of undercooling. In the literature, to best of our knowledge, there is only one study reporting the formation of BiSn liquid metal particles by DET and 1 vol% of acetic acid in diethylene glycol was used as a reaction media (Çınar *et al.*, 2016). There are few other examples where BiSn particles were fabricated via similar techniques but under different conditions. While Gong *et al.* (2020) used high speed stirring of bismuth-tin alloy melt in paraffin and polyethylene glycol and produced particles with sizes in the range of 1.9 – 27.6  $\mu\text{m}$ , Allieux *et al.* (2020) sonicated BiSn alloy melt in glycerol with sodium bicarbonate and fabricated particles having diameters of  $8.5 \pm 4.8 \mu\text{m}$ . Similarly, Kang *et al.* (2019) used ultrasonication in a silicon oil and controlled the mean particle size between 92 to 506 nm by variations in ultrasonication power and irradiation time. However, in all of these studies, the resulting particles were completely solid.

In this study, we hypothesized that undercooled particles can be fabricated with high yield by control over the particle size and the surface coating. To this end, in this study, we investigate effects of the oxidant type, the oxidant concentration, and stirring duration to fabricate undercooled BiSn micro-/nano-particles with varying particle size. The effect of surface coating on the particle formation and the yield of undercooled particles were discussed. Acetic acid and oxygen are evaluated as oxidants for fabrication of BiSn liquid metals with high yield.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Materials

Bismuth-tin alloy at eutectic composition (Bi:Sn 58:42 wt%, purity  $\geq 99.9\%$ , m. p.  $\approx 138 \text{ }^\circ\text{C}$ ), acetic acid (glacial,  $\approx 100\%$ ) and diethylene glycol (ReagentPlus, 99%) were purchased from Rotometals, Merck and Sigma Aldrich, respectively. Technical grade ethanol was used for cleaning and storage.

### 2.2. Particle fabrication procedure

In order to prepare the set up for particle preparation, a glass vial (volume  $\approx 25 \text{ ml}$ ) was placed in a silicon oil bath. For stirring, a cross-shaped poly(tetrafluoroethylene) rod was implemented to a dremel tool (Dremel 4000) and it was placed as close as possible to vial wall to enhance the effect of shear in a glass vial. Stirring rate was measured using digital tachometer. The highest stirring rate that could be achieved at the highest power settings of the Dremel tool was recorded as  $12,000 \pm 1,000 \text{ rpm}$  and this rate was kept constant for all experiments in order to favor smaller particle formation.

Diethylene glycol was used as a carrier fluid because of its relatively high boiling point and inert nature towards BiSn alloy. In order to fabricate liquid BiSn metal particles, 10 ml of diethylene glycol was heated to  $160 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\approx T_m + 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) in a glass vial. Then a piece of BiSn alloy at eutectic composition ( $1.0 \pm 0.1 \text{ g}$ ) was added into diethylene glycol and let to melt for 1 min. Acetic acid, if used, was added afterwards, and the solution was stirred at a rate of  $12,000 \pm 1,000 \text{ rpm}$  to form micro/nano-droplets. When used, the concentration of the acetic acid was calculated as a volume percentage of the diethylene glycol. For 0.25 vol% acetic acid experiments, for example, 25  $\mu\text{l}$  of acetic acid was used. Depending on the experiments, three different acetic acid concentrations, 0.25 vol%, 1 vol% and 2 vol%, were used. The time started to be recorded once stirring started. After couple of minutes, the color of the solution started to turn gray indicating the formation of particles. At the end of the stirring process, the glass vial was taken out of the oil bath and the particles were washed with ethanol via centrifugation at 5,000 rpm for 15 min. The washing procedure was repeated twice in order to clean the remaining organics on particle surfaces. After the washing procedure, the BiSn particles were stored in ethanol.

### 2.3. Characterization of particles

For SEM analysis, the particles in ethanol were dropped onto a silicon wafer and left for drying prior to analysis and the back-scattered scanning electron microscopy (BSE-SEM, Nova, NanoSEM 430) was used.

For the statistical analysis of the solid and undercooled particles, at least 400 particles were analyzed using BSE-SEM micrographs, and measurements were conducted manually using ImageJ software. Number percentage of both solid and undercooled particles as well as the cumulative size distribution of the total number of particles were presented.

For differential scanning calorimetry (DSC, Hitachi, EXSTAR7000) experiments, aluminum pan and lids were used. The particles were dropped into pan and left for drying overnight. About 1 mg of particles were collected in a pan. The sample was first cooled from 30 °C to -80 °C with cooling rate of 5 °C /min, left at this temperature for 2 min to equilibrate, then heated back to 30 °C with the same rate.

### 2.4. BiSn phase diagram

The phase diagram of Bi-Sn system was calculated under 1 atm pressure and in the range of 50 - 300 °C using Thermo-calc software. The alpha-tin phase, the transformation which occurs at 13°C, was disabled during calculations because the transformation is not observed experimentally in BiSn alloys of eutectic composition.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

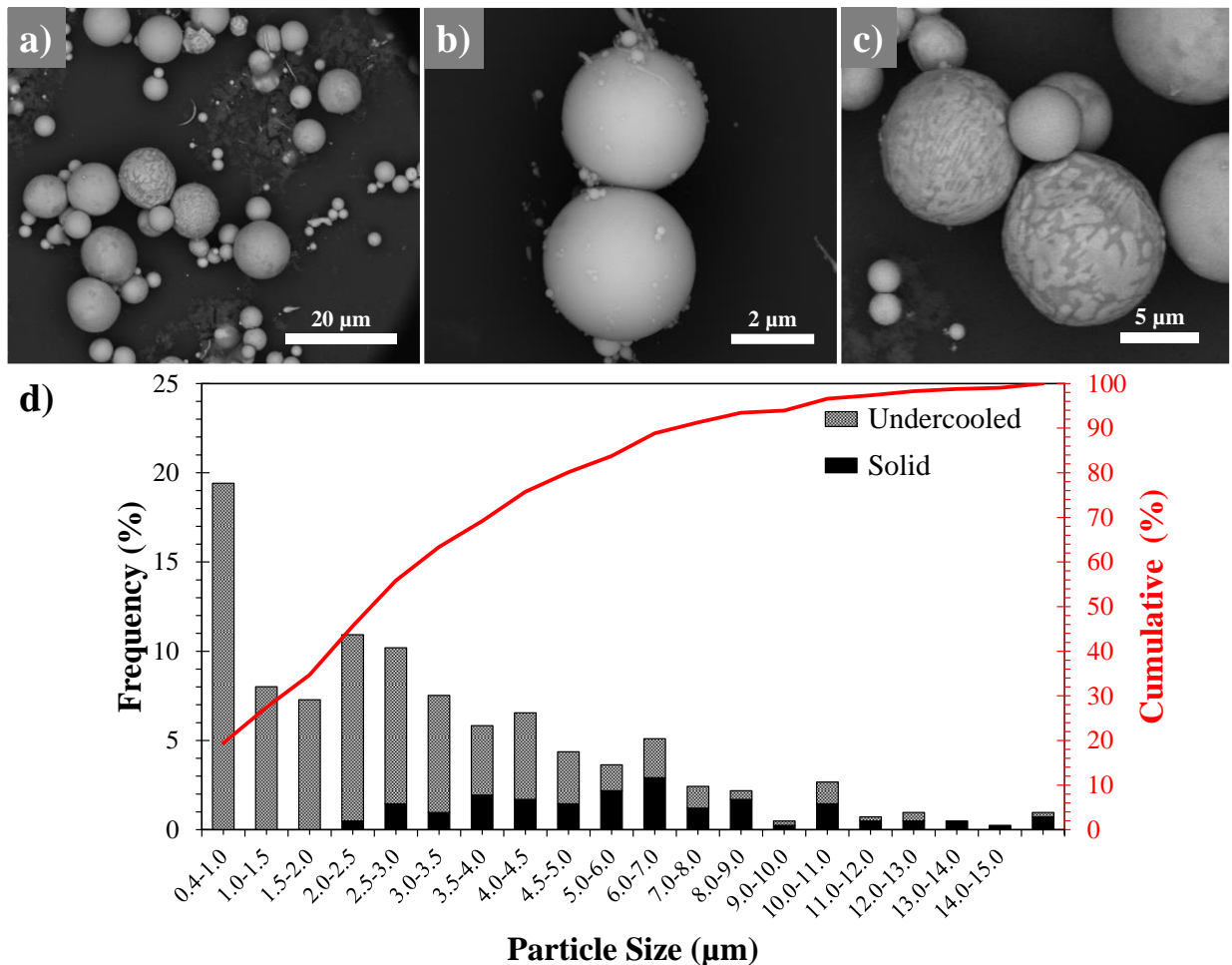
### 3.1. Fabrication of BiSn particles using acetic acid

BiSn particles fabricated using 0.25 vol% acetic acid by stirring for 10 min were presented in Figure 1a and 1b. As shown in Figure 1a-c, spherical particles with smooth surfaces were successfully fabricated and have a broad size distribution ranging from hundred nanometers to few tens of micrometers. Compared to the literature values where the fabrication of micron-sized particles was commonly reported for droplet emulsion technique, the formation of particles in nanometer size range is noteworthy.

In eutectic alloys, components are completely soluble in the liquid state, but only partially soluble in the solid state. These insoluble phases form a characteristic lamellar microstructure. In BSE-SEM micrographs, bismuth-rich phases seem brighter compared to tin-rich phases because of bismuth's higher atomic number. As realized in Figures 1a, 1b and 1c, both unicolor and bicolor particles existed in the sample. Bicolor of particles is a clear indication of a solid alloy. Presence of unicolor particles, on the other hand, indicates complete solubility, which is the case in liquid state at eutectic composition. Similar observations were reported previously for undercooled alloys and verified with complementary techniques (Çınar *et al.*, 2016). Therefore, as observed in Figures 1a-c, both solid and undercooled particles could be produced at the reported conditions. Even though smaller particles tend to be undercooled more, it was evident from the micrographs that undercooled particles as large as 15 µm can also be fabricated. Moreover, considering that the particles were stored and analyzed at room temperature, they are undercooled more than 100 degrees (melting point of eutectic BiSn is 138.4 °C, Figure 5). According to the statistical analysis of fabricated particles, presented in Figure 1d, 80% of the fabricated particles were undercooled, and the average particle size ( $D_{50}$ ) of the fabricated undercooled particles were 1.7 µm while 90% of them have diameter were below 4 µm, i.e.  $D_{90} = 4$  µm. In order to obtain a batch of undercooled particles with high yield, the particles can be separated by their size. As an example, if the particles with a diameter of 2 µm or less were separated, then the yield of undercooling would be around 99%.

Even though the number of fabricated undercooled particles are significantly high in this experiment, since the solid particles are larger in size, the weight percentage of the undercooled materials can be considered low. It is known that the droplet emulsion technique leads to the formation of undercooled particles by retarding the nucleation event, i.e. heterogeneous nucleation. That happens because the

heterogeneous nucleation sites for solidification are eliminated by trapping the impurities in few fractions of fabricated particles, and the container effects are minimized and the system is pushed towards containerless solidification. Since homogeneous nucleation requires very high driving force for solidification, the particles can be undercooled to the temperatures way below their equilibrium melting points. Therefore, if the average particle size of the particles can be reduced, then the impurities will be trapped in fewer percentage of particles, therefore the overall yield of undercooling can be improved.

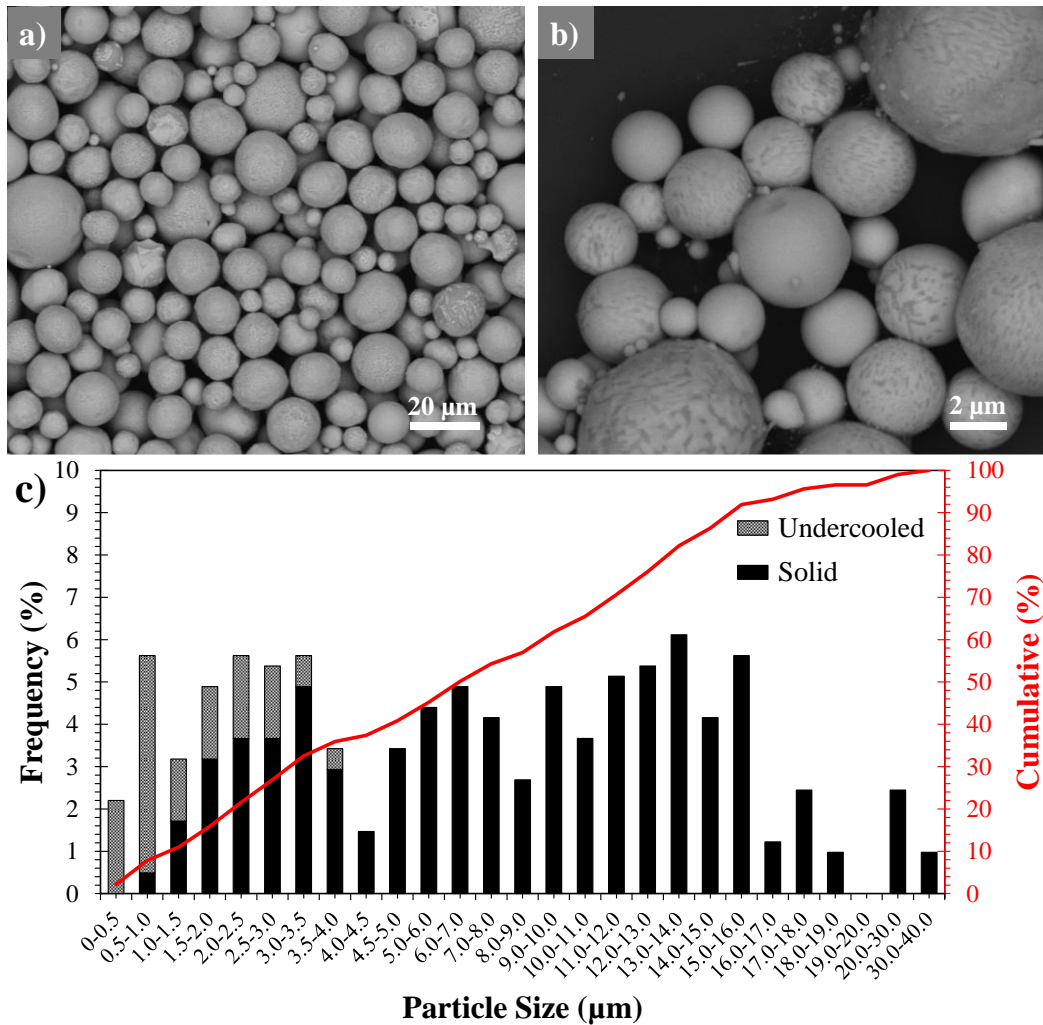


**Figure 1.** BSE-SEM characterization of fabricated BiSn particles. 0.25 vol% acetic acid used, and a metal melt was stirred for 10 min. In (a), both solid and undercooled particles can be observed. In (b) and (c) undercooled and solid particles were presented in larger magnifications, respectively. In (d) the frequency and cumulative size distributions of the fabricated particles and contribution of the solid and undercooled particles to the size distribution were presented.

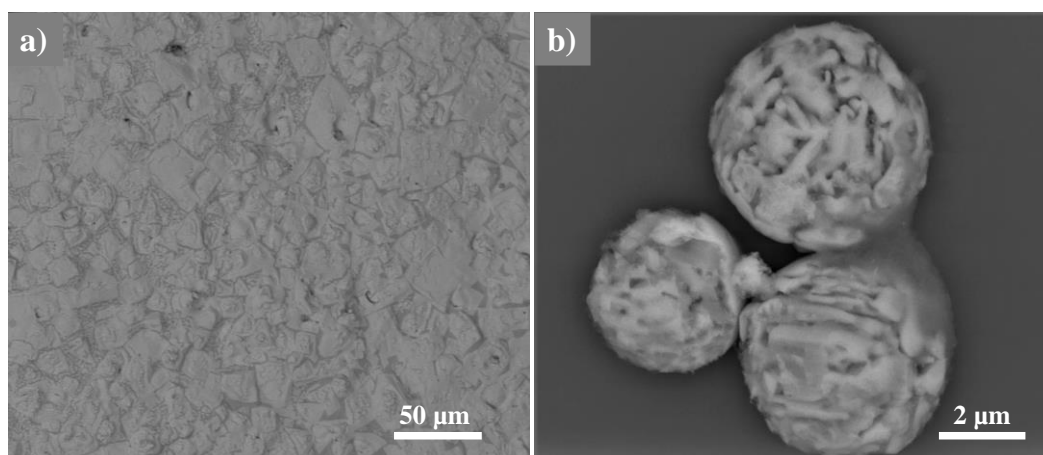
### 3.2. Effect of stirring duration on the production efficiency of undercooled BiSn particles

In order to decrease the average particle size of the particles, either higher stirring rates or longer stirring durations may be employed. In order to get benefit from the size effect on the undercooled particle yield, the stirring duration was altered. It was first increased from 10 min to 30 min under the same experimental conditions. As a result, the particles with spherical shape and smooth surfaces could still be obtained as shown in BSE-SEM micrographs in Figures 2a and 2b. However, the statistical analysis of the particles presented in Figure 2c showed that the number of solid particles were increased unexpectedly

under these experimental conditions. 85% of the fabricated particles were solid. Moreover, the average particle size was increased rather than decreased. The average particle size ( $D_{50}$ ) was found to be 6.8  $\mu\text{m}$ . The significant portion of the fabricated undercooled particles were only about 500 nm in size. It was realized that a piece of metal about few millimeters in size was formed during this experiment. This metal piece was analyzed using BSE-SEM (Figure 3a), and it was revealed that its surface was almost pure bismuth with inclusions of tin. The chemical content of the particles fabricated from the same batch was analyzed using EDS and found that they were still at eutectic composition.



**Figure 2.** BSE-SEM characterization of BiSn particles fabricated by use of 0.25 vol% acetic acid and stirring for 30 min. Average particles size can be conceived in (a) and undercooled particles can be distinguished in (b). (c) shows the particle size distribution of the fabricated undercooled, solid and total number of particles.



**Figure 3.** BSE-SEM images of the large metal piece formed during/after the experiments conducted using acetic acid of 0.25 vol% and stirred for 30 min (a); and using acetic acid of 2 vol% and stirred for 10 min (b).

### 3.3. Effect of acetic acid concentration on the production efficiency of undercooled BiSn particles

It is known that tin is more reactive in acidic conditions when compared to bismuth. In order to investigate the relation between the acetic acid concentration and the particle formation, acetic acid concentration was increased from 0.25 vol% to 1 vol% and 2 vol%, respectively, and the particle formation procedure was repeated for 10 min. In each case, formation of a millimeter-range solid metal piece was observed, and their BSE-SEM micrographs were almost identical to the one presented in Figure 3a. The concentration at which the highest number of particles were fabricated was 0.25 vol%. The particles could still be produced when the acetic acid concentration was 1 vol%. When the acid concentration was increased to 2 vol%, the color of the solution was dark grey at the beginning as usual, but then slightly turned to white. At the end of the particle formation procedure, very few particles could be formed. As shown in Figure 3b, those particles were still spherical but the tin content in particles was almost completely etched out. The gray cloud around particles in Figure 3-b was also an indication of the etched tin and it potentially oxidized and/or formed complexes with acetic acid (Chang *et al.*, 2019; Çınar *et al.*, 2016).

In the undercooled particle formation process suggested here, first, the small particles are separated from the metal melt once the Rayleigh-Plateau limit is reached (Tevis *et al.*, 2014), then with the effect of shear forces, spherical particles are formed. In the media containing oxidants, the particle surfaces are coated with a thin layer of metal-oxide or organic molecule-metal oxide complexes. Particularly at the very first stage of the particle formation process, these layers are hypothesized to be too thin to protect the particles, and will either be broken into smaller pieces with an effect of stirring process or dissolve in relatively acidic reaction media. As stirring continues with the effects of extended time and applied shear force, the particles will get smaller and stronger surface layers may start to form. In order to form a good surface layer, thus enable the formation of spherical undercooled BiSn liquid metal particles with high yield, under these conditions, the oxide formation and dissolution reactions should reach an equilibrium. If the dissolution reaction dominates over the oxidation reactions, excessive dissolution of Sn does not allow the formation of a protective layer and may result in the formation of a hyper-eutectic (bismuth-rich) alloy (Figure S1). In the absence of the protective layer, these bismuth-rich metal droplets would coalesce back and form large metal pieces. At even more extreme conditions, the alloy composition may change so drastically that the melting point of alloy may shift to the higher temperatures (Figure 5), and the alloy tends to solidify at reaction temperature ( $\sim 160$  °C). The dissolution reaction may continue after solidification. Bismuth-rich composition of the large metal piece observed after the experiment (Figure 3a) and excessive dissolution of Sn in the particle form (Figure 3b) are evidences of this hypothesis. It can be

concluded that the optimization of shell formation, i.e. oxidation and dissolution, reactions are extremely critical to fabricate undercooled liquid metal micro-/nano-particles with high yield.

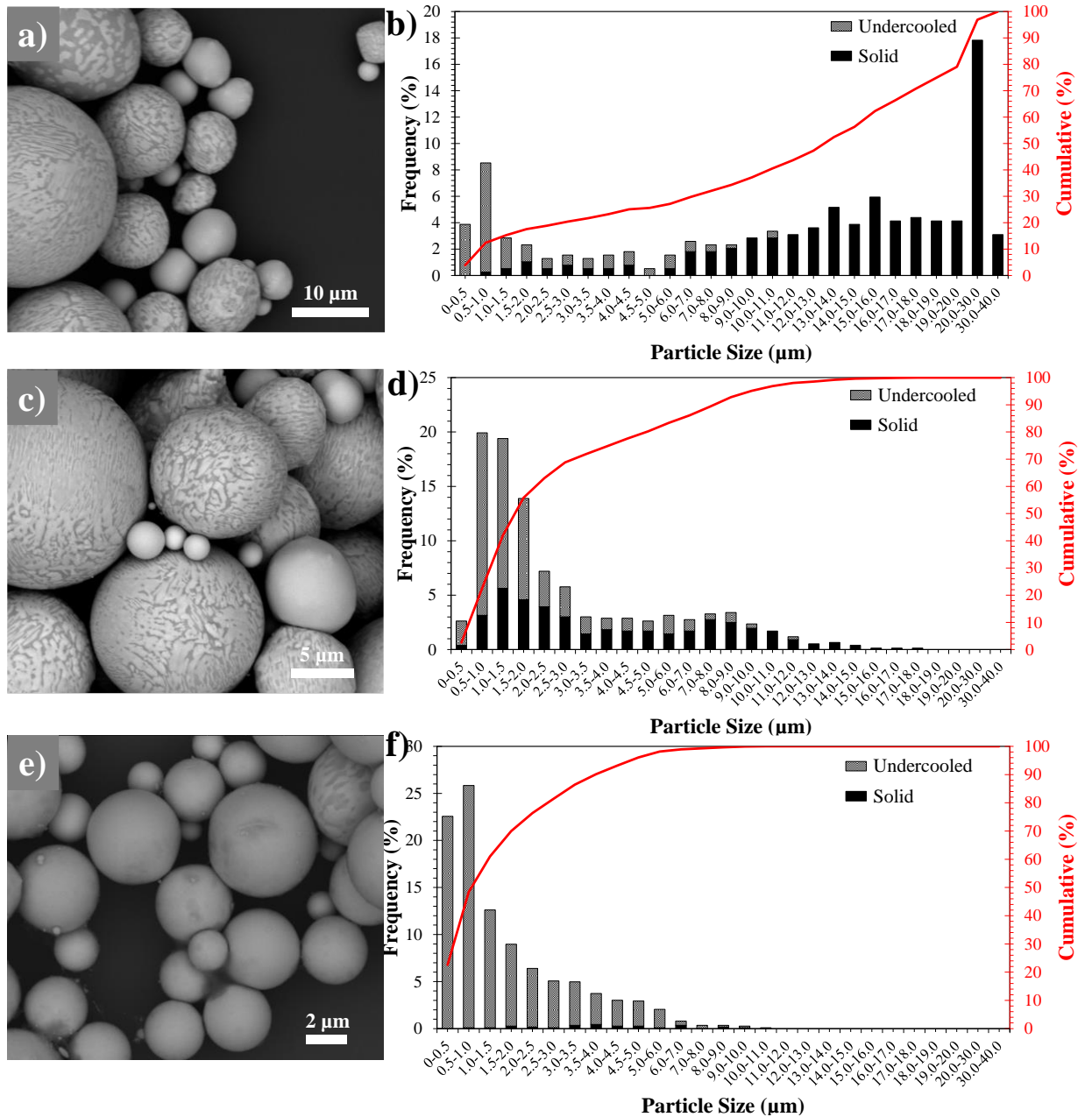
### 3.4. Native oxide layer as a shell and its effect on the fabrication of undercooled BiSn particles

Based on our observations in the previous experiments, in order to favor the fabrication of undercooled BiSn particles, mild reaction conditions should be preferred. It is known that tin forms a very thin protective oxide layer when BiSn alloy is exposed to ambient atmosphere (Frangia *et al.*, 2015; Allieux *et al.*, 2020). In order to create milder reaction conditions, bismuth-tin particles were prepared under similar conditions without any addition of external oxidizing agents, but by relying on the oxidation potential of the available trace amount of oxygen in the reaction media, i.e. oxygen dissolved or mixed in diethylene glycol during reaction.

When particle formation experiments were conducted in diethylene glycol without using acetic acid, the spherical particles were successfully formed after 10 minutes of stirring (Figure 4a). When these particles were compared to the ones fabricated using 0.25 vol% acetic acid (Figure 1a and 1b, Table 1), the particles formed without acetic acid addition were found to be much larger in size ( $D_{50} = 13.5 \mu\text{m}$ ) indicating that the balance between the oxidation/dissolution reactions could indeed be shifted. Even though one can expect to obtain smaller particles as a result of slower oxidation reaction, without use of an acid, dissolution reactions got even much slower, and lead to formation of larger particles. Since the particle sizes are larger compared to the case where the acetic acid is used as an oxidant, the yield of undercooled particles was also relatively low (Figure 4b, Table 1). Only 24% of the fabricated particles were undercooled. The solid particles exhibited eutectic microstructure as expected.

In order to decrease the particle size, the stirring duration was increased to 22 min and 30 min. As a result, the average size ( $D_{50}$ ) of the fabricated particles could be reduced to  $1.7 \mu\text{m}$  and  $2.3 \mu\text{m}$ , respectively (Figure 4c-f). The size of the largest particles decreased to  $17.5 \mu\text{m}$  after 22 min. of stirring, and to  $10.0 \mu\text{m}$  after 30 min. of stirring, indicating that the particle size distribution narrowed down with increasing stirring duration as expected. 58% of the fabricated particles were undercooled after 22 min. of stirring, whereas this ratio was increased to 97% after 30 min of stirring. As the stirring duration increased, not only the average particle size decreased, but also the undercooled particle yield at almost any size range was increased. A very small metal piece was formed when 30 min. of stirring was employed and it was useful in a way to separate the solid particles from the undercooled particles and it improved the undercooled particle yield. Therefore, it can be concluded that even the trace amount of oxygen dissolved in and/or mixed into diethylene glycol was a good enough oxidant to form BiSn liquid metal particles. Longer stirring durations with less reactive oxidant in the same reaction media balanced the shell formation reactions and enabled us to fabricate undercooled particles with high yield.





**Figure 4.** BSE-SEM characterization of BiSn particles fabricated without use of acetic acid as a result of stirring for 10 min (a-b), 22 min (c-d) and 30 min (e-f). On the left side BSE-SEM micrographs were shown (a, c and d) while on the right side, contribution of the undercooled and solid particles to the particle size distribution (b, d, f) and the cumulative size distribution for total number of particles were presented.

**Table 1.** Particle size distribution of fabricated (both solid and undercooled) particles under various experimental conditions and the yield (the number of undercooled particles with respect to the total number of particles) of undercooled particles.

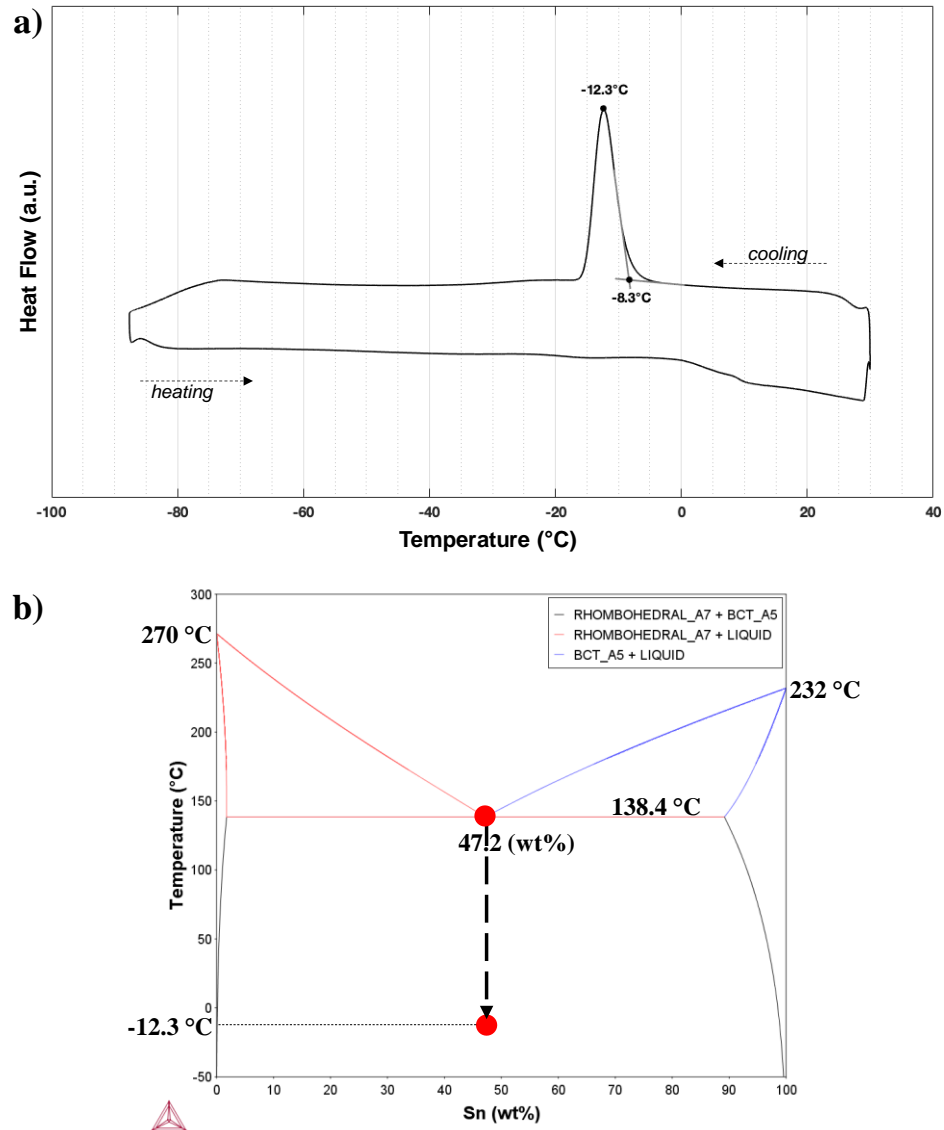
Sample	D <sub>10</sub> (μm)	D <sub>50</sub> (μm)	D <sub>90</sub> (μm)	Yield of undercooled particles
0.25 vol% acetic acid 10 min. of stirring	0.2	2.2	6.7	80%
0.25 vol% AA 30 min. of stirring	1.2	6.8	15.3	15%
without acetic acid addition 10 min. of stirring	0.8	13.5	23.2	24%
without acetic acid addition 22 min. of stirring	0.7	1.7	8.1	58%
without acetic acid addition 30 min. of stirring	0.6	2.3	4.7	97%

### 3.5. The level of undercooling

In order to determine the level of undercooling, the particles fabricated with high yield were solidified using DSC. As presented in Figure 5a, the crystallization started at -8.3 °C and completed at -15 °C. The peak temperature was -12.3 °C, corresponding to the 151 degree of undercooling, which is about 0.37  $T_m$  ( $T_{m, BiSn} \approx 411$  K). This is one of the highest undercooling obtained for BiSn particles at eutectic composition fabricated using the droplet emulsion technique (Bogatyrenko *et al.*, 2018; Thompson and Spaepen 1983). The crystallization point of the fabricated undercooled particles were shown on the bismuth-tin phase diagram in Figure 5b.

Faster cooling rates may lead to higher undercooling. By changing the cooling rate from 1 °C /min to 20 °C /min, the peak temperature was shifted by 3 °C (Figure S1). As can be inferred from the single solidification peak in Figure 5a, the solidification temperature, thus the level of undercooling, does not change significantly in the size range of fabricated particles. The absence of the thermal event during heating proves metastability of the undercooled particles and irreversibility of the process.

Considering that the fabricated particles were washed with centrifugation at 5,000 rpm right after the particle formation process and prior to the characterization, it can be concluded that their undercooling state was stable enough under such harsh conditions. These particles could preserve their undercooled state for months under ambient conditions.



**Figure 5.** a) Differential scanning calorimetry analysis of the fabricated undercooled particles. The particles were fabricated by without using any oxidant and stirring for 30 min. b) The phase diagram of bismuth-tin alloy. The level of undercooling obtained for bismuth-tin particles at eutectic composition was marked on the diagram

#### 4. CONCLUSIONS

The fabrication of the undercooled BiSn liquid metal particles at eutectic composition were studied. The size of the fabricated particles ranged from hundreds of nanometers to tens of micrometers. By increasing the stirring duration, even smaller particles could be obtained when available oxygen is used as only oxidant. Comparing the state of fabricated particles in broad size range, it was concluded that the yield of undercooled particles is higher in small sizes whereas larger particles tend to solidify more. Both acetic acid (0.25 vol% of diethylene glycol) and the available oxygen in reaction conditions are found to be good oxidants for BiSn and led to formation of spherical particles with smooth surfaces. Using the available oxygen as an oxidant allows the formation of smaller particles, thus promotes the formation of undercooled BiSn particles with high yield. The fabricated undercooled particles solidified at about -12

°C, thus the undercooling was found to be 151 °C (as high as  $0.37T_m$ ), and can safely be used at room temperature applications. The particles can be stored for months. Based this study, it can be concluded that by the selection of the appropriate oxidant and by the optimization of processing conditions, the metastable liquid metal portfolio can be extended to other alloys with melting points higher than room temperature.

## 5. ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) under Grant No: 117C025.

## REFERENCES

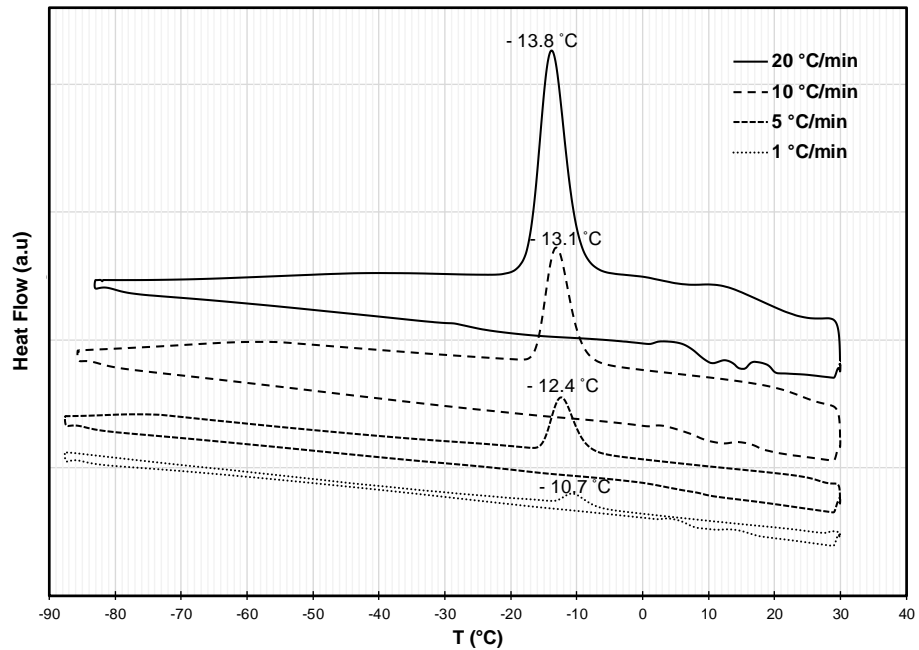
- Allioux, Francois-Marie, Salma Merhebi, Mohammad B Ghasemian, Jianbo Tang, Andrea Merenda, Roozbeh Abbasi, Mohannad Mayyas, et al. 2020. "Bi-Sn Catalytic Foam Governed by Nanometallurgy of Liquid Metals." *Nano Letters* 20 (6): 4403–9.
- Bogatyrenko, S. I., A. A. Minenkov, and A. P. Kryshthal. 2018. "Supercooling under Crystallization of Bi-Sn Eutectic Alloy in Contact with Bi, Sn and Amorphous C." *Vacuum* 152 (June): 1–7.
- Chang, Boyce S., Brijith Thomas, Jiahao Chen, Ian D. Tevis, Paul Karanja, Simge Çinar, Amrit Venkatesh, Aaron J. Rossini, and Martin M. Thuo. 2019. "Ambient Synthesis of Nanomaterials by: In Situ Heterogeneous Metal/Ligand Reactions." *Nanoscale* 11 (29): 14060–69.
- Chang, Boyce S., Ravi Tutika, Joel Cutinho, Stephanie Oyola-Reynoso, Jiahao Chen, Michael D. Bartlett, and Martin M. Thuo. 2018. "Mechanically Triggered Composite Stiffness Tuning through Thermodynamic Relaxation (ST3R)." *Materials Horizons* 5 (3): 416–22.
- Chen, Sen, Hong Zhang Wang, Rui Qi Zhao, Wei Rao, and Jing Liu. 2020. "Liquid Metal Composites." *Matter* 2 (6): 1446–80.
- Çinar, Simge, Ian D. Tevis, Jiahao Chen, and Martin Thuo. 2016. "Mechanical Fracturing of Core-Shell Undercooled Metal Particles for Heat-Free Soldering." *Scientific Reports* 6 (1): 1–12.
- Daeneke, T, K Khoshmanesh, N Mahmood, I A De Castro, D Esrafilzadeh, S J Barrow, M D Dickey, and K Kalantar-Zadeh. 2018. "Liquid Metals: Fundamentals and Applications in Chemistry." *Chem. Soc. Rev* 47: 4073.
- Ding, Yu, Xuelin Guo, Yumin Qian, Leigang Xue, Andrei Dolocan, and Guihua Yu. 2020. "Room-Temperature All-Liquid-Metal Batteries Based on Fusible Alloys with Regulated Interfacial Chemistry and Wetting." *Advanced Materials*, 2002577.
- Felton, Lawrence E., Christopher H. Raeder, and David B. Knorr. 1993. "The Properties of Tin-Bismuth Alloy Solders." *JOM* 45 (7): 28–32.
- Firdaus, W, B Soegijono, A Sudarmadji, and A D Trisnadi. 2020. "Characterization of Bismuth in Sn-Based as Safe Environment Solder Material." *AIP Conference Proceedings* 2242: 20011.
- Frongia, F., M. Pilloni, A. Scano, A. Ardu, C. Cannas, A. Musinu, G. Borzone, S. Delsante, R. Novakovic, and G. Ennas. 2015. "Synthesis and Melting Behaviour of Bi, Sn and Sn-Bi Nanostructured Alloy." *Journal of Alloys and Compounds* 623 (February): 7–14.
- Gong, Mengqi, Jun Shen, Ping Nee, and Dan Hu. 2020. "Preparation of Sn-58Bi Solder Powder by Shearing Liquids into Complex Particles." *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 31: 5647–52.
- Greer, A. Lindsay. 2010. "Materials Science: A Cloak of Liquidity." *Nature* 464 (7292): 1137–38.
- Herlach, D. M., R. F. Cochrane, I. Egry, H. J. Fecht, and A. L. Greer. 1993. "Containerless Processing in the Study of Metallic Melts and Their Solidification." *International Materials Reviews* 38 (6): 273–347.
- Herlach, D M. 1991. "Containerless Undercooling and Solidification of Pure Metals." *Annual Review of Materials Science* 21 (1): 23–44.
- Idrus-Saidi, Shuhada A, Jianbo Tang, Jiong Yang, Jialuo Han, Torben Daeneke, Anthony P O'mullane, and Kourosh Kalantar-Zadeh. 2020. "Liquid Metal-Based Route for Synthesizing and Tuning Gas-Sensing Elements" 50: 7.

- Kalantar-Zadeh, Kourosh, Jianbo Tang, Torben Daeneke, Anthony P O, Logan A Stewart, Jing Liu, Carmel Majidi, Rodney S Ruoff, Paul S Weiss, and Michael D Dickey. 2019. "Emergence of Liquid Metals in Nanotechnology." *ACS Nano* 13.
- Kang, Sung K, and Amit K Sarkhel. 1994. "Lead (Pb)-Free Solders for Electronic Packaging." *Journal of Electronic Materials* 23 (8).
- Kang, Yeo Kyung, Jumi Kim, Kwabena Darko, Sung Kyu Park, and Myung-Gil Kim. 2019. "Large-Scale Sonochemical Synthesis of Bi-Sn Eutectic Alloy Nanoparticles." *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 20 (5): 3201–5.
- Kim, Hoyeon, Junyoung Lim, Jihun Kim, Jungil Lee, and Yongsok Seo. 2020. "Multilayer Structuring of Nonleaded Metal (BiSn)/Polymer/Tungsten Composites for Enhanced  $\Gamma$ -Ray Shielding." *Advanced Engineering Materials* 22 (6): 1901448.
- Li, Hongzhe, Roozbeh Abbasi, Yifang Wang, Francois M. Allieux, Pramod Koshy, Shuhada A. Idrus-Saidi, Md Arifur Rahim, et al. 2020. "Liquid Metal-Supported Synthesis of Cupric Oxide." *Journal of Materials Chemistry C* 8 (5): 1656–65.
- Lin, Yiliang, Jan Genzer, and Michael D. Dickey. 2020. "Attributes, Fabrication, and Applications of Gallium-Based Liquid Metal Particles." *Advanced Science* 7 (12): 2000192.
- Liu, Nian, Guangmin Zhou, Ankun Yang, Xiaoyun Yu, Feifei Shi, Jie Sun, Jinsong Zhang, et al. 2019. "Direct Electrochemical Generation of Supercooled Sulfur Microdroplets Well below Their Melting Temperature." *Proceedings of National Academy of Science* 116 (3): 765–70.
- Mahmood, Nasir, Isabela Alves De Castro, Kuppe Pramoda, Khashayar Khoshmanesh, Suresh K. Bhargava, and Kourosh Kalantar-Zadeh. 2019. "Atomically Thin Two-Dimensional Metal Oxide Nanosheets and Their Heterostructures for Energy Storage." *Energy Storage Materials* 16 (January): 455–80.
- Malakooti, Mohammad H., Michael R. Bockstaller, Krzysztof Matyjaszewski, and Carmel Majidi. 2020. "Liquid Metal Nanocomposites." *Nanoscale Advances*.
- Martin, Andrew, Boyce S. Chang, Zachariah Martin, Dipak Paramanik, Christophe Frankiewicz, Souvik Kundu, Ian D. Tevis, and Martin Thuo. 2019. "Heat-Free Fabrication of Metallic Interconnects for Flexible/Wearable Devices." *Advanced Functional Materials* 29 (40): 1903687.
- Niu, Jiazheng, Hui Gao, Wensheng Ma, Fakui Luo, Kuibo Yin, Zhangquan Peng, and Zhonghua Zhang. 2018. "Dual Phase Enhanced Superior Electrochemical Performance of Nanoporous Bismuth-Tin Alloy Anodes for Magnesium-Ion Batteries." *Energy Storage Materials* 14 (September): 351–60.
- Niu, Jiazheng, Kuibo Yin, Hui Gao, Meijia Song, Wensheng Ma, Zhangquan Peng, and Zhonghua Zhang. 2019. "Composition- and Size-Modulated Porous Bismuth-Tin Biphasic Alloys as Anodes for Advanced Magnesium Ion Batteries." *Nanoscale* 11 (32): 15279–88.
- Perepezko, J. H., and J. S. Paik. 1981. "Undercooling Behavior of Liquid Metals." In *MRS Proceedings*, 8:49. Cambridge University Press.
- Perepezko, J. H., and G. Wilde. 2016. "Melt Undercooling and Nucleation Kinetics." *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 20 (1): 3–12.
- Perepezko, John H. 1984. "Nucleation in Undercooled Liquids." *Materials Science and Engineering* 65 (1): 125–35.
- Qu, Ke, Hong Zhang, Qianqian Lan, Xia Deng, Xinlong Ma, Yuanqing Huang, Junwei Zhang, et al. 2015. "Realization of the Welding of Individual TiO<sub>2</sub> Semiconductor Nano-Objects Using a Novel 1D Au<sub>80</sub>Sn<sub>20</sub> Nanosolder." *Journal of Materials Chemistry C* 3 (43): 11311–17.
- Rasmussen, Don H., and Jr. Carl R. Loper. 1975. Micron sized spherical droplets of metals and method. US4042374A, issued March 20, 1975.
- Schüllli, T U, R Daudin, G Renaud, A Vaysset, O Geaymond, and & A Pasturel. 2010. "Substrate-Enhanced Supercooling in AuSi Eutectic Droplets." *Nature* 464.
- Silva, Cristian A., Jian Lv, Lu Yin, Itthipon Jeerapan, Gabriel Innocenzi, Fernando Soto, Young-Geun Ha, and Joseph Wang. 2020. "Liquid Metal Based Island-Bridge Architectures for All Printed Stretchable Electrochemical Devices." *Advanced Functional Materials*, 2002041.

- Tevis, I. D., Newcomb, L. B., Thuo, M. 2014. "Synthesis of Liquid Core-Shell Particles and Solids Patchy Multicomponent Particles by Shearing Liquids Into Complex Particles (SLICE)." *Langmuir* 30 (47): 14308-13.
- Thompson, C. V., and F. Spaepen. 1983. "Homogeneous Crystal Nucleation in Binary Metallic Melts." *Acta Metallurgica* 31 (12): 2021–27.
- Wang, Lei, and Jing Liu. 2013. "Liquid Metal Material Genome: Initiation of a New Research Track towards Discovery of Advanced Energy Materials." *Frontiers in Energy* 7 (3): 317–32.
- Wang, Qian, Yang Yu, and Jing Liu. 2018a. "Preparations, Characteristics and Applications of the Functional Liquid Metal Materials." *Advanced Engineering Materials* 20 (5): 1700781.
- Wang, Xuelin, Rui Guo, and Jing Liu. 2018b. "Liquid Metal Based Soft Robotics: Materials, Designs, and Applications." *Advanced Materials Technologies* 4 (2): 1800549.
- Xu, Chengtao, Biao Ma, Shuai Yuan, Chao Zhao, and Hong Liu. 2020. "High-Resolution Patterning of Liquid Metal on Hydrogel for Flexible, Stretchable, and Self-Healing Electronics." *Advanced Electronic Materials* 6 (1): 1900721.
- Yuan, Tingbiao, Zheng Hu, Yuxin Zhao, Jinjie Fang, Jun Lv, Qinghua Zhang, Zhongbin Zhuang, Lin Gu, and Shi Hu. 2020. "Two-Dimensional Amorphous SnO<sub>x</sub> from Liquid Metal: Mass Production, Phase Transfer, and Electrocatalytic CO<sub>2</sub> Reduction toward Formic Acid." *Nano Letters* 20: 2916–22.
- Zahir, Md Hasan, Shamseldin A. Mohamed, R. Saidur, and Fahad A. Al-Sulaiman. 2019. "Supercooling of Phase-Change Materials and the Techniques Used to Mitigate the Phenomenon." *Applied Energy* 240 (April): 793–817.
- Zhai, Q.J., Y.L. Gao, W.B. Guan, and K.D. Xu. 2006. "Role of Size and Cooling Rate in Quenched Droplet of SnBi Eutectic Alloy." *Materials Science and Engineering: A* 441 (1–2): 278–81.

## Supporting Information

## FABRICATION OF UNDERCOOLED BISMUTH TIN LIQUID METAL PARTICLES WITH HIGH YIELD

Simge Çınar<sup>1,\*</sup>

**Figure S1.** The effect of cooling rate on the solidification temperature of undercooled BiSn micro-/nano-particles. The peak temperatures of crystallization were found to be -11 °C, -12 °C, -13 °C and -14 °C when the samples were cooled with the rates of 1 °C/min, 5 °C/min, 10 °C/min and 20 °C/min, respectively.



## FARKLI Zn ve Mg İÇERİĞİNE SAHİP YAŞLANDIRILABİLİR TİCARİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

<sup>1</sup>Yusuf KAPLAN , <sup>2</sup>Sercan TAŞAR , <sup>3</sup>Mehmet YILDIRIM 

<sup>1,3</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği  
Bölümü, Konya, TÜRKİYE

<sup>2</sup> RMT Metalurji ve San. ve Tic. Ltd. Şti, Konya, TÜRKİYE

<sup>1</sup>yusufkaplanmmm@gmail.com, <sup>2</sup>rmt@rmtmetal.com, <sup>3</sup>myildirim@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 04.09.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 28.10.2020)

**ÖZ:** Bu çalışma kapsamında, farklı oranlarda Zn ve Mg içeren 5 adet ticari Al döküm alaşımının mikroyapısal özellikleri ve sertlik değerleri incelenmiştir. Alaşımlara üretildikten sonra 500°C sıcaklıkta 1 saat süre ile çözültüye alma işlemi uygulanmış sonrasında 200°C sıcaklıkta 1, 4 ve 16 saat boyunca yaşlandırma ısıl işlemine maruz bırakılmıştır. Mevcut fazların miktarı, dağılımı, büyüklüğü ve morfolojisi gibi mikroyapısal özellikler alaşımların bileşimine ve yaşlandırma işlemi süresine göre pek fazla değişmemiştir. Sadece 16 saat yaşlandırma sonucu mikroyapıda aşırı yaşlandırmaya bağlı irileşme gözlemlenmiştir. İncelenen tüm alaşımların sertlik değerleri yaşlandırma sonucu önemli ölçüde artmış olup tüm alaşımlar pik (en yüksek) sertlik değerlerine 4 saat yaşlandırma süresinde ulaşmışlardır.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum alaşımları, Mikroyapı, Yaşlandırma, Sertlik

### Investigation of the Structural Properties of Age-Hardenable Commercial Aluminum Alloys with Various Zn and Mg Contents

**ABSTRACT:** In this study, the microstructural properties and hardness of five different commercial aluminum alloys containing various amount of Zn and Mg have been investigated. After production, the alloys were solutionized at 500°C for 1 hour and subsequently aged at 200°C for 1, 4 and 16 hours. Microstructural properties such as size, amount, distribution and morphology of constituent phases were not much changed with respect to aging condition or Zn and Mg content. However, certain amount of coarsening was observed in the microstructures of 16 h aged all specimens due to overaging. After aging treatment, the hardness values of all investigated compositions increased significantly. For all compositions, the peak hardness was observed for 4 h aged specimens.

**Key Words:** Aluminum alloys, Microstructure, Aging, Hardness

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum alaşımları dökme demir ve çelik esaslı malzemelerden sonra yapısal mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ikinci metal olup demir-çelik esaslı malzemelere göre oldukça hafiftirler (yaklaşık üçte biri) (Kaufman ve Rooy, 2004; Rooy, 1992; Mistri ve Joshi, 2017). En önemli özellikleri hafif olmalarından kaynaklı yüksek özgül dayanıma (dayanım/ağırlık) sahiptirler (Singh, 2008; Rooy, 1992). Dolayısıyla parça ağırlığının hafifletilmesi gibi çok yüksek bir avantaja sahip olmalarından ötürü enerji tüketiminin/verimliliğin çok önemli olduğu havacılık ve otomotiv uygulamalarında çok sıklıkla tercih edilmektedir (Davis, 2001; Davis, 1993; Ejişfor ve Reddy, 1997; Gül, 2014; Mohamed ve diğ.,



2009). Bununla birlikte Al alaşımları yüksek elektrik ve termal iletkenliğe, yüksek korozyon direncine, kolay dökülebilirlik kabiliyetine ve sünek olmalarından ötürü kolay haddelenebilirliğe sahiptirler (Mistri ve Joshi, 2017).

Döküm ile üretilen Al alaşımlarının yapısal uygulamalarda kullanılabilmesi için bileşimlerinde silisyum, bakır, magnezyum ve çinko gibi çeşitli alaşım elementleri içermeli ve gerektiğinde de ısı işlemi uygulanabilmelidir (Çetin, 2017; Rana ve diğ., 2012; Kalhapure ve Digpe, 2015). Al-Si alaşımları döküm ile üretilen Al alaşımları arasında en yüksek üretim ve kullanım oranına sahip olan alaşımlar olup diğer Al esaslı alaşımlara kıyasla nispeten daha düşük dayanım değerlerine sahiptir (Çetin, 2017). Bu yüzden Al-Si alaşımlarının düşük mekanik özellikleri mikroyapı modifikasyonu, tane inceltme, yaşlandırma ısı işlemi ve üçüncü/dördüncü alaşım elementi ilavesi ile iyileştirilmektedir. Al-Si alaşımlarına belli oranları geçmemek kaydı ile Cu, Mg ve Zn birlikte ilave edilebilmektedir (Easton ve John, 1999; Easton ve John, 1999; Li ve diğ., 1989). Cu ilavesi Al alaşımlarının akıcılığını/dökülebilirliğini arttırmakta aynı zamanda dayanım ve sertliğini de iyileştirmektedir. Mg ise Si ile birlikte kullanıldığında alaşımların yaşlandırma kabiliyetini arttırmakta dolayısıyla da dayanım ve sertlik değerleri de yükselmektedir. Bunun yanında Zn alüminyum içerisinde en yüksek katı çözünlüğe sahip alaşım elementi olup katı çözümlüğü güçlendirmesine sebep olmaktadır (Mistri ve Joshi, 2017; ; Ji ve diğ., 2012).

Bu çalışmada otomotiv parçalarının üretiminde yaygın olarak kullanılan yaklaşık % 7-8 Si oranına sahip ve farklı oranlarda Zn ve Mg içeren beş farklı ticari Al-Si esaslı döküm alaşımlarının yaşlandırma ısı işlemi öncesi ve sonrası mikroyapı ve sertlikleri incelenmiştir.

## MALZEME VE METOT (MATERIALS and METHOD)

### Numunelerin Üretimi (Production of the Samples)

Çalışma kapsamında farklı kimyasal bileşimlere sahip (Çizelge 1) 5 değişik ticari alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Alaşımların üretimi Konya Konsan Sanayi Sitesi'nde bulunan RMT Metalurji tesislerinde ortalama ağırlığı 6-7 kg civarında külçelere dökülerek gerçekleştirilmiştir. Ergitme işleminde 8 ton kapasiteli Erdem Makina marka alüminyum ergitme fırını kullanılmıştır. Ocağa şarj olarak alüminyum hurdası ve çeşitli alaşım elementleri yüklenmiştir. Ergitilen alüminyum alaşımlarına gaz giderme işlemi uygulanmıştır. Daha sonra sıvı alüminyum kokil kalıplara dökülerek soğutulmaya bırakılmıştır. Numunelerin kimyasal analizi Oxford Instruments Foundry Master model optik emisyon spektrometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 1.** Çalışmada kullanılan Ticari Al-alaşımlarına ait kimyasal analiz değerleri.

*Table 1. Chemical composition of investigated commercial Al-alloys*

Numune	Al	Si	Zn	Mg	Cu	Fe	Pb	Mn	Ni	Ti	Cr
Numune1	85,5	7,92	2,75	0,161	2,12	0,878	0,107	0,193	0,130	0,030	0,020
Numune2	84,9	8,13	2,94	0,278	2,08	0,902	0,198	0,206	0,111	0,031	0,027
Numune3	84,9	7,76	3,24	0,325	2,07	0,928	0,210	0,237	0,115	0,028	0,028
Numune4	84,5	7,77	3,45	0,226	2,29	1,00	0,191	0,208	0,132	0,030	0,030
Numune5	84,7	6,85	4,03	0,414	2,10	1,25	0,179	0,159	0,090	0,034	0,037

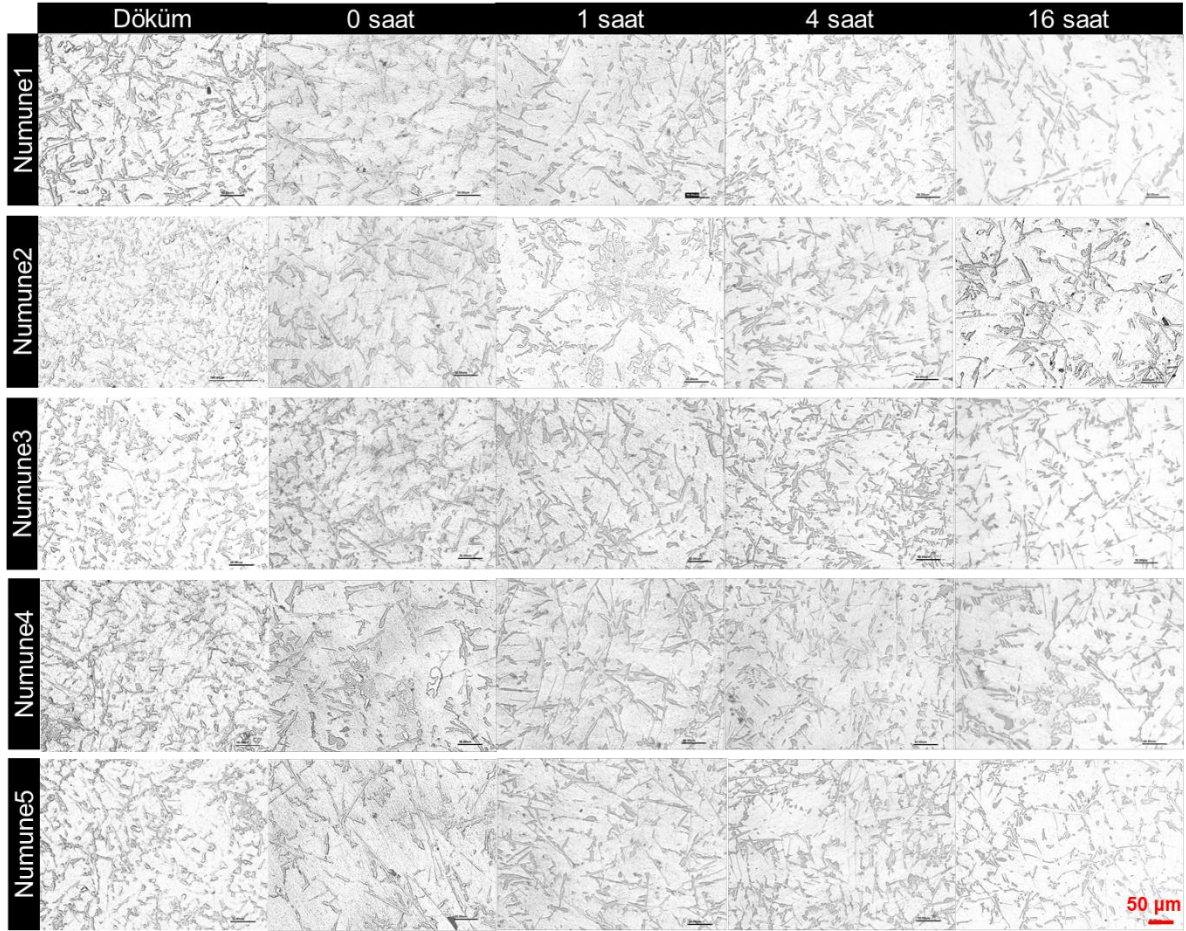
### Isıl İşlem (Heat-Treatment)

Üretimi tamamlanan ticari alüminyum alaşımlarının ısı işlemi Konya Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarında bulunan Protherm PLF 130/9 model kamara tipi fırında gerçekleştirilmiştir. Öncelikle numunelere 500°C sıcaklıkta 1 saat süre ile çözeltiye alma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra numunelere oda sıcaklığında su verilmiştir. Son olarak numunelere 200°C sıcaklıkta 1, 4 ve 16 saat boyunca yaşlandırma ısı işlemi uygulanıp sonrasında fırında soğutulmaya bırakılmışlardır.

### Karakterizasyon (Characterization)

Numuneler içyapı incelemesi için standart metalografik numune hazırlama işlemleri kullanılarak hazırlanmıştır. Bu işlem kapsamında numuneler önce zımparalanmış (120-1200 grit SiC zımpara kâğıdı) sonra 1  $\mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  çözeltisi kullanılarak parlatılmış ve sonunda da Kellar çözeltisi ile dağlanmıştır. Numunelerin ısı işlem öncesi ve sonrası mikroyapı incelemesi Metkon IMM 901 model ters metal mikroskobu kullanılarak yapılmıştır. Alaşımların faz analizi Bruker D8 Advance model X-ışını kırınım cihazı (XRD) kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler, tarama hızı  $2^\circ/\text{dk}$  ile  $2\theta=20-90^\circ$  aralığında ve dalga boyu 1.5406 Å olan Cu-K $\alpha$  ışınması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yaşlandırma öncesi ve sonrası Brinell sertlik değerleri EMCO Test DuraVision 300 model sertlik ölçme cihazı kullanılarak 62,5 kgf yük altında ve 2,5 mm bilya ile yapılmıştır. Numunelerden en az 5 farklı ölçüm alınarak ortalama sertlik değerleri hesap edilmiştir.

### BULGULAR (RESULTS)

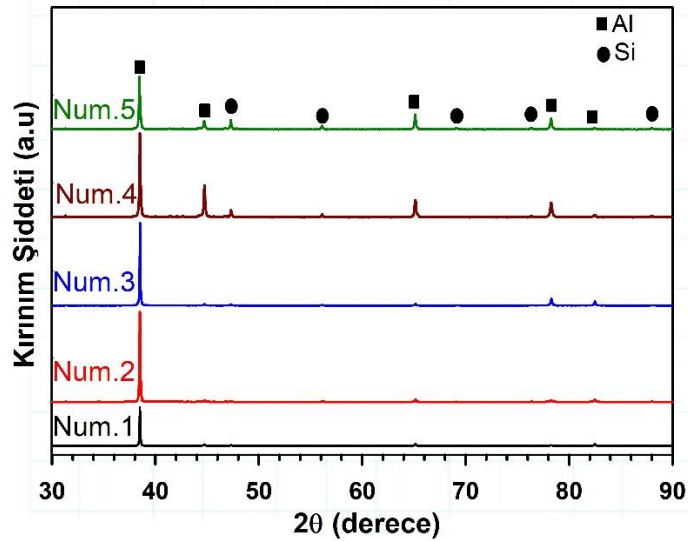


Şekil 1. Dökülmüş, çözeltiye alınmış (0 saat) ve yaşlandırılmış alüminyum alaşımlarına ait mikroyapı fotoğrafları (200X büyütme).

*Figure 1. Optical micrographs of as-cast, solutionized (0 hour) and aged aluminum alloys (200X magnification).*

Çalışma kapsamında kullanılan ticari Al-alaşımlarının dökülmüş, çözeltiye alınmış ve farklı sürelerde yaşlandırılmış numunelerine ait mikroyapı resimleri Şekil 1’te verilmektedir. Isıl işlem öncesi ve sonrası tüm numunelerin mikroyapıları birincil katılaştan  $\alpha$ -Al dendritlerden (açık renkli faz) ve dendritler arası bölgede bulunan kaba, düzlemsel ve keskin köşeli ötektik Si fazından (koyu renkli faz) meydana gelmektedir. Numunelerin mikroyapıları dikkatli incelendiğinde kompozisyona ve yaşlandırma süresine bağlı olarak Al ve Si fazlarının miktarlarında, morfolojilerinde ve büyüklüklerinde önemli bir değişiklik

görülmemiştir. Bununla birlikte sadece 16 saat yaşlandırma uygulanan numunelerin mikroyapılarında Si fazının belli oranda aşırı yaşlandırmaya bağlı irileştiği gözlemlenmiştir (Wagner ve diğ., 2001).



Şekil 2. Çalışmada kullanılan alüminyum alaşımlarına ait X-ışınları kırınım eğrisi.

Figure 2. XRD patterns of investigated aluminum alloys.

Çalışma kapsamında kullanılan dökülmüş haldeki ticari Al-alaşımlarının faz analizleri X-ışını kırınımı (Şekil 2) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'den de anlaşılacağı üzere araştırılan numunelerde sadece Al ve Si fazlarına ait kırınım piklerine rastlanmıştır olup herhangi bir ikili veya üçlü intermetalik (metallerarası bileşik) fazlarına ait piklere rastlanmamıştır. Mikroyapı incelemesi ve faz analizi sonuçları birlikte irdelediğinde çalışma kapsamında kullanılan alaşımların belli oranda Zn ve Mg içermelerine rağmen Al ve Si fazlarından başka herhangi bir faz içermedikleri açıkça görülmektedir. Bunun sebebi ise Zn ve Mg metallerinin YMK kristal yapıya sahip Al içerisinde çözünürlüğe sahip olmalarıdır. Hatta Zn alaşım elementleri içerisinde Al içerisinde en yüksek katı çözünürlüğe (atomik % 66,4) sahip olan elementtir (Mistri ve Joshi, 2017).

**Çizelge 2.** Isıl işlem görmemiş (dökülmüş haldeki) alaşımlarda Alüminyum ve Silisyumun fazlarının hesap edilmiş kafes parametresi.

Table 2. Calculated lattice parameters of Aluminum and Silicon phases in as-cast alloys.

Numune	Alüminyum Kafes Parametresi (Å)	Silisyum Kafes Parametresi (Å)
Numune1	4,0471	5,4295
Numune2	4,0488	5,4329
Numune3	4,0472	5,4303
Numune4	4,0462	5,4281
Numune5	4,0466	5,4308

Ayrıca Çizelge 2' de listelenen Al fazına ait ve Bragg Kanunu kullanılarak hesap edilen kafes parametreleri incelendiğinde Mg ve Zn elementlerinin Al ile birlikte katı çözelti oluşturdukları açıkça görülmektedir. Saf Al elementinin kafes parametresi 4,0495 Å olup çalışma kapsamında kullanılan alaşımlardaki Al kafes parametreleri tüm numuneler için bu değerden belli oranda düşüktür. Bu durum şu şekilde açıklanmaktadır. Saf Mg ve Zn' un kafes parametreleri sırasıyla 3,2094 Å ve 2,6649 Å olup saf Al' un kafes parametresine kıyasla oldukça düşüktür. Daha düşük kafes parametresine sahip Zn ve Mg' un Al içerisinde çözünmesiyle Al' un sahip olduğu YMK kristal kafes küçülmektedir ve dolayısıyla Al alaşımları saf Al'a kıyasla daha düşük kafes parametresine sahip olmaktadır. Bununla birlikte alaşımlardaki Zn ve Mg miktarına göre hesap edilen kafes parametrelerinde herhangi bir artış ya da

azalma eğilimi gözlemlenmemiştir. Bunun sebebi ise alaşımların çok bileşenli olmasına ve kırınım analizlerinin bulk (hacimli) numunelerden yapılmasına bağlanmaktadır.

Çalışma kapsamında kullanılan dökülmüş haldeki ve ısıtma işlemi görmüş Al alaşımlarının oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri Brinell sertlik testleri ile belirlenmiş ve önemli bulgular elde edilmiştir. Her bir numuneden rastgele en az 5 farklı Brinell sertlik ölçümü yapılmış, döküm veya katılaşma kaynaklı kusurlardan ortaya çıkan çok yüksek/düşük sertlik değerleri hesaba katılmamıştır. Çizelge 3'te çalışma kapsamında kullanılan numunelere ait hesap edilmiş ortalama sertlik değerleri verilmiştir. Elde edilen sertlik değerlerine göre, dökülmüş haldeki alaşımların en düşük sertlik değerlerine sahip olduğu ve yaşlandırma ısıtma işlemi neticesinde tüm numunelerin sertlik değerlerinde önemli artış olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, en yüksek (pik) sertlik değerlerine 4 saat yaşlandırma sonucu ulaşıldığı sürenin 16 saate çıkması ile birlikte sertlik değerlerinin % 10-12 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum temel nedeni ise mikroyapı analizlerinde gözlemlendiği üzere 16 saat yaşlandırılan numunelerde aşırı (fazla) yaşlandırmaya bağlı olarak fazlarda ortaya çıkan irileşmedir.

**Çizelge 3.** Dökülmüş, çözeltiye alınmış (0 saat) ve yaşlandırılmış alüminyum alaşımlarına ait Brinell sertlik değerleri.

*Table 3. Brinell hardness values of as-cast, solutionized (0 hour) and aged aluminum alloys.*

Numune	Ortalama Sertlik Değeri				
	Döküm	Çözeltiye alınmış	1 saat	4 saat	16 saat
Numune1	76	91	85	109	99
Numune2	75	99	94	122	108
Numune3	80	107	91	127	118
Numune4	79	101	89	124	107
Numune5	75	104	90	123	107

Çözeltiye alınmış numunelerin sertlik değerlerinin dökülmüş (ham) haldeki numunelerin sertlik değerlerine kıyasla daha yüksek olmasının sebebi çözeltiye alma ısıtma işlemi ile nispeten yüksek sıcaklıkta ve nispeten yüksek difüzyon hızında aşırı doymuş katı çözelti meydana gelmesidir. Bu da katı çözelti sertleşmesine sebep olmaktadır. Bununla birlikte 1 saat yaşlandırma neticesinde sertlik değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Nispeten yüksek sıcaklıkta uygulanan çözeltiye alma işlemi atom boşluğu konsantrasyonunu arttırmış ve takiben su verme işlemi ile de fazla miktarda atom boşluğuna sahip aşırı doymuş katı çözelti elde edilmiştir. Daha sonrasında çözeltiye alma işlemine kıyasla daha düşük sıcaklıkta uygulanan yaşlandırma neticesinde atom boşluğu sayısı azalmış ve dolayısıyla alaşımlarda bir miktar yumuşama gözlemlenmiştir. Pogaster ve diğerleri (Pogaster ve diğ., 2011) tarafından yapılan çalışmada yaşlandırma sıcaklığı ve atom boşluğu arasındaki ilişkinin yapay yaşlandırmayı kontrol eden mekanizmaya etkisi araştırılmış ve 170-180°C yerine daha yüksek sıcaklıklarda (200-210°C) yapılan yaşlandırmada atom boşluklarının kaybolmasının diğer bir deyişle konsantrasyonlarının azalmasının aşırı doymuş katı çözeltiye kıyasla baskın mekanizma olduğunu bildirmişlerdir.

Çalışmada kapsamında kullanılan numunelerin Brinell sertlik sonuçları dikkatlice incelendiğinde en az oranda (% 0,116) Mg içeren Numune1'in çözeltiye alma ve tüm yaşlandırma koşullarında diğer numunelere kıyasla daha düşük sertlik değerine sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebebi olarak içerdiği düşük Mg miktarı düşünülmektedir. Mg, Al-alaşımlarının en temel alaşım elementlerinden birisi olup alaşımların yaşlandırılabilirliğini arttırdığı bilinmektedir (Mistri ve Joshi, 2017). Bu sebeple incelenen 5 farklı bileşimin dökülmüş haldeki sertlik değerleri birbirine yakın iken, ısıtma işlemi sonrasında Numune1'in sertlik değerleri diğer dört numunenin sertlik değerlerine kıyasla düşüktür. Yaşlandırma ısıtma işlemi Numune1'in sertliğinde % 43 artış sağlarken, diğer dört numunenin sertlik artışı bileşime bağlı olarak % 57-64 arasında ölçülmüştür.

Öte yandan Zn miktarının çalışma kapsamında kullanılan Al-alaşımlarının sertlik değerlerine etkisi incelendiğinde Zn miktarına bağlı olarak değişen belirgin bir sertlik artış ya da azalma eğilimi gözlemlenmemiştir. Zn, Al içerisinde en yüksek çözünürlüğe sahip element olup (Van Horn 1968) katı çözelti güçlendirmesine sebep olmaktadır. Fakat çalışma kapsamında kullanılan alaşımlar ticari alaşımlar

olup Si, Mg ve Zn'nun dışında farklı ve fazla sayıda safsızlık bulunmaktadır. Bu yüzden numunelerde Zn miktarına bağlı belirgin bir sertlik artışı veya azalma eğilimi gözlemlenmemiştir.

Bununla birlikte bu çalışma kapsamında araştırılan numunelerin sertlik değerleri önceki çalışmamızda kullanılan (Çevirir ve diğ., 2018) benzer Si içeren (% 7,29) ve çok az oranda Mg, Zn ve Cu içeren Al-alaşımının sertlik değerleri ile kıyaslandığında her koşul için yaklaşık 1,5 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Mg, Zn ve Cu içermeyen alaşımın dökülmüş haldeki ve pik sertlik değeri sırasıyla 46 ve 86 Brinell sertlik değeri olarak ölçülmüşken şimdiki çalışmada bu değerler önemli ölçüde artmıştır. Elde edilen bu sonuç gösteriyor ki Mg, Zn ve Cu ilavesi ile Al alaşımlarının oda sıcaklığındaki mekanik özelliklerine çok önemli ölçüde katkı sağlamaktadır.

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında farklı oranlarda Zn ve Mg içeren 5 farklı ticari Al alaşımının yaşlandırma öncesi ve sonrası mikroyapısal özellikleri ve sertliği incelenmiştir ve elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir:

- Yaşlandırma öncesi ve sonrası Zn ve Mg miktarına bağlı olarak mikroyapısal özelliklerde önemli değişiklikler gözlemlenmemiştir.
- 16 saat yaşlandırma sonucunda Si fazında aşırı yaşlandırmadan kaynaklı belli oranda irileşme meydana gelmiştir.
- Tüm numunelerin sertliği yaşlandırma sonrası önemli ölçüde artmış ve pik (en yüksek) sertlik 4 saat yaşlandırma sonucu ortaya çıkmıştır.
- Diğer numunelere göre daha az Mg içeren Numune1'in yaşlandırılabilirlik kabiliyeti zayıftır.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Konya Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü mezunlarından Yusuf Kaplan'ın lisans bitirme projesi kapsamında hazırlanmıştır. Yazarlar numunelerin üretimi ve temini için RMT Metalurji firmasına, numune hazırlanmasında emeklerini esirgemeyen Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü emekli teknisyeni Ali Özdoğan'a teşekkürlerini sunmaktadır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Çetin, A., 2017, "Alüminyum Döküm Alaşımları", *Dökümcünün El Kitabı Serisi-04, Dökümhane Akademi Projesi*.
- Çevirir, Y., Necip, S., Yıldırım, M., 2018, "Isıl İşlem Süresinin Ötektik-Altı Al-Si Alaşımlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt. 18, ss. 1036-1042.
- Davis, J. R., 1993, "Introduction to Aluminum & its alloys", *ASM International*. ss. 30–32.
- Davis, J. R., 2001 "Aluminum and Aluminum Alloys", *ASM International*.
- Easton, M., John, D., 1999, "Grain Refinement of Aluminum Alloys: Part I. The Nucleant and Solute Paradigms—A Review of the Literature", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Cilt. 30, ss. 1613-1623.
- Easton, M., John, D., 1999, "Grain Refinement of Aluminum Alloys: Part II. Confirmation of, and a Mechanism for, the Solute Paradigm", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Cilt. 30, ss. 1625-1633.
- Ejiofor, J.U., Reddy R.G., 1997, "Developments in the Processing and Properties of Particulate Al-Si Alloy Composites", *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials*, Cilt. 49, ss. 31-37.
- Gül, F., 2014, "AlSi10Mg Döküm Alaşımlarının Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine İkincil Yaşlandırma İşleminin Etkisi", *Suleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Science*, Cilt. 18, ss. 30-37.

- Ji, S., Watson, D., Fan., Z., White, M., 2012, "Development of a Super Ductile Die-Cast Al-Mg-Si Alloy. *Mater. Sci. Eng. A*. Cilt. 556, ss. 824-833.
- Kalhapure, M.G., Dighe, M.P., 2015, "Impact of Silicon Content on Mechanical Properties of Aluminum Alloys", *International Journal of Science and Research*, Cilt. 4, ss. 38-40.
- Kaufman, J. G., Rooy, E. L., 2004, "Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes and Applications", *ASM International*.
- Li, H. J., Shivkumar, S., Luos, X. J., Apelian, D., 1989, "Influence of Modification on the Solution Heat Treatment Response of Cast Al-Si-Mg Alloys", *Cast Metals* Cilt .1, ss. 227-234.
- Mistry, V.A., Joshi, M.J, 2017, "Development of Aluminum-Zinc Alloy by Adding Zn Solid and Zn Powder", *International Journal of Science Technology & Engineering*, Cilt. 4(1), ss. 165-167.
- Mohamed, A.M.A., Samuel, A.M. Samuel, F.H., Doty, H.W., 2009, "Influence of Additives on the Microstructure and Tensile Properties of Near-Eutectic Al-10.8%Si Cast Alloy", *Materials and Design*, Cilt. 30, ss. 3943-3957.
- Murray, J.L., 1982, "The Al-Mg (Aluminum-Magnesium) System", *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, Cilt. 3(1), ss. 60-74.
- Pogatscher, S., Antrekowitsch, H., Leitner, H., Ebner, T., Uggowitzner, P. J., 2011, "Mechanisms controlling the artificial aging of Al-Mg-Si Alloys", *Acta Materilia*, Cilt. 59 (9), ss. 3352-3363.
- Rana, R. S., Purohit, R., Das, S., 2012, "Review on the Influence of Alloying Elements on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloys", *International Journal of Scientific and Research Publication*, Cilt. 2, ss. 1-7.
- Rooy, E.L., 1992, "ASM Metal Handbook Properties and Selection: Non- Ferrous Materials and Special Purpose Alloys", *ASM International*, Cilt. 02, ss. 17-44.
- Singh, V., 2008, "Physical Metallurgy", *Standard Publication Delhi*, 1st Edition, ss. 679-688.
- Van Horn K. R., 1968, "Aluminum Vol.I Properties, Physical Metallurgy and Phase Diagrams", ASM.
- Wagner, R., Kampmann, R., Voorhees, P.W., 2001, "Homogeneous Second Phase Precipitation, in Phase Transformations in Materials", *Wiley-VCH*, ss. 309-407.



## ARAÇ İÇİ SESİNDEN ARACI TANIMA VE SINIFLANDIRMA

<sup>1</sup>Emrah AYDEMİR , <sup>2</sup>Murat IŞIK 

<sup>1,2</sup>Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, TÜRKİYE  
<sup>1</sup>emrah.aydemir@ahievran.edu.tr, <sup>2</sup>muratisik@ahievran.edu.tr

(Geliş/Received: 20.06.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 03.11.2020)

**ÖZ:** Günümüzde, teknolojik imkanların hızla gelişmesiyle ses sınıflandırma uygulamalarının sayıları da artmakta ve popüler bir çalışma alanı haline gelmektedir. Bu çalışmada, amacımız durağan halde bir aracın üretmiş olduğu sesi kullanarak "aracın sesli imzasını" üretmek ve aracın sınıflandırılması için kullanmaktır. Çalışan bir aracın sesi; motor sesi, titreşimden kaynaklı sesler, rüzgâr sesleri gibi bazı seslerin bir araya gelmesiyle oluşur. Uygulamada 22 aracın rölantideki sesleri kaydedilmiş ve Local Binary Pattern (LBP) ve Cubic SVM algoritmaları kullanılarak %95,2 oranında başarılı sınıflandırılmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** ses sınıflandırma, araç tanıma, sesli imza, araç sınıflandırma

### Vehicle Detection and Classification from Its Interior Sound

**ABSTRACT:** Today, with the rapid development of technological possibilities, the number of sound classification applications are increasing and becoming a popular field for researchers. In this study, our aim is to extract "vehicle sound signature" by using the sound produced by the vehicle at idle mode. After that to use this sound signature for the classification of the vehicle. The sound of a working vehicle at idle mode consist of some noises cause by engine, vibration, wind etc. In practice, the sounds of 22 vehicles at idle mode were recorded and 95.2% successful classification was made by using the Local Binary Pattern (LBP) method and the Cubic SVM algorithm. In addition, the results were analyzed by comparing them with similar studies in the related literature.

**Key Words:** sound classification, vehicle recognition, voice signature, vehicle classification

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda ses sınıflandırma konusu araştırmacıların giderek daha çok ilgilerini çeken bir çalışma alanı haline gelmiştir (Han ve diğ., 2016; Mielke ve Brück, 2013; Salamon ve diğ., 2014; Salamon ve Bello, 2017). Bunun başlıca nedeni ise günümüz teknolojisi ile ses sınıflandırma yönteminin kullanıldığı uygulamaların ve alanların oldukça geniş olmasıdır. Ses sınıflandırma yönteminin kullanıldığı başlıca uygulamalar; hayvan seslerinin sınıflandırılması, konuşma/müzik gibi birbirinden farklı seslerin ayrıştırılması, insan seslerinin sınıflandırılması, ortam seslerinin sınıflandırılması, araç seslerinin sınıflandırılması gibi uygulamalardır (Chu ve diğ., 2008; Huang ve Hansen, 2006; Lavner ve Ruinskiy, 2009; Montino ve Pau, 2019; Scheirer ve Slaney, 1997; Zhang ve Kuo, 2001). Ses sınıflandırma yönteminin kullanıldığı başlıca alanlar ise güvenlik, sağlık, askeri amaçlar, gözetim ve takip sistemleri, akıllı algılama ve kontrol sistemleri, eğlence sistemleri, kentsel uygulamalar ve Akıllı Ulaşım Sistemleri şeklindedir (Cowling ve Sitte, 2003; Dokur ve Ölmez, 2008; Jarnicki ve diğ., 1998; Kubera ve diğ., 2015; Mielke ve Brück, 2013; Radhakrishnan ve diğ., 2005; Salamon ve Bello, 2015; Yoo ve Yook, 2008). Araç tanıma ve

sınıflandırma konusu, Akıllı Ulaşım Sistemlerinde de karşılaşılan en temel zorluklardan biridir (De Angelis ve diğ., 2016; Tan ve diğ., 2018).

Literatürde bu tür zorluklara çözüm olarak araç kabin sesleri, yol sesi, motor sesini ve lastik sesini veri olarak kullanarak farklı sınıflandırma sonuçlarına ulaşan birçok çalışma mevcuttur (Alexandre ve diğ., 2015; Erb, 2007; George ve diğ., 2013; Ghiurcau ve Rusu, 2009; Johnstone ve Woodward, 2013; Mayvan ve diğ., 2015; Montino ve Pau, 2019; Paulraj ve diğ., 2013; Wiczorkowska ve diğ., 2018). Ancak bu çalışmaların ortak amacı araç türünü tespit etmeye yöneliktir. Bu çalışma ile sunulan yöntemde ise motor sesi kaydedilen bir aracın daha sonradan tespiti hakkında tahminde bulunmaya yöneliktir.

Çalışan bir aracın sesi; motor sesi, titreşimden kaynaklı sesler, rüzgâr sesleri gibi bazı seslerin bir araya gelmesiyle oluşur. Doğal olarak bu ses; araçta kullanılan yakıt türüne, motor çeşidine, yalıtım seviyesine, malzeme yapısına ve çeşitliliğine göre farklılık gösterir. Aynı marka, model ve özelliklere sahip araçlar, aynı şartlarda çalıştığı zaman yaklaşık olarak aynı sesleri üretmelerine (De Angelis ve diğ., 2016; Randall, 1987) rağmen bu sesler aracın kullanımına ve zamana bağlı olarak farklı parçalarının farklı seviyelerde yıpranmasından dolayı neredeyse benzersiz hale gelmektedir.

Bu çalışmada amacımız durağan halde bir aracın üretmiş olduğu bu benzersiz sesi "aracın sesli imzası" olarak tanımlayıp kaydetmektir. Bu sayede aracın sesli imzası kayıt edildikten sonra yeni bir ses algılandığında; bu sesin tanımlanması ve eğer daha önceden kayıtlı bir ses ise aracın sınıflandırılması için kullanılmasıdır. Geliştirilen bu sistemle günümüzde birçok uygulama mümkün olacaktır. Örneğin acil durumlarda, araç içerisinde telefon ile konuşan kişiden arka planda olan motor sesinin duyulması ile aracın belirlenmesi mümkün olabilecektir. Günümüzde üretilen araçların neredeyse tümü akıllı (Hahn ve diğ., 2019) ve sesli tanıma sistemleri için gerekli donanımsal alt yapıya sahiptir (Bisio ve diğ., 2018). Bu altyapı ile birlikte, tanımlanan "sesli imzalar" bütünleşik halde çalışabilecektir. Böylelikle araç çalıştırıldığı anda eğer aracın çalışma sesinin değişimine sebep olan bir arıza var ise bunun için öncü bir uyarı sistemi olacaktır.

## BENZER ÇALIŞMALAR (RELATED WORKS)

2019 yılında yapılan bir çalışmada, düşük maliyetli, yapay sinir ağı ile çalışan, mikrodenetleyici tabanlı gömülü bir sistem geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri sistem yol üzerinde herhangi bir uzaktan kontrol bağlantısına ihtiyaç duymadan yerleştirilip, geçen araçların motor seslerinden geçen araç olup/olmadığını algılamaktadır (Montino ve Pau, 2019). 2018 yılında yapılan başka bir çalışmada ise veri olarak hem araç sesi hem de araç görüntüsü kullanılmıştır. Araç sesleri dışarıdan ve araca yaklaşık 30m mesafeden kayıt edilmiştir. Hem araçları türlerine göre hem de motor sesinden yakıt tipine göre ayırmayı hedeflemişlerdir. Araç türlerini sınıflandırmada %97,45'e kadar, motor tipini belirlemede ise benzinli araçlarda %100, dizellerde ise %92,7'ye kadar başarı sağlamışlardır (Wiczorkowska ve diğ., 2018). 2015 yılında yapılan bir çalışmada, araç dışından kaydedilen sesler veri olarak kullanılmış ve araç türü tahminini %80 başarı ile yapmışlardır (Mayvan ve diğ., 2015). 2015 yılında yapılan diğer bir çalışmada ise yine yoldan alınan sesler ile araç türü tespit edilmeye çalışılmıştır. Çalışmalarında Extreme Learning Machine ile melezlenmiş özel bir Genetik Algoritma sınıfına (kısıtlı arama ile) dayalı yöntem kullanmışlardır. %74,83 - %93,74 arasında oranlarda başarılı sınıflandırma yapabilmişlerdir (Alexandre ve diğ., 2015). 2013 yılında yapılan bir çalışmada yaklaşmakta olan aracın sesinden araç türü ve uzaklığı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Hareket halindeki araçların farklı çevrelerde üretmiş oldukları ses kaydedilmiş ve özbağımlı model algoritma ile analiz edilmiştir. Bu sesin sınıflandırılması için PNN modelini kullanmışlardır. %92,8 başarıyla araç türünü ve mesafesini tahmin edebilmişlerdir (Paulraj ve diğ., 2013). 2013 yılında yapılan diğer bir çalışmada, yola yerleştirmiş oldukları mikrofon ile yoldan geçen araçların seslerini kayıt edilmiş ve ANN/KNN algoritmalarını kullanarak sınıflandırılmıştır. Araç türünün tespitinde; KNN algoritmasında %50,62 başarıya, ANN algoritmasında ise %73,42 başarıya ulaşmışlardır (George ve diğ., 2013). 2013 yılında yapılan diğer bir çalışmada ise motor sesinden araç tanıma için ANN ve NBC algoritmalarının başarısını karşılaştırmıştır. Araç seslerini araç dışında kaydetmişlerdir. ANN için %88,7 NBC için %92,3 doğru sınıflandırma yapabilmişlerdir (Johnstone ve



Woodward, 2013). 2009 da yapılan bir çalışmada, Matlab platformunda zaman kodlu sinyal işleme ve tanıma yöntemi (TESPAR) ile Archetypes tekniği birleştirilerek kullanılmıştır. Altı farklı araçtan kaydedilen 45 ses verisi üzerinde çalışmışlardır. Bazı araç modellerini belirlemede başarılı iken bazılarını ise yaklaşık %50 hata ile sınıflandırmışlardır (Ghiurcau ve Rusu, 2009). 2007 yılında hazırlanan bir tez çalışmasında yol üzerinde araçlardan toplanan seslerden araç türü tespiti yapılmıştır. SVM algoritmasını kullanarak yapılan bu çalışmada %87 'ye kadar doğru sınıflandırma yapabilmıştır. Ancak araç hızları veya trafik arttıkça bu başarı oranı oldukça düşmektedir (Erb, 2007). 1998 yılında Wu ve ark. yaptıkları bir çalışmada hareket halindeki araçların seslerini kullanarak araç türünü tahmin etmeye çalışmışlardır. Ancak o zamanki teknoloji imkanlarının yoksunluğundan istemiş oldukları sonuçları elde edememişlerdir (Wu ve diğ., 1998). Ses sinyallerini kullanarak araç sınıflandırma araştırmacıların önem verdiği konulardan olup bununla ilgili Literatürde farklı algoritmalar geliştirerek farklı sınıflandırma sonuçları elde eden birçok çalışma (Dalir ve diğ., 2018; Paulraj ve diğ., 2013; Wierzchowska ve diğ., 2018) olmuştur. Bu çalışmada sunulan yöntem ile bu çalışmaya konu olan benzer çalışmalar sonuç kısmında karşılaştırılmıştır.

## **MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)**

### **Veri Toplama (Data Collection)**

Çalışır durumda olan 22 aracın rölantideki araç içi sesi kaydedilmiştir. Ses kaydedilirken standart mikrofon kullanılmış ve aracın sürücü koltuğu ile yan yolcu koltuğunun ortasına konumlandırılmıştır. Araç sesleri kayıt edilirken ortam seslerinin olmamasına dikkat edilmiştir. Her bir ses kaydı en az 210 saniye olacak şekilde alınmıştır. Bu ses dosyaları iki saniyelik parçalara ayrıştırılmıştır. Böylece her araca ait 100'den fazla ses kaydı oluşturulmuştur. 44100 Hz örnekleme oranı ile toplam 2416 ses kaydı analiz edilmiştir. Çizelge 1'de araçlara yönelik detaylar verilmiştir. Sonrasında kaydedilen sesler Local Binary Pattern (LBP) yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.

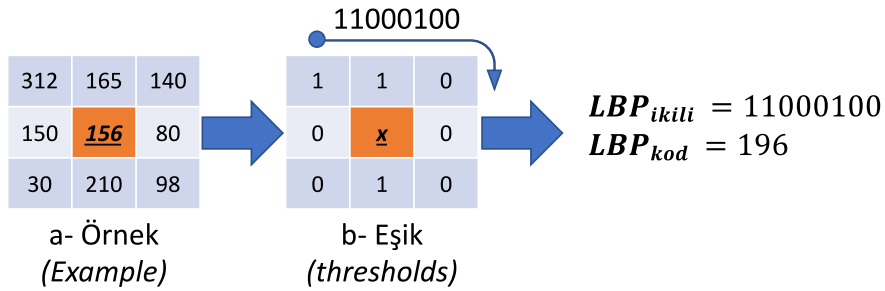
Araçların yalnızca beş tanesi Benzin+LPG yakıt türüne sahip olup kalanların tümü dizel yakıtlı araçlardır. Araçların içerisinde dört tanesi aynı marka, aynı model, aynı yakıt türü ve aynı motor hacminde olup üretim yılı ve kilometre değerleri farklıdır. Böylece yapılacak tahminde hem tüm araçların birbirinden nasıl ayrıştığı hem de aynı özellikte olmalarına rağmen araçların ayrışıp ayrışmadığı göstermek amaçlanmıştır.

### **Yerel İkili Örüntü (LBP) (Local Binary Pattern)**

LBP, bir resmin her pikselini, o pikselin çevresindeki 3x3 alanda komşu olduğu pikseller ile eşleştiren ve sonuçta ikili sayı sisteminde tek bir değer üreterek bu pikselleri etiketleyen basit ancak çok etkili bir doku operatörüdür. Şekil-1a'da işaretli pikseli "merkez piksel" olarak ele alalım; eşlik tablosu çıkarabilmek ve LBP değerini elde edebilmek için komşu olduğu diğer sekiz piksel ile büyüklük/küçüklük ilişkisine bakılır. Eğer merkez pikselin değeri komşusu olan pikselden büyükse karşılaştırması yapılan pikselin konumuna 1, küçükse 0 yazılarak eşik tablosu hazırlanır. Çıkarılan tablodan sekiz bitlik LBP değeri ikilik sayı formatında elde edilebilir. Bunun için tablonun ilk hücrendeki değer en yüksek değerlikli bit olacak şekilde saat yönüne doğru ilerleyerek LBP ikili sayı değeri elde edilir. Kolay kullanım ve okuma için bu değer LBP kod olarak adlandırılarak onluk sayıya çevrilir ve ilgili piksel bu değer ile etiketlenir.

Çizelge 1. Araç Detayları  
Table 1. Details of the Vehicles

ID	Marka	Model	Seri	Üretim Yılı	Motor Hacmi	Yakıt Türü	KM
1	Renault	Fluence	Icon	2013	1500	Dizel	150000
2	Fiat	Egea	Urban	2016	1300	Dizel	72000
3	Toyota	Corolla	Comfort Extra	2012	1600	Benzin+LPG	84000
4	Wosvagen	Passat	Varyant	2013	1600	Dizel	160000
5	Scoda	SuperB	Prestige	2018	1600	Dizel	60000
6	Renault	Fluence	Icon	2015	1500	Dizel	83000
7	Fiat	Linea	Active Plus	2012	1300	Dizel	170000
8	Honda	Civic	Eco Elegans	2012	1600	Benzin+LPG	104000
9	Renault	Fluence	Dynamic	2011	1500	Dizel	220000
10	Peugeot	301	Allure	2016	1600	Dizel	65000
11	Audi	A3	Ambiante	2014	1600	Dizel	78000
12	Fiat	Egea	Easy	2017	1300	Dizel	86000
13	Fiat	Marea	Liberty	2004	1600	Benzin+LPG	180000
14	Fiat	500x	Cross Plus	2017	1600	Dizel	28000
15	Wosvagen	Polo	Comfort Line	2015	1200	Benzin+LPG	20000
16	Mercedes	E200	Elegance	1995	2000	Benzin+LPG	270000
17	Scoda	Octavia	Elegance	2014	1600	Dizel	69000
18	Wosvagen	Passat	R-Line	2017	1600	Dizel	45000
19	Renault	Fluence	Extreme	2015	1500	Dizel	141000
20	Chevrolet	Aveo	LTZ	2012	1300	Dizel	148000
21	Ford	Focus	Trends	2015	1600	Dizel	132000
22	Renault	Megane	Touch	2017	1500	Dizel	94000



Şekil 1. Yerel İkili Örüntü (LBP) mantığı  
Figure 1. Logic of the Local Binary Pattern

LBP metodolojisi doku analizinde önemli ilerlemelere yol açmıştır. Araştırma ve uygulamalarda tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır (Pietikäinen, 2010). LBP'nin temel kullanım amacı yüz tanıma, doku tanıma, hareket analizi gibi (Da Costa ve diğ., 2019) görüntü işleme ve makine görmesine yönelik uygulamalardır (Huang ve diğ., 2011). Bunun en temel nedeni ise LBP'nin ayrıştırma da olan başarısı ve hesaplama kolaylığı olarak gösterilebilir. LBP'nin hesaplamalarda sağladığı basitlik ve ayrıştırma başarısı bu çalışmada görüntü işleme yerine ses sınıflandırma amacıyla kullanılmıştır. LBP görüntü işleme açısından oldukça etkili bir tekniktir ancak görüntü üzerindeki parazitlere karşı çok hassas olabilmektedir. Örneğin pikseller üzerine gelecek ufak bir aydınlık, piksel değerlerinin değişmesine bu sebeple LBP değeri hesaplanırken kullanılacak 1'lerin 0 veya 0'ların 1 olmasına sebep olabilir. Bir ses genliği (zaman-frekans gösterimi) iki boyutlu bir resim olarak düşünülerek, kaydedilen bir ses verisi genliği üzerinde LBP ile doku analizi yapmak mümkündür (Kobayashi ve Ye, 2017; Thwe ve War, 2017).

### Kübik SVM (Cubic SVM)

Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine – SVM) sınıflandırma tekniği düşük bellek alanı problemini aşmada kullanılan yararlı bir yöntemdir. SVM sınıfları mümkün olan en iyi şekilde ayırmak için çok boyutlu bir hiper düzlem bulur (Lin ve Wei, 2005). Kübik SVM sınıflandırıcısı sınıflandırıcının çekirdek fonksiyonunun kübik olduğu durumlarda ancak kullanılabilir. Aşağıdaki Denklem 1 ile kullanılır. Buradaki çalışmada Matlab programı içerisinde kübik SVM yönteminin varsayılan parametreleri kullanılmıştır.

$$K(x_i, x_j) = (x_i^T x_j)^3 \quad (1)$$

### Bulgular (Findings)

Çalışma içerisinde 22 tane aracın rölantide iken çıkarttıkları araç içi sesleri kayıt altına alınmıştır. Ses dosyaları üçer saniyelik parçalara ayrılmış fakat üzerinde gürültü giderme benzeri hiçbir filtreleme ya da ön işleme yapılmamıştır. LBP öznitelik çıkarma yöntemi Matlab platformunda ses dosyalarına uygulanarak 256 öznitelik çıkarılmıştır. Elde edilen veriler yine Matlab platformunda sınıflandırma algoritmaları kullanılarak analiz edilmiştir. 10-katlı çapraz doğrulama ile veriler eğitim ve test olarak ayrıştırılmıştır. Sınıflandırma algoritmalarının tümünde varsayılan parametreler kullanılmıştır. Öncelikle 22 aracın da içerisinde yer aldığı bir analiz yapılmış ve Cubic SVM algoritması ile %95,2 oranında başarılı sınıflandırmalar yapılmıştır. Aşağıdaki Çizelge 2’de karışıklık matrisi gösterilmiştir.

**Çizelge 2.** Tüm Araçlar için Cubic SVM Algoritması ile Sonuçların Karışıklık Matrisi

*Table 2. Confusion Matrix of Results with Cubic SVM Algorithm for All Vehicles*

		Tahmin Değerleri																						Tp.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Gerçek Değerler	1	100	0	0	0	0	3	0	2	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	107
	2	0	102	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	107
	3	1	0	98	0	0	0	0	2	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	105
	4	0	0	3	103	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	106
	5	0	0	0	0	108	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	111
	6	0	0	0	0	0	98	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	101
	7	0	0	0	0	1	0	104	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	106
	8	0	0	0	0	2	5	0	94	0	2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	106
	9	4	0	0	0	0	0	1	0	101	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	106
	10	0	0	0	0	0	0	2	0	0	104	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	106
	11	0	0	0	0	4	0	0	0	1	0	101	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	107
	12	0	5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	98	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	106
	13	1	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	106
	14	0	3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	104	0	0	0	0	0	0	0	0	109
	15	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	104	0	0	0	0	0	0	0	106
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	114	0	0	0	0	0	7	121
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	105	0	0	0	0	2	113
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	112	0	0	1	0	113
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	114	1	0	0	116
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	110	0	0	111
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	1	0	131	1	137
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	108	110

### SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

22 aracın rölantideki araç içi sesi kaydedilip toplam 2416 ses kaydı analiz edilmiştir. Matlab platformunda LBP ile ses verilerinden 256 adet öznitelik çıkarılarak, Cubic SVM algoritması ile %95,2

oranında başarılı sınıflandırma yapılmıştır. Elde edilen bu yüksek başarı oranı her aracın aynı marka ve model bile olsalar kendilerine özgü bir "sesli imzalarının" olduğunu göstermektedir. Bu farklılığın özellikle aynı marka ve model araçlarda bile görülmesinin temel sebebi araçlarda kullanılan malzemelerin farklı zamanlarda ve farklı seviyelerde yıpranmasının yanı sıra araçlarda kullanılan yalıtım malzemelerinin, yakıtın, filtrelerin hatta motor yağı gibi küçük detayların bile etkili olduğu düşünülmektedir.

Literatürde yer edinmiş benzer çalışmalar ile sunulan çalışmanın arasındaki farklılıklar analiz edilerek Çizelge 3'te sunulmuştur. Çizelge incelendiği zaman literatürde sunulan konu ile ilgili çalışmaların çoğunun araç türünü belirlemeye yönelik olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra farklı olarak ses kayıtları araç dışarısından alınmaktadır, bu sebeple alınan ses kayıtlarının içerisinde rüzgâr sesi, lastik sesi gibi birçok farklı etken sesler dahil olmaktadır. Sunulan çalışmada ise araç içerisinde alınan çok küçük bir ses parçası ile %95,2 oranında araç doğru olarak tespit edilebilmiştir.

**Çizelge 3. Benzer çalışmalar ile karşılaştırma**

*Table 3. Comparison with similar studies*

Benzer Çalışmalar	Kullanılan yöntem	Ulaşılan Başarı	Sunulan çalışma ile farklılıkları
Montino ve Pau, 2019	Yapay Sinir Ağı	%97,5	Ortam seslerini sınıflandırarak sadece geçen araç olup/olmadığını algılamaktadır. Geçen araç için herhangi bir tanımlayıcı bilgi vermemektedir. Sesler araç dışında kaydedilmektedir.
Wieczorkowska ve ark., 2018	RF, DL, SVM(linear, quadratic, RBF kernel)	%97,45	Sadece araç türü ve motor tipi tespit için geliştirilmiştir. Araç marka, model ve serisini bulmaya yönelik değildir. Ses araç dışında kayıt edilmektedir.
Mayvan ve ark., 2015	QDA, SVM	%80	Sadece araç türünü tespit için geliştirilmiştir. Araç marka, model ve serisini bulmaya yönelik değildir. Araç dışında kayıt alınmıştır.
Alexandre ve ark., 2015	Extreme Learning Machine ve Genetik Algoritma	%93,74	Sadece araç türünü tespit için geliştirilmiştir. Araç marka, model ve serisini bulmaya yönelik değildir. Araç dışında kayıt alınmıştır.
Paulraj ve ark., 2013	Analiz için autoregressive, sınıflandırma için PNN	%92,8	Sadece aracın türünü ve mesafesini tahmin etmeye yöneliktir. Araç dışında kayıt alınmıştır.
George ve ark., 2013	ANN/KNN Algoritmaları	%73,42	Sadece aracın türünü bulmaya yöneliktir. Ses kayıtları yol üzerinde yapılmaktadır.
Johnstone ve ark., 2013	ANN/NBC Algoritmaları	%88,7 ve %92,3	Kullanılan metot farklı olmasının yanı sıra her bir eğitim seti için kullanılan ses kaydı 26.3 s sürmektedir. Ayrıca sesler araç dışarısında kaydedilmektedir.
Ghiurcau ve Rusu, 2009	Matlab platformunda TESPARD ile Archetypes tekniği	%45,5 - %100	Sadece 6 araç modeli üzerinde çalışılmıştır. Bazı araçları %55,55 hata ile sınıflandırmışlardır.
Erb, 2007	SVM Algoritması	%80-%87	Sadece araç türünü bulmaya yöneliktir. Ses kaydı araç dışında yapılmaktadır.
<b>Sunulan Çalışma</b>	<b>Local Binary Pattern (LBP)</b>	<b>%95,2</b>	

Sonraki çalışma olarak araç hareket halinde iken bu çalışmada sunulan yöntem ile aracın sınıflandırılmasını sağlamaktır. Bunun için araç hareket halinde iken kaydedilen sesten gürültü olarak nitelendirilecek ve aracın hareketine bağlı meydana gelebilecek sürtünme sesi, rüzgâr sesi, yol sesi gibi diğer seslerin giderilmesi gerekmektedir. Ayrıca aynı marka, model ve özelliklere sahip araçlar, aynı şartlarda çalıştığı zaman yaklaşık olarak aynı sesleri üretmesi (De Angelis ve ark., 2016; Randall, 1987) durumu kullanılarak, araca özgün "sesli imza" durumu dikkate alınarak kaç kilometre yol yaptığı üzerinde çalışılabilir. Bu sayede kayıtlı olmayan bir aracın sesi algılandığında araç km verisi ile oynanıp oynanmadığı bulunulabilir. Eğitim verisi olarak kullanılacak, araç tanıma sesleri dikkatle seçilmeli,

kaydedilmeli ve sınıflandırılmalıdır. Kayıt yapılırken ortamda bulunacak farklı seslerin dikkate alınmaması sonuçlarda ve analizlerde hataya neden olabilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Alexandre, E., Cuadra, L., Salcedo-Sanz, S., Pastor-Sánchez, A., Casanova-Mateo, C., 2015, "Hybridizing extreme learning machines and genetic algorithms to select acoustic features in vehicle classification applications", *Neurocomputing*, 152, 58-68.
- Bisio, I., Garibotto, C., Grattarola, A., Lavagetto, F., Sciarrone, A., 2018, "Smart and robust speaker recognition for context-aware in-vehicle applications", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(9), 8808-8821.
- Chu, S., Narayanan, S., Kuo, C.C.J., 2008, "Environmental sound recognition using MP-based features," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp. 1-4, 2008.
- Cowling, M., Sitte, R., 2003, "Comparison of techniques for environmental sound recognition", *Pattern Recognition Letters*, vol. 24, pp. 2895-2907.
- Da Costa, M.V.B., Couto, C.M.V., Couto, L.N., 2019 October, "Face Recognition Using LBP on an Image Transformation Based on Complex Network Degrees", *32nd SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI)*, pp. 163-169.
- Dalir, A., Beheshti, A.A., Masoom, M.H., 2018, "Classification of vehicles based on audio signals using quadratic discriminant analysis and high energy feature vectors", *arXiv*, arXiv:1804.01212.
- De Angelis, G., De Angelis, A., Pasku, V., Moschitta, A., Carbone, P., 2016 October, "A simple magnetic signature vehicles detection and classification system for smart cities", *IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, pp. 1-6.
- Dokur, Z., Ölmez, T., 2008, "Heart sound classification using wavelet transform and incremental self-organizing map", *Digital Signal Processing*, 18(6), 951-959.
- Erb, S., 2007, "Classification of vehicles based on acoustic features", Doctoral Dissertation Thesis, Graz University of Technology, Austria.
- George, J., Cyril, A., Koshy, B. L., Mary, L., 2013, "Exploring sound signature for vehicle detection and classification using ANN", *International Journal on Soft Computing*, 4(2), 29.
- George, J., Mary, L., Riyas, K. S., 2013 December, "Vehicle detection and classification from acoustic signal using ANN and KNN". *International Conference on Control Communication and Computing (ICCC)*, pp. 436-439.
- Ghiurcau, M.V., Rusu, C., 2009 July, "Vehicle sound classification. Application and low pass filtering influence", *International Symposium on Signals, Circuits and Systems*, pp. 1-4.
- Hahn, D.A., Munir, A., Behzadan, V., 2019, "Security and Privacy Issues in Intelligent Transportation Systems: Classification and Challenges", *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*.
- Han, W., Coutinho, E., Ruan, H., Li, H., Schuller, B., Yu, X., Zhu, X., 2016, "Semi-supervised active learning for sound classification in hybrid learning environments", *PloS one*, 11(9).
- Huang, D., Shan, C., Ardabilian, M., Wang, Y., Chen, L., 2011, "Local binary patterns and its application to facial image analysis: a survey", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 41(6), 765-781.
- Huang, R., Hansen, J.H.L., 2006, "Advances in unsupervised audio classification and segmentation for the broadcast news and NGSW corpora," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 14(3): pp. 907- 919.
- Jarnicki, J., Mazurkiewicz, J., Maciejewski, H., 1998, "Mobile object recognition based on acoustic information", *Proc. of the 24th Annual Conf. of the IEEE Industrial Society*, vol. 3, pp. 1564-1569.
- Johnstone, M.N., Woodward, A., 2013 December, "Automated detection of vehicles with machine learning", *11th Australian Information Security Management Conference*, DOI: 10.4225/75/57b65924343cd.

- Kobayashi, T., Ye, J., 2014 May, "Acoustic feature extraction by statistics based local binary pattern for environmental sound classification", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 3052-3056.
- Kubera, E., Wiczorkowska, A., Skrzypiec, K., 2015 October, "Audio-based hierarchic vehicle classification for intelligent transportation systems", *In International Symposium on Methodologies for Intelligent Systems*, pp. 343-352, Springer, Cham.
- Lavner, Y., Ruinskiy, D., 2009, "A Decision-Tree-Based Algorithm for Speech/Music Classification and Segmentation," *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*, doi:10.1155/2009/239892
- Lin, Y.L., Wei, G., 2005, "Speech emotion recognition based on HMM and SVM", *International conference on machine learning and cybernetics*, 8, pp. 4898-4901.
- Mayvan, A.D., Beheshti, S.A., Masoom, M.H., 2015, "Classification of vehicles based on audio signals using quadratic discriminant analysis and high energy feature vectors", *International Journal on Soft Computing*, 6(1), 53.
- Mielke, M., Brück, R., 2013 June, "Smartphone application for automatic classification of environmental sound", *the 20th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems-MIXDES*, pp. 512-515.
- Montino, P., Pau, D., 2019 September, "Environmental Intelligence for Embedded Real-time Traffic Sound Classification", *IEEE 5th International forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI)*, pp. 45-50.
- Paulraj, M.P., Adom, A.H., Sundararaj, S., Rahim, N.B.A., 2013, "Moving vehicle recognition and classification based on time domain approach", *Procedia Engineering*, 53, 405-410.
- Pietikäinen, M., 2010, "Local Binary Patterns", *Scholarpedia*, 5(3), 9775.
- Radhakrishnan, R., Divakaran, A., Smaragdis, P., 2005, "Audio analysis for surveillance applications", *IEEE WASPAA'05*, pp. 158-161.
- Randall, R.B., 1987, "Frequency analysis", California Üniversitesi, Bruel ve Kjaer, ISBN: 87-87355-07-8.
- Salamon, J., Bello, J.P., 2015 April, "Unsupervised feature learning for urban sound classification", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 171-175.
- Salamon, J., Bello, J.P., 2017, "Deep convolutional neural networks and data augmentation for environmental sound classification", *IEEE Signal Processing Letters*, 24(3), 279-283.
- Salamon, J., Jacoby, C., Bello, J. P., 2014 November, "A dataset and taxonomy for urban sound research", *the 22nd ACM international conference on Multimedia*, pp. 1041-1044.
- Scheirer, E., Slaney, M., 1997, "Construction and evaluation of a robust multifeature speech/music discriminator," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp. 1331-1334.
- Tan, Y., Xu, Y., Das, S., Chaudhry, A., 2018 October, "Vehicle Detection and Classification in Aerial Imagery", *25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pp. 86-90.
- Thwe, K.Z., War, N., 2017 June, "Environmental sound classification based on time-frequency representation", *18th IEEE/ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD)*, pp. 251-255.
- Wiczorkowska, A., Kubera, E., Słowik, T., Skrzypiec, K., 2018, Spectral features for audio based vehicle and engine classification, *Journal of Intelligent Information Systems*, 50(2), 265-290.
- Wu, H., Siegel, M., Khosla, P., 1998 May, "Vehicle sound signature recognition by frequency vector principal component analysis", *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, vol. 1, pp. 429-434.
- Yoo, I.-C., Yook, D., 2008, "Automatic sound recognition for the hearing impaired", *IEEE Trans. on Consumer Electronic*, vol. 54, pp. 2029- 2036.
- Zhang, T., Kuo, C.C.J., 2001, "Audio content analysis for online audiovisual data segmentation and classification", *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 9(4): pp. 441 - 457.



## ZAMAN TANIM BÖLGESİNDE SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE PYTHON DİLİNDE GRAFİK KULLANICI ARAYÜZLÜ BİR ELEKTROMANYETİK BENZETİM YAZILIMININ GELİŞTİRİLMESİ

<sup>1</sup>Murat Can SERKUŞ , <sup>2</sup>Serhan YAMAÇLI 

<sup>1,2</sup>Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri, TÜRKİYE  
<sup>1</sup>[muratacanserkus@gmail.com](mailto:muratacanserkus@gmail.com), <sup>2</sup>[syamacli@nny.edu.tr](mailto:syamacli@nny.edu.tr)

(Geliş/Received: 24.07.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 04.11.2020)

**ÖZ:** Rastgele geometrilerin söz konusu olduğu durumlarda elektromanyetik çözümler için sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Zaman bölgesinde sonlu farklar (ZTBSF) metodu da bu amaçla kullanılan popüler yöntemlerden biridir. Bu çalışmada, Python programlama dilinde ZTBSF yöntemi ile rastgele yapıların elektromanyetik benzetimlerini yapmak için bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılıma Tkinter modülü kullanılarak bir grafik kullanıcı arayüzü de eklenerek kullanıcı dostu bir yapı elde edilmiştir. Çeşitli elektromanyetik problemlerin hem geliştirilen yazılım ile hem de piyasada ticari olarak bulunan bir yazılım ile yapılan benzetim sonuçları karşılaştırılmış ve geliştirilen yazılımın beklendiği şekilde çalıştığı gösterilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Zaman bölgesinde sonlu farklar metodu, ZTBSF, Python, Tkinter, elektromanyetik benzetim.

### Development of an Electromagnetic Simulation Software with Graphical User Interface in Python Programming Language Using Finite Difference Time Domain Method

**ABSTRACT:** Numerical methods are utilized for solving electromagnetic problems having random geometries. Finite difference time domain (FDTD) is a popular method used for these types of simulations. In this study, a software in Python programming language is developed implementing FDTD method for electromagnetic simulations. The software is made as user-friendly by adding a graphical user interface with the Tkinter module. Simulation results of various electromagnetic problems obtained with our software and a commercial software are compared and it is shown that our software can be used to simulate electromagnetic problems as expected.

**Keywords:** Finite difference time domain method, FDTD, Python, Tkinter, electromagnetic simulation.

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hem haberleşme hem de savunma sanayilerindeki gelişmeler neticesinde elektromanyetik benzetimler günümüzde her zamankinden daha fazla önem kazanmıştır. Ancak, Maxwell denklemlerinin doğasından dolayı, rastgele geometriler söz konusu olduğunda elektromanyetik problemlerin çözümünde sayısal yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Bu sayısal yöntemlere örnek olarak moment metodu (Ney, 1985), sonlu elemanlar metodu (Jin, 1993), zaman tanım bölgesinde sonlu farklar metodu (ZTBSF) (Yee, 1966) ve iletim hattı metodu (Christopoulos, 1995) verilebilir.

Bu çalışmada, ZTBSF yöntemi kullanılarak kullanıcı dostu bir elektromanyetik benzetim yazılımı gerçekleştirilmiştir. Diğer yöntemlerle kıyaslandığında, ZTBSF yönteminin iki temel olumlu yanı vardır. Bunlar, Maxwell denklemlerinin zaman tanım bölgesinde kullanması sayesinde geniş frekans aralığında benzetim yapılabilmesi ve problem uzayı büyüdükçe gereken işlem adımı sayısının doğrusal artışı olarak ifade edilebilir (FDTD Method, 2019). ZTBSF yönteminde temel olarak Maxwell denklemleri sonlu farklar denklemlerine dönüştürülmekte ve bu denklemler iteratif olarak çözülmektedir (Yee, 1966). ZTBSF yönteminin birçok programlama dilinde ve ticari yazılımlarda alternatif gerçeklemeleri mevcuttur. Pratikte ZTBSF metodunun temel alındığı elektromanyetik benzetim programlarına örnek olarak XFDTD (XFDTD Software, 2020), Lumerical (Lumerical Inc., FDTD Software, 2020) ve Synopsys (FullWAVE FDTD Software, 2020) yazılımları gösterilebilir. Diğer taraftan ticari olmayan birer modül olarak yazılmış olan Meep (Oskooi vd., 2010) ve Houle ve Sullivan kütüphaneleri (Sullivan, 2020) literatürde bulunmaktadır. Bu çalışmada ise, Elsherbeni ve Demir tarafından MATLAB ortamında geliştirilen ZTBSF çözümü hareket noktası olarak alınmıştır (Elsherbeni ve Demir, 2015). Bunun sebebi, MATLAB dilinin diğer dillere göre Python diline daha fazla benzemesidir. Her ne kadar dil benzerliği olsa da Python değişkenleri ile MATLAB değişkenleri arasındaki veri yapısı farkları ile sınıf-nesne farklılıkları nedeniyle aynı program kodunu Python ortamında yürütmek doğal olarak olanaksızdır. Bu nedenle bu çalışmada ZTBSF algoritmasını gerçekleştiren fonksiyonlar Python programlama dilinde baştan yazılmıştır. Daha sonra ise, kendi yazılımımıza Python'ın Tkinter modülü ile bir grafik kullanıcı arayüzü eklenerek daha da geliştirilmiş ve kullanıcı dostu haline getirilmiştir. Ayrıca, eklenebilen geometrilere dikdörtgen prizması ve küre haricinde, silindir, halka ve kesik piramit nesnelere de eklenmiştir. Bu sayede, geliştirilen yazılımla kodlama bilgisine ihtiyaç olmaksızın ZTBSF tabanlı elektromanyetik benzetimler kolaylıkla yapılabilmektedir. Aynı zamanda, yazılım geliştirilirken kullanılan bütün modül ve kütüphaneler ücretsizdir ve bu sayede geliştirilen yazılım sınırsız şekilde dağıtılabilecek potansiyele sahiptir. Geliştirilen arayüz ile kullanıcı, elektromanyetik benzetimini yapmak istediği yapıyı geometrik olarak kısa sürede tanıtabilmekte, tasarımına toplu devre elemanları, gerilim kaynakları ve elektriksel portlar ekleyebilmektedir. Kullanıcının eklediği nesnelere 3 boyutlu sahnede OpenGL tabanlı olarak çizilmekte ve problem uzayı üzerinde döndürme, sürüklenme, uzaklaştırma ve yakınlaştırma gibi 3 boyutlu işlemler yapılabilmektedir. Geliştirilen yazılımın ayrıntılı anlatımı ilerleyen bölümlerde bulunmaktadır.

### ZTBSF YÖNTEMİ (FDTD METHOD)

Öncelikle, ZTBSF yönteminin başlangıç noktası olan Maxwell denklemleri hatırlatılmıştır. Diferansiyel formdaki Maxwell denklemleri (1) ve (2)'de gösterildiği gibi yazılabilir. Sürekli zaman ve uzay bileşenlerini içeren bu denklemler daha açık halde (3)-(8)'deki gibi ifade edilebilmektedir (Elsherbeni ve Demir, 2015).

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma^e \vec{E} + \vec{J}_i \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \sigma^m \vec{H} - \vec{M}_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_x} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma_x^e E_x - J_{ix} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_y} \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma_y^e E_y - J_{iy} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_z} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma_z^e E_z - J_{iz} \right) \quad (5)$$

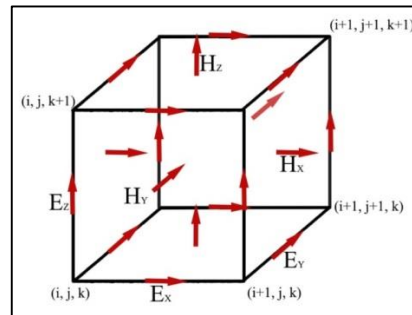


$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu_x} \left( \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \sigma_x^m H_x - M_{ix} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu_y} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - \sigma_y^m H_y - M_{iy} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu_z} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \sigma_z^m H_z - M_{iz} \right) \quad (8)$$

Herhangi bir geometriye ilişkin olarak bu denklemlerin bilgisayar ortamında ZTBSF yöntemi ile sayısal olarak çözülmesi için problem uzayı Şekil 1’de gösterilen Yee hücrelerine bölünmekte ve bu hücrelerde bulunan elektrik ve manyetik alan bileşenleri (9)-(14)’deki gibi ifade edilmektedir (Yee, 1966, Elsherbeni ve Demir, 2015).



Şekil 1. Yee hücresi (K.S. Yee, 1966)

Figure 1. Yee cell (K.S. Yee, 1966)

$$E_x(i, j, k) \rightarrow ((i-0.5)\Delta x, (j-1)\Delta y, (k-1)\Delta z) \quad (9)$$

$$E_y(i, j, k) \rightarrow ((i-1)\Delta x, (j-0.5)\Delta y, (k-1)\Delta z) \quad (10)$$

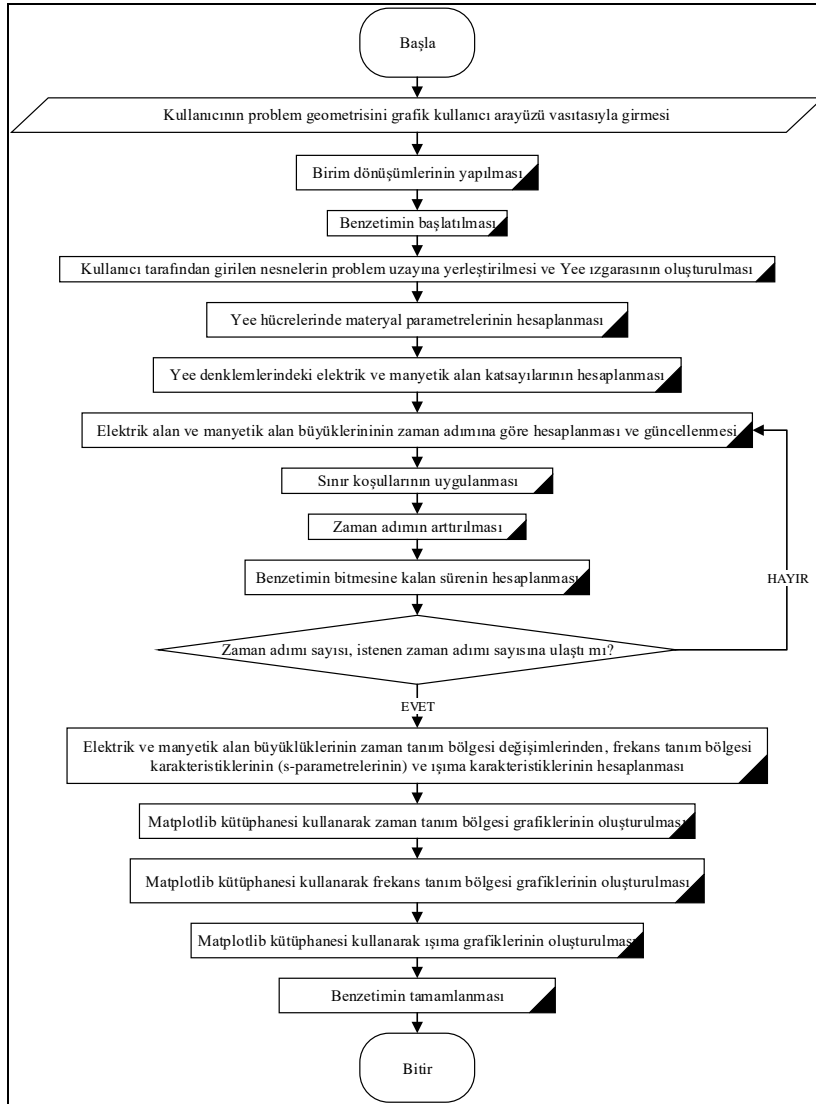
$$E_z(i, j, k) \rightarrow ((i-1)\Delta x, (j-1)\Delta y, (k-0.5)\Delta z) \quad (11)$$

$$H_x(i, j, k) \rightarrow ((i-1)\Delta x, (j-0.5)\Delta y, (k-0.5)\Delta z) \quad (12)$$

$$H_y(i, j, k) \rightarrow ((i-0.5)\Delta x, (j-1)\Delta y, (k-0.5)\Delta z) \quad (13)$$

$$H_z(i, j, k) \rightarrow ((i-0.5)\Delta x, (j-0.5)\Delta y, (k-1)\Delta z) \quad (14)$$

Yee hücrelerindeki elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri, zaman tanım bölgesinde kullanıcı tarafından girilen benzetim frekans aralığına bağlı olan belli bir zaman adımı ile iteratif olarak hesaplanmaktadır. Problem uzayındaki sınır koşulları uygulanarak elektromanyetik problemin çözümü sonuçlandırılmakta ve benzetim sonucunda istenen büyüklükler, elde edilen elektrik ve manyetik alan bileşenlerinden yola çıkılarak hesaplanmaktadır. ZTBSF yönteminin kısa özeti bu şekilde olsa da, bu algoritmanın tam bir yazılım şeklinde gerçekleştirilmesi için, ayrıntıları Şekil 2’deki işaret-akış diyagramında verilen adımlar kullanılmıştır.



Şekil 2. Geliştirilen elektromanyetik benzetim yazılımının işaret-akış diyagramı.

Figure 2. Flowchart of the developed electromagnetic simulation software

## GELİŞTİRİLEN ELEKTROMANYETİK BENZETİM YAZILIMI (DEVELOPED ELECTROMAGNETIC SIMULATION SOFTWARE)

Bu çalışmada, Python programlama dilinde bir elektromanyetik benzetim yazılımı geliştirilmiştir. Kısaca belirtmek gerekirse, Python nesne tabanlı üst seviye bir programlama dilidir. Açık kaynaklı ve modüler yapısı sayesinde bilimsel hesaplamalar için yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Python diline gösterilen rağbet son yıllarda gittikçe artmış ve 2020 yılının en popüler programlama dillerinden biri olmuştur (Eastwood, 2020).

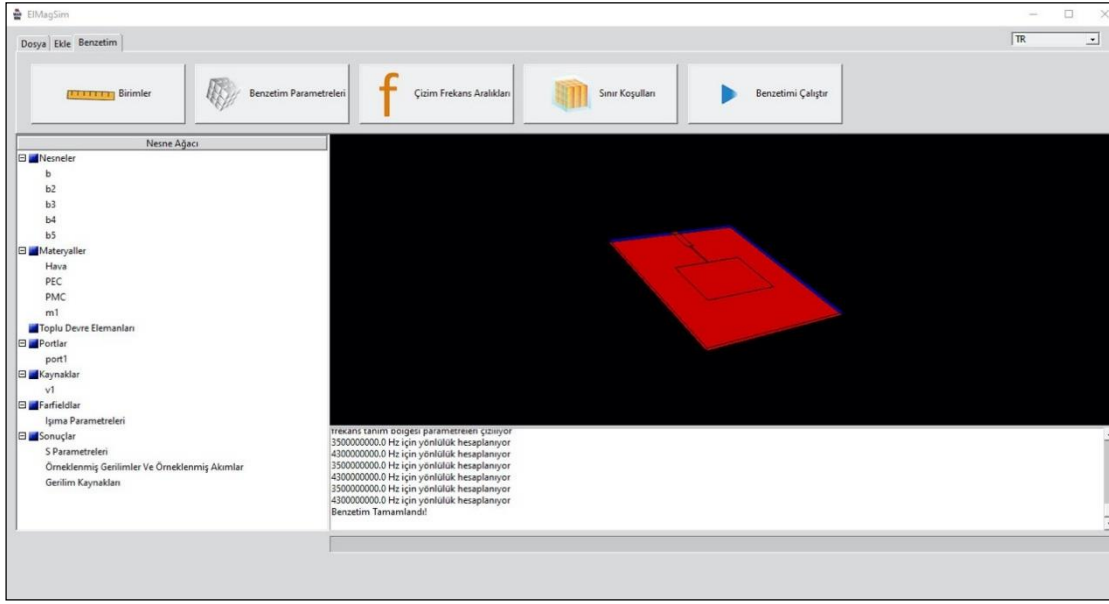
Geliştirilen yazılımın merkezinde, ZTBSF yönteminin gerçekleştirildiği ZTBSF kütüphanesi bulunmaktadır. Bu kütüphane, bu çalışma kapsamında Python programlama dilinde yazılmıştır ve içerisinde elektromanyetik benzetim fonksiyonları bulunmaktadır. Bu fonksiyonlar, çağrılabilir ve benzetim sonuçlarını liste olarak geri döndürebilir olarak yazılmıştır. Bu sayede, ZTBSF yöntemini gerçekleştiren ana fonksiyonlar arayüzden bağımsız olup, bu fonksiyonların başka kütüphanelerde yazılabilecek olan arayüzlerle de ileriye yönelik uyumlu olması hedeflenmiştir.

Yazılımda kullanılan grafik kullanıcı arayüzü Python programlama dilinde Tkinter arayüz kütüphanesi kullanılarak yazılmıştır. Tkinter, Python programa dilinin içerisinde bulunan bir arayüz oluşturma kütüphanesidir. Tkinter kullanılarak Windows, Mac OS veya Linux ortamında pencere oluşturulabilmekte ve pencere içerisine amacına uygun olarak butonlar, metin kutuları, açılır menüler gibi standart nesnelere eklenebilmektedir. Ayrıca, pencere içerisinde 2 boyutlu veya 3 boyutlu çizimler OpenGL tabanlı kütüphaneler ile yapılabilmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen yazılımda kullanım kolaylığı sağlamak amacıyla kullanıcı arayüzü, ana pencere ve diyalog pencerelerinden oluşturulmuş ve modüler olarak yazılmıştır. Tkinter ile pencerelerin görünüşleri, boyutları, pencerelerin içerisinde bulunacak olan buton, menü, metin kutusu gibi nesnelere, gerçekleştirdikleri olaylar ve pencere içindeki konumları kod ile yazılmakta ve kullanıcıya gösterilmektedir. Oluşturulan projelerin saklanması için gereken dosya formatı ve ZTBSF metodunda gereken sayısal işlemler için numpy (Oliphant, 2006) kütüphanesi kullanılmıştır. Numpy bir bilimsel hesaplama kütüphanesi olup, bu kütüphane ile büyük boyutlu dizilerle matematiksel işlemler yapılabilmektedir. Diğer taraftan, elektromanyetik benzetim sonucu ortaya çıkan zaman tanım bölgesi dalga şekilleri, frekans tanım bölgesi grafikleri ve polar grafikler için ise matplotlib (Hunter, 2007) kütüphanesinden yararlanılmıştır. Matplotlib, 2 boyutlu ve 3 boyutlu grafik çizme imkânı sağlayan bir kütüphanedir. Geliştirilen yazılımda bulunan sonuç grafiklerine yakınlaştırma, uzaklaştırma, taşıma, grafik görüntüsünü resim biçiminde kaydetme ve grafik ayarları butonları da eklenmiştir.

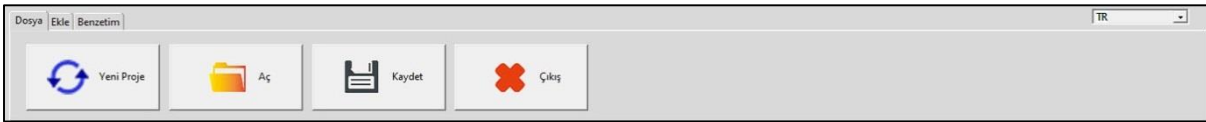
Kullanıcı tarafından girilen elektromanyetik problem geometrisinin 3 boyutlu olarak gösterilmesi için PyOpenGL (Fletcher ve Liebscher, 2005) ve PyOpenGLTk (Wright, 2018) kütüphaneleri kullanılmıştır. PyOpenGL 2 boyutlu ve 3 boyutlu gösterimler ve animasyonlar yapabilme imkânı sağlayan bir kütüphanedir. Gösterilen tasarımlara gölgelendirme ve ışıklandırma gibi birçok görsel işlem de uygulanabilmektedir. PyOpenGLTk ise PyOpenGL ve Tkinter arasına köprü görevi görmektedir. Grafik kullanıcı arayüzündeki "canvas" nesnesi PyOpenGL için sahne olarak kullanılmıştır. Gösterilen 3 boyutlu problem geometrisi yakınlaştırılabilir, uzaklaştırılabilir, taşınabilir ve döndürme işlemi yapılabilir. Kullanıcının girdiği nesnelere anında sahneye çizdirilmekte ve bu sayede sahne sürekli güncellenmektedir.

Hazırlanan arayüz ile benzetim yapacak olan kullanıcı, problem geometrisini grafiksel olarak tanıtmakta, daha sonra ise benzetim parametrelerini de girerek benzetimi gerçekleştirmekte ve sonunda da benzetim sonuçlarını görüntülemektedir. Kullanıcı arayüzünün genel görünümü, benzetim sekmesi aktifken Şekil 3'de gösterilmiştir. Arayüzün solundaki çerçevede nesnelere, materyallerin, devre elemanlarının, elektriksel portların, kaynakların ve sonuçların listelendiği nesne ağacı bölümü vardır. Arayüzün üst kısmında ise çeşitli aşamalar arasında geçiş yapmaya yarayan sekmeler ile gösterim dilinin seçildiği bölüm (Türkçe veya İngilizce) bulunmaktadır. Pencerenin ortasında ise girilen problem geometrisinin bulunduğu 3 boyutlu sahne ve bu sahnenin altında ise çalışmakta olan benzetim hakkında bilgi veren bir bölüm bulunmaktadır. Şekil 4'te ise genel dosya işlemlerinin yapıldığı sekme gösterilmiştir.



Şekil 3. Grafik kullanıcı arayüzünün genel görünümü

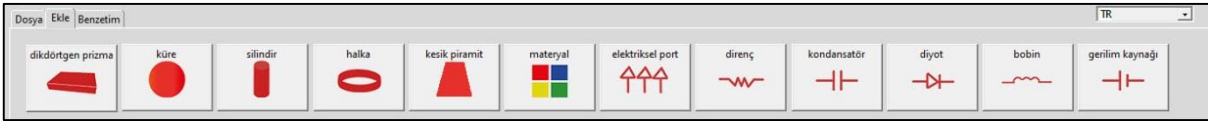
Figure 3. General view of the graphical user interface



Şekil 4. "Dosya" sekmesi

Figure 4. "File" tab

Kullanıcının benzetimini yapacağı problem geometrisi ise, Şekil 5'te gösterilen "Ekle" sekmesi vasıtasıyla yazılıma girilmektedir. Bu sekmede sırasıyla dikdörtgen prizma, küre, silindir, halka, kesik piramit geometrileri ekleme; yeni fiziksel materyal ekleme, elektriksel port ekleme, direnç, kondansatör, diyot, bobin ve gerilim kaynağı şeklindeki toplu devre elemanları ekleme kısımları bulunmaktadır.



Şekil 5. "Ekle" sekmesi

Figure 5. "Add" tab

Geometri ekleme butonlarına basıldığında bir diyalog penceresi çıkmakta ve bu pencerede, eklenecek olan geometrinin parametreleri kullanıcı tarafından girilmektedir. Dikdörtgen prizma ekleme penceresi Şekil 6'da, küre ekleme penceresi Şekil 7'de, silindir ekleme penceresi Şekil 8'de ve halka ekleme penceresi Şekil 9'da ve kesik piramit ekleme penceresi Şekil 10'da gösterilmiştir. Nesne ekleme pencerelerinde nesnenin kartezyen koordinat sistemindeki yeri, nesne ağacında görünecek olan ismi, materyal tipi gibi gerekli olan parametreler istenmektedir. Bu nesneler eklendiğinde, pencerenin merkezindeki 3 boyutlu sahne anlık olarak güncellenmektedir.

Bir Dikdörtgen Prizma Ekle

Dikdörtgen Prizma İsmi:

Minimum x:  mm

Minimum y:  mm

Minimum z:  mm

Maksimum x:  mm

Maksimum y:  mm

Maksimum z:  mm

Malzeme Tipi:

TAMAM İptal

Şekil 6. Dikdörtgen prizma ekleme penceresi  
Figure 6. Brick add window

Bir Küre Ekle

Küre İsmi:

Merkez x:  mm

Merkez y:  mm

Merkez z:  mm

Yarıçap:  mm

Malzeme Tipi:

TAMAM İptal

Şekil 7. Küre ekleme penceresi  
Figure 7. Sphere add window

Bir Silindir Ekle

Silindir İsmi:

Merkez x:  mm

Merkez y:  mm

Merkez z:  mm

Yarıçap:  mm

Yükseklik:  mm

Yön:  p:pozitif

Malzeme Tipi:

TAMAM İptal

Şekil 8. Silindir ekleme penceresi  
Figure 8. Cylinder add window

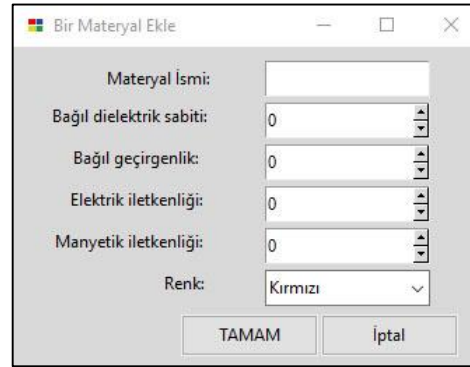
Şekil 9. Halka ekleme penceresi

Figure 9. Torus add window

Şekil 10. Kesik piramit ekleme penceresi

Figure 10. Frustum pyramid add window

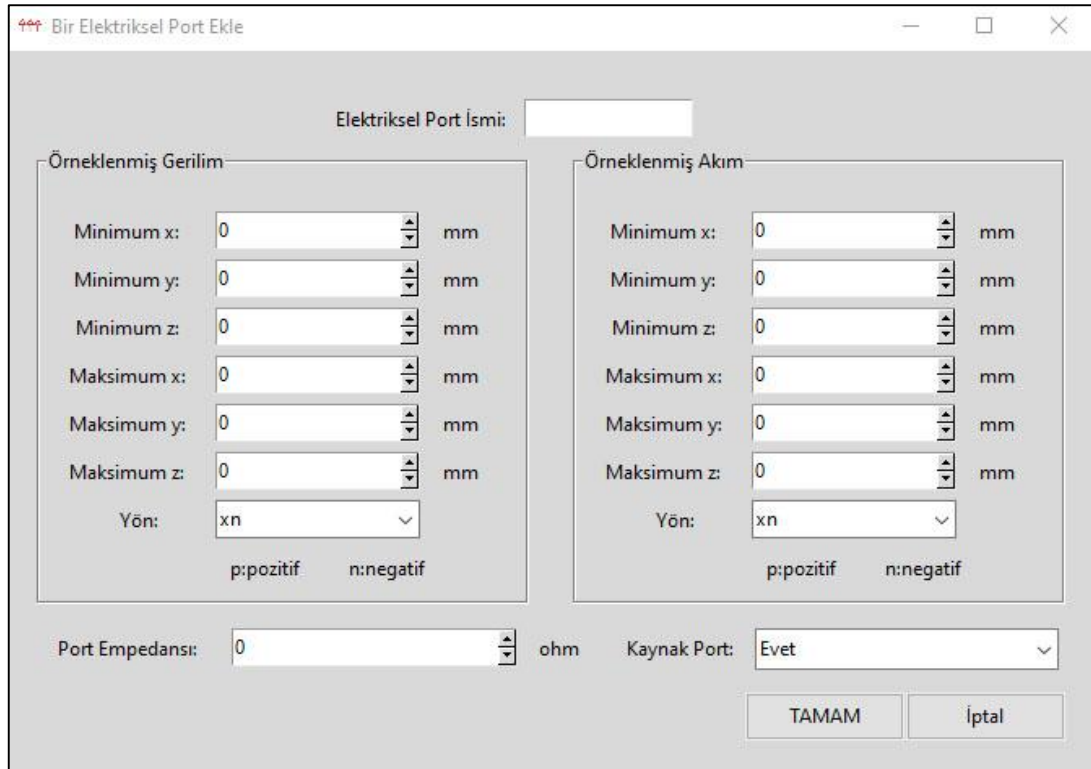
Yeni fiziksel materyal ekleme penceresi ise Şekil 11’de gösterilmiştir. Bu pencerede materyalin ismi, bağıl dielektrik sabiti, bağıl manyetik geçirgenliği, elektrik iletkenliği ve manyetik iletkenliği girilmektedir. Ayrıca, 3 boyutlu sahnede bu materyalden yapılmış olan nesnelerin çiziminde kullanılacak renk seçilebilmektedir.



Şekil 11. Materyal ekleme penceresi

Figure 11. Material adding window

Elektriksel port ekleme penceresi ise Şekil 12’de gösterilmiştir. Pencerde, elektriksel portun örneklenmiş akım ve örneklenmiş gerilim için x, y ve z koordinatındaki minimum ve maksimum noktaları ile porta verilecek olan isim girilmekte ve yönü seçilmektedir. Aynı diyalog penceresinde port empedansı da girilmekte ve kaynak port olup olmadığı da işaretlenmektedir. Eklenmiş olan elektriksel portlar ana pencerenin sol kısmında bulunan nesne ağacında “Portlar” bölümü altında kullanıcının portlara verdiği isimlerle listelenmektedir.



Şekil 12. Elektriksel port ekleme penceresi

Figure 12. Electrical port adding window

Direnç ekleme penceresi Şekil 13’te gösterilmiştir. Pencerde direncin kartezyen koordinat sistemindeki yeri, yönü, direnç değeri ve nesne ağacında görülecek ismi girilir. Kondansatör, diyot ve bobinde de dirençte olduğu gibi açılan pencerelerde kartezyen koordinat sistemindeki yeri, ismi ve yönü girilmektedir. Kondansatör ekleme penceresinde kapasitans değeri ve bobin ekleme penceresinde bobin değerleri belirtilmektedir. Herhangi bir toplu devre elemanı eklendiğinde, ana penceredeki nesne ağacında “Toplu devre elemanları” bölümü altında kullanıcının elemanlara verdiği isimlerle listelenmektedir.

**Şekil 13.** Direnç ekleme penceresi

*Figure 13. Resistor add window*

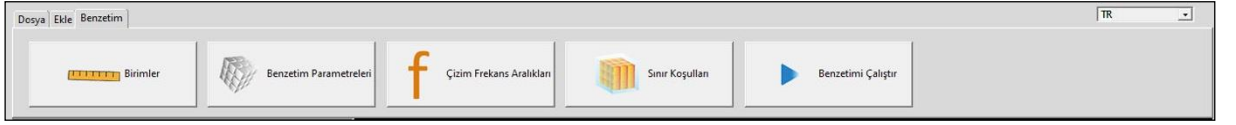
Gerilim kaynağı ekleme penceresi ise Şekil 14'te gösterilmiştir. Pencerede gerilim kaynağının kartezyen koordinat sistemindeki yeri, ismi, dalga formu tipi ve yönü seçilir. Gerilim kaynağının iç direnç ve genliği de girilmektedir. Eklenen gerilim kaynakları, genel penceredeki nesne ağacında "Kaynaklar" bölümü altında kullanıcının verdiği isimlerle listelenir.

**Şekil 14.** Gerilim kaynağı ekleme penceresi

*Figure 14. "Add voltage source" window*

Benzetimi yapılacak olan problem geometrisi tanımlandıktan sonra ise son olarak ana penceredeki "Benzetim" sekmesi kullanılarak benzetim adımına geçilmektedir. Benzetim sekmesinde Şekil 15'de gösterildiği gibi sırasıyla "Birimler", "Benzetim parametreleri", "Çizim frekans aralıkları", "Sınır koşulları" ve "Benzetimi çalıştır" butonları bulunmaktadır.

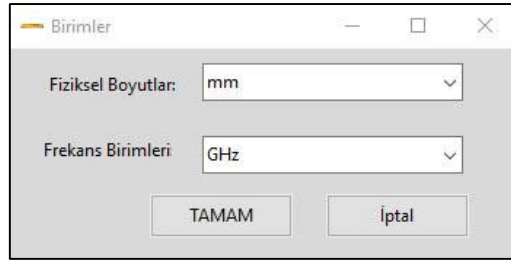




Şekil 15. Benzetim sekmesi

Figure 15. Simulation tab

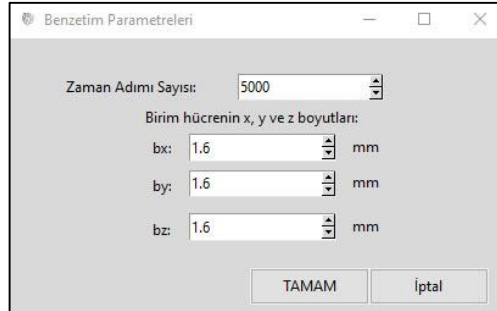
Birimler butonuna basıldığında gelen Birimler penceresi Şekil 16’da gösterilmiştir. Bu pencerede fiziksel boyutların ve frekansın birimleri seçilmektedir.



Şekil 16. Birimler penceresi

Figure 16. Units window

“Benzetim parametreleri” penceresi Şekil 17’de gösterilmiştir. Bu pencerede benzetimin zaman adım sayısını ve birim hücrenin (Yee hücresinin) boyutları girilmektedir.



Şekil 17. Benzetim parametreleri penceresi

Figure 17. Simulation parameters window

“Çizim frekans aralığı” butonuna basıldığında gelen çizim frekans penceresi ise Şekil 18’de gösterilmiştir. Bu pencerede sonuç grafiklerinde kullanılacak olan alt ve üst frekans değerleri girilmektedir.

Şekil 18. Çizim frekans aralığı penceresi

Figure 18. Plotting frequency range window

“Sınır koşulları” penceresi ise Şekil 19’da gösterilmiştir. Bu pencerede sınırın x, y ve z koordinatındaki pozitif ve negatif yönündeki hava boşluğu ve kalınlık değerleri girilir. Dış sınırdaki hücre sayısı girilir. Hava boşluğu nesnelere ve sınırlar arasındaki hücre sayısıdır. Kalınlık ise hücre kalınlığıdır. PEC (Perfect Electrical Conductor-Mükemmel Elektrik İletkeni) ve CPML (Convolutional perfectly matched layer-Evrişimli mükemmel uyumlu katman) olmak üzere iki çeşit sınır şartı kullanılabilir.

Şekil 19. Sınır koşulları penceresi

Figure 19. Boundary conditions window

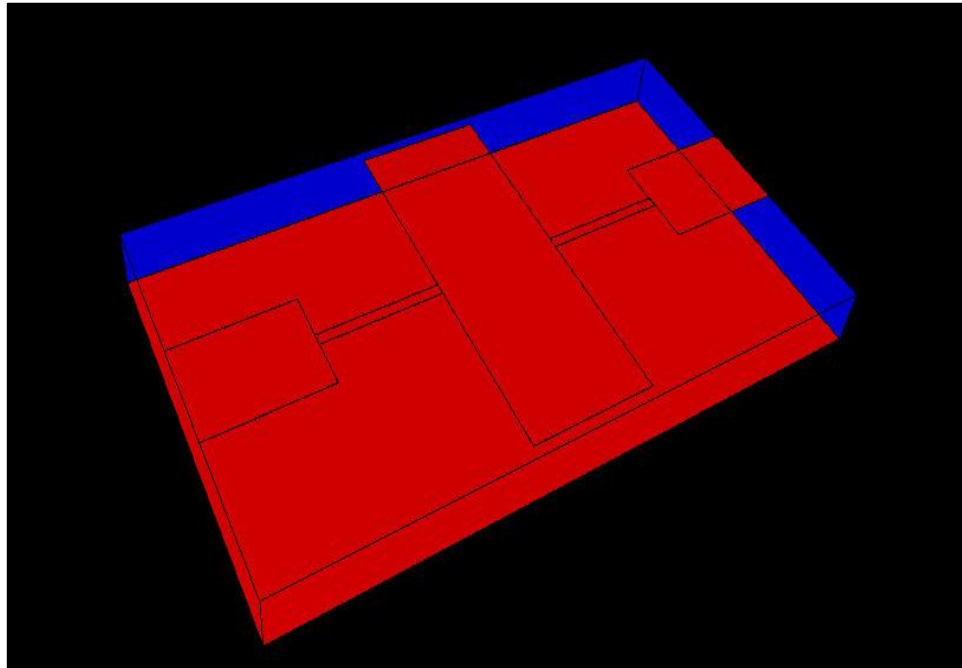
Son olarak ise “Benzetimi çalıştır” butonu ile elektromanyetik benzetim başlatılabilmektedir. Benzetim başladıktan sonra zaman adımları ve benzetime ilişkin anlık parametreler, ana penceredeki sahnenin altında akıcı şekilde gösterilmektedir. Benzetim sona erdikten sonra ise, hesaplanan elektrik ve manyetik alan büyüklüklerinden yola çıkılarak s-parametreleri, ışımaya karakteristikleri ve zaman tanım bölgesindeki dalga formları hesaplanarak matplotlib kütüphanesi vasıtasıyla çizdirilmektedir.

#### YAZILIMIN DOĞRULANMASI (VALIDATING THE SOFTWARE)

Yazılımı test etmek amacıyla farklı örnek yapıların elektromanyetik benzetimleri, geliştirilen yazılım ve ZTBSF metodunu temel alan ticari bir yazılım ile gerçekleştirilmiştir.

#### Mikroşerit Alçak Geçiren Süzgeç Benzetimi (Simulation of a Microstrip Lowpass Filter)

Alçak geçiren süzgeç, kesim frekansından düşük frekanslarda olan işaretleri ileten, daha yüksek frekanslarda olan işaretleri ise zayıflatan bir süzgeç çeşididir. Bu bölümde, bir mikroşerit alçak geçiren süzgecin hem geliştirdiğimiz yazılımda hem de ticari bir yazılımda benzetimleri yapılmıştır. Bu süzgeç devresinde alttaş (substrate) kalınlığı 1.8mm, alttaş bağlı dielektrik sabiti 4.6, süzgecin genişliği 13mm ve boyu ise 23.073mm’dir. Benzetime tabi tutulan mikroşerit süzgeç Şekil 20’de gösterilmiştir.

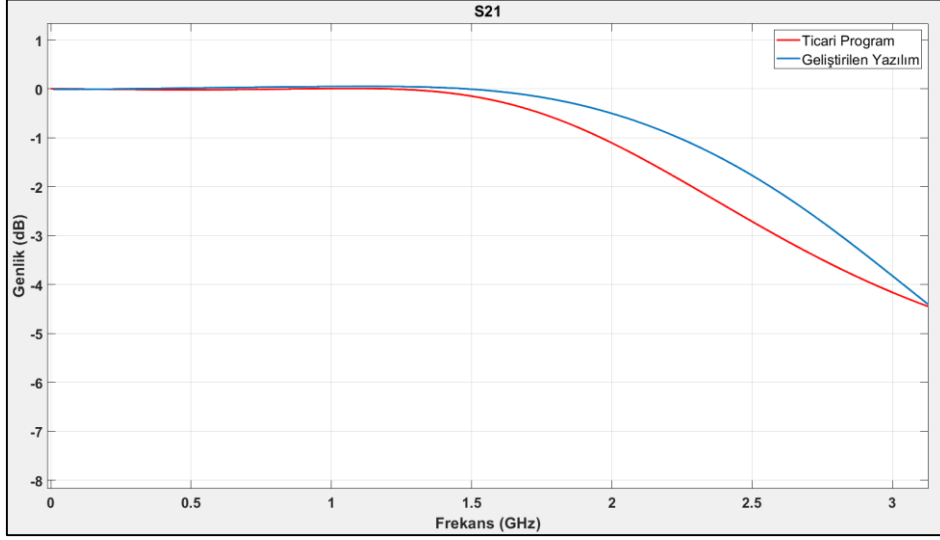


Şekil 20. Mikroşerit alçak geçiren süzgeç devresi.

*Figure 20. Microstrip lowpass filter circuit.*

Elektromanyetik benzetimler sonucunda, ticari yazılımdan ve geliştirilen yazılımdan elde edilen  $S_{21}$  karakteristikleri Şekil 21’de aynı eksen takımında çizdirilmiştir. Saçılma parametrelerinin, doğrusal devrelerin davranışlarını tanımlamak üzere kullanılan parametreler olduğunu hatırlatmakta fayda vardır. Mikrodalga mühendisliğinde yoğun olarak kullanılan ve diğer bir ifadeyle saçılma parametreleri olarak isimlendirilebilen s-parametrelerinden;  $S_{21}$  kompleks doğrusal gerilim kazancını,  $S_{11}$  ise girişteki kompleks gerilim yansımalarını ifade etmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Mikrodalga devrelerinin davranışları genel

itibariyle frekansa bağılı olduğundan, s-parametrelerinin de frekansa bağılı olarak ifade edilmesi bir gerekliliktir; bu çalışmada geliştirilen yazılım da s-parametrelerinin benzetim neticesinde frekansa bağılı olarak elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

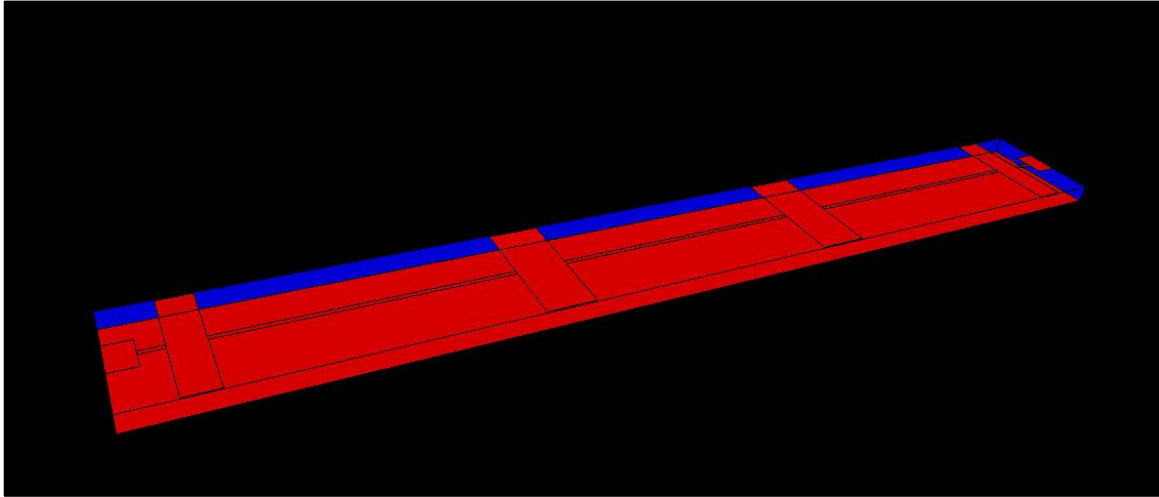


Şekil 21. Mikroşerit alçak geçiren süzgecin  $S_{21}$  karakteristikleri.

Figure 21.  $S_{21}$  characteristics of the simulated microstrip lowpass filter.

#### Mikroşerit Band Durduran Süzgeç Benzetimi (Simulation of a Microstrip Bandstop Filter)

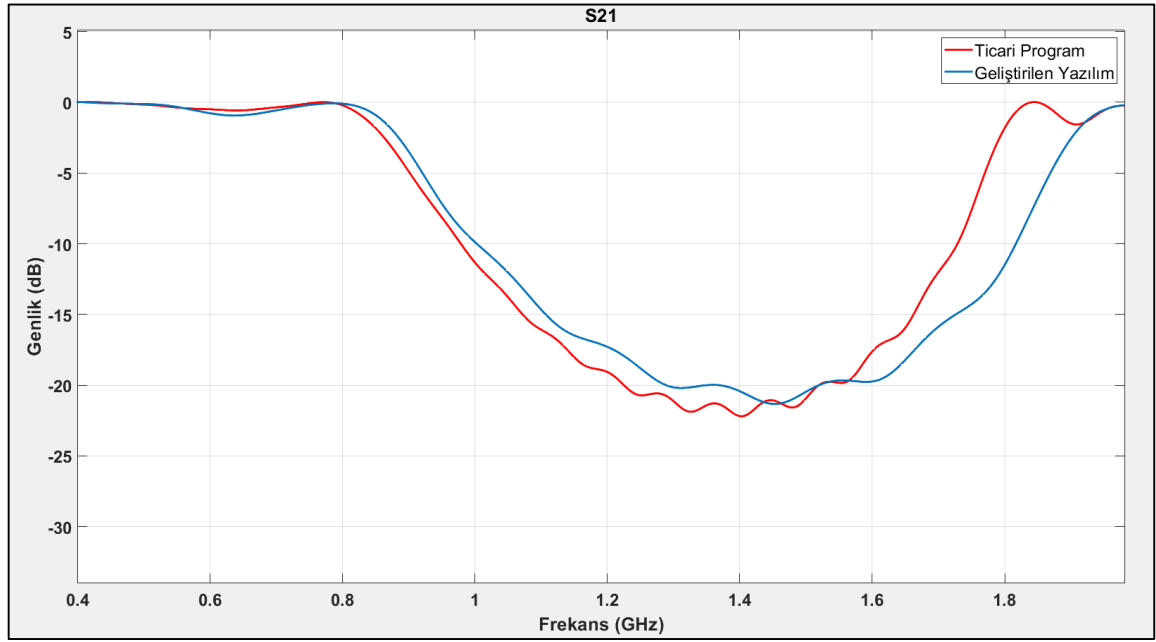
Band durdurucu süzgeç, belirli iki frekans arasındaki frekanslara sahip olan işaretleri zayıflatan ve o aralık dışındaki frekanslarda olan işaretleri geçiren bir devredir. İkinci örnek olarak, alttaş kalınlığı 0.64mm, genişliği 13.1mm, boyu 92.567mm ve alttaş bağılı dielektrik sabiti 5 olan ve Şekil 22’de gösterilen mikroşerit band durdurucu süzgeç devresi benzetime tabi tutulmuştur.



Şekil 15. Mikroşerit band durdurucu süzgeç devresi.

Figure 22. Microstrip bandstop filter circuit.

Mikroşerit band durdurucu süzgeç devresi hem bu çalışmada geliştirilen yazılımda hem de ticari yazılımda benzetime tabi tutulmuştur. Bu benzetimler sonucu elde edilen  $S_{21}$  grafikleri yine aynı eksen takımında çizdirilmiş ve Şekil 23’te verilmiştir.

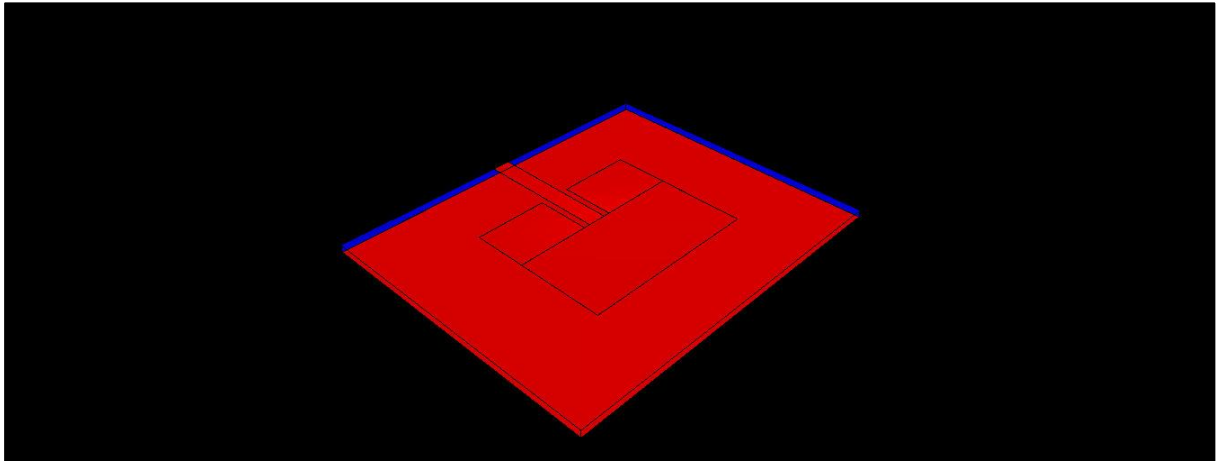


Şekil 23. Band durduran süzgecin  $S_{21}$  grafikleri.

Figure 23.  $S_{21}$  characteristics of the simulated microstrip bandstop filter.

#### Ek Beslemeli Dikdörtgensel Yama Mikroşerit Anten Benzetimi (Simulation of an Inset Fed Rectangular Microstrip Patch Antenna)

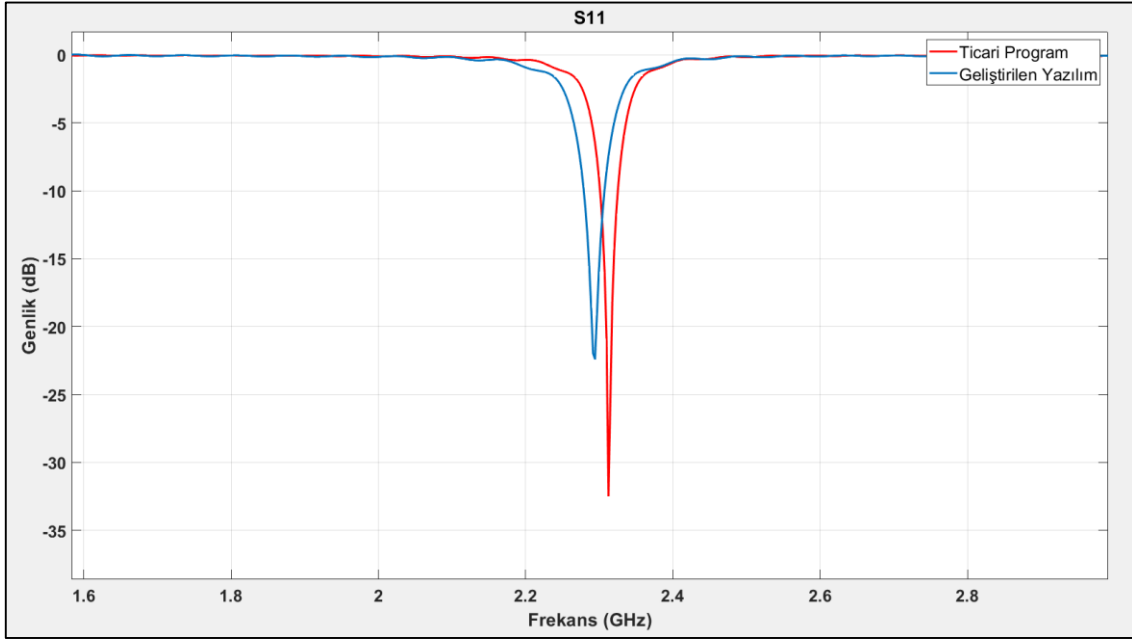
Üçüncü olarak ise merkez frekansı 2.4GHz, yama uzunluğu 35.4529mm ve yama genişliği 44.1917mm olan ek beslemeli bir dikdörtgensel yama mikroşerit antenin benzetimleri hem bu çalışmada geliştirilen yazılımla hem de ticari yazılım ile yapılmıştır. Bu mikroşerit anten Şekil 24'te gösterilmiştir.



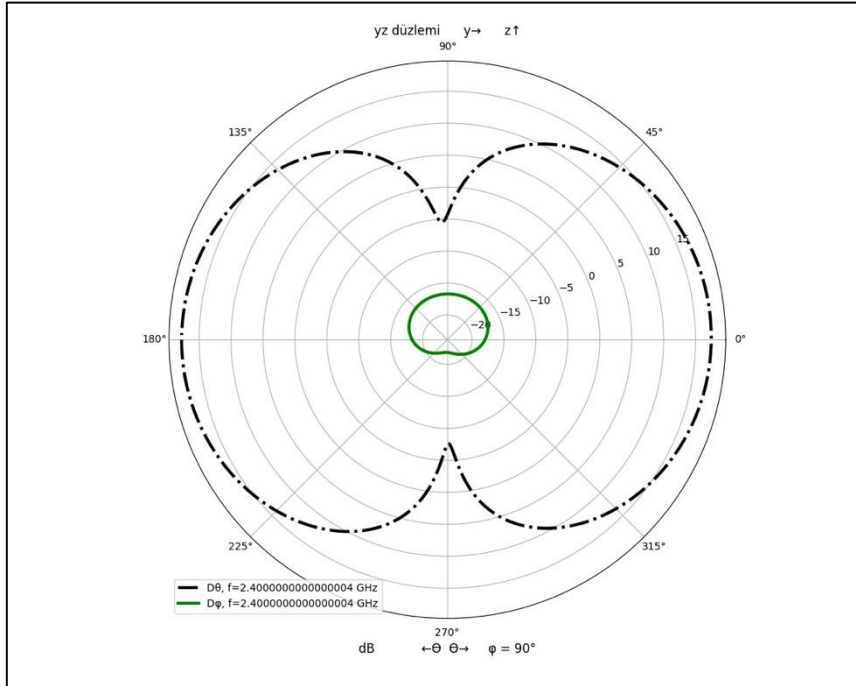
Şekil 24. Ek beslemeli dikdörtgensel yama mikroşerit anten

Figure 24. Inset fed rectangular patch microstrip antenna

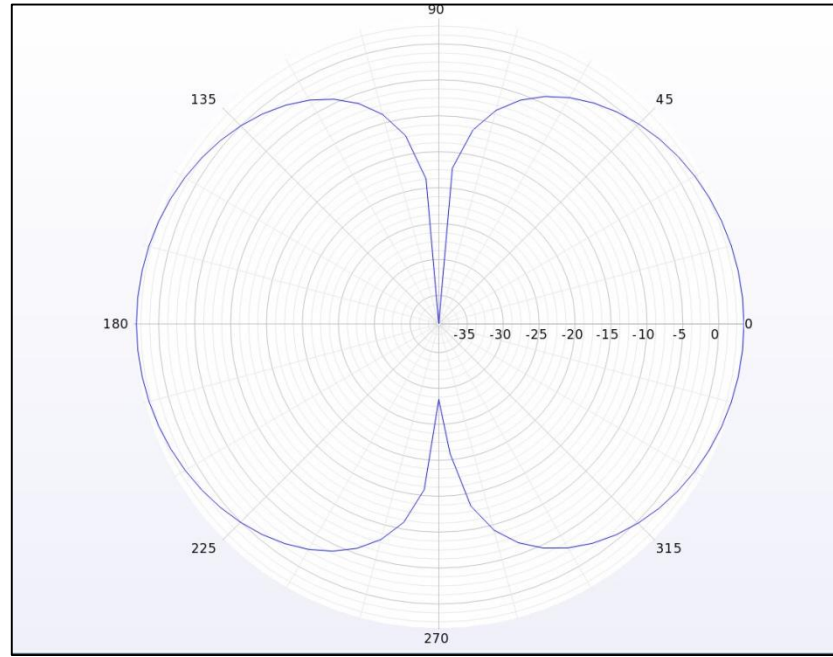
Söz konusu antene ilişkin hem bizim geliştirdiğimiz yazılımla hem de ticari yazılımda yapılan benzetimler sonucunda elde edilen  $S_{11}$  karakteristikleri Şekil 25'te verilmiştir. Ayrıca bu antenin her iki yazılımla elde edilen ışıma karakteristikleri de Şekil 26 ve Şekil 27'de gösterilmiştir. Işıma karakteristiklerinin yönler göre ışıma yoğunluğunu gösteren karakteristikler olduğunu hatırlatmakta fayda vardır.



Şekil 25. Dikdörtgenel mikroşerit yama antenin  $S_{11}$  karakteristikleri.  
 Figure 25.  $S_{11}$  characteristics of the rectangular microstrip antenna.



Şekil 26. Geliştirilen yazılımdan elde edilen ışıma karakteristiği.  
 Figure 26. Radiation characteristics obtained from the developed software.



Şekil 27. Ticari yazılım ile elde edilen ışıma karakteristiği.  
Figure 27. Radiation characteristics obtained from a commercial software

## SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, Elsherbeni ve Demir tarafından MATLAB ortamında geliştirilen ZTBSF çözümünden hareketle, Python programlama dilinde rastgele geometrilerin elektromanyetik benzetimlerini icra etmek için bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım, Python'ın numpy nümerik kütüphanesi ve ilgili veri yapıları kullanılarak en baştan yazılmıştır. Ayrıca, kullanıcı kolaylığı sağlamak için Python'ın Tkinter kütüphanesi kullanılarak bir grafik kullanıcı arayüzü de geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılımın temel faydaları şu şekilde izah edilebilir: i) ZTBSF yönteminin kullanıcının girdiği herhangi bir elektromanyetik probleme uygulanabilmesi, ii) kullanımı kolay bir arayüze sahip olması, iii) dikdörtgen prizması, küre, silindir, halka ve kesik koni gibi nesnelere, direnç, kondansatör, diyot, bobin gibi toplu devre elemanlarını, istenilen dalga formuna sahip gerilim kaynağı, elektriksel port ve istenen parametrelere sahip materyal ekleme olanağı, iv) elektromanyetik problem uzayındaki cisimlerin sahneye 3 boyutlu olarak çizilmesi ve bu şeklin yakınlaştırma, uzaklaştırma, sürükleme, bırakma ve çevirme özellikleri ile detaylı izlenebilmesi, v) benzetim sırasında kullanıcıya yapılan işlem, bitime kalan süre ve süreç durumu hakkında verilmesi ve vi) s-parametreleri, ışıma karakteristikleri ve zaman tanım bölgesindeki dalga şekillerinin kolaylıkla çizdirilebilmesi ve çizdirilen bu grafiklerin resim biçiminde kaydedilmesine olanak tanınmasıdır. Ayrıca, oluşturulan projeler istenildiği takdirde kaydedilip daha sonra tekrar açılabilir.

Yazılımın test edilmesi için üç farklı yapı, geliştirilen yazılım ve ticari olan bir programda elektromanyetik benzetimlere tabi tutulmuştur. Bu yapılar mikroşerit alçak geçiren süzgeç, mikroşerit band durdurucu süzgeç ve ek beslemeli dikdörtgensel mikroşerit yama antendir. Bu benzetim sonuçlarının gerek s-parametreleri gerekse de ışıma grafikleri anlamında uyumlu olduğu görülmektedir. Daha belirgin şekilde belirtmek gerekirse, Şekil 21'de verilen mikroşerit alçak geçiren süzgece ait  $S_{21}$  karakteristikleri incelendiğinde kesim frekansı ticari yazılımda 1.09GHz, bu çalışmada geliştirilen yazılımda ise 1.18GHz olarak tespit edilmiştir. Şekil 23'te verilen mikroşerit band durdurucu süzgece ait olan  $S_{21}$  karakteristikleri incelendiğinde ise band durdurucu aralığı ticari yazılımda 0.77GHz-1.84GHz, bu çalışmada geliştirilen yazılımda ise 0.78GHz-2.05GHz'dir. Ek beslemeli mikroşerit yama antenin Şekil 25'te gösterilen  $S_{11}$  karakteristikleri incelendiğinde, geliştirilen yazılımda antenin merkez frekansı 2.29GHz, ticari yazılımda ise merkez frekans 2.31GHz olarak elde edilmiştir. Yine bu yama antene ait olan Şekil 26 ve Şekil 27'de

verilen ışınım karakteristikleri incelendiğinde 2.4GHz frekansında ışınım şekillerinin bu çalışmada geliştirilen yazılımda ve ticari yazılımda elde edilmiş hallerinin benzer olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmada Python programlama dili kullanılarak grafik kullanıcı arayüzüne sahip olan ve ZTBSF yöntemini kullanan bir elektromanyetik benzetim yazılımı geliştirilmiştir. Çeşitli problemler için, bu çalışmada geliştirilen yazılım ve ticari olan bir elektromanyetik benzetim yazılımının sonuçlarının benzer olduğu gösterilmiş ve böylece geliştirilen yazılımın doğrulaması yapılmıştır. Rastgele problemlerin elektromanyetik benzetimlerinin yapılabildiği bu şekilde bir yazılımın, farklı özellikler eklenerek daha ileri bir noktaya taşınmasının hem ülkemizde hem de dünyada elektromanyetik benzetimlere ihtiyaç duyan araştırmacılara faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

#### SEMBOLLER (SYMBOLS)

$E$	: Elektrik alan vektörü
$J$	: Akım Yoğunluğu
$H$	: Manyetik alan vektörü
Hz	: Hertz
dB	: Desibel
mm	: Milimetre
$\sigma$	: İletkenlik
$\epsilon$	: Dielektrik sabiti
$\mu$	: Manyetik geçirgenlik
$t$	: Zaman
ZTBSF	: Zaman bölgesinde sonlu farklar

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Elsherbeni A. ve Demir V., 2015. The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics: With MATLAB Simulations, Scitech Publishing, 2nd ed.
- Christopoulos, C., 1995. The Transmission-Line Modeling Method: TLM. New York: IEEE Press.
- Eastwood, B., 2020. The 10 Most Popular Programming Languages to Learn in 2020, <https://www.northeastern.edu/graduate/blog/most-popular-programming-languages/>, erişim tarihi: 15.10.2020.
- FDTD Method, 2019. <https://www.remcom.com/xf-fdtd-method>, erişim tarihi: 14.10.2020.
- Fletcher, M., ve Liebscher, R., 2005. PyOpenGL, <http://pyopengl.sourceforge.net/>, erişim tarihi: 11.07.2020.
- Hunter, J. D., 2007. Matplotlib: A 2D Graphics Environment", Computing in Science & Engineering, vol. 9, no. 3, pp. 90-95.
- Jin, J., 1993. The Finite Element Method in Electromagnetics, Wiley.
- Lumerical Inc., FDTD Software, 2020. <https://www.lumerical.com/tcad-products/fdtd/>, erişim tarihi: 11.07.2020.
- Ney, M.M., 1985. Method of moments as applied to electromagnetic problems, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 33, no. 10, 972-980.
- Oliphant, T.E., 2006. A guide to NumPy, Trelgol Publishing USA.



- Oskooi, A., Roundy, D., Ibanescu, M., Bermel, P., Joannopoulos, J., ve Johnson, S. 2010. Meep: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method. *Computer Physics Communications*, 181(3), 687-702.
- Remcom Inc., XF7 Software 7.3.0.3, 2020. <https://www.remcom.com/xfdtd-3d-em-simulation-software/>, erişim tarihi: 11.07.2020.
- Sullivan, D., 2020. *Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method with Python*, Wiley-IEEE Press.
- Synopsys Inc., FullWAVE FDTD Software, 2020. <https://www.synopsys.com/optical-solutions/rsoft/passive-device-fullwave.html>, erişim tarihi: 11.07.2020.
- Wright, J., pyopenglTk, 2018. <https://github.com/jonwright/pyopenglTk>, erişim tarihi: 11.07.2020.
- Yee, K.S, 1966. Numerical solution of initial boundary problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, no. 3, 302-307.

## PICK-UP HAFİF KAMYON UYGULAMALARI İÇİN TEK PARÇALI ALÜMİNYUM KARDAN MİLİ KONSEPT TASARIMI

<sup>1</sup>Muzaffer KASABA , <sup>2</sup>Efe IŞIK , <sup>3</sup>Sedat TARAKÇI 

<sup>1,2,3</sup> Tirsan Kardan San. ve Tic. A.Ş. Araştırma Geliştirme Merkezi OSB IV. Kısım, Manisa, TÜRKİYE  
<sup>1</sup>[m.kasaba@tirsankardan.com.tr](mailto:m.kasaba@tirsankardan.com.tr), <sup>2</sup>[e.isik@tirsankardan.com.tr](mailto:e.isik@tirsankardan.com.tr), <sup>3</sup>[s.tarakci@tirsankardan.com.tr](mailto:s.tarakci@tirsankardan.com.tr)

(Geliş/Received: 21.04.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 10.11.2020)

**ÖZ:** Kardan milleri, motordan aldığı torku ve dönme hareketini arka akslara ileten bir aktarma organı elemanıdır. Yüksek tork taşıma gerekliliklerini karşılamak amacıyla, hafif ticari araç uygulamalarında kullanılan kardan milleri çelik malzeme kullanılarak üretilmektedir. Çelik malzeme kullanılarak üretilmiş kardan mili ve parçalarında ağırlık azaltma, geometrilerin sınır koşulları nedeniyle çoğu zaman kısıtlı olabilir. Bu nedenle alüminyum gibi düşük yoğunluklu malzemeler kullanılarak geliştirilen uygulamalar önem kazanmaktadır. Bu çalışma kapsamında pick-up tarzı hafif ticari araç uygulamalarında kullanılmak üzere alüminyum kardan mili için mühendislik hesapları gerçekleştirilmiş ve sonlu elemanlar analizleri ile hesaplar doğrulanmıştır. Doğrulmalar sonucunda iki yöntem arasında dayanım hesaplarında %1, doğal frekans hesaplarına %8 sapma hesaplanmıştır ve sapma değerlerinin kabul edilebilir olduğu belirlenmiştir. Birim parçaların, için sonlu elemanlar ile elde edilen sonuçlar kullanılan alüminyum malzemenin akma limitleri ile güvenlik katsayıları hesaplanmıştır. Elde edilen güvenlik katsayıları kardan milleri için uygun olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kardan mili, Alüminyum, Dayanım Hesapları, Kritik Hız, Doğal Frekans

### Concept Design Of an Aluminum One-Piece Driveshaft for Pick-up Truck Applications

**ABSTRACT:** Driveshafts are the driveline elements that transfers torque and rotational motion which is received from the engine to the rear axles. In order to meet the high torque handling requirements, driveshaft components are usually made up of steel. Weight reduction in steel parts can often be limited due to the boundary conditions of geometries. For this reason, applications developed with low density parts such as aluminum gain importance. Within the scope of this study, engineering calculations for aluminum cardan shaft for pick-up style light commercial vehicle applications were performed and the calculations were verified with finite element analysis. As a result of the corrections, deviation of 1% for strength calculations and 8% for natural frequency calculations was calculated between the two methods, and it was determined that the deviation values were acceptable. The yield limits and safety coefficients of the aluminum material used were calculated for the unit parts with the results obtained with finite elements. It has been determined that the safety coefficients obtained are suitable for driveshafts.

**Key Words:** Driveshafts, Aluminum, Strength Calculations, Critical Speed, Natural Frequency

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz endüstrisinde çelikten sonra en fazla kullanılan malzeme olarak karşımıza çıkan alüminyum ve alüminyum alaşımları; hafif olmaları, iyi ısıl ve elektrik iletkenlikleri, artırılabilen mukavemet özellikleri ve korozyona karşı dirençleri nedeniyle mühendis ve tasarımcılar için önemli bir alternatif malzeme konumundadır. Özellikle son yıllarda, enerji tasarrufuna dönük çalışmalar, daha az yakıt harcayan hafif, ekonomik taşıtların üretimini gündeme getirmiş ve alüminyum alaşımları, kara ve

deniz taşıtları yapımında öncelikli olarak tercih edilir olmuştur. Öyle ki 1400 kg ağırlığındaki bir kara taşıtında geniş kapsamda alüminyum kullanımı, taşıtın ağırlığında %20'ye varan bir azalmaya imkân tanımaktadır (Hirsch, 1999).

Literatürde kara taşıtlarının aktarma organlarına ait birçok hafifletme çalışması bulunmaktadır. Kardan mili özelinde ise Hak Sun Kim ve arkadaşları, alüminyum / kompozit hibrit kardan mili uygulamaları ve bu uygulamanın düşük hızlı darbe hasarı özelliklerini incelemiştir (Kim ve diğ., 2004). Dai Gil Lee ve arkadaşları ise çalışmalarında, klasik metalik yapılar ile kompozit yapıların değiştirilmesinin, daha yüksek spesifik sertlik ve kompozit malzemelerin spesifik yüksek mukavemeti nedeniyle birçok avantaja sahip olduğunu belirtmişlerdir (Lee ve diğ., 2004). Durk Hyun Cho ve arkadaşları çalışmalarında bir şanzıman şaftının karbon kompozit ve alüminyum malzemeler kullanılarak üretilmesi durumunda doğal eğilme frekansının değiştirilmeden tork taşıma kapasitesinin artırılabilirliğini belirtmişlerdir. (Cho ve diğ., 1997). Young Choi ve arkadaşları ise kardan milleri için alüminyum soğuk çekim sıcak ekstrüzyon boru imalat parametrelerinin gerekli mukavemet özelliklerini sağlaması amacıyla proses optimizasyonu üzerine çalışmıştır (Choi ve diğ., 2013). Yücel Birol ve arkadaşlarının çalışmasında, otomotiv süspansiyon bileşenlerinde yaygın olarak kullanılan EN AW 6082 alaşımlı dövme yapının karakterizasyon çalışması yapılmıştır. Sıcak dövme işleminin, sonraki yapay yaşlandırma döngüsü sırasında yeterli yaş sertleşmesini sağlamak için dövme sırasında yeterli Mg ve Si'nin çözülmesi için ince ayar yapıldığı takdirde ayrı bir çözelti işleminin ihmal edilebileceği belirtilmiştir. Öncelikle ince bir lifli çekirdeğe sahip olan ve bu şekilde elde edilen düzgün yapıların daha iyi yorulma ve darbe özellikleri ile daha uzun bir hizmet ömrü sağlayacağı gösterilmiştir. Önerilen işlem ile, sadece otomotiv süspansiyon bileşenlerinin kalitesini arttırmakla kalmamış, aynı zamanda önemli maliyet tasarrufu sağlamıştır (Birol ve diğ., 2016). J. Bouquerel ve arkadaşları, 6082-T6 alüminyum malzemenin soğuk dövme prosesi sırasındaki mikro yapısındaki değişimleri incelemiştir. İnceleme sırasında Electron Backscatter Diffraction (EBSD), Line Segment Method (LSM), Kernel Average Misorientation (KAM), Grain Orientation Spread (GOS) ve Grain Average Misorientation (GAM) yöntemleri kullanılmıştır (Bouquerel ve diğ., 2015). Störzel ve arkadaşlarının çalışmasında, nominal gerilme, yapısal sıcak nokta gerilimi ve çentik gerilme gibi farklı yaklaşımlar, işlenmiş alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımını analiz etmek için kullanılmıştır (Störzel ve diğ., 2012). Vidit Gaura ve arkadaşları, iki farklı dolgu malzemesine sahip 50 mm kalınlığında MIG kaynaklı Al-Mg alaşımı (Al-5083) plakaların Walker modeline dayanan, S-N eğrilerinin eğimlerinin monoton olmayan trendini ve öngörülen yorulma ömürlerini bu modellerden daha iyi yakalayabilen yeni bir model önermiştir (Gaura ve diğ., 2018). Ruan ve arkadaşları ise 6 mm kalınlığında 6082-T6 alüminyum alaşımlı levha üzerinde, kaynak bağlantısının mikro sertliği ve dayanımı üzerinde çalışma yürütmüşlerdir (Ruan ve diğ., 2012). Harshal ve arkadaşları çalışmalarında kompozit malzeme üzerinde optimizasyon yaparak kardan mili ağırlığında azaltma çalışmaları gerçekleştirmişlerdir (Harshal ve diğ., 2013). Kammuluri ve arkadaşları dayanım artırma çalışmaları için alüminyum hibrit malzeme çalışmaları gerçekleştirilmişlerdir (Kammuluri ve diğ., 2016). Khalid ve arkadaşları alüminyum/kompozit hibrit kardan millerinin eğilme yorulma davranışları üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir (Khalid ve diğ., 2007). Mutasher ve arkadaşları alüminyum/kompozit hibrit kardan millerinin torsiyonel dayanımının kestirilmesi üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir (Mutasher ve diğ., 2019). Rompicharla ve arkadaşları kompozit malzemeli kardan millerinin tasarımı üzerine çalışmışlardır (Rompicharla ve diğ., 2012).

#### **Pick-Up Tarzı Hafif Ticari Araçlar İçin Tek Parçalı Alüminyum Kardan Mili Tasarımı (Design Of A One Piece Aluminum Cardan Shaft For Light Weight Pick-Up Trucks)**

Pick-up tarzı hafif ticari araçlarda, çelik malzeme kullanılarak üretilmiş kardan milleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe karbon emisyonlarının gelecek yıllar içinde daha da düşük seviyeler çekilmesi sadece ülkemiz için değil tüm dünyada yasal bir zorunluluk haline gelmektedir. Bu bağlamda araç üreticileri, yakıt sarfiyatını ve karbon salınımını azaltmak amacı ile araç üzerinde birçok yapısal parçayı, çelik malzeme kullanımına alternatif olabilecek alüminyum ve kompozit malzeme kullanarak üretme yoluna gitmiştir. Araç üzerinde motor, şanzıman ve diferansiyel arasında

konumlandırılan kardan millerinin de alüminyum malzeme kullanılarak üretilmesi durumunda, çelik malzeme kullanılarak üretilen benzerlerine kıyasla yüksek oranlarda ağırlık azaltma imkânı doğmaktadır. Bu sınıftaki araçların teknik özellikleri Çizelge 1.'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Pick-up tarzı hafif ticari araçların teknik özellikleri

*Table 1. Technical properties of lightweight pick-up trucks*

Özellik	Değer Aralığı
Dingil Mesafesi (mm)	2600 - 3200
Güvenli çalışma hız aralığı (dev/dk)	5700 - 6000
Güvenli çalışma frekans aralığı (Hz)	95 - 100
Fonksiyonel limit torku (Nm)	2800
Motor gücü (Bg)	160 - 220
Azami yük (kg)	2000 - 3000

Kardan milleri motorlu taşıtlarda motorda üretilen dönme hareketini ve gücü motor veya şanzımandan alarak, aracın diferansiyeline ileterek, araca hareket verilmesinde kullanılan aktarma organı elemanlarıdır. Pick-up tarzı araçların aktarma organlarına ait yerleşim çoğunlukla Şekil 1.'deki gibidir (Andrews, 2020).



**Şekil 1.** Pick-up sınıfı araçlar için aktarma organlarının yerleşimi

*Figure 1. Driveline layout of pick-up class trucks*

Çalışma kapsamında çelik malzeme kullanılarak üretilmekte olan iki parçalı kardan milinin, tek parçalı alüminyum kardan mili olarak tasarımı gerçekleştirilmiştir.

## MÜHENDİSLİK HESAPLARI (ENGINEERING CALCULATIONS)

Kardan milleri motor ve diferansiyel kaynaklı yüksek hız aralıklarında fonksiyonelliğini koruyarak güvenli şekilde çalışabilmelidir. Bahse konu güvenli çalışma aralığı gerekliliği, kardan milinin doğal frekansının aracın güvenli çalışma hızından daha büyük olması zorunluluğunu doğurur. Denklem 1 ile alüminyum kardan mili için tasarlanan farklı boru boyutlarına ait doğal frekanslar analitik olarak hesaplanmıştır. (SAE International, 1991)

$$NF = 2\pi \sqrt{\frac{ExI}{\rho x AxL^4}} \quad (1)$$

Denklemde, E (elastisite modülü) 70 GPa.,  $\rho$  (yoğunluk) 2.7 gr /cm<sup>3</sup> ve kardan milinin araç yerleşimine uygun olarak L (uzunluk) 1740 mm olarak alınmıştır. Farklı boru boyutlarına göre doğal

frekanslar Çizelge 2’de verilmiştir. Kardan milinin minimum doğal frekans limiti Çizelge 1.’de verilen aracın güvenli çalışma hız aralığına göre belirlenmiştir.

**Çizelge 2.** Kavramsal kardan mili tasarımı için farklı boru boyutlarına göre 1. doğal frekans hesaplamaları

*Table 2. 1 st Natural frequencies of the concept design according to different tube dimensions*

Boru çapı (mm)	Et kalınlığı (mm)	1. Doğal Frekans (Hz)
125	3	122.8
120	3	119.5
120	2.4	104
101	1.7	96
84	1.7	88

Kardan milleri, motordan gelen torku da fonksiyonelliğini koruyarak güvenli şekilde arka aksa iletebilmelidir. Kardan milinin araç üzerinde maruz kalacağı maksimum tork değeri aracın fonksiyonel limit torku ile belirlenmiştir. Denklem 2’ de kardan mili boruları için kayma gerilmesi formülü verilmiştir. Alüminyum kardan milinde kullanılan alüminyum borunun boyutlandırılmasında özellikle pick-up tarzı hafif ticari araçlarda görülen Çizelge 1’de verilen 2800 Nm’lik fonksiyonel limit torku dikkate alınmıştır. (SAE International, 1991)

$$\tau_b = \frac{M_b}{I_p} x r \quad (2)$$

$\tau_b$ : Burulma Gerilmesi

$M_b$ : Burulma Momenti

$I_p$ : Alan Atalet Momenti

Denklem 2. kullanılarak Çizelge 3.’deki sonuçlar elde edilmiştir.

**Çizelge 3.** Alüminyum ve çelik borular için farklı boru boyutlarına göre dayanım hesapları

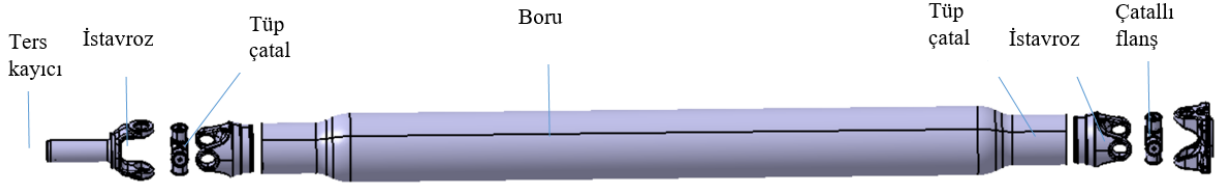
*Table 3. Strength calculations for aluminum and steel tubes according to different tube dimensions*

Boyut (mm)	Malzeme Tipi	Akma Dayanımı $\sigma$ (MPa)	Malz. Kayma Dayanımı $\tau_m$ (MPa)	Tork (Nm)	Burulma Gerilmesi $\tau_b$ (MPa)	Eşdeğer Von Mises Gerilmesi $\sigma$ (MPa)
Ø 84 x 1.7	EN AW 6082 - T6	320	384	2800	157	274
Ø 120 x 2.40	EN AW 6082 - T6	320	179	2800	66	116
Ø 125 x 3	EN AW 6082 - T6	320	179	2800	40	71
Ø 120 x 1.5	EN AW 6082 - T6	320	179	2800	85	148
Ø 120 x 2	EN AW 6082 - T6	320	179	2800	65	113

Çizelge 3 incelendiğinde dayanım kriterleri göz önünde bulundurularak Ø84x1.7 boyutlarının alüminyum boru için güvenli olacağı görülmüştür. Ancak doğal frekans kriterlerini sağlaması için yapılan mühendislik hesaplarının sonucunda Şekil 1’de gösterilen araç yerleşimi göz önünde bulundurularak 1740 mm boru uzunluğuna sahip kardan mili uygulaması için hem dayanım kriterlerini hem de doğal frekans kriterlerini sağlayan optimum boru boyutu Ø120x2.40 olarak tespit edilmiştir.

Boru boyutunun belirlenmesini takiben tek parçalı alüminyum kardan milinin tasarımı gerçekleştirilmiş ve tasarım Şekil 2.’de verilmiştir. Bu tasarımda, çatallı flanş ve tüp çatal boru ile beraber alüminyum malzeme seçilerek tasarlanmıştır. Bu sayede iki parçalı çelik malzeme kullanılarak tasarlanan

muadil kardan millerine göre kardan milinin ağırlığı yaklaşık %41 oranında hafifletilmiştir. Şekil 2’de verilen tasarımda ters kayıcı, istavroz gövdesi ve rulmanları ise dayanım, ömür ve güvenlik kısıtlarından dolayı çelik olarak tasarlanmıştır.



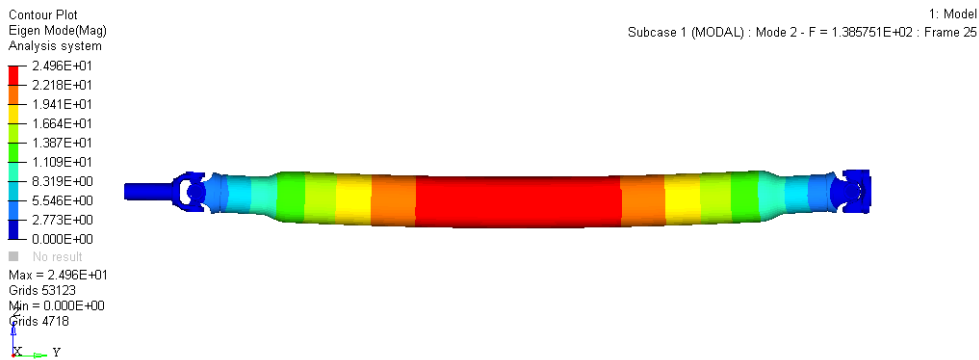
Şekil 2. Kavramsal tek parçalı alüminyum kardan mili tasarımı

Figure 2. Concept One piece aluminum driveshaft design

### SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ (FINITE ELEMENT ANALYZES)

DeneySEL yöntemler genellikle yüksek doğrulukla sonuç verse de getirdiği fazladan ekipman, zaman ve maliyet gibi nedenlerle alternatif bir tasarım doğrulama yöntemi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizler çoğu zaman tasarım doğrulama yöntemi olarak tercih edilmektedir. Kurulacak sonlu elemanlar modelinin gerçek durumu en doğru şekilde benzetmesi beklenirken aynı zamanda kolay modellenmeli, hızlı çözümlenmelidir. Bu çalışma kapsamında beklentileri karşılayacak şekilde bir sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

Mühendislik hesapları göz önüne alınarak tasarımı gerçekleştirilen alüminyum kardan milinin tasarım doğrulaması için sonlu elemanlar ile analiz gerekliliği de doğmuştur. Bu bağlamda öncelikle modal analiz için sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modellemeleri için HyperWorks (Versiyon 2019) yazılımı kullanılmıştır. Modelde, kardan milinin araca montaj koşulları göz önünde bulundurularak her iki tarafına sabit sınır koşulları uygulanmış ve modal analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen modal analiz sonucunda ortaya çıkan 1. doğal frekansının titreşim biçimi Şekil 3’de verilmiştir. Sonlu elemanlar modal analiz sonucunda alüminyum kardan miline ait ilk doğal frekans 117 Hz olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuç, mühendislik hesapları ile belirlenen (Çizelge 1’de) maksimum kritik hız limitleri ile kıyaslanmıştır ve Ø120 x 2.40 ebadındaki boru kullanılarak gerçekleştirilen modal analiz sonuçlarının konsept tasarımın aracın hız limitlerine uygun olduğu görülmüştür. Bu sonuca ilaveten sonlu elemanlar ile gerçekleştirilen modal analiz sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri ile mühendislik hesaplarıyla elde edilen doğal frekans arasında % 8 fark tespit edilmiştir.

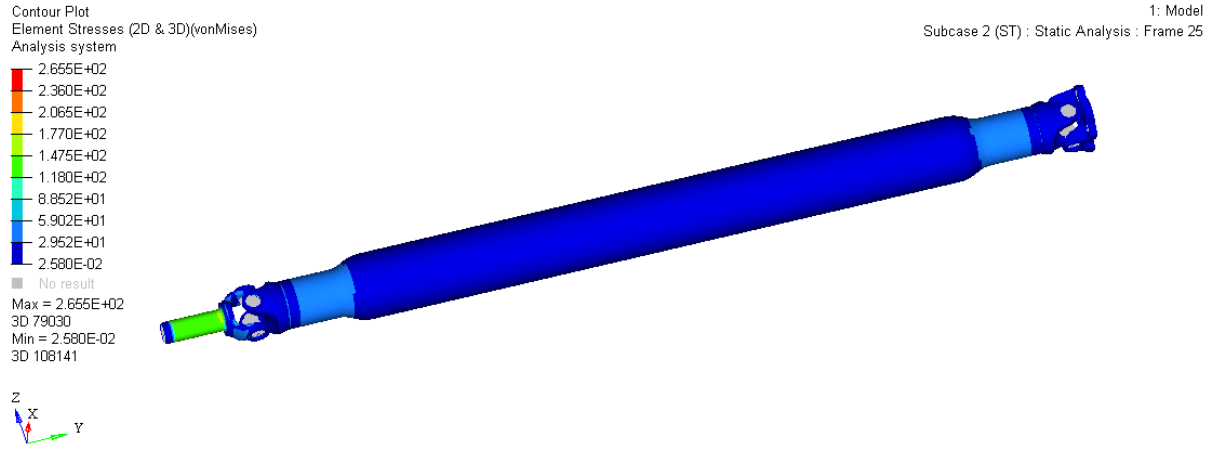


Şekil 3. Kavramsal alüminyum kardan mili modal analiz mod şekli

Figure 3. Modal analysis mode shape of concept aluminum driveshaft

Modal analiz çalışmaları tamamlanan alüminyum kardan milinin sonlu elemanlar ile statik analiz çalışmaları kardan mili üzerindeki gerilme dağılımlarının tespit edilmesi için gerçekleştirilmiştir. Şekil

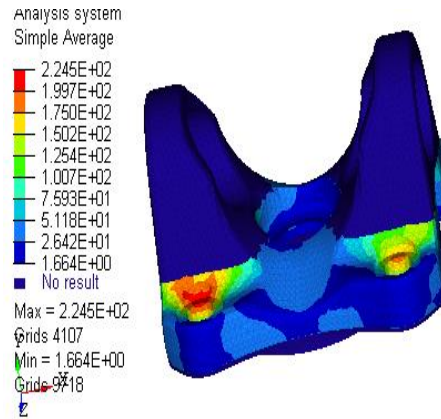
4.'de 2800 Nm torsiyonel yük altındaki alüminyum kardan mili üzerinde ortaya çıkan gerilme dağılımı verilmiştir.



Şekil 4. Alüminyum kardan mili gerilme dağılımı

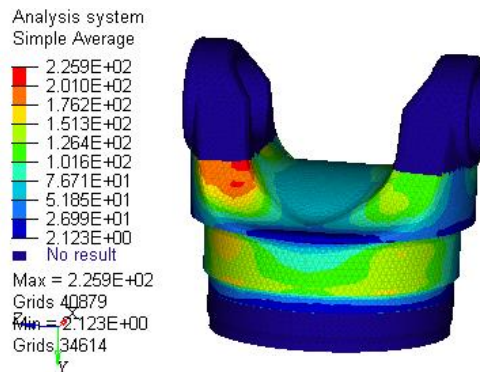
Figure 4. Stress distribution aluminum cardan shaft

Alüminyum kardan milinin gerilme dağılımının belirlenmesi sonrasında alüminyum olarak tasarlanan kardan mili birim parçaları tüp çatal, çatalı flanş ve boru için gerilme dağılımları incelenmiştir. Çatalı flanş, tüp çatal ve boruya ait gerilme dağılımları Şekil 5, 6 ve 7'de sırasıyla verilmiştir.



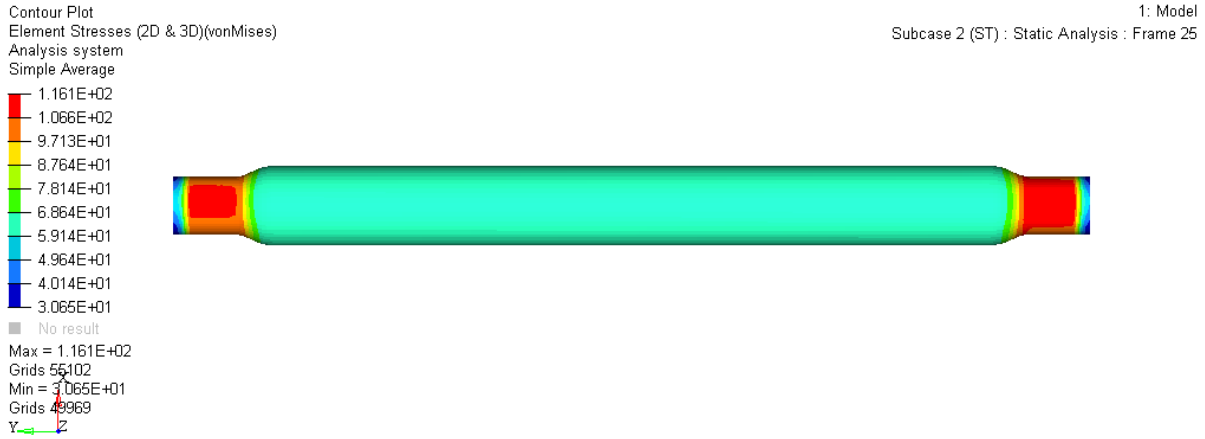
Şekil 5. Çatalı flanş gerilme dağılımı

Figure 5. Stress distribution of flange yoke



Şekil 6. Tüp çatal gerilme dağılımı

Figure 6. Stress distribution of tube yoke



Şekil 7. Boru gerilme dağılımı

Figure 7. Stress distribution of tube

Alüminyum boru, çatallı flanş ve tüp çatal üzerinde ortaya çıkan maksimum gerilme değerleri Çizelge 3.'de 6082 T6 ve boru malzemesi akma değerleri ile kıyaslanmış ve dayanım olarak güvenli bölgede olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.** Alüminyum mili birim parçaları için sonlu elemanlar analizleri ile akma mukavemeti değerlerinin kıyaslanması

Table 4. Comparison of finite element analysis and yield strength values for aluminum and steel cardan shaft parts

Alüminyum Akma Mukavemeti	Alüminyum FY Sonlu Elemanlar Maksimum Von Misses Gerilmesi $\sigma$	Alüminyum TY Sonlu Elemanlar Maksimum Von Misses Gerilmesi $\sigma$	Alüminyum boru Sonlu Elemanlar Maksimum Von Misses Gerilmesi $\sigma$
320 Mpa	224 Mpa	225 Mpa	116 Mpa

## SONUÇLAR (CONCLUSION)

- Çalışmanın sonucu olarak tek parçalı alüminyum kardan milinin tasarımı tamamlanmıştır. Malzeme seçimi yapılırken literatür incelenmiş, Birol ve arkadaşlarının çalışmaları ve dayanım özellikleri de göz önünde bulundurularak malzeme EN AW 6082 T6 olarak belirlenmiştir.

- Boru boyutlarını belirlemek için önce dayanım limitlerine uygunluğu daha sonra da doğal frekans limitlerine uygunluğu mühendislik hesapları ile hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda alüminyum parçalardan imal edilecek tek parçalı kardan mili için boru boyutları  $\varnothing 120 \times 2.4$  olarak belirlenmiştir.

- Tasarımı tamamlanan alüminyum kardan mili için öncelikle sonlu elemanlar ile modal analiz gerçekleştirilmiştir. Modal analiz sonucunda tek parçalı alüminyum kardan milinin ilk doğal frekansı 117 Hz olarak hesaplanmıştır. Aracın maksimum çalışma frekansının 100 Hz olduğu düşünüldüğünde tek parçalı alüminyum kardan milinin rezonans frekansının üzerinde güvenli şekilde çalışacağı öngörülmüştür.

- Tek parçalı kardan miline ait statik torsiyon analizi aracın fonksiyonel limit torku olan 2800 Nm'de gerçekleştirilmiştir. Alüminyum malzeme kullanılarak tasarlanan tüp çatal, çatallı flanş ve boru üzerinde maksimum Von-Misses gerilmesi sırasıyla 225 MPa, 224 MPa ve 116 MPa olarak hesaplanmıştır. Elde edilen maksimum gerilme sonuçları ile EN AW 6082 T6 akma limiti kıyaslandığında, çatallı flanş ve tüp çatal için güvenlik katsayısının 1.4, boru için ise güvenlik katsayısının 2.75 olarak ortaya çıktığı görülmüştür.

- Sonlu elemanlar analizleri sonuçları ile analitik sonuçlar arasında dayanım hesaplarında %1,



doğal frekans hesaplarında maksimum %8 lik bir sapma tespit edilmiştir.

- Elde edilen güvenlik katsayıları ve sapma değerlerinin kardan milleri için uygun olduğu tespit edilmiştir.

#### KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)

Tirsan Kardan A.Ş. Ar-Ge Merkezi'ne ve Test Merkezi'ne bu çalışmanın gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimizi sunarız.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

Dai, G. L., Hak, S. K., Jong, W. K., Jin, K. K., 2004, "Design and manufacture of an automotive hybrid aluminum/composite drive shaft" *Composite Structures* 63, 87–99.

Durk, H. C., Dai, G. L., Jin, H. C., 1997, "Manufacture of one-piece automotive drive shafts with aluminum and composite materials", Vol. 38, 309-319

Hak, S. K., Byung, C. K., Tae, S. L., Dai, G. L., 2004, "Foreign objects impact damage characteristics of aluminum/composite hybrid drive shaft", *Composite Structures* 66, 377–389.

Biröl, Y., Gokcil, E., Guvenc, M., Akdi S., 2016, "Processing of high strength ENAW 6082 forgings without a solution heat treatment" *Materials Science & Engineering A*, 674, 25–32.

Harshal, B., Viraj, S., Baskar, P., 2013, "Material Optimization and Weight Reduction of Drive Shaft Using Composite Material" *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, Volume 10, Issue 1, 39-46.

Hirsch, J., 1999, "Light Metal World, Light Metal Age", p.124.

Bouquerel, J., Diawara, B., Dubois, A., Dubar, M., Vogt, J.B., Najjar, D., "Investigations of the microstructural response to a cold forging process of the 6082-T6 alloy", *Materials and Design* 68 (2015) 245–258.

Störzel, K., Bruder, T., Hanselka, H., "Durability of welded aluminium extrusion profiles and aluminium sheets in vehicle structures, *International Journal of Fatigue* 34 (2012) 76–85

Vidit, G., Manabu, E., Toshiya, O., Syohei, Y., "A study on fatigue behavior of MIG-welded Al-Mg alloy with different fillerwire materials under mean stress", *International Journal of Fatigue* 107 (2018) 119–129

Ruan, Y., Qiu, X.M., Gong, W.B., Sun, D.Q., Li, Y.P., " Mechanical properties and microstructures of 6082-T6 joint welded by twin wire metal inert gas arc welding with the SiO<sub>2</sub> flux, *Materials and Design* 35 (2012) 20–24

Kammuluri, B., Venkata, S., Ramakotiah, K., 2016, "Hybrid materials of aluminium" *Materials Today: Proceedings* 3, 4140–4145.

Khalid, Y. A., Mutasher, S.A., Sahari, B.B., Hamouda, A.M.S., 2007, "Bending fatigue behavior of hybrid aluminum/composite drive shafts", *Materials and Design*, 28, 329–334.

Mutasher, S.A., 2019, "Prediction of the torsional strength of the hybrid aluminum/composite drive shaft" *Materials and Design* 30, 215–227.

Rompicharla, R. P., Rambabu K., 2012, "Design and Optimization of Drive Shaft with Composite Materials" Vol.2, Issue.5, 3422-3428.

SAE International, 1991, "Universal Joint and Driveshaft Design Manuel" The Society of Automotive Engineers.

Young, C., Kim, D., U., Kang, B., Y., Park, D., K., Lee, D., J., Lee, S., W., Shin, H., T., 2013, "Forming of the precision aluminum tube for a light weight driveshaft" *Journal of Mechanical Science and Technology*, Volume 27, Issue 11, pp 3445–3449.

Andrews, J., 2020, "Off-road vehicle four-wheel drive systems explained" <https://www.fwi.co.uk/>,



## ENDÜSTRİYEL BİYOLOJİK FERMANTASYON İŞLEMİ İÇİN DENGE OPTİMİZASYON ALGORİTMASIYLA KONTROLÖR TASARIMI

Abdullah ATEŞ 

*İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Malatya, TÜRKİYE*  
[abdullah.ates@inonu.edu.tr](mailto:abdullah.ates@inonu.edu.tr)

(Geliş/Received: 17.05.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 21.11.2020)

**ÖZ:** Bu çalışmada yeni bir meta sezgisel optimizasyon yöntemi olan Denge Optimizasyon (DO) algoritması ile aşı üretiminde gerçekleştirilen biyolojik fermantasyon işleminde kullanılan karıştırıcı modelleri için PID kontrolörler tasarlanmıştır. Öncelikle Denge Optimizasyon algoritması PID kontrolör parametrelerini optimize edebilecek kabiliyete ulaştırılmıştır. Daha sonra algoritmanın çalışma performansına etki eden parametrelerde çalışma esnasında deneysel olarak ayarlanmıştır. Özellikle literatürde daha önceden karıştırıcı modelleri için analitik yöntemlerle tasarlanmış olan PID kontrolör yerine performansı daha iyi olan Denge Optimizasyon algoritmasıyla tasarlanmış PID kontrolörlerin kapalı çevrim sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu sayede yeni bir algoritma olan denge optimizasyon algoritmasının gerçek mühendislik problemlerinde de kullanılabileceği ve analitik yöntemlere karşın daha iyi kontrol performansına sahip PID kontrolörler türetilabileceği gösterilmektedir.

*Anahtar Kelimeler: Denge optimizasyon, Biyolojik fermentasyon, PID, Kontrolör*

### Controller Design with Equilibrium Optimization Algorithm for an industrial biological fermentation process

**ABSTRACT:** In this study, PID controllers are designed for the mixer mathematical models for biological fermentation process in vaccine production with the Equilibrium Optimization (EO) algorithm, which is a new meta-heuristic optimization method. Firstly, Equilibrium Optimization algorithm has been provided with the ability to optimize PID controller parameters. Then, the parameters affecting the working performance of the algorithm were found experimentally during the study. In the literature, the closed loop results of PID controllers designed with the Equilibrium Optimization algorithm, which was previously designed with analytical methods for mixer system, have been presented comparatively. Thus, it is shown that the Equilibrium Optimization algorithm, which is a new algorithm, can also be used in real engineering problems and PID controllers with better control performance can be derived despite analytical methods.

*Key Words: Equilibrium optimizer, biological fermentation, PID, controller*

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde optimizasyon algoritmaları birçok mühendislik probleminde kullanılır. Bilindiği gibi bir problemin çözümünde kullanılan metotların yapısına problemin kendisi karar verir. Örneğin bir optimizasyon probleminde probleme ilişkin matematiksel modelin, kısıtların vs. tamamıyla bilinmesi durumunda analitik optimizasyon yöntemleri kullanılabilir. Analitik optimizasyon yöntemleri kendi arasında iki temel gruba ayrılabilir. Bunlar doğrusal programlama ve doğrusal olmayan

programlamadır. Problem çözümünde hangi analitik yöntemin kullanılacağına da problemin doğrusal veya doğrusal olmama durumu belirler (Bazaraa, Sherali, and Shetty 2005; Rabani 2007).

Analitik yöntemlerde karmaşık matematiksel yapılar kullanılır. Fakat bu yöntemlerin en önemli avantajı ise bulunan sonucun global veya lokal çözüm olmasının analizleri kesin olarak yapılabilir. Örneğin doğrusal olmayan bir optimizasyon probleminde problemin konveks veya konkavlığına göre Karush Khun Tucker ve Fritz John testleriyle bulunan sonuçların lokal veya global çözüm olma durumları kesin bir şekilde analiz edilebilir (Kuhn and Tucker 2014).

Fakat gerçek mühendislik problemlerinde ise problemin, matematiksel modelinin, kısıtlarının vs. tam anlamıyla bilinmesi son derece güçtür. Hatta model ve kısıtlar tamamıyla bilinmesi durumunda sistem, performansını etkileyen birçok bozucu ve dış etkene maruz kalabilir. Bu etkenlerde sistem modellerini değiştirir. Bundan dolayı mühendislik problemlerinin çözümünde genellikle nümerik optimizasyon yöntemleri kullanılır (Zhang and Ordóñez 2012). Nümerik optimizasyon yöntemleri deterministik ve stokastik yöntemler olarak iki grupta incelenebilir. Deterministik yöntemler parametre vektör uzaylarını deterministik matematiksel alt yapıya göre tarar. Stokastik yöntemler ise parametre vektör uzaylarını stokastik olarak tarar (Lin, Tsai, and Yu 2012). Özellikle mühendislik problemlerinde daha önce bahsedilen belirsizliklerinde dolayı stokastik optimizasyon algoritmaları kullanılır.

Literatürdeki stokastik optimizasyon algoritmaları doğadan esinlenen, insandan esinlenen ve fiziksel olaylardan esinlenen algoritmalar olarak sınıflandırılabilir. Doğadan esinlenen algoritmalar doğada yaşayan canlıların davranışlarında esinlenen algoritmalar olarak adlandırılabilir. Bu algoritmalara örnek karınca kolonisi (Dorigo and Socha 2007), yapay arı kolonisi (Karaboga and Akay 2009), guguk kuşu arama algoritması (Gandomi, Yang, and Alavi 2013), gri kurt optimizasyon algoritması (Mirjalili, Mirjalili, and Lewis 2014), salp sürüsü optimizasyon algoritması (Mirjalili et al. 2017) gösterilebilir. Fiziksel olaylardan esinlenen algoritmalara yer çekimi arama algoritması (Rashedi, Nezamabadi-pour, and Saryazdi 2009), yüklü sistem araması (Kaveh and Talatahari 2010) örnek olarak gösterilebilir. İnsandan esinlenen algoritmalara ise öğrenme ve öğretme tabanlı optimizasyon algoritması (Rao, Savsani, and Vakharia 2011), emperyalist yarışma algoritması (Atashpaz-Gargari and Lucas 2007) örnek olarak gösterilebilir.

Denge optimizasyon algoritması hem dinamik hem de denge durumlarını tahmin etmek için kullanılan hacim kütle denge kontrol modellerinden esinlenmektedir. Bu algoritma Faramarzi ve arkadaşları tarafından 2020 yılında önerilmiştir (Faramarzi et al. 2020). Algoritma süreçlerini stokastik olarak gerçekleştirir. Algoritmada her parçacık birer parametre vektör uzayını tarayan bir hareket olarak adlandırılır. DO algoritmasının temel makalesinde, literatürdeki PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu), GWO (Gri Kurt Optimizasyon), GA (Genetik Algoritma), GSA (Yerçekimi Arama Algoritması), SSA, CMA-ES (Kovaryans Matris Uyarlaması ile Evrim Stratejisi), SHADE (Başarı Geçmişine Dayalı Diferansiyel Evrime göre Parametre Uyarlama), CMA-ES in yarı parametre optimizasyonun liner popülasyonun büyüklüğünün azaltılmasıyla elde edilen LSHADE SPACMA gibi yeni ve uzun süredir literatürde kullanılan etkin optimizasyon algoritmalarıyla karşılaştırılmış ve üstünlükleri gösterilmiştir (Faramarzi et al. 2020). Özellikle algoritma performans analizlerinde çözümü son derece güç olan komposit karşılaştırma fonksiyonları üzerinden de test edilmiştir. Hatta algoritma temel mühendislik test problemleri üzerinde de test edilmiş ve performans analizleri detaylarıyla yapılmıştır. Bu çalışmada ise algoritmanın gerçek bir mühendislik problemi olan kontrolör tasarımı probleminde kullanılabileceği aşırı üretiminde kullanılan karıştırıcı modelleri üzerinden gösterilmiştir.

Kontrolör tasarımı önemli mühendislik problemlerinde biridir. Çünkü sistemin referans girişi takip etmesi için kontrolör kullanılması gerekir. Fakat kontrolör tasarımı analitik olarak çözülmesi zor bir mühendislik problemidir. Özellikle sistem modelinin veya kısıtlarının bilinmemesi ve bozucunun tahmin edilemediği durumlarda zorluğun derecesi daha da artmaktadır. Bundan dolayı kontrolör tasarımında meta-sezgisel yöntemlerin kullanıldığı birçok çalışma bulunur. Örneğin (Ateş and Yeroglu 2016) çalışmasında modifiye edilmiş tabu arama algoritmasıyla PID ve kesir dereceli PID'yi sistem modelleri için tasarlanmıştır. Gerçek zamanlı uçuş kontrol sistemlerine kesir dereceli ve tamsayı dereceli kontrolörlerin tasarlandığı çalışma (Yeroglu ve Ateş 2014)'da bulunmaktadır. Modifiye edilmiş yapay

fizik optimizasyon algoritmasıyla sistemlere kontrolörlerin tasarlandığı çalışma (Ateş and Yeroğlu 2018)'de bulunmaktadır. Görüldüğü gibi meta sezgisel yöntemlerle kontrolör tasarımı literatür de geçerliliğini koruyan güncel bir çalışma alanıdır.

Fakat, kontrolör tasarımında önemli bir durum ise kontrolör tasarlanan modelin gerçek hayattan esinlenen bir model olması kullanılan algoritmanın problem çözümündeki etkinliğini de belirler. Özellikle biyolojik veya kimyasal reaksiyonların modellendiği çalışmalara etkin kontrolörler tasarlamak gerçek zamanlı üretim süreçlerine katkılar sunabilir. Bunda dolayı bu çalışmada aşı üretiminde gerekli olan fermentasyon sürecine ilişkin karıştırıcı ve çözünen oksijen miktarı arasındaki ilişkinin kurulduğu modeller kullanılmıştır (Khan et al. 2018).

(Khan et al. 2018) çalışmasında elde edilen veri setlerine göre oluşturulmuş modeller alınarak daha önce gerçek mühendislik probleminde kullanılmamış olan denge optimizasyon algoritmasıyla PID kontrolör tasarlanmıştır. Khan ve arkadaşları çalışmalarında önerdikleri model için doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemiyle kontrolör tasarlamışlardır (Khan et al. 2018) . Fakat bilindiği gibi bu tarz analitik yöntemler sabit sistem şartlarında ve modelin tamamıyla bilindiği durumlarda etkin çalışmaktadır. Sistemsel değişikliklere karşın tepkileri yavaş veya yetersiz olabilir. Bunda dolayı bu çalışmada meta sezgisel bir yöntemle bu tarz bir sistem modeline kontrolör tasarımının yapılabileceğinin gösterilmesi bu alanda oluşturulan diğer modeller içinde meta sezgisel yöntemler ile kontrolör tasarlanabileceğini gösterebilir. Çalışmada dört adet sistem modeli kullanılmıştır. Öncelikle denge optimizasyon algoritması PID kontrolör parametrelerine optimize edebilecek hale getirilmiştir. Dört farklı fermentasyon işlemindeki karıştırıcı ve çözünen oksijen miktarı arasındaki ilişkiyi gösteren modeller için optimizasyon algoritması birbirinden bağımsız olarak çalıştırılmıştır. Her model için bulunan kontrolör parametreleri diğer modeller üzerinde de denemiş ve sonuçlar doğrusal olmayan en küçük kareler metodu sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Çalışma sonucunda denge optimizasyon yönteminin mühendislik problemlerinde kullanılabileceği gösterilmiştir. Bunun yanı sıra gerçek bir mühendislik probleminden elde edilen ve aşı üretimindeki fermentasyon işlemi için karıştırıcı hızıyla çözünen oksijen miktarı arasındaki ilişkiye gösteren modeller için PID kontrolörler tasarlanmıştır. Bulunan kontrolörlerin mevcut durumdan daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bu sayede bu tarz sistem değişikliği fazla olan özellikle bozucu oranı fazla olan sistemler için meta sezgisel yöntemlerle kontrolörler tasarlanabileceği gösterilmiştir.

## DENGE OPTİMİZASYON ALGORİTMASI (EQUILIBRIUM OPTIMIZATION ALGORITHM)

### Algoritmanın Çıkış Terminolojisi (Inspiration)

Denge optimizasyon algoritmasının ilham kaynağı kontrol hacmi üzerindeki dinamik kütle dengesinin karşılaştırılmasıdır. Kütle denge denklemi, reaktif olmayan bir bileşenin konsantrasyonunu tanımlamak için kontrol hacmi içerisindeki çeşitli kaynakların ve sızıntı mekanizmasının bir fonksiyonu olarak kullanılır. Kütle denge denklemi kütle korunumu kuralını bir kontrol hacmi içerisinde sağlar. Aşağıda verilen birinci dereceden adi diferansiyel denklem genel kütle denge denklemini gösterir. Bu denkleme göre kütle zamanla bağlı değişimi sisteme giren toplam kütleden sistemden çıkan toplam kütle farkının alınmasıyla elde edilir (Faramarzi et al. 2020). Zamanla bağlı kütle değişim denklemi aşağıdaki gibidir:

$$V \frac{dC}{dt} = QC_{eq} - QC + G \quad (1)$$

Denklemden ki C kontrol hacmi içerisindeki konsantrasyonu (V),  $V \frac{dC}{dt}$  ise kontrol hacmi içerisindeki kütle değişim oranını verir, Q volümetrik akış oranını,  $C_{eq}$  denge durumundaki konsantrasyonu, G ise kontrol hacmi içerisindeki kütle değişim oranını gösterir (Faramarzi et al. 2020). Denklemden ki  $V \frac{dC}{dt}$  oranı sıfıra gittiği zaman sistem kalıcı denge durumuna ulaşır.

$Q/V$  'nin bir fonksiyonu olan  $dc/dt$ 'nin çözülmesi için Denklem 1 yeniden düzenlenir. Denklemdaki  $Q/V$  yerleşme zamanının tersini veya devir hızını gösterir. Denklemden bu değer yerine  $\lambda$  yazılmıştır. Sonuç olarak Denklem 1 zamanın bir fonksiyonu olarak kontrol hacmi içerisindeki konsantrasyonun (yoğunluk) hesaplanması için aşağıdaki gibi yeniden oluşturulur (Faramarzi et al. 2020).

$$\frac{dC}{\lambda C_{eq} - \lambda C + \frac{G}{V}} = dt \quad (2)$$

Denklemden her iki tarafın integrali alınır:

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{\lambda C_{eq} - \lambda C + \frac{G}{V}} = \int_{t_0}^t dt \quad (3)$$

Sonuç olarak Denklem 3 aşağıdaki gibi düzenlenir:

$$C = C_{eq} + (C_0 - C_{eq})F + \frac{G}{\lambda V}(1-F) \quad (4)$$

Denklem 4 deki  $F$  aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$F = \exp[-\lambda(t - t_0)] \quad (5)$$

Denklemlerdeki  $t_0$  ve  $C_0$  sırası ile başlangıçtaki zaman ve konsantrasyon (yoğunluk) değerlerini gösterir. Denklem 4 ile bu dönüş hızına göre kontrol hacmi içerisindeki konsantrasyon hesaplanır. Veya Denklem 4 ile ortalama dönüş hızı doğrusal regresyon ile hesaplanır. Bu denklem Denge Optimizasyon algoritmasının temel denklemidir (Faramarzi et al. 2020). Denklem 4 Parçacık sürü optimizasyon algoritmasındaki gibi parçacıkların güncellenme kuralını gösterir. Denklem 4'de parçacıkların güncellenmesi için üç durum veya aşama bulunur. Her parçacık konsantrasyonun güncellenmesi için birbirinden bağımsız bu üç duruma göre çalışmaktadır.

Birinci aşama konsantrasyonun dengesidir. Bu aşama havuzda rastsal olarak seçilen en iyi çözümlerden birini ifade eder. Bu yapı denge havuzu olarak adlandırılır. Algoritmadaki havuz en iyi çözüm etrafında oluşturulan dört en iyi çözümü ve onların ortalamasından oluşur (Faramarzi et al. 2020). İkinci aşama mevcut parçacık ile denge durumu arasındaki konsantrasyonun (yoğunluk) farkını gösterir. Bu yapı doğrudan arama mekanizmasını etkiler.

Üçüncü aşama ise üretim oranı ile ilgilidir. Bu aşama aramanın iyileştirilmesinde rol oynar. Özellikle küçük adımlar veya oranlarla hareket edildiğinde arama sürecine önemli katkıları olur. Bahsedilen bu üç aşama arama performansını doğrudan etkiler. Algoritmanın arama sürecine etki eden yapıları aşağıda açıklanmaktadır (Faramarzi et al. 2020).

### Başlangıç Değer ve Fonksiyonun Değerlendirilmesi (Initialization and Function Evaluation)

Diğer meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarında olduğu gibi DO (Denge Optimizasyon) algoritmasının optimizasyon sürecini başlatmak için başlangıç popülasyonu kullanılır. Başlangıç konsantrasyonu parçacık sayısına göre uniform rastsal dağılım kullanılarak oluşturulur. Başlangıç popülasyonu aşağıdaki gibidir:

$$C_i^{initial} = C_{min} + \text{rand}_i(C_{max} - C_{min}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

$C_i^{initial}$  her parçacık için başlangıç konsantrasyon vektörüdür.  $C_{max}$  ve  $C_{min}$  parçacıkların maksimum ve minimum değerlerini gösterir.  $rand$ : [0 1] arasında türetilen rastsal vektördür.  $n$  ise popülasyondaki parçacıkların sayısını gösterir. Parçacıkların kendi amaç fonksiyon (fitness) değerine göre değerlendirilir ve daha sonra bu değer denge adaylarının belirlenmesinde kullanılır (Faramarzi et al. 2020).

### Denge havuzu ve adaylar (Equilibrium Pool and Candidates ( $C_{eq}$ ))

Denge durumu algoritmanın final durumu olarak gösterilir. Bu aşama algoritma içerisinde global optimal nokta olarak adlandırılır. Optimizasyon sürecinin başlangıcında denge durumu hakkında bilgi bulunmamaktadır. Sadece parçacıklar arama işlemini başlatmak için denge adaylarını kullanır. Farklı şartlar altında farklı tip problemlerin çözümünde elde edilen tecrübelerle göre tüm optimizasyon sürecinde bu aday çözümler en iyi çözüme yakın olan dört farklı çözümdür. Yani en iyi çözümün etrafında dört adet aday çözüm belirlenir. Bu çözümlere ek olarak dört adet aday çözümün ortalaması da kullanılır. Bu dört aday DO algoritmasına arama kabiliyeti artırır. Optimizasyon problemine göre aday çözümlerin sayısı istenilen sayıda alınabilir.

Aslında en iyi çözüm etrafında belirli bir sayıda aday çözüm belirlemek literatürdeki başka çalışmalarda da mevcuttur (Mirjalili, Mirjalili, and Lewis 2014). Gri Kurt optimizasyon algoritmasında da üç aday çözüm kullanılır. Fakat dört aday çözümden fazla aday çözüm algoritma performansına olumsuz yönde etki ettiği literatürdeki birçok çalışmada açıklanmıştır. Algoritmada denge havuzu diye adlandırılan  $C_{eq,pool}$  beş elemandan oluşur (Faramarzi et al. 2020).

$$\bar{C}_{eq,pool} = \{\bar{C}_{eq(1)}, \bar{C}_{eq(2)}, \bar{C}_{eq(3)}, \bar{C}_{eq(4)}, \bar{C}_{eq(ave)}\} \quad (7)$$

Her iterasyondaki her parçacığın konsantrasyonu aynı olasılıkla aday çözümler içerisinde rastsal olarak seçilerek güncellenir. Örneğin birinci iterasyonda ilk parçacık tüm konsantrasyonun  $\bar{C}_{eq(1)}$  göre güncellenir. Buna bağlı olarak ortalama konsantrasyonun  $\bar{C}_{eq(ave)}$  değeri de güncellenir. Bundan dolayı optimizasyon süreci sonunda tüm parçacıklar tüm aday çözümlere göre aynı sayıdaki güncellenmeyle güncellenir.

### Üssel Dönem (Exponential Term (F))

Ana konsantrasyon değerlerinin güncellendiği dönem üssel aşamasıdır. Denge optimizasyon algoritmasının algoritmik süreç içerisinde arama ve işletme (çalıştırma) durumları arasında bir dengeye sahiptir. Çünkü değişim hızı oranı (turnover rate) gerçek bir kontrol hacmi içerisinde zamana bağlı olarak değişebilir.  $\lambda$  [0,1] arasında rastsal bir vektörü gösterir. Bu vektör aşağıdaki gibidir (Faramarzi et al. 2020):

$$\bar{F} = e^{-\lambda(t-t_0)} \quad (8)$$

Denklemdaki  $t$  fonksiyondaki iterasyon sayısını tanımlar. Bunda dolayı Denklem 9'da gösterildiği gibi iterasyon sayısına göre azalır ve  $t$  aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$t = \left(1 - \frac{Iter}{Max\_Iter}\right)^{\left(a_2 \frac{Iter}{Max\_Iter}\right)} \quad (9)$$

Denklemdaki  $Iter$  ve  $Max\_Iter$  mevcut ve maksimum iterasyon sayılarını gösterir.  $a_2$  sabit bir değerdir ve kullanım kabiliyetini gösterir. Yapılan işlemler sonucunda arama ve çalıştırma (kullanma) kabiliyeti artırılarak algoritmanın optimal noktaya ulaşmasının sağlamak için Denklem 10 göz önünde bulundurulur (Faramarzi et al. 2020).

$$\bar{t}_0 = \frac{1}{\lambda} \ln(-a_1 \text{sign}(\bar{r} - 0.5)[1 - e^{-\lambda t}]) + t \quad (10)$$

Denklemden ki  $a_1$  arama kabiliyetini kontrol eden sabit bir sayıdır.  $a_1$  değerinin büyük olması arama kabiliyetini artırırken kullanma ve çalıştırma kabiliyetini de azaltır. Benzer şekilde  $a_2$ 'nin yüksek olması çalıştırma veya kullanma kabiliyetini artırırken arama kabiliyetini azaltır. Denklem 10 'daki üçüncü bileşen olan  $(r-0.5)$  arama ve kullanma durumlarına doğrudan etki eder. Çalışmada  $r$ , 0 ile 1 arasında

rastsal bir vektördür. Algoritmada karşılaştırma fonksiyonu testleri için  $a_1=2$  ve  $a_2=1$  değerleri kullanılmıştır. Bu değerler ampirik testler neticesinde bulunmuştur (Faramarzi et al. 2020). Fakat başka problemlerde bu değerlerin değiştirilmesi gerekebilir (Faramarzi et al. 2020). Denklem 10 Denklem 8'de yerine konulmasıyla Denklem'11 elde edilir.

$$\vec{F} = a_1 \text{sign}(\vec{r} - 0.5)[e^{-\vec{\lambda}t} - 1] \quad (11)$$

### Türetme Oranı (Generation Rate (G))

Türetme oranı DO algoritmasının en önemli yapılarında birdir. Bu oran algoritmanın çalışma veya kullanma yeteneğini geliştirerek tam çözümün bulunmasını sağlar. Birçok mühendislik uygulamalarında türetme oranı için birçok model kullanılır (Guo 2002).Örneğin bunlardan biri olan birinci dereceden üstsel azalma modeli aşağıdaki gibi tanımlanır (Faramarzi et al. 2020).

$$\vec{G} = \vec{G}_0 e^{-\vec{k}(t-t_0)} \quad (12)$$

Denklemdaki  $G_0$  başlangıç değerini gösterir.  $k$  azalma katsayısıdır. Algoritmanın arama yapma sürecinin kontrol edilmesi için bu çalışmada  $k = \lambda$  olarak alınmıştır. Türetme oranının son denklemi ise aşağıdaki gibidir.

$$\vec{G} = \vec{G}_0 e^{-\vec{k}(t-t_0)} = \vec{G}_0 \vec{F} \quad (13)$$

Denklemdaki  $G_0$  aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\vec{G}_0 = \vec{GCP}(\vec{C}_{eq} - \vec{\lambda}\vec{C}) \quad (14)$$

$$\vec{GCP} = \begin{cases} 0.5r_1 & r_2 \geq GP \\ 0 & r_2 < GP \end{cases} \quad (15)$$

Denklemdaki  $r_1$  ve  $r_2$  değerleri  $[0,1]$  aralığındaki rastsal değerlerdir. GCP Türetme oranı kontrol parametresidir. Bu parametre güncellenme süreçlerine katkı sağlamak için türetme olasılıklarını içerir. Bu olasılık bilgisi parçacıkların kendi durumlarını güncellerken kaç adet türetme durumu ve aşamasının kullanıldığını belirler. Bu yapı türetme olasılığı (GP- Generation Probability) olarak adlandırılır. Bu mekanizma Denklem 14 ve Denklem 15'e göre türetilir. Örneğin GCP'nin sifıra eşit olması  $G'$  nin sifıra eşit olması anlamına gelir. Bu da tüm yönlerdeki parçacıkların türetme oranı kullanmadan güncellendiği anlamına gelir. Arama ve kullanma veya çalıştırma arasında denge olması için  $GP=0.5$  olarak alınmıştır. Sonuç olarak Denge optimizasyon algoritmasının güncellenme kuralları aşağıdaki gibidir (Faramarzi et al. 2020):

$$\vec{C} = \vec{C}_{eq} + (\vec{C} - \vec{C}_{eq}) \cdot \vec{F} + \frac{\vec{G}}{\lambda V} (1 - \vec{F}) \quad (16)$$

Denklemin 16'daki birinci aşama konsantrasyonun dengesidir. İkinci ve üçüncü aşamalar ise konsantrasyonun değişimidir. İkinci aşama algoritmada global optimum noktanın bulunmasından sorumludur. Bu aşama daha çok arama fazına etki eden bir aşamadır. Bu aşamada, doğrudan denge konsantrasyon değerinden mevcut konsantrasyon yani parçacıktaki değer farkı alınır. İkinci aşamada global nokta bulunduktan sonra üçüncü aşamada ise bulunan sonuçların doğruluğu denetlenir. Algoritma temelde şöyle çalışmaktadır. Başlangıç popülasyonu oluşturulduğunda algoritma büyük rastsal değerlere göre hareket eder. Bu adım güncellenme prosedürü ile parçacıkların optimal noktaya yerleşmesini sağlar. Bu durumun ters senaryosu da geçerlidir. Eğer değerler yani başlangıç popülasyonu optimal noktalara yakın ise rastsal değerler türetilirken adımlar küçültülmelidir. Bu yapı algoritmaya n boyutlu ve yönlü aday popülasyonlarla çalışma fırsatı verir (Faramarzi et al. 2020).

### Parçacık Hafızasının Kaydedilmesi (Particle Memory Saving)

Bu bölümde parçacıkların parametre vektör uzayındaki yerlerinin ve amaç fonksiyon değerleri kaydedilir. Bu yapı PSO algoritmasındaki en iyi değer ile benzerlik taşır. Mevcut durumdaki ve bir önceki durumdaki amaç fonksiyon değerleri karşılaştırılır. Eğer amaç fonksiyonu maksimize ve minimize

edilecek eğilimde ise mevcut değer en iyi değer üzerine yazılarak güncellenir. Şekil 3 de bu yapı gösterilmektedir (Faramarzi et al. 2020).

### **Denge optimizasyon algoritmasının arama kabiliyeti (Exploration ability of EO)**

Çalışmanın bu bölümde Denge Optimizasyon Algoritmasının çalışma mekanizmasına etki eden parametreler detaylı olarak açıklanmaktadır:

**a<sub>1</sub>:** Tarama yapısını kontrol eden bir katsayıdır. Parçacığın yeni pozisyonunun denge aday çözümünden ne kadar uzakta olduğunu belirler. Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi  $a_1$  değerinin büyük olması yüksek arama kabiliyeti sağlar. Fakat değer üçten büyük olması arama performansını azaltır. Çünkü  $a_1$  konsantrasyon değişimini büyütebilir. Bunda dolayı bu değer arama kabiliyetini artırmak için olması gerektiği kadar büyük olmalıdır. Bu değer üç ile sınırlandırılması aslında ampirik olarak elde edilmiştir. Bu tarz diğer meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarında da sınırlandırma mevcuttur. Örneğin PSO'da sosyal ve kavramsal parametrelerin dört'e eşit veya küçük olması şartı bulunur (Faramarzi et al. 2020).

**Sing(r-0.5)**=arama yönünü kontrol eder. r 0 ile 1 arasında rastsal bir değerdir.

### **Türetme Olasılığı (Generation Probability-(GP))**

GP=1 olması durumunda optimizasyon sürecinde değişim olmadığını bu da yüksek oranda tarama kapasitesini gösterir. GP=0 olması durumunda ise değişim oranının optimizasyon sürecindeki aday çözümlere etki ettiğini gösterir. Ampirik testler sonucunda arama ve kullanma süreçlerinin dengeli olması için GP=0.5 şeklinde alınmıştır (Faramarzi et al. 2020).

### **Denge Havuzu (Equilibrium Pool)**

Bu vektör beş elemanda oluşur veya beş parçacığa sahiptir. Bu beş parametrenin seçimi bazen keyfi bazen de ampirik testlere göre yapılır. Başlangıç iterasyonun da tüm aday çözümler belirli bir mesafeyle birbirinde uzaktır. Bu aday çözümler göre konsantrasyon yani amaç fonksiyon değerinin güncellenmesiyle parametre vektör uzayında algoritmanın arama yapması daha doğrusu global noktanın bulma prosedürünü artırır.

### **Denge optimizasyon algoritmasının kullanma ve çalıştırma kabiliyeti (Exploitation ability of EO)**

Bu aşamada algoritmanın kullanma ve lokal arama aşamaları gerçekleştirilir. Bu aşamaya etki eden parametreler aşağıdaki gibidir (Faramarzi et al. 2020).

**a<sub>2</sub>:** Bu parametre  $a_1$  parametresi gibidir. Fakat  $a_2$  parametresi kullanma veya deneme fazını kontrol eder. Kullanma durumunun genliğini belirler bu sayede en iyi çözüm etrafında denemeler yapılmasını sağlar.

### **Hafızanın Kaydedilmesi (Memory Saving)**

İlgili popülasyonda bulunan parçacıkların en iyi ve en kötü değerlerini kaydeder. Bu yapı optimizasyon algoritmasında kullanılan kullanma sürecini doğrudan etki eder.

### **Denge Havuzu (Equilibrium Pool)**

Parametrelerin yinelenmesiyle birlikte arama fazı kaybolur deneme fazı etkin hale gelir. Bundan dolayı her iterasyonda denge adaylarının birbirine yakın olması durumunda konsantrasyon güncelleme prosedürü aday çözümler etrafında lokal aramalar yapmaya yardım eder. DO algoritmasının sözde kodu aşağıda bulunmaktadır.

Başlangıç popülasyon parçacıklarının belirlenmesi



Denge aday çözümlerin maliyet fonksiyonlarının büyük bir sayı ile atanması

Algoritmanın parametrelerin atanması  $a_1=2$ ,  $a_2=1$ ;  $GP=0.5$ .

While Iter<Max\_Iter

for i=1:Parçacık Sayısı(n)

Her parçacığın maliyet fonksiyonunun hesaplanması

if  $\text{fit}(\bar{C}_i) < \text{fit}(\bar{C}_{\text{eq}(1)})$

$\bar{C}_{\text{eq}1}$  'i ile  $\bar{C}_i$  ve  $\text{fit}(\bar{C}_{\text{eq}(1)})$  'i  $\text{fit}(\bar{C}_i)$  ile değiştir

Elseif  $\text{fit}(\bar{C}_i) < \text{fit}(\bar{C}_{\text{eq}(1)})$  and  $\text{fit}(\bar{C}_i) < \text{fit}(\bar{C}_{\text{eq}(2)})$

$\bar{C}_{\text{eq}2}$  'i ile  $\bar{C}_i$  ve  $\text{fit}(\bar{C}_{\text{eq}(2)})$  'i  $\text{fit}(\bar{C}_i)$  ile değiştir

Elseif  $\text{fit}(\bar{C}_i) < \text{fit}(\bar{C}_{\text{eq}(1)})$  and  $\text{fit}(\bar{C}_i) < \text{fit}(\bar{C}_{\text{eq}(2)})$  and  $\text{fit}(\bar{C}_i) < \text{fit}(\bar{C}_{\text{eq}(3)})$

$\bar{C}_{\text{eq}3}$  'i ile  $\bar{C}_i$  ve  $\text{fit}(\bar{C}_{\text{eq}(3)})$  'i  $\text{fit}(\bar{C}_i)$  ile değiştir

Elseif  $\text{fit}(\bar{C}_i) < \text{fit}(\bar{C}_{\text{eq}(1)})$  and  $\text{fit}(\bar{C}_i) < \text{fit}(\bar{C}_{\text{eq}(2)})$  and  $\text{fit}(\bar{C}_i) < \text{fit}(\bar{C}_{\text{eq}(3)})$  and  $\text{fit}(\bar{C}_i) < \text{fit}(\bar{C}_{\text{eq}(4)})$

$\bar{C}_{\text{eq}4}$  'ü ile  $\bar{C}_i$  ve  $\text{fit}(\bar{C}_{\text{eq}(4)})$  'i  $\text{fit}(\bar{C}_i)$  ile değiştir

End

End

$$\bar{C}_{\text{ave}} = (\bar{C}_{\text{eq}(1)} + \bar{C}_{\text{eq}(2)} + \bar{C}_{\text{eq}(3)} + \bar{C}_{\text{eq}(4)}) / 4$$

$$\text{Denge havuzunun oluşturulması } \bar{C}_{\text{eq, pool}} = \{\bar{C}_{\text{eq}(1)}, \bar{C}_{\text{eq}(2)}, \bar{C}_{\text{eq}(3)}, \bar{C}_{\text{eq}(4)}, \bar{C}_{\text{eq}(\text{ave})}\}$$

Hafıza kaydının tamamlanması (if Iter<1)

$$t \text{ nin tanımlanması } t = \left(1 - \frac{\text{Iter}}{\text{Max\_Iter}}\right)^{\left(\frac{a_2}{\text{Max\_Iter}}\right)}$$

for i=1:parçacık sayısı (n)

Denge havuz vektöründe bir aday çözümün rastsal seçilmesi

$$\text{Random vektörlerin Denklem 11 e göre türetilmesi } \bar{\lambda}, \bar{r} \quad \bar{F} = a_1 \text{sign}(\bar{r} - 0.5)[e^{-\bar{\lambda}t} - 1]$$

$$\bar{F} = a_1 \text{sign}(\bar{r} - 0.5)[e^{-\bar{\lambda}t} - 1] \text{ düzenlenmesi}$$

$$\vec{GCP} = \begin{cases} 0.5r_1 & r_2 \geq GP \\ 0 & r_2 < GP \end{cases} \text{ düzenlenmesi}$$

$$\vec{G}_0 = \vec{GCP}(\bar{C}_{\text{eq}} - \bar{\lambda}\bar{C}) \text{ düzenlenmesi}$$

$$\vec{G} = \vec{G}_0 e^{-\bar{k}(t-t_0)} = \vec{G}_0 \bar{F} \text{ düzenlenmesi}$$

$$\text{Konsantrasyonun Güncellenmesi } \bar{C} = \bar{C}_{\text{eq}} + (\bar{C} - \bar{C}_{\text{eq}}) \cdot \bar{F} + \frac{\vec{G}}{\lambda V} (1 - \bar{F})$$

End

Iter=Iter+1

End

## ENDÜSTRİYEL BİYOLOJİK FERMANTASYON İŞLEMİ (INDUSTRIAL BIOLOGICAL FERMENTATION PROCESS)

Aşı üretimi birçok aşamadan oluşur. Bu aşamalardan ilki mikrobiyal fermentör içerisinde organizmanın yetiştirilmesidir. Optimal aşı sentezinin gerçekleşmesi için temel etken yeterli miktarda oksijen çözümünün kontrol edilmesidir. Çalışmanın bu bölümünde aşı üretimi için karıştırıcının hızının değişimiyle çözünen oksijen miktarının değişimi için oluşturulan veri setleri giriş ve çıkış verisi olarak kullanıldığı modeller kullanılmıştır (Khan et al. 2018). Khan ve arkadaşları dinamik bir fermenter sistemi oluşturmuşlardır. Bu çalışmada bu sisteme uygulanan giriş verilerine karşın çıkış verileri açık çevrim olarak elde edilmiştir. Elde edilen veri setini modellemek için birçok farklı model yapısı kullanılmıştır.

Bunlar içerisinde en iyi cevabı veren dört model seçilmiştir. Bu çalışmada da Khan ve arkadaşları tarafında elde edilmiş modeller için PID kontrolörler DO algoritmasıyla tasarlanmıştır.

$G_p$  transfer fonksiyonu için karıştırıcının hızı  $U(s)$ , çözünen oksijen miktarı ise  $Y(s)$  şeklindedir. Çalışmada modeller Matlab "tfest" modelleme araç kutusuna göre gerçekleştirilmiştir (Khan et al. 2018). Çalışmada önerilen modeller aşağıdaki tabloda verilmektedir.

**Çizelge 1.** Karıştırıcı hızına göre oksijen çözünme modelleri

*Tablo 1. Dissolved oxygen model according to stirrer rate*

Model	Modelin Türü	Kat sayılar	Modelin Transfer fonksiyonu
Model 1 $G_{p1}$	$\frac{Ke^{-\theta_1 s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$K = 2033; \tau_1 = 86; \tau_2 = 5656; \theta = 24$	$\frac{2033s}{486416s^2 + 5742s + 1} e^{-24s}$
Model 2 $G_{p2}$	$\frac{Ke^{-\theta_2 s}(\tau_3 s + 1)}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$K = 0.326; \tau_1 = 89; \tau_2 = 564.7; \tau_3 = 719.1; \theta = 18$	$\frac{234.4266s + 0.326}{50263s^2 + 653.7s + 1} e^{-18s}$
Model 3 $G_{p3}$	$\frac{Ke^{-\theta_3 s}(\tau_3 s + 1)}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$K = -0.829; \tau_1 = 80.7; \tau_2 = 11960; \tau_3 = -5721; \theta = 24$	$\frac{4742.7s - 0.829}{965172s^2 + 12401s + 1} e^{-24s}$
Model 4 $G_{p4}$	$\frac{Ke^{-\theta_4 s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$K = 2130; \tau_1 = 97.6; \tau_2 = 5461; \theta = 7$	$\frac{2130s}{532990s^2 + 5558.6s + 1} e^{-7s}$

## DENGE OPTİMİZASYON ALGORİTMASIYLA KONTROLÖR TASARIMI VE SIMULASYON SONUÇLARI (CONTROLLER DESIGN WITH EQUILIBRIUM OPTIMIZATION METHOD AND SIMULATION RESULTS)

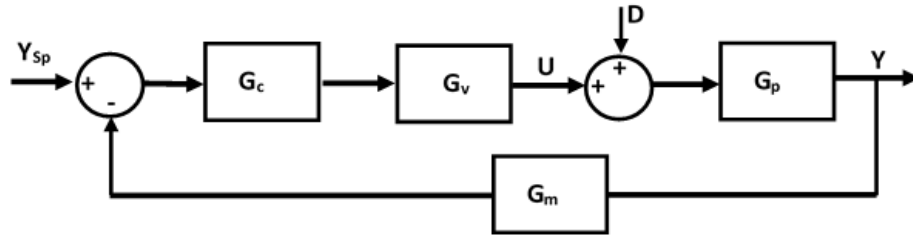
Aşı üretiminde karıştırıcının hızıyla çözünen oksijen miktarı arasında kolerasyonun olduğu bilinir. Çözünen oksijenin kontrolü için karıştırıcının hızının kontrol edilmesi gerekir. (Khan et al. 2018) çalışmasında dört farklı örnek için karıştırıcı hızıyla çözünen oksijen miktarı arasında ilişkinin olduğu model belirlenmiştir. Daha sonra bu modeller için doğrusal olmayan en küçük kareler optimizasyon metoduyla kontrolörler IAE hata yapısına göre tasarlanmıştır. Aslında dört farklı örnek için elde edilen modeller Çizelge 1’de verilmektedir. Bu modeller analitik olarak denetçi tasarlamak güçtür ve tasarlanan denetçileri kontrol performansları son derece iyidir. (Khan et al. 2018) çalışmasında karıştırıcı hızına karşın oksijen çözünüm sistem modelleri için doğrusal olmayan en küçük kareler optimizasyon algoritmasıyla tasarlanan PID denetçi parametreleri Çizelge 2’de verilmektedir. Bu değerler Çizelge 1’de verilen model 1 için IAE hata fonksiyonuna göre bulunmuş ve diğer model 2 model 3 ve model 4 için ise bu kontrolör doğrudan denenmiş ve sonuçları sunulmuştur.

Fakat bu çalışmada ise 2020 yılında önerilmiş olan ve daha önce her hangi gerçek bir mühendislik probleminde kullanılmamış olan denge optimizasyon algoritması kullanılmıştır (Faramarzi et al. 2020). Öncelikle algoritma PID kontrolör parametrelerini optimize edecek kabiliyete getirilmiş ve MATLAB ortamında kodlanmıştır. Çalışma esnasında Denge optimizasyon algoritmasının performansına etki edebilecek yapılarında analizi yapılmış ve bu problem için yeniden belirlenmiştir. Örneğin (Faramarzi et al. 2020) çalışmasında denge optimizasyon algoritması benchmark fonksiyonları üzerinde çalıştırılırken  $a_1=2$   $a_2=1$  alınmasına karşın önceki bölümde detayları verilmiş olan bu parametreler bu çalışmada  $a_1=0.7$ ,  $a_2=0.2$  değerleri alınmıştır. Bu değerler ampirik olarak çoklu testler yapılarca tespit edilmiştir. Optimizasyon esnasında parametreler tamamiyle serbest bırakılmış yani algoritma sınırlı bir alanda arama uzaylarını oluşturmamıştır. Bilindiği gibi PID kontrolör yapısında üç parametre bulunmaktadır.

Bundan dolayı aslında arama uzayımız üç yönlü bir arama uzayıdır. Yani her parametre için denge optimizasyon algoritmasının felsefesinden dolayı dördü aday çözümler önerilmiştir. Bu aday çözümlere göre de aday havuzu oluşturulmuştur. Daha sonra popülasyondaki her konfigürasyonun amaç fonksiyon değerine bakılarak algoritma önceki bölümlerde verilen optimizasyon algoritmasının terminolojisini takip ederek çalıştırılmıştır.

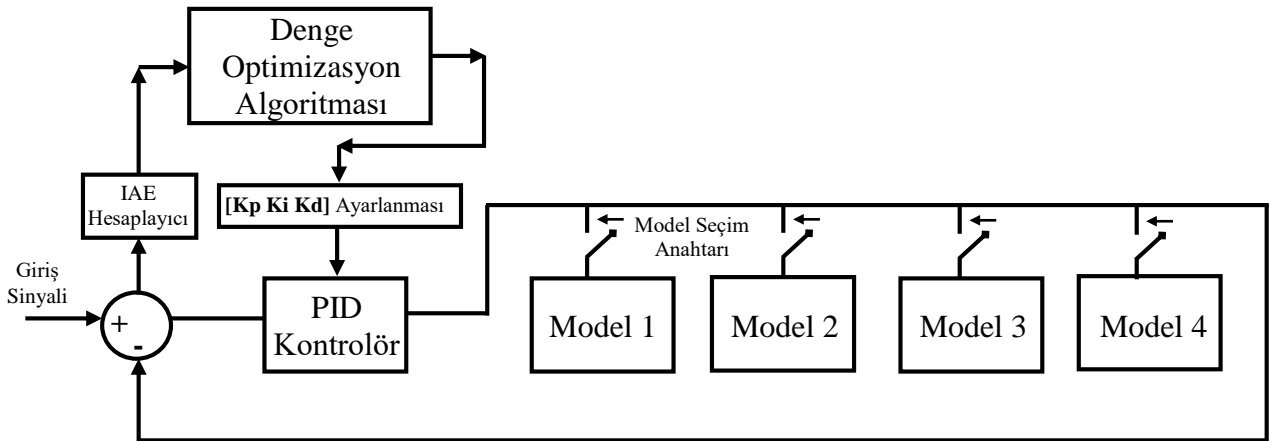
Çalışma esnasında amaç fonksiyonu olarak (Khan et al. 2018) çalışmada olduğu gibi IAE hata fonksiyon tanımı kullanılmıştır. Optimizasyon süresince kullanılan sistem model terminolojisi Şekil 1’de sunulmaktadır. Şekil 1’de optimizasyonda kullanılan geri beslemeli kontrol sistemi görülmektedir. Bu şekilde  $G_c$  PID kontrolörü gösterir.  $G_v$  final kontrol elemanı olarak adlandırılır ve 20 olarak alınmıştır.  $U$  karıştırıcı oranı olarak adlandırılır.  $G_p$  ise sistemin modelidir. Bu çalışmada dört örnek veri seti için dört farklı model Şekil 1’de gösterilen kapalı çevrim kontrol sisteminde  $G_p$  bloğu yerinde kullanılmıştır.  $D$  is bozucu girişidir. Optimizasyon uygulamasında bu değer sıfır alınmıştır.  $G_m$  ise sensör veya verici olarak adlandırılmakta bu çalışmada  $G_m$  ise 1 alınmıştır (Famarzi et al. 2020).

Optimizasyon süresince öncelikle  $G_p$  yerine Model 1 yazılmış ve 10 iterasyon 15 parçacık sayısı ile IAE amaç fonksiyonu göre çalıştırılmış ve PID kontrol parametreleri türetilmiştir. Daha sonra aynı şartla altında sadece  $G_p$  değiştirilerek yerine model 2 yapısı konulmuştur ve aynı şekilde PID parametreleri tespit edilmiştir. Bu uygulama benzer şekilde model 3 ve model 4 içinde tekrarlanmıştır.



Şekil 1: Kontrol Yapısı (Khan et al. 2018)

Figure 1. Control Structure



Şekil 2: Optimizasyon Yapısı

Figure 2. Hierarchical Optimization Structure

Şekil 2’de çalışmada kullanılan algoritmik yapı sunulmuştur. Algoritmada optimizasyon süresince model seçim anahtarına göre model seçilmekte ve kontrolör parametreleri optimize edilmektedir. Örneğin birinci anahtar kapatıldığında model 1 seçilmekte model 1 için denge optimizasyon algoritması PID parametrelerini optimize etmek için belirlenen iterasyonlar sonucunda çalışmakta ve Çizelge 2’deki Model 1 için bulunan kontrol parametrelerini türetmektedir. Bu kontrolör parametreleri Model 1, Model

2, Model 3 ve Model 4 için denenerek ilgili modeller için doğrusal olmayan optimizasyon algoritması sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Şekil 3'de gösterilmektedir. Ayrıca her model için optimizasyon süresince hata fonksiyonunun değişim grafiker gösterilmektedir. Örneğin Şekil 3'de Model 1 için optimizasyon süresince hata fonksiyonunun azalan bir eğilimde olması optimizasyon algoritmasının performansının iyi olduğunu gösterir.

Bunların yanı sıra sonuçlardan da görüldüğü gibi optimizasyon algoritması analitik yolla tasarlanmış kontrolörlerden bile daha iyi kontrolörler tasarlayabilmektedir. Bu da optimizasyon algoritmasının diğer bir üstünlüğü olarak gösterilebilir. Yukarıda bahsedilen yapı diğer üç model içinde tekrarlanmış ve sonuçlar Şekil4, Şekil 5 ve Şekil 6'da sırasıyla sunulmaktadır.

Şekil 2'de verilen anahtar 1 kapatılarak algoritma Model 1 için çalıştırılmıştır. Çalışmada toplam popülasyon sayısı 10, parçacık sayısı 15 olarak belirlenmiştir. Çalışmada  $a_1=0.7$  ve  $a_2=0.2$ 'dir. Çizelge 1'de görüldüğü gibi Model 1 birinci dereceden zaman gecikmeli ve pay kısmında türev olan bir modeldir. Kontrolör tasarımında referans çalışmadaki olduğu gibi IAE hata değeri amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır (Khan et al. 2018). Tasarlanmış olan kontrolör parametreleri Çizelge 2'de sunulmuştur. Şekil 3 de Model 1 için tasarlanan kontrolörün Model 2 Model 3 ve Model 4'e göre giriş sinyaline karşın cevapları bulunmaktadır. Şekillerden de görüldüğü gibi DO algoritması rastsal noktalarda ve çok geniş bir parametre aralığında başlamasına rağmen doğrusal olmayan en küçük kareler optimizasyon yöntemiyle elde edilen kontrolör cevaplarına karşın daha iyi sonuçlar üretebildiği gözlemlenmiştir. Özellikle Şekil 1a, Şekil 1b ve şekil1c'de mevcut kontrolör cevaplarına karşın yerleşme zamanında iyileşmeler mevcut iken Şekil 1d ise hem yerleşme hem de yükselme zamanlarına karşı iyileşmenin olduğu tespit edilmiştir. Bunların yanı sıra şekil 1e'de ise Model 1 için yapılan optimizasyon süresince hatanın değişimi gösterilmektedir. Hata fonksiyonu minimize edilmesi gereken bir amaç fonksiyonudur. Bundan dolayı optimizasyon süresince azalması beklenir. Şekil 1 e 'de ise iterasyonlar süresince hata fonksiyonunun sürekli azaldığı görülür. Bu da DO algoritmasının mühendislik problemlerinde özellikle kontrolör tasarımında etkin bir yöntem olduğunu gösterir.

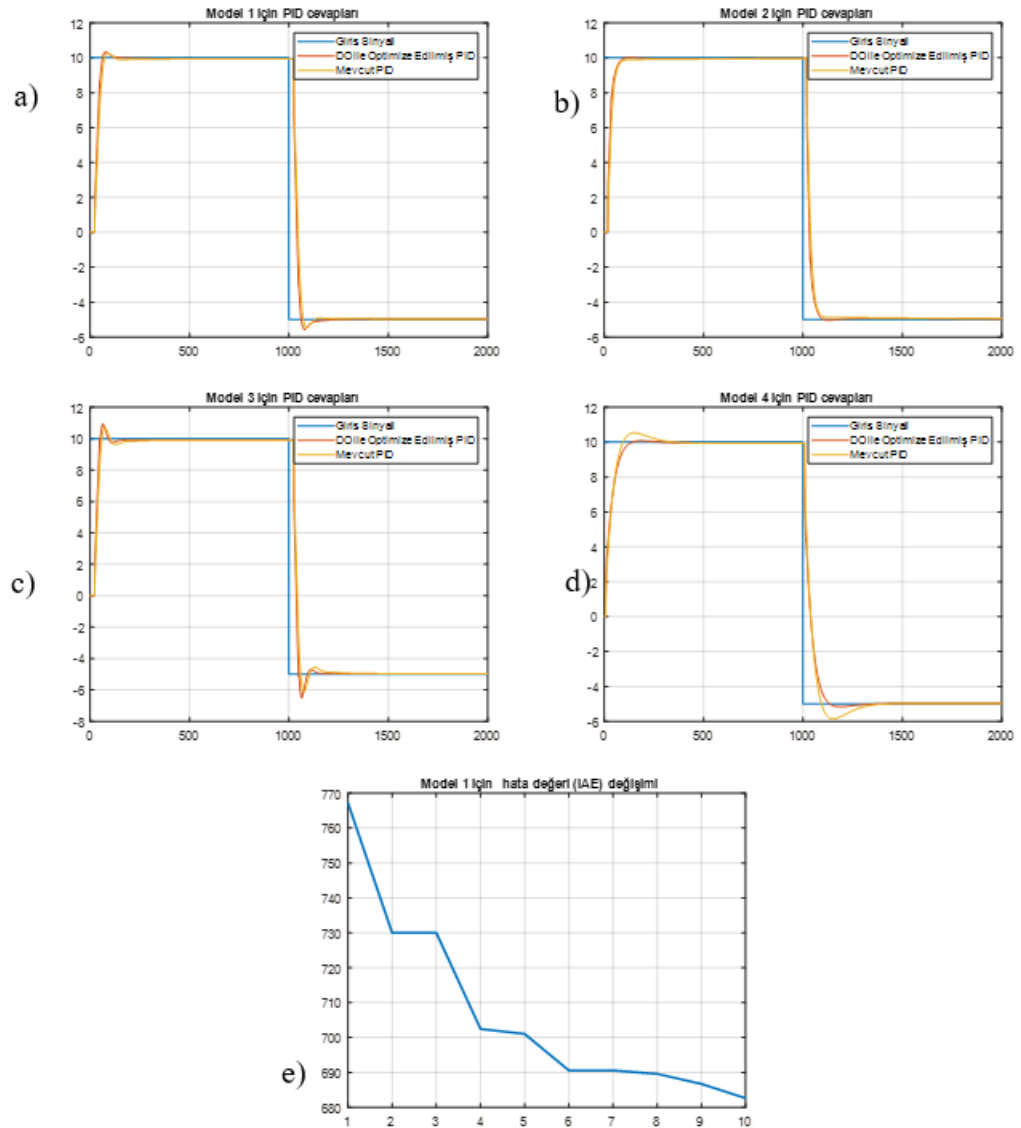
Model 2 için optimizasyon algoritması model 1'de olduğu gibi aynı şartla altında çalıştırılmıştır. Şekil 4 de ise model 2 için tasarlanan kontrolörün diğer modeller için de cevapları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Model 2 için elde edilen kontrolör parametreleri Çizelge 2'de bulunmaktadır. Özellikle Şekil 4b ve 4d daha iyi yerleşme zamanı ve yükselme zamanı cevapları üretmiştir. Görüldüğü gibi optimizasyon algoritması referans aldığı model için Model 1 de olduğu gibi Model 2 içinde mevcut durumdan daha iyi kontrolör parametreleri üretmiştir. Model 2 için optimizasyonla elde edilen kontrolörün sistem cevabı Şekil 4b'de bulunur. Diğer sonuçlar ise Model 2 için elde edilmiş kontrolörün diğer modellere olan cevaplarıdır. Bazı şekiller de sonuçların mevcut sistemden bir miktar kötü çıkması optimizasyon algoritmasının ilgili model için çalıştıramadığından dolayıdır. Hatta denge optimizasyon algoritmasıyla bulunan kontrolörler ilgili model için optimize edilmemiş sistem modellerine göre daha başarılı kontrol cevapları ürettiği şekillerde gözlemlenmiştir.

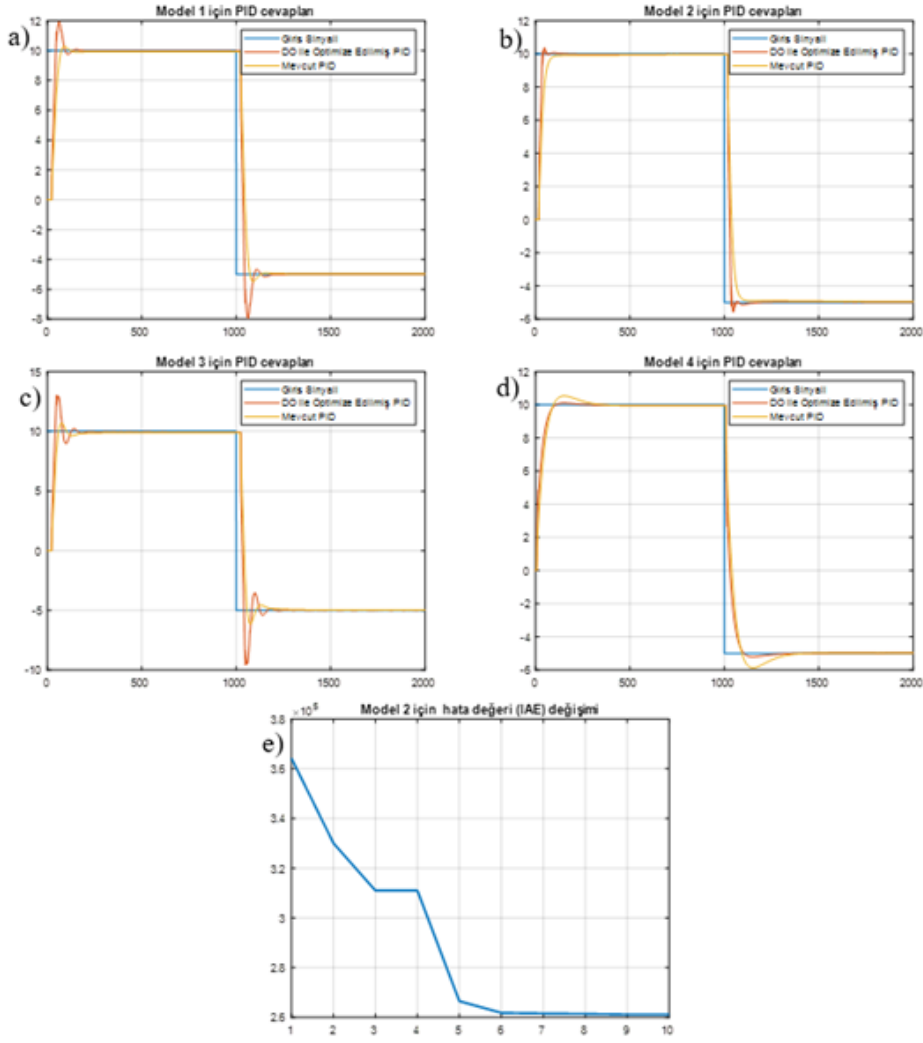
Model 3 ve Model 4 için aynı şartlar altında optimizasyon algoritmaları çalıştırılmış ve elde edilen kontrolör parametrelerine göre sistem cevapları Şekil 5 ve Şekil 6 da sunulmuştur. Şekillerden de görüldüğü gibi denge optimizasyon algoritması her durumda mevcut durumdan daha iyi kontrol cevapları üretmiştir. Özellikle yükselme ve yerleşme zamanlarındaki iyileşme açıkça görülmektedir. Bunların yanı sıra optimizasyon algoritmalarının performans göstergesi olan hatanın azalması da tüm modeller için gözlemlenmiştir. Şekil 5e ve şekil 6e de her iki model içinde hataların düşen eğilimde olduğu denge optimizasyon algoritmasının kontrolör tasarımı problemlerinde çalıştığına göstergesidir.

Elde edilen sonuçlara göre yani her model için optimizasyon algoritması bağımsız olarak çalıştırılmış ve her model için bulunan kontrolörler diğer modellerde de denenerek en uygun PID kontrolörün bulunması amaçlandığında dolayı tüm sonuçla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sistemlerin cevapları incelendiğinde Model 1 için elde edilen kontrolörlerin diğer sistemlerde daha iyi cevaplar verdiği görülmektedir.

**Çizelge 2.** DO optimizasyon algoritmasıyla elde edilen kontrolörler parametreleri*Tablo 2. Obtained controller parameter with EO Algorithm*

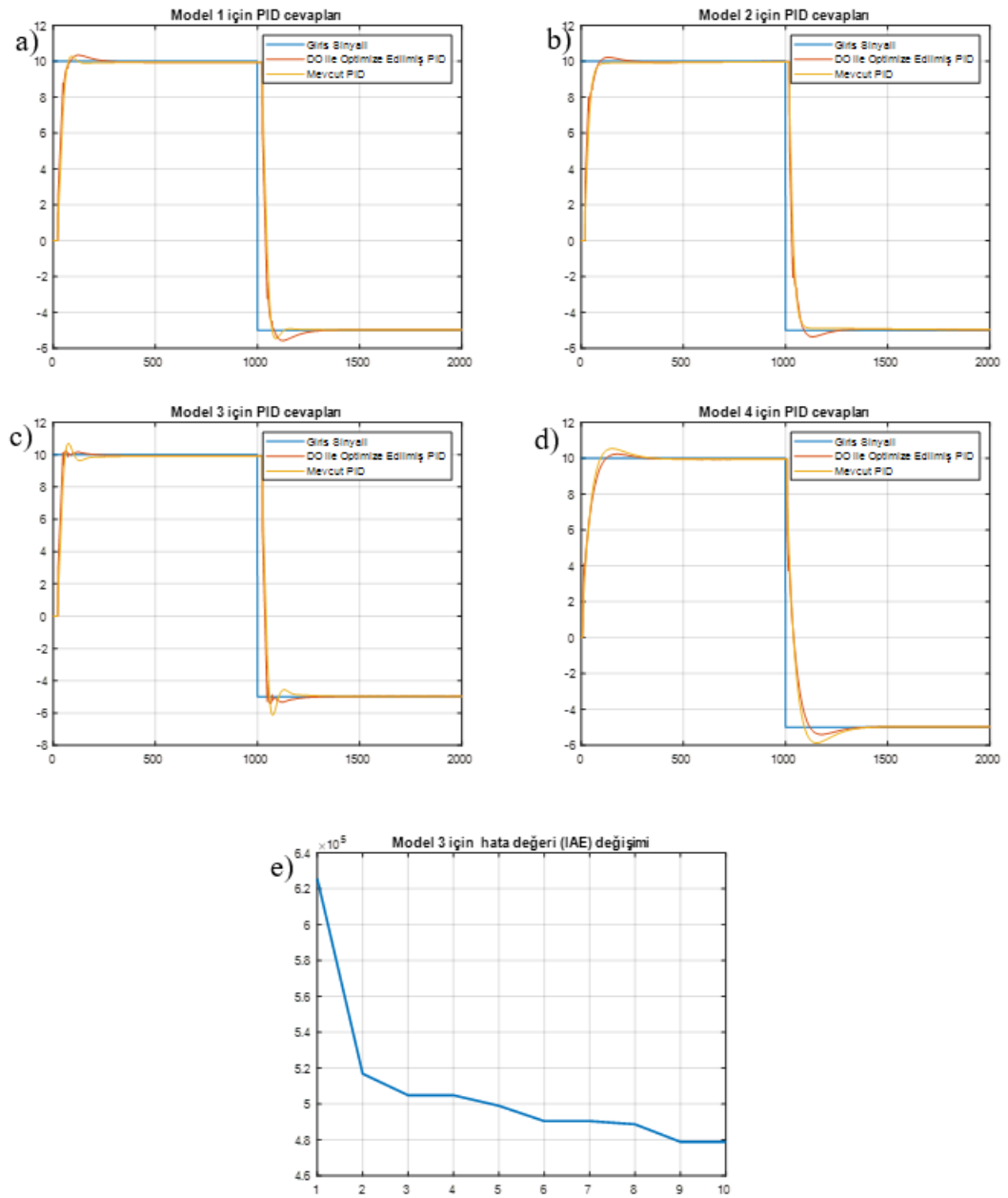
Model	$K_p$	$K_i$	$K_d$
<b>Model 1:</b> $G_{p1} = \frac{2033s}{486416s^2 + 5742s + 1} e^{-24s}$	0.3622867195	0.004124040288	2.324804293
<b>Model 2:</b> $G_{p2} = \frac{234.4266s + 0.326}{50263s^2 + 653.7s + 1} e^{-18s}$	0.4684828186	0.005401002796	3
<b>Model 3:</b> $G_{p3} = \frac{4742.7s - 0.829}{965172s^2 + 12401s + 1} e^{-24s}$	0.3394137491	0.004374472308	3
<b>Model 4:</b> $G_{p4} = \frac{2130s}{532990s^2 + 5558.6s + 1} e^{-7s}$	0.4	0.004	2.077914127
Referans PID Kontrolör Katsayıları (Doğrusal Olamayan En Küçük Kareler Yöntemi)	0.3226	0.0035	1.3872

**Şekil 3:** Model 1 için Denge optimizasyon algoritması ile elde edilmiş PID kontrolörün giriş sinyali cevaplarının karşılaştırması.*Figure 3. Comparison of the input signal responses of the PID controller obtained with Equilibrium optimization algorithm for Model 1.*



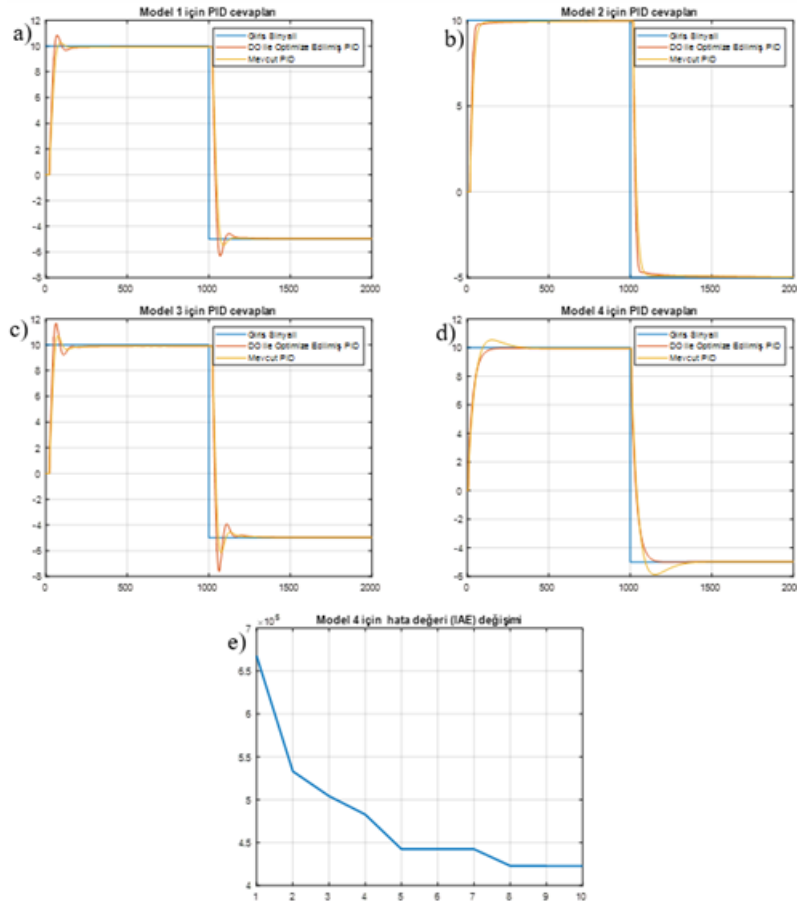
Şekil 4: Model 2 için Denge optimizasyon algoritması ile elde edilmiş PID kontrolörün giriş sinyali cevaplarının karşılaştırması.

Figure 4. Comparison of the input signal responses of the PID controller obtained with Equilibrium optimization algorithm for Model 2.



**Şekil 5:** Model 3 için Denge optimizasyon algoritması ile elde edilmiş PID kontrolörün giriş sinyali cevaplarının karşılaştırması.

*Figure 5. Comparison of the input signal responses of the PID controller obtained with Equilibrium optimization algorithm for Model 3.*



**Şekil 6:** Model 4 göre Denge optimizasyon algoritması ile elde edilmiş PID kontrolörün giriş sinyali cevaplarının karşılaştırması.

*Figure 6. Comparison of the input signal responses of the PID controller obtained with Equilibrium optimization algorithm according to Model 4.*

## SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada yeni bir meta sezgisel yöntem olan denge optimizasyon algoritması gerçek bir mühendislik probleminde kullanılmıştır. Aşı üretiminde önemli bir aşama olan karıştırıcı hızına karşın çözünen oksijen miktarının kontrolü için PID kontrolör parametreleri denge optimizasyon algoritması ile tasarlanmıştır. Öncelikle optimizasyon algoritması üç boyutlu bir optimizasyon problemi olan PID kontrolör parametrelerini optimize edebilecek kabiliyete ulaştırılmıştır.

İlgili sistem için literatürde önerilmiş dört farklı model için denge optimizasyon algoritması çalıştırılmış ve her model için elde edilen kontrolör parametreler diğer modeller içinde denenmiştir. Öncelikle denge optimizasyon algoritması referans alınan her model için mevcut durumda daha iyi kontrol performansı gösterebilen kontrolörler üretmiştir. Özellikle yükselme ve yerleşme zamanlarında üstünlükleri bulunmaktadır. Elde edilen sonuçlar denge optimizasyon algoritmasının mühendislik problemleri için özellikle kontrolör tasarımında kullanılacak uygun bir algoritma olduğunun göstergesidir.

Çalışma esnasında denge optimizasyon algoritması çok detaylı irdelenmiş ve özellikle algoritmanın çalışmasında son derece önemli olan bazı kat sayıların kontrolör tasarımı için hangi değerler olması gerektiği yapılan testler sonucunda tespit edilmiştir.

Gelecek çalışmalarını olarak bu algoritmanın modifiye edilerek gerçek zamanlı sistem modelleme, yol belirleme vb. mühendislik problemlerinde kullanılması planlanmaktadır.



**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- Atashpaz-Gargari, Esmail, and Caro Lucas. 2007. "Imperialist Competitive Algorithm: An Algorithm for Optimization Inspired by Imperialistic Competition." In *2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2007*.
- Ateş, A., and C. Yeroğlu. 2016. "Optimal Fractional Order PID Design via Tabu Search Based Algorithm." *ISA Transactions* 60.
- Ateş, A., and C. Yeroğlu. 2018. "Modified Artificial Physics Optimization for Multi-Parameter Functions." *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Electrical Engineering* 42(4).
- Bazaraa, Mokhtar S., Hanif D. Sherali, and C. M. Shetty. 2005. *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms* *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*.
- Dorigo, Marco, and Krzysztof Socha. 2007. "Ant Colony Optimization." In *Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics*.
- Faramarzi, Afshin, Mohammad Heidarinejad, Brent Stephens, and Seyedali Mirjalili. 2020. "Equilibrium Optimizer: A Novel Optimization Algorithm." *Knowledge-Based Systems*.
- Gandomi, Amir Hossein, Xin She Yang, and Amir Hossein Alavi. 2013. "Cuckoo Search Algorithm: A Metaheuristic Approach to Solve Structural Optimization Problems." *Engineering with Computers*.
- Guo, Zhishi. 2002. "Review of Indoor Emission Source Models. Part 1. Overview." *Environmental Pollution*.
- Karaboga, Dervis, and Bahriye Akay. 2009. "A Comparative Study of Artificial Bee Colony Algorithm." *Applied Mathematics and Computation*.
- Kaveh, A., and S. Talatahari. 2010. "A Novel Heuristic Optimization Method: Charged System Search." *Acta Mechanica*.
- Khan, Omar et al. 2018. "Optimized PID Controller for an Industrial Biological Fermentation Process." *Journal of Process Control*.
- Kuhn, Harold W., and Albert W. Tucker. 2014. "Nonlinear Programming." In *Traces and Emergence of Nonlinear Programming*.
- Lin, Ming Hua, Jung Fa Tsai, and Chian Son Yu. 2012. "A Review of Deterministic Optimization Methods in Engineering and Management." *Mathematical Problems in Engineering*.
- Mirjalili, Seyedali et al. 2017. "Salp Swarm Algorithm: A Bio-Inspired Optimizer for Engineering Design Problems." *Advances in Engineering Software*.
- Mirjalili, Seyedali, Seyed Mohammad Mirjalili, and Andrew Lewis. 2014. "Grey Wolf Optimizer." *Advances in Engineering Software*.
- Rabani, Yuval. 2007. "Linear Programming." In *Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics*.
- Rao, R. V., V. J. Savsani, and D. P. Vakharia. 2011. "Teaching-Learning-Based Optimization: A Novel Method for Constrained Mechanical Design Optimization Problems." *CAD Computer Aided Design*.
- Rashedi, Esmat, Hossein Nezamabadi-pour, and Saeid Saryazdi. 2009. "GSA: A Gravitational Search Algorithm." *Information Sciences*.
- Yeroğlu, C., and A. Ateş. 2014. "A Stochastic Multi-Parameters Divergence Method for Online Auto-Tuning of Fractional Order PID Controllers." *Journal of the Franklin Institute* 351(5).
- Zhang, Chunlei, and Raúl Ordóñez. 2012. "Numerical Optimization." In *Advances in Industrial Control*.



## TARİHİ SİLLE ÇEŞMELERİN ARŞİVLENMESİNDE BİLGİSAYAR ALTYAPISININ KULLANILMASI VE KLASİK MODELLERLE KIYASLANMASI

<sup>1</sup>Mehmet Emin BAŞAR , <sup>2</sup>Bayram AKDEMİR , <sup>3</sup>İlknur ACAR ATA 

<sup>1,3</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Konya, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,  
Konya, TÜRKİYE

<sup>1</sup> mebasar@ktun.edu.tr, <sup>2</sup> bakdemir@ktun.edu.tr, <sup>3</sup> iaata@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 11.11.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 26.11.2020)

**ÖZ:** Bu çalışmada Konya yöresinin tarihi eser değeri taşıyan çeşmelerinin arşivlenmesinde dijital metotların kullanılması ve klasik modellerle karşılaştırılması yapılmıştır. Tarihi eserlerin arşivlemesi kültürün gelecek nesillere aktarılması ve olası bir restorasyon gerekliliğinde planlarına erişilebilmesi açısından önemlidir. Tarihi bir yapıyı arşivlemek için sadece resim yetmez. Arşiv aynı zamanda yapının kendine has detaylarını ölçüleri ile birlikte içermelidir. Bu detaylar bazen büyük resimde olabileceği gibi bazen da dar alanlarda olabilir. Bu yüzden arşivde yalnızca bilgisayara güvenme ve otomatik şekillendirmek detay kaybına neden olabilir. Arşivde mutlaka deneyimli bir göze ihtiyaç vardır. Arşivi sadece manuel hale getirmek ise işin yavaşlamasına ve verim düşüklüğüne sebep olmaktadır. Bu çalışma kabul edilebilir bir arşivin dijital ve el yapımı arşivlerle kıyaslamakta ve dijital çalışmalarda dikkat edilmesi gereken noktaları öne çıkarmaktadır. Böylece olası arşivlerde minimum detay kaybı ve maksimum özellik arşivlemeyi mümkün kılmayı hedeflemektedir. Bu arşiv denemesi gerçek tarihi eser niteliği taşıyan sille çeşmeleri üzerinde denenmiş ve iki tanesi ayrıntılı olarak bu makalede işlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Belgeleme, Çeşme, Dijital arşiv, Konya Tarihi eser, Sille tarihi

### Using Computer Infrastructure in Archiving Historical Sille Fountains and Comparing with Classical Models

**ABSTRACT:** In This study has been compared with classical models and digital methods in archiving historical artifact stone fountains of Konya region. It is important to archive historical artifacts, to transfer them to productive generation futures and to reach their plans in case of a possible restoration requirement. Pictures alone are not enough to archive a historical building. The archive should also contain specific details of the building along with its dimensions. These details can sometimes be in the big picture or sometimes narrow. Therefore, trusting resources and auto-shaping in the archive can cause loss of detail. He definitely needs an eye in the archive. Making the archive only manual causes the work to slow down and be low. This study compares an acceptable archive with digital and handmade journals and extracts the points that work digitally. It aims to make minimum details available in qualified archives. This study experiment was tried on Sille fountains, which are real historical artifacts, and two of them were elaborated.

**Key Words:** Fountain, Konya historical monument, Digital archive, History of Sille

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Globalleşen dünyada kültürel farklılıkların ortadan kalkmaya başlamasının bir sonucu olarak, koruma bilinci yoğun çaba sarf edilen bir gereklilik olmuştur. Bu da kültürel mirasın belgelenmesi,

yaşatılması ve gerekli görüldüğünde onarılması ile mümkün olmaktadır. Belgeleme ve koruma projelerinin oluşturulması için doğru ve güvenilir bir tespit çalışması yapılmalıdır. Çünkü doğal veya insan eliyle tahrip olan veya yok olan kültürel mirasın aslına uygun şekilde onarılması veya yeniden yapılması için dokümantasyonunun yapılmış olması gerekir.

Bir yapının, kent dokusunun veya arkeolojik kalıntının yakından incelenmesi, belgelenmesi, mimarlık tarihi açısından değerlendirilmesi ve restorasyon projelerinin hazırlanabilmesi için, binanın iç ve dış mimarisine, özgün dekorasyonuna ve taşıyıcı sistemi ile yapı malzemelerine ait mevcut durumunun ölçekli çizimlerle anlatılması gereklidir. Sağlıklı bir belgeleme ve onarımın yapılması için gerekli olan bu işlem ise gelişen teknik ve teknolojilerin en verimli şekilde kullanılmasıyla mümkün olmaktadır.

Türkiye'deki tarihi mimari eserler bugün çeşitli faktörlerle (zaman, insan, iklim, vb.) yıpranmakta ve eğer önlem alınmazsa yok olup gitmektedirler. Bu eserlerin varlıklarını sürdürebilmeleri, doğru bir şekilde tespit edilmelerine, rölöve, restitüsyon ve restorasyon projelerinin çizilerek koruma altına alınmalarıyla mümkündür. Bu nedenle korumanın en önemli ve ilk aşamalarından biri olan rölöve çok önemlidir. Rölövenin doğruluğu ise restorasyonun sağlıklı açısından vazgeçilmez bir önem arzeder.

Sille, tarihte değişik kültürlerin bir arada yaşadığı ve bu kültürlerin ürünlerini bünyesinde barındıran ülkemizin ender yerleşim merkezlerinden bir tanesidir. Burada, günümüze kadar varlıklarını sürdürebilmiş çok sayıda mimarlık eseri (evler, camiler, kiliseler, hamamlar, su yapıları) bulunmaktadır. Bugün bu tarihi miraslar çeşitli faktörlerle (zaman, iklim, insan) yıpranmakta ve yok olmaktadır. Bunlar arasında tarihi su yapıları gurubu içerisindeki sokak çeşmeleri önemli bir yer tutmaktadır. Sokak çeşmeleri günlük hayatın bir parçası olduğundan ve taşınmadıklarından oldukları yerde korunmaları ve kayıt altına alınmaları gerekir. Tahrip edilmeye ve hor kullanıma en açık yapı türlerindenidir.

Bu bağlamda, çeşmelerin kolay erişilebilir yerlerde nispeten daha küçük boyutlu yapılar olması ve cephe rölelerinin manuel olarak rahat alınabilmesi nedeniyle Sille yerleşkesindeki tarihi sokak çeşmeleri çalışma alanı olarak seçilmiştir.

Bu çalışmanın amacı sokak çeşmelerinin tespitinin modern bir yöntem olan dijital fotogrametrik yöntem kullanılarak yapılması ve elde edilen sonuçların klasik (manuel) yöntemle karşılaştırılmasıdır. Klasik yöntemle (elle) alınmış özellikle cephe rölöveleri ile dijital belgeleme tekniklerinden yersel fotogrametri tekniği kullanılarak elde edilen rölövelerin, sayısal görüntü eşleme metodu ile karşılıklı olarak değerlendirilmesinin yapılarak manuel rölövelerin kabul edilebilir hata paylarının tespiti amaçlanmıştır. Ayrıca iki metodun sağladığı avantajlar ve dezavantajları da bu kapsamda değinilecektir. Her iki yöntemle elde edilen verilerin karşılaştırılmasında görüntü eşleme teknolojisi imkanlarından faydalanılacak ve eşleştirilen görüntü çiftlerinin  $x$  ve  $y$  doğrultusundaki sapmalarına bakılacaktır. Böylelikle nokta sapmaları üzerinden sayısal bir sonuca varılması hedeflenmektedir.

Sille, geçmişi Neolitik döneme kadar uzanan, Anadolu coğrafyasının tam kalbinde Ortodoks Rumlar ve Müslüman Türklerin birlikte ikamet ettikleri kadim bir yerleşkedir (Bahar, 1994). Roma-Kudüs kutsal hac yolunun bir parçası konumundaki yerleşke Hıristiyanlar için oldukça önemli bir merkez özelliğindedir (Özönder, 1998; Küçük, 2001; Sarıköse, 2009). Bugün eski görkeminden biraz uzakta olan Aya Eleni Kilisesi Hristiyan hacılar için önemli bir uğrak noktasıdır. Selçuklu ve Osmanlı dönemlerinde de önemini koruyan bir merkez konumundadır. Sille, 19. yy. sonlarında bir nahiye merkezi, Cumhuriyetin ilk zamanlarından 1980'e kadar belediye (Ulusoy, 1951), 1989'dan itibaren mahalle olmuştur. Müslüman halk ile gayrimüslim halkın iç içe yaşadığı (Küçükdağ, 2005) bir yerleşim yeri olan Sille'de, nüfusun %56'sı Müslümanlardan %44'ü Gayrimüslimlerden oluşmaktadır (Aköz ve Ürekli, 1997). Burada yaşayan Rumlar Grek alfabesi ile Türkçe yazıp konuşmaktadır. Bir dönem 8500 nüfusun yaşadığı bu bölge ticari hayatının canlılığı ile de bilinmektedir (Erdem ve diğ.). 19. Yüzyılın sonlarına kadar önemli bir merkez olduğu bilinen Sille'nin, bu yüzyılın sonuna doğru yaşamaya başladığı bir gerileme dönemi hızını Lozan'la birlikte gerçekleşen Mübadele sonrası iyice arttırmıştır. Sille'nin mübadele sonrası eski cazibesini kaybetmesi buralara yerleştirilen Türklerin ise kısa zamanda buraları terketmesi bu çöküşü hızlandıran unsurlardandır (Erdoğan, 2014).. Bugün eski gösterişli günlerinden eser kalmayan bölge bir zamanlar tıpkı Mardin gibi yamaçlarında birbirine saygılı, ekolojik evler ile şekillenmiş bir vadinin ortasında üzüm bağlarının ve balık turşularının nefis kokuları arasında bir cazibe merkeziydi. Sosyo-kültürel dokunun

deformasyonu ve yerine ikame olan alt kültürün hoyrat tutumları dokunun bozulmasına ve giderek yok olmasına neden olmuştur. Özellikle 1990'lı yıllardan sonra farkındalık artmış ve son dönemlerde Sille bir cazibe merkezi haline gelmeye başlamıştır (Erdoğan, 2014). Sille geleneksel yapılarında kullanılan yöresel yapı malzemesi "Sille taşı" olarak adlandırılan malzemedir. Yapı taşı olarak kullanılan bu taş, Konya'daki Selçuklu dönemi ve Ulusal Mimarlık Dönemi eserleri başta olmak üzere yöredeki pek çok eski bina, kilise ve camilerde yaygın olarak kullanılmıştır (Erdoğan, 2014). Taş malzeme, yapıların ana yapı malzemesi olup, taş örgülerin arasında ve cephelerde Horosan benzeri bir harç kullanılmıştır. Taş malzeme Silenin geleneksel konutlarında olduğu gibi, sokak çeşmelerinde de ana yapı malzemesidir (Erdoğan, 2014).

## MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada arşivlenen çeşmelerin aynı zamanda Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü Restorasyon Anabilim Dalında, dokümantasyon ve bilgi sistemi çalışmalarında kullanılmak üzere bir altyapı oluşturulması amacıyla da kullanılmak üzere küçük ölçekte bir yapı gurubu olan çeşmeler seçilmiştir. Bu kapsamda Konya'ya bağlı Sille yerleşkesinde bulunan 13 adet geleneksel çeşmenin klasik yöntemlerle ve ardından aynı çeşmeler üzerinde yakın resim fotogrametrisi kullanılarak dijital belgeleme çalışmaları yapılmıştır.

Çalışma safhaları aşağıdaki grafikte belirtilen araştırma projesinin, ilk aşamasında klasik yöntemle röloveleri alınan sokak çeşmelerinin cepheleri, laboratuvarında kalibrasyonu tamamlanmış dijital SLR bir kamera kullanılarak özel bir yazılımla bilgisayar ortamında modellenmiş ve değerlendirilmiştir. Daha sonra buradan elde edilen sonuçlar klasik (manuel) yöntemle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak bir değerlendirme yapılmıştır.

Çalışmada bir veya iki kişinin rahatlıkla erişebileceği ve ölçümleyebileceği ölçekte çeşmelerin seçilmesi kararlaştırılmıştır. Buradaki amaç ise dijital teknikler kullanılmadan yapılacak olan ölçme işlemi sırasında karşılaşılabilecek engellerin ve zorlukların minimize edilerek dijital araçlarla yapılan arşivlemenin kıyaslanmasındaki olası farkın realize edilmesi hedeflenmiştir. Çalışma alanı olarak Konya Sille yerleşkesinde bulunan tarihi sokak çeşmeleri kullanılmıştır.

Mevcut bir yapının, bilinen ölçme aletleri (şerit metre, su terazisi, kırık metre, lazer metre vb.) yardımıyla üçgenleme tekniği kullanılarak ölçülmesi ve çizime aktarılmasına klasik yöntem (manuel yöntem) denilmektedir. Rölove alınırken çelik şerit metre, şakül, ip, su terazisi gibi aletler kullanılmıştır. Çalışma esnasında hassas davranılması ve ölçümlerin doğru yapılabilmesi için lazer şakül ve lazer metre ile ölçüm işlemlerine destek sağlanmıştır.



**Şekil 1.** Rölove almında kullanılan alet ve cihazlar (a) klasik cihazlar; çelik metre, şakül, ip ve su terazisi (b) teknolojik cihazlar; lazer metre, lazer şakül, SLR fotoğraf makinesi ve fotomodeler yazılımı.

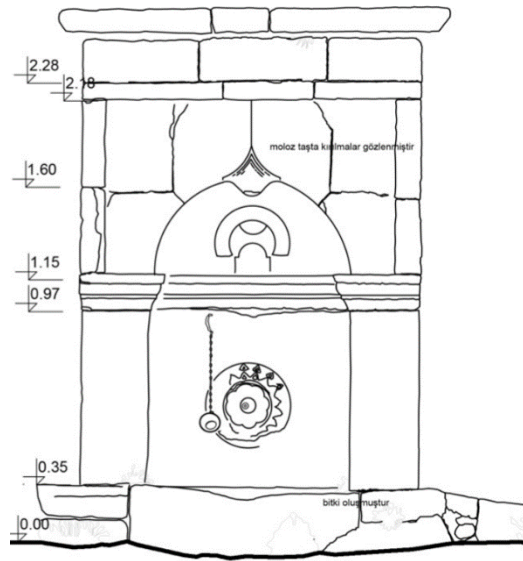
*Figure 1. Tools and devices used in survey taking (a) Classic devices; steel meter, plumb line, rope and spirit level (b) Technological devices; laser meter, laser plummet, SLR camera and Photomodeler software*

Projenin dijital rölove tarafında Hilti marka lazer metre, Hilti marka lazer düzeç, Canon EOS 300D dijital SLR makine ile Photomodeler v.5.0 yazılımının temini sağlanmıştır.

## Klasik Metot ile Belgeleme Çalışmaları (Documentation Studies with the Classical Method)

Üç ay boyunca 8 öğrenci ve 3 deneyimli kişi ile tarihi Sille Çeşmelerinin rölovelerinin çıkarılması ve bunların istenilen formatta sunumu çalışmaları yürütülmüştür. Ölçüleri alınan çeşmeler fotoğraflardan da yararlanılarak aydınlar üzerine plan, kesit ve ön cepheden oluşan çizimleri elle yapılarak oluşturulmuş ve bu çalışmalar aynı zamanda programı ile de elektronik ortama aktarılmıştır. Böylece manuel çalışmalar

hem yazılı hem de elektronik ortamda oluşturulmuştur. Elektronik ortama çizimler Autocad 4.2 kullanılarak aktarılmıştır.



**Şekil 2.** Klasik metotla çizilmiş Nuri Paşa Sille tarihi eser çeşmesi  
*Figure 2. Sille historical monument fountain Nuri Paşa drawn with the classical method*

Çizim ileriki bölümlerde dijital metotla kıyaslanmıştır.

#### Dijital Tekniklerle Belgeleme Çalışmaları (Documentation Studies with the Digital Technics)

Dijital tekniklerle rölöve alabilmek için ön hazırlıkların yapılması gerekmektedir. Özellikle dijital cihazların güvenilirliğinin olması ve verilerin sağlıklı alınabilmesi için kalibrasyonları yapılmıştır. Dijital ölçümlerin başlangıcını fotoğraf makinesi oluşturmaktadır. Dijital rölöve, fotoğraf makinesi ile farklı açılardan çekilmiş fotoğrafların yazılım yardımı ile tekrar ölçülendirilmesine ve tek bir çizime dönüştürülerek elde edilir. Dijital fotoğraflarda ölçülerin kaymaması için rölövesi çalışılan çeşme lazer işaretleyici ile işaretlenebilir. Böylece elde edilecek olan rölöve daha gerçeğine yakın olacaktır. Şekil 3 lazer işaretleyici ile işaretlenmiş bir çeşmeyi göstermektedir.



**Şekil 3.** Lazer işaretleyici ile (Nuri Paşa) çeşmenin işaretlenmesi  
*Figure 3. Mark the fountain (Nuri Paşa) with a laser pointer*

İşaretleme kişisel bir tercih olup resmin derinliğini ve eşleşmeyi arttıracakları umulan her noktaya konulabilir. Buradaki amaç Photomodeler programının resmi eşleştirirken referans noktası olarak kullanması ve otomatik ölçeklemeye yardım etmesidir.

Fotoğraf nesneden eşit uzaklıklarda ve farklı açılardan çekilmesi yazılımın bir gerekliliğidir. Yazılım farklı açı ve işaretleri kullanarak em resmi boyutlandırır hem de otomatik ölçeklemeyi yaparak köşe çizgi gibi geometrik bileşenleri eşleştirerek en doğru resim için analiz yapar. Şekil 4'te farklı açılardan çekilmiş Nuri Paşa çeşmesi görülmektedir.

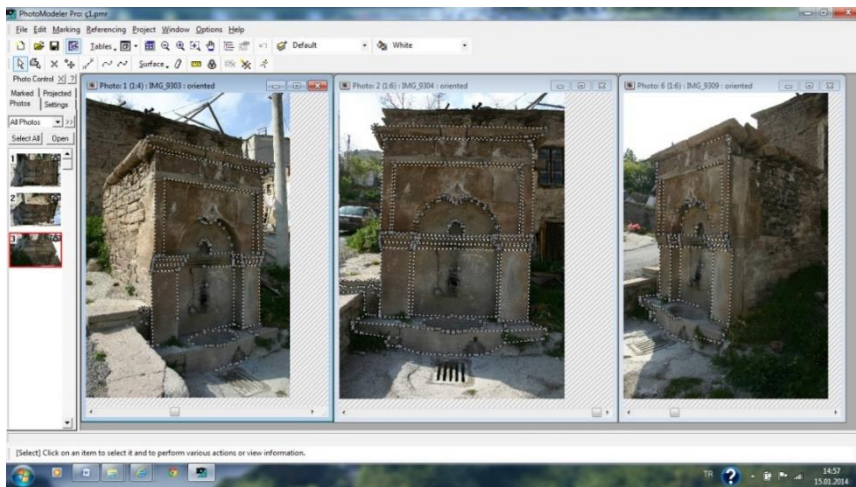


Şekil 4. Dijital fotoğraf makinesi ile farklı açılardan çekilmiş Sille çeşmesi

*Figure 4. Sille fountain taken from different angles with a digital camera*

Tüm resimlerin birleştirilmesi ise Photomodeler yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Photomodeler programı yeterli sayıda fotonun girdi olarak verilmesi ile resmin üç boyutlu hale getirilmesi mümkündür. Ancak bu çalışmalarda orta foto referans alınmıştır. Orta foto bir yapının orta referansından ölçekli olarak gösterilmiş halidir. Orta foto; resimlerdeki eğiklik etkileri ve yükseklik farklarından (rölyef kayma) ileri gelen hataların giderilmesi ile elde edilen ortofoto görüntüler üzerine eş yükseklik eğrileri, yükseklik bilgileri, harita kenar bilgileri de eklenmek suretiyle elde edilen, ortofoto görüntü parçacıklarının birleştirilmesiyle standart veya istenilen ölçeklerde üretilen fotolardır (<https://en.wikipedia.org/wiki/Orthophoto>).

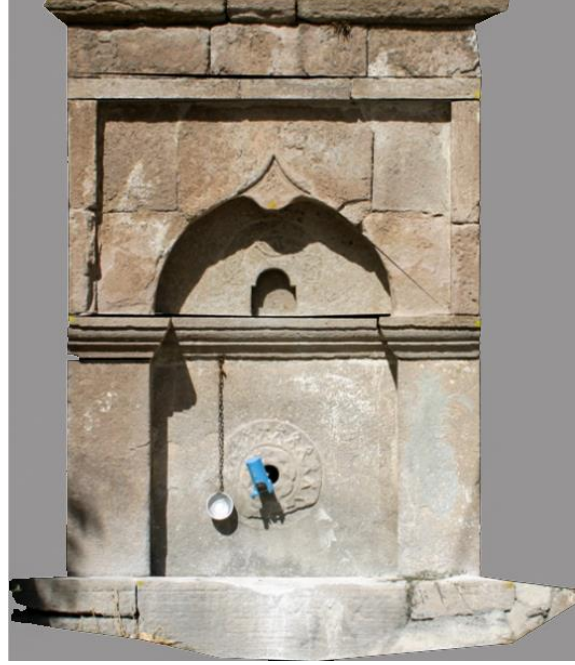
Photomodeler ile çalışma aşamasında tüm işlemler ofis ortamında gerçekleştirilebilirler. Model oluşturulurken her bir fotoğrafta konulan noktalar diğer tüm fotoğraflarda da eşleştirilerek programa girdi olarak söylenmektedir. Ne kadar çok nokta eşleştirilirse sonuç o kadar hassas olmaktadır. Şekil 5 yazılımın çalışmasından bir anı göstermektedir.



Şekil 5. Photomodeler ile resmin üç boyutlu hale getirilmesi ve ortofotonun elde edilmesi

*Figure 5. Making the picture three-dimensional and obtaining orthophoto with photomodeler software*

Eşleştirmelerden sonra yazılım hafızasındaki yapıyı oluşturabilir. Elle alınan ve dijital oluşturulan yapıların önden görünen yüzleri ortofotolar kıyaslanmıştır. Şekil 6’ta photomodeller dan elde edilen ortofoto gösterilmiştir.



**Şekil 6.** Dijital tekniklerle elde edilen Nuri Paşa Sille tarihi eser çeşmesi  
*Figure 6 Nuri Paşa Sille historical fountain obtained with digital techniques*

#### VERİLERİN KIYASLANMASI (COMPARISON OF DATA)

Çeşmelere ait verilerin kıyaslanmasında ortofotolarla çalışmalar kullanılmıştır. Manuel yaklaşımla ve dijital teknikler kullanılarak oluşturulan ortofotolar bilgisayar yardımı ile karşılaştırılmışlardır. Karşılaştırma tekniği olarak pixellerin birbirinden olan farkları alınmıştır. Ortofoto ölçekli olduğundan elde edilen pixel farkları aynı zamanda ölçü farkı anlamına da gelmektedir. Değerlendirme modeli olarak öklit uzaklığı kullanılmıştır.

#### Öklit Uzaklığı (Euclidean Distance)

Öklit uzaklığı iki nokta arasındaki doğrusal uzaklıktır. Çok boyutlu kartezyen veri uzayında iki nokta arasındaki uzaklığın doğrusal bağlantı yöntemi ile ölçülmesidir (Liwei Wang, 2005). Öklit uzaklığı mutlak büyüklüktür vektör değildir. Yön belirtmez. Yalnızca iki nokta arasındaki mesafeyi ifade eder. Uzaklık ölçüsü n boyutlu da olabilir (Liberti ve diğ. 2014).

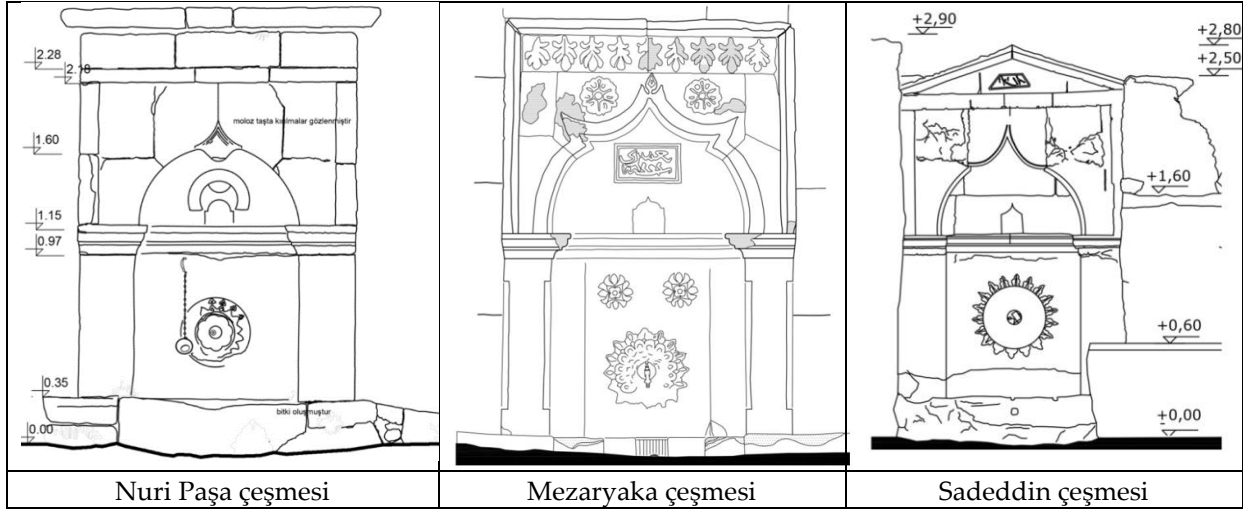
$P(P_x, P_y)$  ve  $Q(Q_x, Q_y)$  iki boyutlu düzlemde (görüntü düzleminde) noktalar olmak üzere Öklit uzaklığı:

$$\sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2}$$

Formülü kullanılarak hesaplanmaktadır. Eğer n boyutlu bir nokta var ise genel denklem şu şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned} d(\mathbf{p}, \mathbf{q}) &= d(\mathbf{q}, \mathbf{p}) = \sqrt{(q_1 - p_1)^2 + (q_2 - p_2)^2 + \dots + (q_n - p_n)^2} \\ &= \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - p_i)^2}. \end{aligned}$$

Öklit uzaklığı için elde edilen 3 adet çeşmeye ait elle ve dijital olarak oluşturulan ortofotolar Şekil 7 ve Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Elle oluşturulmuş ve AutoCad çizimi haline getirilmiş ortofotolar.

Figure 7. Handmaded drawn and converted to AutoCAD drawn orthophoto

Elle yapılmış olan çalışmalar AutoCad çalışması haline getirildikten sonra bilgisayar ortamına aktarılmış ve böylece dijital tekniklerle yapılan çalışma ile kıyaslama imkanı oluşturulmuştur. Ortofotonun özelliği ölçekli olduğundan dijital tekniklerle ve elle oluşturulan resimler arasında idealde bir farkın olmaması gerekmektedir. Her ikisinde farklı cihaz ve aygıtlar kullanılarak yapılmış olsa da ölçek değerleri ve ölçüleri aynı olduğundan resimler üst üste çakışmalıdır. Çakışmayan noktalar pixel cinsinden ölçülmüş olup hatalardaki pixel farkları ölçek değeri üstünden de tersine uzunluğa çevrilebilir. Buradaki çalışma yalnızca mutlak hatayı incelediğinden bu çalışmada hatalar tekrar uzunluk cinsine çevrilmemiştir.



Şekil 8. Dijital tekniklerle oluşturulmuş ve Photomodeler yazılımı ile elde edilmiş 3 adet tarihi sille çeşmesi.

Figure 8. 3 fountains created with digital techniques and obtained with Photomodeler software

Ortofotolar oluşturulduktan sonra resimleri üst üste koymak ve bunlar arasındaki farka bakmak iki metodu kıyaslamak için bir başlangıçtır. Pikseller arasındaki farklar aynı zamanda bir uzaklığa da işaret



etmektedir. Bu yüzden yalnızca piksel farkları hata ölçüsü olarak değerlendirilmiştir. Piksel değerleri cm cinsinden hesaplamak isterse Çizelge 1 dönüşüm tablosu olarak kullanılabilir.

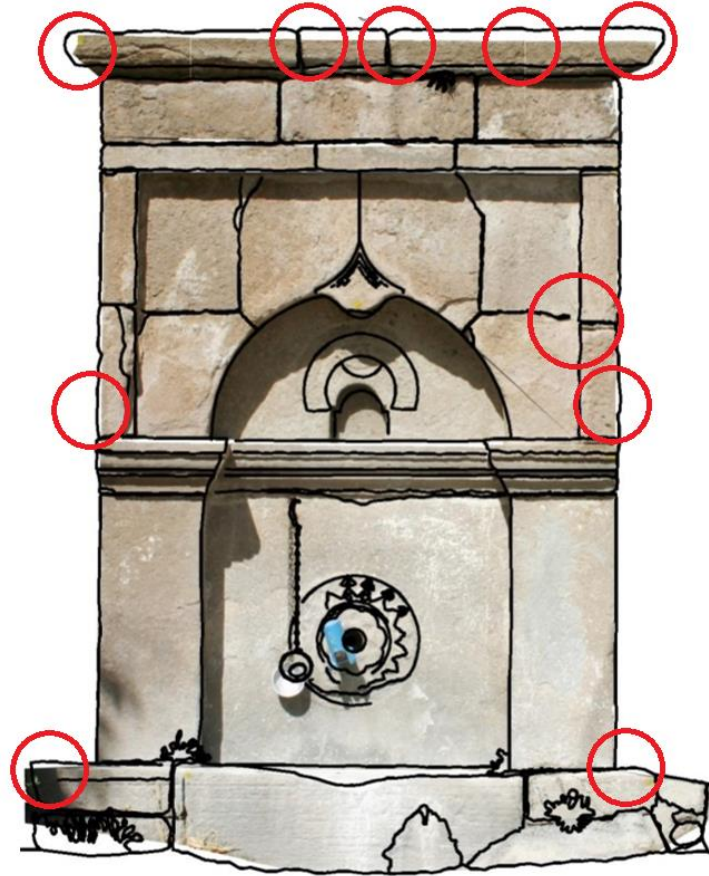
**Çizelge 1.** Çeşmelere ait piksel cm ölçeği

*Table 1. Pixel to cm scale for fountains*

	Nuri Paşa çeşmesi	Mezaryaka çeşmesi	Sadeddin çeşmesi
<b>1 piksel</b>	0,221 cm	0,058 cm	0,064 cm

## VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF DATA)

Verilerin yorumlanmasında Öklit uzaklığı kullanılmıştır. Öklit uzaklığı iki nokta arasındaki en kısa doğruyu tarif eder. Ancak yön belirtmez. Şekil 9 Nuri paşa çeşmesi için elle ve dijital olarak çizilmiş iki resmin eşleştirilmesini göstermektedir. Eşleştirilmiş olan iki ortofotonun arasındaki farkları gözle görmek mümkündür



**Şekil 9.** Nuri paşa çeşmesi için üst üste getirilerek karşılaştırılmış iki ortofoto

*Figure 9. Two orthophotos overlapped and superimposed for Nuri Paşa fountain*

Resimler arasındaki farkı görmek mümkündür. Özellikle insan boyunu geçen veya ölçü alınması zor olan yerlerdeki farklar daha barizdir. Bu yüzden dijital teknikler doğru ayarlandıklarında ve kalibrasyonlarında problem olmadığı sürece daha gerçekçi ve detaylı rölemler elde etmek mümkündür. Çizelge 2’de üç çeşmeye ait piksel cinsinden hatalar verilmiştir.







176	646	1041	647	1045	3.01	2377	3534	2545	3533	32	2026	2079	1984	2164	95.71
177	649	1036	655	1035	5.01	2379	3641	2345	3642	34	2079	2073	2078	2141	69.12
178	662	1027	665	1029	3.55	2380	3798	2341	3797	39	2141	2021	2104	2086	76.16
179	614	1033	619	1037	5.32	2387	3853	2337	3853	50	2368	1780	2366	1810	30
180	618	1020	621	1021	2.57	2386	3935	2337	3935	49	2568	1873	2559	1894	21
181	1122	1462	1128	1466	7.5	2390	4054	2335	4054	54	1485	4857	1485	4917	55
182	1138	1452	1144	1461	10.31	2389	4093	2444	4088	54.33	1733	4847	1732	4913	67
183	1001	1393	1010	1389	10.5	2387	4209	2337	4211	50.04	2081	4847	2079	4909	64
184	61	1419	76	1458	41.79	2383	4471	2332	4440	61.06	2198	4847	2198	4908	62
185	115	1425	109	1464	38.55	1884	3414	1816	3412	69.03	1651	4280	1601	4296	53.45
186	195	1436	180	1470	36.96	1990	3554	1940	3502	71.45	1818	4160	1807	4287	128.25
187	276	1450	268	1464	17.22	2043	3708	1982	3653	82.07	2211	3275	2189	3379	106.3
188	327	1434	310	1436	15.5	2033	3875	1991	3836	96.18	3345	2617	3243	2725	152.76
189	230	1394	203	1392	29	1905	4084	1876	4002	103.83	467	4540	441	4540	28
190	18	1359	167	1348	9	1810	4207	1759	4099	118.11	1299	2744	1299	2770	16
191	182	1360	181	1350	8.5	1577	4220	1590	4158	65.51	2825	2904	2803	2982	74.22
192	217	1356	217	1347	8	1313	4267	1295	4143	123.79	2999	1789	2983	1807	20.59
193	251	1356	25	1347	10	1172	4182	1165	4059	124.15	2147	3802	2127	3916	119.68
194	286	1358	286	1348	9.5	1047	4015	1049	3910	109.02	1705	3866	1665	3964	105.85
195	359	1280	35	1279	6	994	3855	1006	3749	104.81	2781	2271	2751	2283	33.29
196	614	1375	610	1360	14.08	1018	3699	1031	3596	104.81	2235	2331	2741	2773	32.06
197	584	590	59	606	19.31	1064	3549	1066	3469	82.05	2082	3392	2059	3420	36.31
198	537	621	550	635	16.65	1163	3352	1177	3348	17.09	1726	3308	1725	3398	88.51
199	235	650	222	650	12.51	1574	3247	1552	3283	44.29	2347	2844	2349	2937	93
200	232	591	223	592	7	642	3700	616	3700	30	3102	2687	3097	2775	90

Verilere ait istatistiksel değerler Çizelge 2’de verilmiştir.

### Çizelge 3. Üç çeşmeye ait hata değerlerinin istatistiksel değerlendirilmeleri

Table 3. Statistical evaluation of error values of three fountains

	Nuri Paşa Çeşmesi	Mezaryaka Çeşmesi	Sadeddin Çeşmesi
<b>maksimum</b>	41,9	1545	492
<b>minimum</b>	2,5	7	1,68
<b>ortalama</b>	11,32	47,57	54,51
<b>Ortalama Hata (cm)</b>	2,5	2,76	3,49

Hatalar yorumlandığında Mezaryaka çeşmesine ait hatanın maksimum değerinin yüksek olması çeşmenin boylu olmasına ve elle ölçü alma zorluğuna yorumlanabilir. Sadeddin çeşmesi ise daha eski ve aşınmış olduğundan aynı yorum bu çeşme içinde düşünülebilir. Bununla birlikte Nuri Paşa çeşmesindeki ortalama hatanı az olması çeşmenin daha basit ve geometrik yapıda olmasına bağlamak mümkündür.

## SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Tarihi envanterlerin daha hassas bir biçimde elde edilmesini sağlamak, kültürel mirasın sayısallaştırılarak dijital ortamda muhafazasına imkan sunmak, belgelenen öğelerin üzerinde istenilen ölçümlerin sürekli bir biçimde yapılması, ölçümlenmesi zor ve tehlikeli olan alanların tespitinde, hasarlı ve can güvenliği olmayan yapılarda, detayların çizilmesinde, yapıda zamanla meydana gelebilecek deformasyonların karşılaştırılmasında, istenilen hassasiyetin sağlanabilmesinde kolaylıklar sağlamak, daha az ekiple arazi çalışmalarının tamamlanabilmesi, arazi çalışmalarının tamamlanmasının ardından yapı ile ilgili her türlü bilginin oluşturulan model üzerinden elde edilebilmesi, görece olarak daha düşük maliyet, arazi çalışmalarının ardından tüm çalışmaların büro da gerçekleştirilebilmesi yersel fotogrametrisinin avantajları arasında sayılabilir. Tüm bunlar ancak yeterli sayıda kaliteli yüksek çözünürlüklü resim ile mümkün olmaktadır. Bazen ölçü alma zorlukları da (yetersiz mesafe, grift yapı, motifli ve deforme yüzeyler gibi) bu problemlere eşlik edebilir. Bu çalışmada da yukarıda bahsedilen avantaj ve dezavantajlarla karşılaşılmıştır.

Piksel bazında yapılan görüntü işleme yöntemiyle karşılaştırmada hata paylarının birinci çeşme için ortalama 11.3227px, ikinci çeşme için 47.56685px, üçüncü çeşme içinse 54.51495px olduğu bulunmuştur. Her bir resim için 1 pikselin kaç cm olduğu hesaplanmış, yine buna göre çeşmelerde sırasıyla 2.50, 2.76 ve 3.49 olarak ortalama hatalar cm cinsinden hesaplanmıştır.

Klasik yöntemlerde iskele kurularak tarihi eserin her köşesi teker teker ölçülüp çizilmek sureti ile rölöveler hazırlanmaktadır. Klasik ölçme tekniği hem zaman, hem doğruluk, hem de pratiklik açısından tercih edilen bir yöntem olmaktan çıkmıştır. Teknolojik imkanlarla yapılan Mimarlık fotogrametrisinin koruma ve dokümantasyon çalışmalarına katkısı net olarak görülmektedir. Fotogrametri yöntemiyle arazi çalışmalarındaki sürenin ve emeğin en aza inmesiyle diğer çalışmalar için daha fazla zaman kalmaktadır. Oluşturulan model yardımıyla turizmden, inşaat mühendisliğine, mimarlıktan, görsel sanatlara kadar birçok alana bilgi aktarılabilir.

Mimari fotogrametri, özellikle sokak çeşmesi gibi küçük ölçekli yapılar veya küçük ölçekli arkeolojik buluntuların üç boyutlu modellenmesi ve dijital ortamda saklanması, sunumu, sanal müzelerde sergilenmesi, yok olması durumunda ise bir veri olarak elde bulundurulmasına imkan verdiği için oldukça faydalı ve gerekli bir yöntemdir.

Karşılaştırma çalışmasında elde edilen bilgilere göre klasik yöntemde hatalar her ne kadar kabul edilebilir gibi görünse de hata payları bu ölçekte bir yapı baz alındığında yüksek bir değerdir.

#### KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenen 2004/038 Proje No'lu "Tarihi Sille çeşmelerinin dijital fotogrametrik envanterinin oluşturulması ve sonuçlarının klasik yöntemle karşılaştırılması" çalışmasından üretilmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aköz, A., Ürekli, B., 1997, "Tarihi Seyir İçerisinde Sille'de (Konya) Müslim-Gayrimüslim Yerleşimi", *Ata Dergisi*, Konya, S.VII, s.193-214
- Bahar, H., 1994, "Takkeli Dağ (Kevele Kalesi) ve Konya Tarihi Bakımından Önemi", *S.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, S.3, Konya, s.313-321.
- Erdem R., Yıldırım H., Çiftçi Ç., Dülgerler O. N., Çıbıkdiken A. O., Levend S., Erdoğan A., 2010, "Sille, Bir Koruma Geliştirme Planı ve Sonrası", *S.Ü. Müh.- Mim. Fak. Dergisi*, C.25.
- Erdoğan, A., 2014, *Geleneksel Sille Yerleşkesinde Turizm Amaçlı Yeniden İşlevlendirme: Bir Stüdyo Çalışması Üzerinden Durum Değerlendirmesi*, Sille Düşleri: İmgeler, Semboller, İzler, Ed: Ebru Erdoğan, Selçuklu Belediyesi Kültür Yayınları, Konya.
- Küçük, M., (2001), "Mevlânâ Sille'ye Uğradı", *Popüler Tarih* (Eylül 2001), s.82-85.
- Küçükdağ, Y., 2005, "Konya Mevlana Dergâhı ve Türbe Hamamı'na Dair İki Mevlevî Vakfiyesi", *Türk Tasavvuf Araştırmaları, Çizgi Kitabevi*, Konya, s.73-116.
- Liwei Wang, Yan Zhang and Jufu Feng, "On the Euclidean distance of images," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 27, no. 8, pp. 1334-1339, Aug. 2005, doi: 10.1109/TPAMI.2005.165.
- Liberti, L., Lavor, C., Maculan, N., & Mucherino, A. (2014). Euclidean distance geometry and applications. *SIAM review*, 56(1), 3-69.
- Özönder, H., 1998, *Sille (Tarih- Kültür- Sanat)*, Konya.
- Sarıköse, B., 2009, *Sille Bin Yıllık Birliktelik Tarihçesi ve Sosyo-Ekonomik Yapısı*, Çizgi Kitabevi, Konya.
- Ulusoy, A., 1951, *Sille*, Yeni Kitap Basımevi, Konya.
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Orthophoto> son erişim: 11.11.2020



## ÖNCEDEN EĞİTİLMİŞ DERİN AĞLAR İLE GÖĞÜS RÖNTGENİ GÖRÜNTÜLERİ KULLANARAK PNÖMONİ SINIFLANDIRILMASI

Mehmet Bilal ER

Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, TÜRKİYE  
[bilal.er@harran.edu.tr](mailto:bilal.er@harran.edu.tr)

(Geliş/Received: 14.09.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 05.12.2020)

**ÖZ:** Pnömoni, bakterilerin, virüslerin veya mantarların neden olabileceği bir akciğer enfeksiyonudur. Enfeksiyon, akciğerlerin hava keselerinin iltihaplanmasına ve sıvı veya irin ile dolmasına neden olur. Ciddi ve hayatı tehdit eden bir hastalık olabilir. Dünya genelinde her yıl pnömoni nedeniyle çok sayıda kişi ölmektedir. Pnömoninin erken tespiti ve tedavisi, ölüm oranlarını önemli ölçüde azaltabilmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada pnömoniyi tespit etmek için röntgen görüntüleri kullanarak önceden eğitilmiş derin öğrenme modellerine dayanan yöntem önerilmektedir. Göğüs röntgen görüntülerini pnömoni ve pnömoni olmayan iki sınıfta sınıflandırmak için çeşitli önceden eğitilmiş Evrişimsel Sinir Ağları özellik çıkarıcı olarak kullanılmıştır. Önceden eğitilmiş derin öğrenme modelleri olarak AlexNet, VGG16, ResNet (ResNet18, ResNet50, ResNet101) modelleri tercih edilmiştir. Bu modellerden elde edilen özellikler birleştirilerek hibrit özellik vektörü elde edilmiştir. Sınıflandırıcı olarak Destek Vektör Makineleri (DVM) ve derin öğrenme modellerinin son katmanında bulunan Softmax kullanılmıştır. Deneyler literatürde yaygın kullanılan veri seti üzerinde yapılmıştır. En yüksek sınıflandırma başarısı %98,32 olarak hibrit özellik vektöründen elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Pnömoni, Evrişimsel Sinir Ağlar, AlexNet, ResNet, VGG16

### Classification of Pneumonia Using Pre-Trained Deep Networks with Chest X-Ray Images

**ABSTRACT:** Pneumonia is a lung infection that can be caused by bacteria, viruses, or fungi. The infection causes the lungs to become inflamed and filled with fluid or pus. It can be a serious and life-threatening disease. Many people die every year due to pneumonia worldwide. Early detection and treatment of pneumonia can significantly reduce mortality. For this reason, this research is to propose a method based on pre-trained deep network models using x-ray images to detect pneumonia. Various pre-trained Convolutional Neural Networks were used as feature extractors to classify chest x-ray images into two classes without pneumonia and pneumonia. AlexNet, VGG16, ResNet (ResNet18, ResNet50, ResNet101) models are preferred as pre-trained deep network models. The hybrid feature vector is obtained by combining the features obtained from these models. As the classifier, Support Vector Machines (SVM) and Softmax in the last layer of deep networks are used. Experiments are carried out on the data set commonly used in the literature. The highest classification success is obtained from the hybrid feature vector as 98.32%.

**Keywords:** Pneumonia, Convolutional Neural Networks, AlexNet, ResNet, VGG16

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Pnömoni, en sık virüs veya bakterilerin neden olduğu bir akut solunum yolu enfeksiyonu türüdür ve her yaşta insanın hayatını hafif ya da ağır şekilde tehdit edebilir. Sağlıklı bir insan nefes aldığı anda akciğerler hava ile dolan alveol denilen küçük keselerden oluşur. Bir birey zatürree olduğunda, alveoller

irin ve sıvı ile doldurulur, bu da nefes almayı ağırlı hale getirir ve oksijen alımını sınırlar. Bu enfeksiyonlar genellikle enfekte kişilerle doğrudan temas yoluyla yayılır. Özellikle 5 yaşın altındaki çocuklar dahil olmak üzere yıllık bazda 150 milyondan fazla insan pnömoni ile enfekte olmaktadır (Rudan ve diğ., 2004). Semptomlar bir kişinin yaşına ve pnömoniyeye neyin neden olduğuna bağlı olarak değişir. Fakat sık görülen semptomlar, çok hızlı nefes alma, hırıltılı seslerle nefes almak, ateş, öksürük ve göğüs ağrısı gibidir. Fakat bu hastalık antiviral ilaçlar ile iyi tedavi edilebilir.

Pnömoninin daha hızlı teşhisi ve doğru tedavinin uygulanması, bu hastalığın ölümcül seyretme oranını önemli ölçüde azaltır. (Aydoğdu ve diğ., 2010). Göğüs röntgenleri şu anda pnömoni teşhisi için en sık kullanılan yöntemdir (WHO, 2001). Fakat pnömoninin röntgen görüntüleri çok net değildir. Bakteriyel veya viral pnömoni görüntüleri bazen uzmanlar tarafından yanlış sınıflandırılır, bu da hastalara yanlış ilaç verilmesine yol açar ve bu duruma bağlı olarak hastaların durumları kötüleşebilir (Davies ve diğ., 1996). Pulmoner ödem, kanama, akciğer kanseri gibi hastalıklar pnömoni teşhisini daha zor ve karmaşık hale getirir. Ayrıca radyologların pnömoni tanısı koyma kararlarında önemli derecede öznel tutarsızlıklar vardır. Bu nedenle, doktorların pnömoni teşhisi koymalarına yardımcı olmak için bilgisayar destekli tanı sistemlerine acil bir ihtiyaç vardır.

Günümüzde, beyin tümörü ve meme kanseri tespiti gibi birçok medikal alanda bilgisayar destekli çözümler kullanılmaktadır (Kallianos ve diğ., 2019). İstatistiksel analiz, makine öğrenimi ve derin öğrenme, bilgisayar destekli tanı sistemlerinde oldukça güçlü araçlardır ve tıbbi görüntüleme alanında yaygın olarak kullanılır. Bu araştırmanın amacı, göğüs röntgeni görüntüsünde en çok pnömoniyeye benzeyen alanları bilgisayar destekli tanı sistemleri ile vurgulayarak pnömoni teşhisini kolaylaştırmaktır.

Bu çalışmanın ana katkıları aşağıdaki gibidir:

- Pnömoni tespitinde derin öğrenmeye dayalı bir yöntem önerilmiştir.
- Pnömoni hastalığının derin özelliklerle sınıflandırılabilmesi gösterilmiştir.
- Literatürdeki çalışmaların aksine daha önceden eğitilmiş derin öğrenme modelleri özellik çıkarıcı olarak kullanılmıştır.
- Önceden eğitilmiş derin mimarilerden elde edilen hibrit özellik vektörü sayesinde sınıflandırma başarısını artırılmıştır.

Bu makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2’de literatürdeki çalışmalar gözden geçirilmiştir ve aralarındaki farklar ortaya koyulmuştur. Bölüm 3 ve 4’de materyal ve önerilen yöntem tanımlanmıştır. Bölüm 5’de çalışmada kullanılan veri seti ve pnömoni hastalarını tespit edilmesiyle ilgili deneysel uygulamalar verilmiştir. Bölüm 6’de ise araştırmanın bulguları tartışılmıştır.

## İLGİLİ ÇALIŞMALAR (RELATED WORKS)

Göğüs röntgeni görüntülerini farklı sınıflara ayırma problemi tıbbi tanı alanında önemli ölçüde araştırılmıştır bu sorunu ele alan birçok araştırma makalesi yayınlanmıştır. Pnömoni hastalığının sınıflandırılması ile ilgili önemli çalışmalar bu bölümde verilecektir.

(Rajpurkar ve diğ., 2017), araştırmacılar, ChestXray14 veri setindeki göğüs röntgeni görüntülerini kullanarak pnömoniyi tespit etmek için derin bir ağ modelini eğitmişlerdir. 121 katmalı Evrişimsel sinir ağ (ESA) modeli kullanılarak sınıflandırma işlemi yapılmıştır. Pnömoniyi tespit etmenin yanı sıra oluşturulan model sayesinde 14 başka hastalık tespit edilebilmektedir.

(Guan ve diğ., 2019), göğüs röntgeni görüntülerinden toraks hastalığını saptamak için bir ESA modeli yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu araştırma ChestXray14 veri seti üzerinde yapılmıştır. Modellerinin performansını diğer modellerle karşılaştırılmıştır. Yazarların yaklaşımları daha iyi performans göstermiştir.

(Rubin ve diğ., 2018), MIMIC-CXR veri setini kullanarak göğüs röntgeni ön ve yan görüntülerinin büyük ölçekli otomatik olarak tanınmasını sağlayan ikili bir ESA sunulmuştur. Bu model, toraks hastalığını tespit etmek için kullanılmıştır. Veri artırma ve piksel normalleştirme tekniklerini kullanarak modellerinin performansını artırmayı amaçlamışlardır. Verilerin %70’i eğitim, %20’si test ve %10’u doğrulama için kullanılmıştır. Genel olarak %72,1 doğruluk elde edilmiştir.



(Anthimopoulos ve diğ., 2016), akciğer hastalığı paternlerini tanımlamak için bir ESA modeli sunmuşlardır. Önerilen model, ReLu aktivasyon fonksiyonu, ortalama havuzlama katmanları, üç tamamen bağlı katman ve 5 evrimsel katmanından oluşur. Veri setinde yedi sınıf ve 14696 görüntü bulunur. Modelden %85,5 doğruluk elde edilmiştir.

(Jain ve diğ., 2020), röntgen görüntüleri kullanarak pnömoniye tespit etmek için ESA modelleri kullanılmıştır. Çeşitli hiperparametreler ve evrimsel katmanların sayısını değiştirerek, x-ışını görüntülerini pnömoni ve pnömoni olmayan iki sınıfta sınıflandırmak için çeşitli ESA modelleri eğitilmiştir. Araştırmada altı tane modelden bahsedilmiştir ve %92,31 doğruluk elde edilmiştir.

(Sirazitdinov ve diğ., 2019), göğüs röntgeni görüntülerinde pnömoninin otomatik tespiti ve lokalizasyonu için makine öğrenmesi uygulaması geliştirilmiştir. Pnömoni tespiti ve lokalizasyonu için iki adet ESA mimarisi önerilmiştir. Veri seti Kaggle'dan alınmıştır ve 26684 kayıt vardır. %79,30 duyarlılık değeri ile otomatik pnömoni teşhisi için güvenilir bir çözüm geliştirilmiştir.

(Rahman ve diğ., 2020), dijital röntgen görüntülerini kullanarak bakteriyel ve viral pnömoniye otomatik olarak tespit etmek amaçlanmıştır. Pnömoninin doğru tespitinde yapılan ilerlemeler hakkında ayrıntılı bilgiler sunulmuştur ve daha sonra yazarlar tarafından benimsenen metodolojiye yer verilmiştir. Transfer eğitimi için dört farklı önceden eğitilmiş ESA modeli kullanılmıştır. Bu modeller, AlexNet, ResNet18, DenseNet201 ve SqueezeNet'dir. Veriler ön işlemden geçirildikten sonra transfer öğrenme işlemi uygulanarak sınıflandırma yapılmıştır. Deneysel sonuçlardan %98 doğruluk elde edilmiştir.

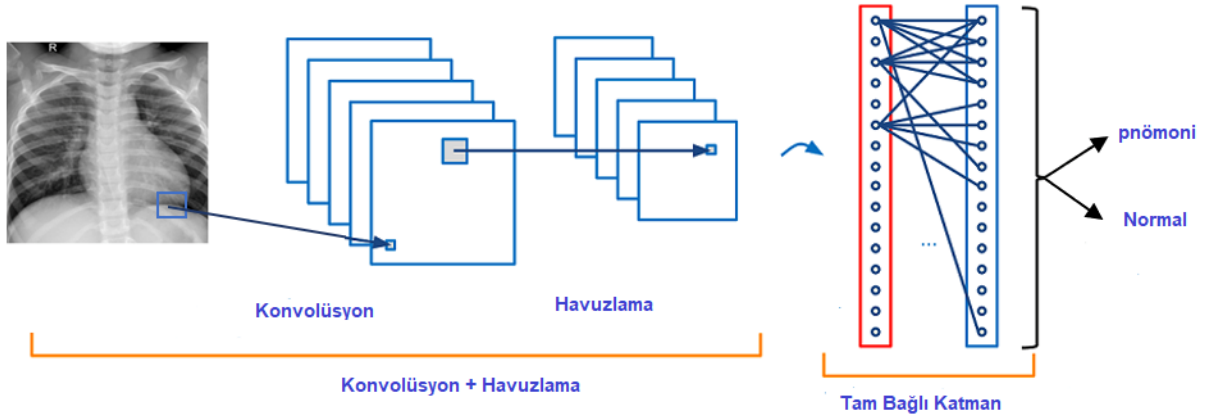
(Stephen ve diğ., 2019), göğüs röntgeni görüntü örnekleri koleksiyonundan pnömoni varlığını sınıflandırmak ve tespit etmek için sıfırdan eğitilmiş ESA modeli önermektedir. Dikkat çekici bir sınıflandırma performansı elde etmek için sıfırdan eğitilmiş bir ESA modeli tasarlanmıştır. ESA modelinin sınıflandırma doğruluğunu geliştirmek için birkaç veri artırma algoritması uygulanmıştır.

(Kumar Acharya & Satapathy, 2020), derin Siyam temelli sinir ağını kullanarak göğüs radyografisi görüntüsünden pnömoninin otomatik olarak saptanması önerilmektedir. Viral ve bakteriyel pnömoni enfeksiyonları, göğüs röntgeni görüntüsünün iki segmentine yayılmış beyaz madde miktarı analiz edilerek ayırt edilir. Derin Siyam ağı, problemi hesaplamak veya sınıflandırmak için iki giriş görüntüsünün simetrik yapısını kullanır. Kaggle veri kümesi, modeli eğitmek ve doğrulamak için kullanılmıştır.

(Varshni ve diğ., 2019), özellik çıkarıcılar olarak önceden eğitilmiş ESA modelleri tercih edilmiştir. Anormal ve normal göğüs röntgenlerinin sınıflandırılması için farklı makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmıştır. Çalışmadaki amaç için en uygun ESA modelini analitik olarak belirlemektir.

## EVRIŞİMSSEL SİNİR AĞLARI (CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS)

ESA'lar görüntü sınıflandırmasındaki gelişmiş performansları nedeniyle oldukça popülerdir. Ağdaki evrişim katmanındaki filtreler, görüntüdeki uzaysal ve zamansal özelliklerin çıkarılmasına yardımcı olur. Bir KSA modeli genel olarak üç yapı taşından oluşur. İlk olarak özelliklerin öğrenilmesi için evrimsel katmanı yer alır. İkinci olarak, görüntüyü yeniden örnekleme, boyutu azaltmak ve hesaplama maliyetini düşürmek için havuzlama katmanı bulunur. Son olarak ise sınıflandırma özelliğine sahip tam bağlı katmanlar bulunur. Tam bağlı katmanda bulunan nöronlar bir önceki katmandaki nöronlara tam bağlı şekildedir (Er & Aydılek, 2019). ESA'nın mimari görünümü Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. ESA Mimarisinin Genel Görünümü

Figure 1. General View of CNN Architecture

### ÖNERİLEN YÖNTEM (PROPOSED METHOD)

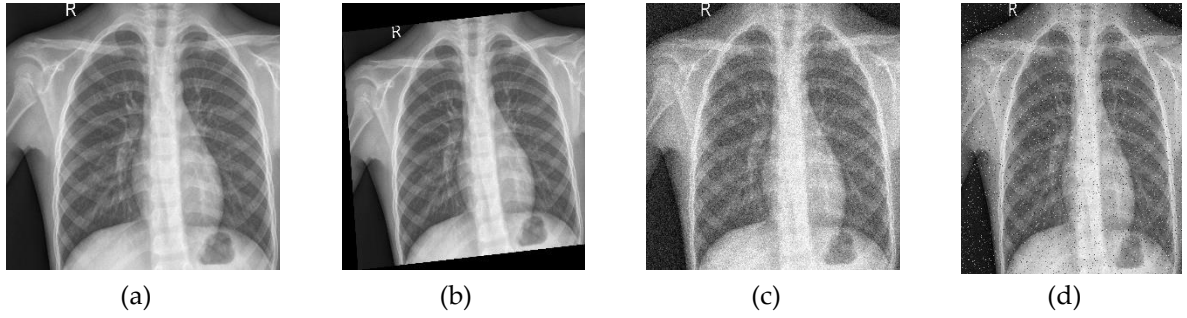
Pnömoni tespiti için önerilen yöntem üç adımdan oluşmaktadır. İlk olarak röntgen görüntüleri ön işleminden geçirilerek yeniden boyutlandırılmıştır. Daha sonra eğitim kümesindeki veri sayısını arttırmak için veri artırma işlemi uygulanmıştır ve röntgen görüntüleri önceden eğitilmiş ESA modellerinde girdi olarak verilmiştir. Önceden eğitilmiş derin öğrenme modeli olarak AlexNet VGG16, ResNet18, ResNet50 ve ResNet101 özellik çıkarıcı olarak kullanılmıştır. Son olarak DVM ve Softmax sınıflandırıcılar kullanılarak röntgen görüntüleri sınıflandırılmıştır. Her adımın detayı aşağıdaki alt bölümlerde açıklanmıştır. Önerilen yöntem şekil 3’de verilmiştir.

#### Ön İşleme (Pre-Processing)

Farklı derin öğrenme modelleri için görüntü girişi farklı olduğundan X-Ray görüntülerini yeniden boyutlandırılmıştır. AlexNet için görüntüler  $227 \times 227$  piksele, VGG16, ResNet18, ResNet50 ve ResNet101 için ise görüntüler  $224 \times 224$  piksele ayarlanmıştır.

#### Veri Arttırma (Data Augment)

ESA mimarileri büyük veri setleri ile daha iyi performans gösterirler. Derin öğrenme modellerinin performansı yeni veri toplamak yerine mevcut verileri artırarak geliştirilebilir. Çalışmamızdaki veri setinin boyutu çok büyük olmadığı için veri artırma işlemi uygulanmıştır. Veri büyütme tekniklerini kullanarak nispeten daha küçük veri kümesi büyük bir veri tabanına dönüştürülür ve derin öğrenme algoritmaları bu veri setleri ile eğitilir. Veri çoğaltmadaki temel ilke, mevcut verilere bazı deformasyon işlemi uygulayarak ek eğitim verileri oluşturulmasıdır (Salamon & Bello, 2017). Görüntüyü farklı açılarda döndürmek, yatay olarak dikey döndürmek, görüntüye gürültü ve renk manipülasyonu eklemek gibi birçok veri artırma tekniği vardır. Bu çalışmada veri artırma için 3 farklı teknik uygulanmıştır. Bunlar, rastgele döndürme, Gauss filtresi ve tuz ve biber gürültüsü şeklindedir. Orijinal görüntülerin kenarlarında siyah alanlar olduğu için döndürme işleminden sonra oluşan siyah alanlar üzerinde herhangi bir işlem yapılmamıştır. Orijinal röntgen görüntüsü ve veri artırma tekniklerinin uygulandığı görüntüler şekil 2’de verilmiştir.



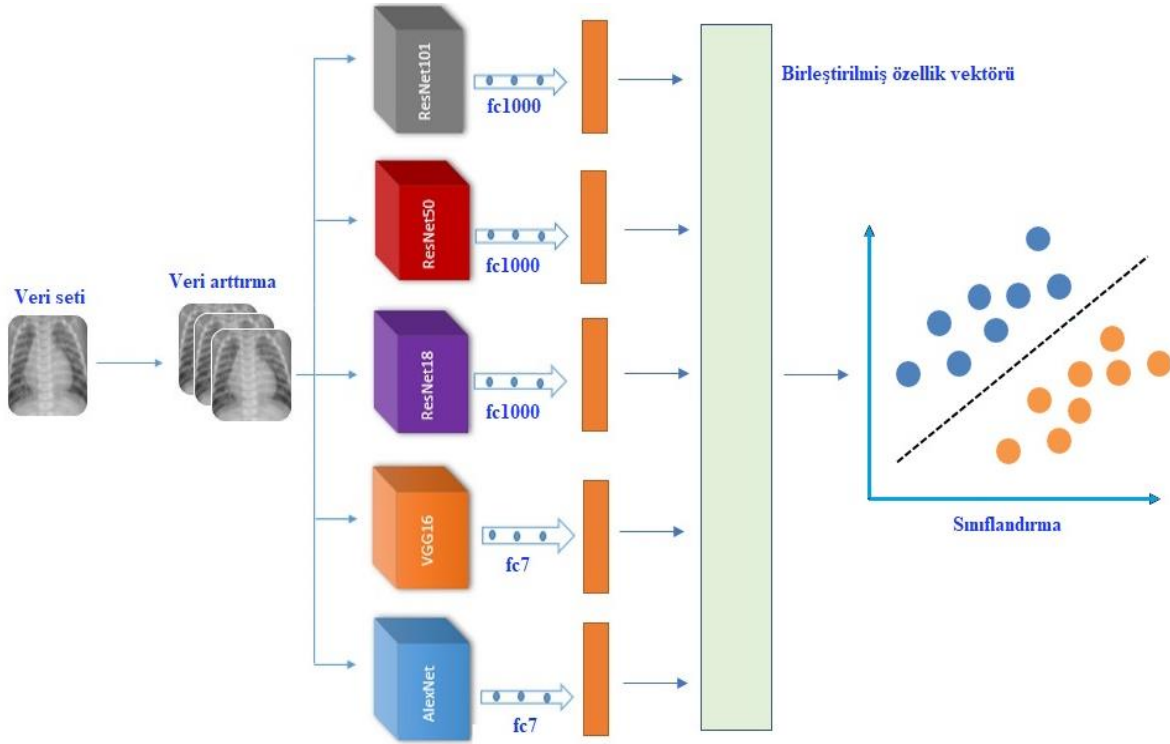
**Şekil 2:** (a) Orijinal Göğüs Röntgeni görüntüsü (b), Döndürmeden Sonrası Göğüs Röntgeni görüntüsü (c), Gauss filtresi Sonrası Göğüs Röntgeni görüntüsü (d) Tuz ve biber filtresi Sonrası Göğüs Röntgeni görüntüsü

*Figure 2: (a) Original Chest X-ray image (b), Chest X-ray image after Rotation (c), Chest X-ray image after Gaussian filter (d) Chest X-ray image after salt and pepper filter*

### Önceden Eğitilmiş Evrişimsel Sinir Ağlarından Özellik Çıkarma (Extracting Features From Pre-Trained Convolution Neural Networks)

Bu çalışmada, iyi bilinen beş tane önceden eğitilmiş derin öğrenme modelleri pnömoni tespiti için kullanılmıştır. AlexNet modeli, ImageNet veri tabanında bulunan yaklaşık 1.2 milyon görüntü kullanılarak eğitilmiştir (Russakovsky ve diğ., 2014). Önceden eğitilmiş AlexNet modeli genelde olarak 5 evrişimsel ve 3 tam bağlı katmandan oluşur. Önceden eğitilmiş VGG16 mimarisi, ILSVRC 2014 yarışmasında Simonyan ve Zisserman tarafından geliştirilmiştir. Temel olarak 13 evrişimsel, 3 tam bağlı katmanından oluşan bir modeldir. Mimaride havuzlama, tam bağlı, ReLu, Dropout ve Softmax katmanlarıyla birlikte toplamda 41 katman yer almaktadır. Girdi katmanında yer alacak görüntü 224x224x3 boyutundadır. Son katman ise sınıflandırma katmanıdır. Boyut azaltmak için AlexNet'e benzer şekilde evrişimsel katmanlarından bazılarını havuzlama katmanı izler (Zisserman, 2014). ResNet birçok varyasyonları vardır ve yaygın olarak kullanılan ResNets18, ResNet50 ve ResNet101'dir. ResNet 2015 yılında düzenlenen ILSVRC yarışmasında %3,37 ile en düşük hata oranını sağlayarak birinci olmuştur. Bu çalışmada, önceden eğitilmiş ResNets (ResNet18, ResNet50, ResNet101) modelleri kullanılmıştır. Bu ağlar sırasıyla 18 (72 alt katman), 50 (177 alt katman) ve 101 (347 alt katman) katmanına sahiptir.

Temel olarak, AlexNet, VGG16 ve ResNet özellik çıkarıcı katmanlar olarak kullanılabilen evrişimsel ve tam bağlantılı katmanlara sahiptir. AlexNet ve VGG16 mimarilerinin fc7 katmanı 4094 nörona sahiptir ve bu katman özellik çıkarıcı katman olarak seçilmiştir. ResNets18, ResNet50 ve ResNet101 ağların hepsinde ise fc1000 (1000 nöron) katmanı bulunur ve bu katman özellik çıkarıcı katman olarak kullanılmıştır. Son olarak her modelden çıkarılan birleştirilerek hibrit özellik vektörü elde edilmiştir.



Şekil 3. Önerilen Yöntem  
Figure 3. Proposed Method

### Sınıflandırma İşlemi (Classification)

Öncede eğitilmiş modellerinin fc7 ve fc1000 katmanından derin özellikler çıkarılmıştır ve bu derin özellikler sınıflandırıcıları eğitmek için kullanılmıştır. Önceden eğitilmiş derin modelinin sınıflandırma katmanında genellikle Softmax kullanılır. Bu çalışmada sınıflandırma için Softmax ve doğrusal DVM kullanıldı. Softmax formülü 1’de verilmiştir. Softmax, nöronlardaki çıkış verilerini 0 ve 1 aralığına getirir. Burada N toplam örnek sayısı,  $x_i$  ise i’nci ağırlıklı giriş örneğidir.

$$\text{softmax}(x)_j = \frac{e^{x_j}}{\sum_{n=1}^N e^{x_n}} \quad \text{for } j=1, \dots, N \quad (1)$$

DVM algoritmasının amacı, N-boyutlu bir alanda veri noktalarını ayrı ayrı sınıflandıran bir hiper düzlem bulmaktır. İki veri noktası sınıfını ayırmak için seçilebilecek birçok olası hiper düzlem vardır. Hedef her iki sınıfın veri noktaları arasındaki maksimum mesafeyi bulmaktır (Kabir ve diğ., 2016). Marj mesafesini en üst düzeye çıkarmak, gelecekteki veri noktalarının daha doğru bir şekilde sınıflandırılabilmesini sağlayacaktır.

$\{x_i, i = 1, \dots, n\}$  giriş vektörü  $y_i \{-1, 1\}$  iki sınıftan birine aittir, hiper düzlem şu şekilde tanımlanır:

$$w_0 \cdot x + b_0 = 0 \quad (2)$$

Burada  $w$  ağırlık vektörüdür,  $x$  giriş vektörüdür,  $b$  bir bias dır. Belirli bir  $w$  ve  $b$  için, veriler aşağıdaki durumlarda doğrusal olarak ayrılabilir:

$$w \cdot x_i + b \geq 1 \quad \text{if } y_i = 1 \quad (3)$$

$$w \cdot x_i + b \leq -1 \quad \text{if } y_i = -1 \quad (4)$$

## DENEYSEL UYGULAMALAR (EXPERIMENTAL APPLICATIONS)

### Veri Seti (Data Set)

Bu çalışmada çözünürlüğü 400p ile 2000p arasında değişen 5856 göğüs röntgeni görüntüsünden oluşan kaggle veri seti kullanılmıştır (Mooney, 2020). 5856 göğüs röntgeni görüntülerinden 1583'ü normal, 4273'ü ise pnömoni olarak etiketlenmiştir. Veri setinin %70'i eğitim, %30'u ise test için kullanılmıştır. Ayrıca veri artırma işlemi sonucu veri setinin boyutu dört katına çıkarılmıştır. Veri artırma öncesi ve sonrası farklı sınıflardaki veri sayıları Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Veri Artırma Öncesi ve Sonrası Veri Sayısı

*Table 1. Number of Data Before and After Data Augment*

Veri	Veri Artırma Öncesi		Veri Artırma Sonrası	
	Test	Eğitim	Test	Eğitim
Normal	475	1108	1900	4432
Pnömoni	1282	2991	5128	11964

### DeneySEL Sonuçlar (Experimental Results)

Önerilen yöntemin başarımlı kriterleri doğruluk, kesinlik ve F-skoru oranlarına dayalı olarak yapılmıştır.

- Yanlış pozitifler (YP): negatif sınıftan olan, pozitif olarak tahmin edilen örnekler.
- Yanlış negatifler (YN): gerçek sınıfı pozitif olan negatif olarak tahmin edilen örnekler.
- Doğru pozitifler (DP): pozitif sınıfa ait doğru tahmin edilen örnekler.
- Doğru negatifler (DN): negatif sınıfa ait olarak doğru tahmin edilen örnekler.
- Doğruluk =  $\frac{|DN|+|DP|}{|YN|+|YP|+|DN|+|DP|}$  (5)

Kesinlik (P), pozitif bir tahminin doğru olma olasılığını tahmin eden bir ölçüdür. Kesinlik ölçümü denklem 6'de verilmiştir.

$$\text{Kesinlik}(P) = \frac{|DP|}{|DP|+|YP|} \quad (6)$$

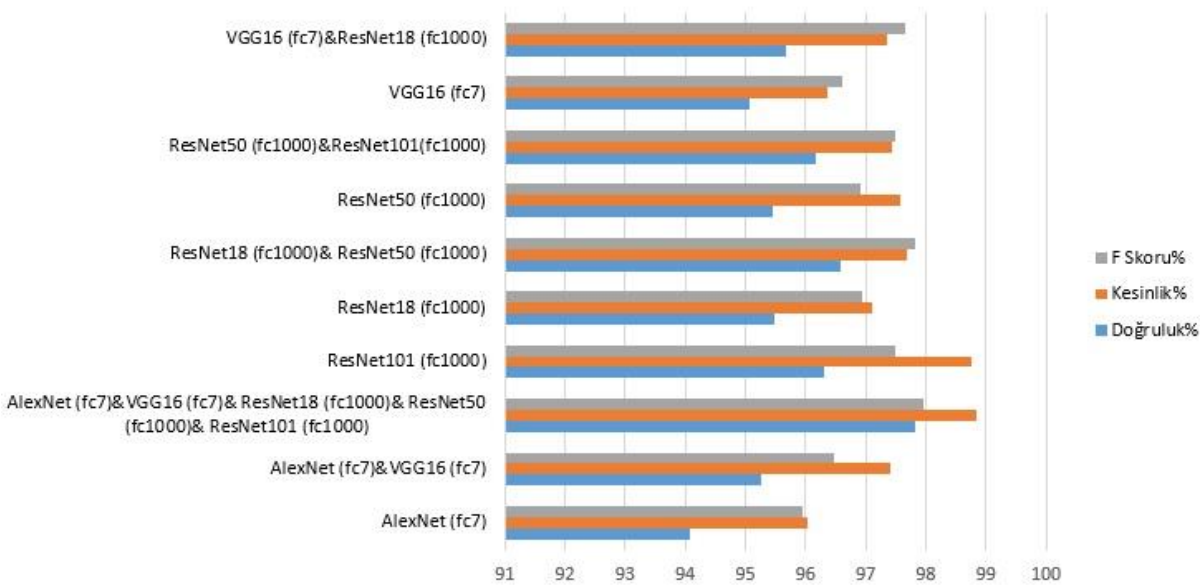
F-skoru, pozitif kestirim oranı ve duyarlılık ölçülerinin uyumlu bir ortalaması olup denklem 7'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$F - \text{skor} = \frac{2*|DP|}{2*|DP|+|YP|+|YN|} \quad (7)$$

Veri setlerinden rastgele seçilen verilerin bir kısmı eğitim için bir kısmı da test için kullanılmıştır. Veriler 5 kat çapraz doğrulama tekniği kullanılarak test ve eğitim için ayrılmıştır. Çizelge 2'de veri artırma işleminin uygulanmasından önce elde edilen sınıflandırma sonuçları verilmiştir. Veri artırma öncesi en yüksek doğruluk %97,81 olarak AlexNet (fc7)&VGG16 (fc7)& ResNet18 (fc1000)& ResNet50 (fc1000)& ResNet101 (fc1000) hibrit özellik vektörü ve DVM sınıflandırıcı ile elde edilmiştir. Veri artırma öncesi her modelden elde edilen sonuçların karşılaştırması şekil 4'de verilmiştir. Çizelge 3'de veri artırma işleminin uygulanmasından sonra elde edilen sınıflandırma sonuçları verilmiştir. Veri artırma sonrası en yüksek doğruluk %98,32 olarak AlexNet (fc7)&VGG16 (fc7)& ResNet18 (fc1000)& ResNet50 (fc1000)& ResNet101 (fc1000) hibrit özellik vektörü ve DVM sınıflandırıcı ile elde edilmiştir. Beklenildiği gibi veri artırma sonrası sınıflandırma başarımlı artmıştır. Veri artırma öncesi her modelden elde edilen sonuçların karşılaştırması şekil 5'de verilmiştir. Veri artırma öncesi ve sonrası en iyi sınıflandırma sonuçlarına ait karışıklık matrisleri şekil 6'de verilmiştir.

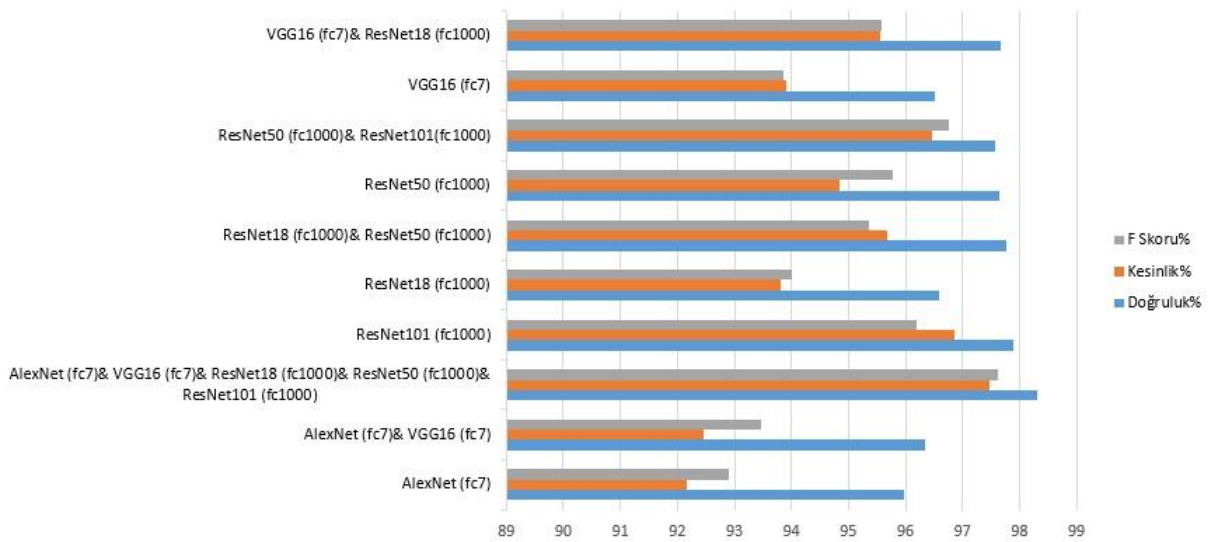
**Çizelge 2. Veri Artırma Öncesi Sınıflandırma Sonuçları***Table 2. Classification Results Before Data Augment*

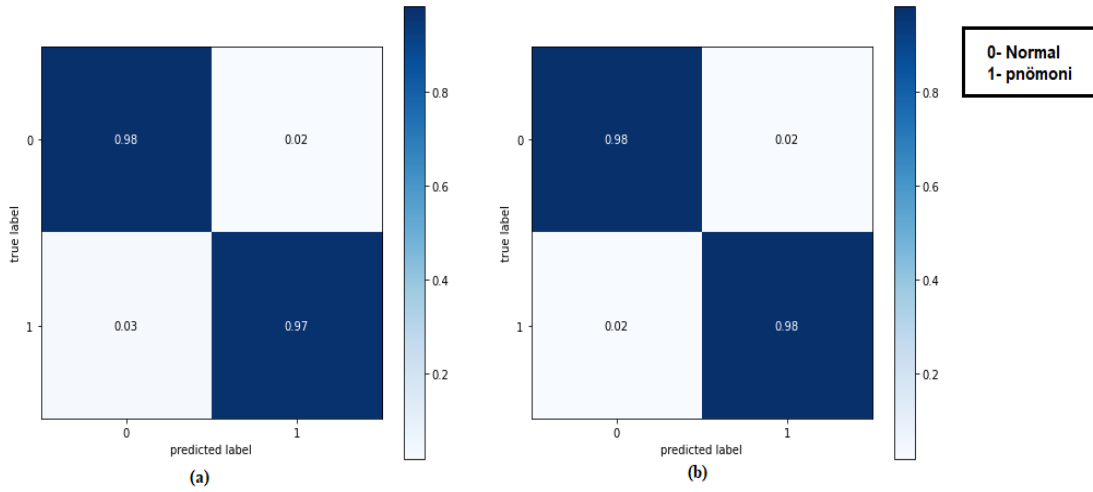
Model	Sınıflandırıcı	Doğruluk %	Kesinlik %	F Skoru %
AlexNet (fc7)	Softmax	94,08	96,02	95,94
VGG16 (fc7)	Softmax	95,06	96,35	96,61
ResNet18 (fc1000)	Softmax	95,42	96,96	96,89
ResNet50 (fc1000)	Softmax	95,45	97,58	96,90
ResNet101 (fc1000)	Softmax	95,79	98,36	97,15
AlexNet (fc7)	DVM	93,74	95,71	95,71
VGG16 (fc7)	DVM	94,78	96,11	96,41
ResNet18 (fc1000)	DVM	95,48	97,11	96,93
ResNet50 (fc1000)	DVM	95,16	97,19	96,70
ResNet101 (fc1000)	DVM	96,30	98,75	97,50
AlexNet (fc7)&VGG16 (fc7)	Softmax	95,27	97,42	96,48
VGG16 (fc7)&ResNet18 (fc1000)	Softmax	96,27	96,63	96,57
ResNet18 (fc1000)& ResNet50 (fc1000)	Softmax	96,57	97,68	97,83
ResNet50 (fc1000)&ResNet101(fc1000)	Softmax	95,48	96,39	97,35
AlexNet (fc7)&VGG16 (fc7)& ResNet18 (fc1000)& ResNet50 (fc1000)& ResNet101 (fc1000)	Softmax	97,75	97,37	96,72
AlexNet (fc7)&VGG16 (fc7)	DVM	94,32	96,23	96,57
VGG16 (fc7)&ResNet18 (fc1000)	DVM	95,67	97,34	97,67
ResNet18 (fc1000)& ResNet50 (fc1000)	DVM	96,46	97,32	97,73
ResNet50 (fc1000)&ResNet101(fc1000)	DVM	96,18	97,43	97,50
AlexNet (fc7)&VGG16 (fc7)& ResNet18 (fc1000)& ResNet50 (fc1000)& ResNet101 (fc1000)	DVM	97,81	98,83	97,96

**Şekil 4. Veri Artırma Öncesi Performans Karşılaştırması***Figure 4. Performance Comparison Before Data Augmentation*

**Çizelge 3.** Veri Artırma Sonrası Sınıflandırma Sonuçları*Table 3. Classification Results After Data Augment*

Model	Sınıflandırıcı	Doğruluk %	Kesinlik %	F Skoru %
AlexNet (fc7)	Softmax	95,84	91,67	92,62
VGG16 (fc7)	Softmax	96,23	92,65	93,33
ResNet18 (fc1000)	Softmax	96,57	93,82	93,96
ResNet50 (fc1000)	Softmax	97,65	94,85	95,77
ResNet101 (fc1000)	Softmax	97,82	94,67	96,07
AlexNet (fc7)	DVM	95,98	92,16	92,89
VGG16 (fc7)	DVM	96,51	93,92	93,86
ResNet18 (fc1000)	DVM	96,60	93,82	94,01
ResNet50 (fc1000)	DVM	97,37	94,66	95,23
ResNet101 (fc1000)	DVM	97,89	96,87	96,19
AlexNet (fc7)& VGG16 (fc7)	Softmax	96,35	92,46	93,47
VGG16 (fc7)& ResNet18 (fc1000)	Softmax	97,67	95,56	95,57
ResNet18 (fc1000)& ResNet50 (fc1000)	Softmax	97,77	95,67	95,36
ResNet50 (fc1000)& ResNet101(fc1000)	Softmax	97,21	95,78	96,51
AlexNet (fc7)& VGG16 (fc7)& ResNet18 (fc1000)& ResNet50 (fc1000)& ResNet101 (fc1000)	Softmax	98,11	97,46	96,46
AlexNet (fc7)& VGG16 (fc7)	DVM	96,34	94,45	93,45
VGG16 (fc7)& ResNet18 (fc1000)	DVM	96,57	94,36	94,56
ResNet18 (fc1000)& ResNet50 (fc1000)	DVM	96,45	94,82	95,22
ResNet50 (fc1000)& ResNet101(fc1000)	DVM	97,56	96,47	96,75
AlexNet (fc7)& VGG16 (fc7)& ResNet18 (fc1000)& ResNet50 (fc1000)& ResNet101 (fc1000)	DVM	98,32	97,48	97,62

**Şekil 5.** Veri Artırma Sonrası Performans Karşılaştırması*Figure 5. Performance Comparison After Data Augmentation*



**Şekil 6:** Karışıklık matrisleri (a) Veri Arttırma Öncesi (b) Veri Arttırma Sonrası

*Figure 6: Confusion matrices (a) Before Data Augment (b) After Data Augment*

Performans değerlendirmesi için elde ettiğimiz bulgularla literatürde kullanılan diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çizelge 4’de önemli bazı çalışmalar verilmiştir.

**Çizelge 4.** Kaggle Göğüs Röntgeni Pnömoni Veri seti için Performans Karşılaştırılması

*Table 4. Performance Comparison for Kaggle chest X-ray Pneumonia Dataset*

Yöntem	Model	Verilerin Test ve Eğitim için Bölünme Yöntemi	Doğruluk %
(Rajaraman ve diğ., 2018)	VGG16	-	96,20
(Jakhar & Hooda, 2018)	KSA	5 kat çapraz doğrulama	84,00
(Rahman ve diğ., 2020)	DenseNet201	5 kat çapraz doğrulama	98,00
(Saraiva ve diğ., 2019)	Yapay Sinir Ağı	5 kat çapraz doğrulama	94,40
Önerilen Yöntem (Veri Arttırmadan Öncesi)	AlexNet&VGG16& ResNet18& ResNet50& ResNet101	5 kat çapraz doğrulama	97,81
Önerilen Yöntem (Veri Arttırma Sonrası)	AlexNet&VGG16& ResNet18& ResNet50& ResNet101	5 kat çapraz doğrulama	98,32

Çizelge 4’de görüldüğü gibi önerilen yöntem, literatürde kullanılan diğer yöntemlerden daha iyi bir performansa göstermiştir.

## SONUÇLAR (RESULTS)

Ölümcül olabilen pnömoni hastalığı nedeniyle her yıl ölen milyonlarca çocuk vardır. Hastalığın doğru teşhisi ve uygun tedavi planı ile zamanında müdahale etmek önemli sayıda hayat kurtarabilir. Bu çalışma, pnömoni tespiti için derin ESA tabanlı bir yaklaşım sunulmaktadır. Beş farklı popüler ESA derin öğrenme algoritması ve göğüs röntgeni görüntüleri kullanılarak normal ve zatürree hastalarının sınıflandırılması yapılmıştır. Kullanılan ESA mimarileri AlexNet, VGG16, ResNet18, ResNet50 ve ResNet101’ dir. Bu modellerden elde edilen özellikler hem kendi içinde hem de birleştirilerek deneyler yapılmıştır. Yöntemin performansını değerlendirmek için kaggle veri seti kullanılmıştır. Sınıflandırma başarımını arttırmak için veri arttırma işlemi uygulanarak veri seti dört katına çıkarılmıştır ve sınıflandırıcı olarak ise DVM ve Softmax kullanılmıştır. Hibrit özellik vektörü ise %98,32 genel doğruluk elde edilmiştir. Modellerin genel performansı, daha büyük veri kümeleri kullanılarak iyileştirilebilir. Gelecekteki çalışmalarda sınıflandırma performansının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.



**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- Anthimopoulos, M., Christodoulidis, S., Ebner, L., Christe, A., & Mougiakakou, S. (2016). Lung Pattern Classification for Interstitial Lung Diseases Using a Deep Convolutional Neural Network. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 35(5), 1207–1216. <https://doi.org/10.1109/tmi.2016.2535865>
- Aydoğdu, M., Ozyilmaz, E., Aksoy, H., Gürsel, G., & Ekim, N. (2010). Mortality prediction in community-acquired pneumonia requiring mechanical ventilation; values of pneumonia and intensive care unit severity scores. *Tüberküloz ve Toraks*, 58, 25–34.
- Davies, H. D., Wang, E. E., Manson, D., Babyn, P., & Shuckett, B. (1996). Reliability of the chest radiograph in the diagnosis of lower respiratory infections in young children. *The Pediatric Infectious Disease Journal*, 15(7), 600–604. <https://doi.org/10.1097/00006454-199607000-00008>
- Er, M. B., & Aydilek, I. B. (2019). Music Emotion Recognition by Using Chroma Spectrogram and Deep Visual Features. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 12(2), 1622–1634. <https://doi.org/https://doi.org/10.2991/ijcis.d.191216.001>
- Guan, Q., Huang, Y., Zhong, Z., Zheng, Z., Zheng, L., & Yang, Y. (2019). Thorax Disease Classification with Attention Guided Convolutional Neural Network. *Pattern Recognition Letters*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2019.11.040>
- Jain, R., Nagrath, P., Kataria, G., Sirish Kaushik, V., & Jude Hemanth, D. (2020). Pneumonia detection in chest X-ray images using convolutional neural networks and transfer learning. *Measurement*, 165, 108046. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108046>
- Jakhar, K., & Hooda, N. (2018). Big Data Deep Learning Framework using Keras: A Case Study of Pneumonia Prediction. In 2018 4th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ccaa.2018.8777571>
- Kabir, E., Siuly, & Zhang, Y. (2016). Epileptic seizure detection from EEG signals using logistic model trees. *Brain Informatics*, 3(2), 93–100. <https://doi.org/10.1007/s40708-015-0030-2>
- Kallianos, K., Mongan, J., Antani, S., Henry, T., Taylor, A., Abuya, J., & Kohli, M. (2019). How far have we come? Artificial intelligence for chest radiograph interpretation. *Clinical Radiology*, 74(5), 338–345. <https://doi.org/10.1016/j.crad.2018.12.015>
- Kumar Acharya, A., & Satapathy, R. (2020). A Deep Learning Based Approach towards the Automatic Diagnosis of Pneumonia from Chest Radio-Graphs. *Biomedical and Pharmacology Journal*, 13(1), 449–455. <https://doi.org/10.13005/bpj/1905>
- Mooney, P. (2020). Chest X-Ray Images (Pneumonia). <https://www.kaggle.com/paultimothymooney/chest-xray-pneumonia>
- Rahman, T., Chowdhury, M. E. H., Khandakar, A., Islam, K. R., Islam, K. F., Mahbub, Z. B., Kadir, M. A., & Kashem, S. (2020). Transfer Learning with Deep Convolutional Neural Network (CNN) for Pneumonia Detection Using Chest X-ray. *Applied Sciences*, 10(9), 3233. <https://doi.org/10.3390/app10093233>
- Rajaraman, S., Candemir, S., Kim, I., Thoma, G., & Antani, S. (2018). Visualization and Interpretation of Convolutional Neural Network Predictions in Detecting Pneumonia in Pediatric Chest Radiographs. *Applied Sciences*, 8, 1715. <https://doi.org/10.3390/app8101715>
- Rajpurkar, P., Irvin, J., Zhu, K., Yang, B., Mehta, H., Duan, T., Ding, D., Bagul, A., Langlotz, C., Shpanskaya, K., Lungren, M., & Ng, A. (2017). CheXNet: Radiologist-Level Pneumonia Detection on Chest X-Rays with Deep Learning.
- Rubin, J., Sanghavi, D., Zhao, C., Lee, K., Qadir, A., & Xu-Wilson, M. (2018). Large Scale Automated Reading of Frontal and Lateral Chest X-Rays using Dual Convolutional Neural Networks.
- Rudan, I., Tomaskovic, L., Boschi-Pinto, C., & Campbell, H. (2004). Global estimate of the incidence of clinical pneumonia among children under five years of age. *Bulletin of the World Health Organization*, 82(12), 895–903.
- Russakovsky, O., Deng, J., Su, H., Krause, J., Satheesh, S., Ma, S., Huang, Z., Karpathy, A., Khosla, A., Bernstein, M., Berg, A., & Li, F. F. (2014). ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge. *International Journal of Computer Vision*, 115. <https://doi.org/10.1007/s11263-015-0816-y>

- Salamon, J., & Bello, J. P. (2017). Deep Convolutional Neural Networks and Data Augmentation for Environmental Sound Classification. *IEEE Signal Processing Letters*, 24(3), 279–283. <https://doi.org/10.1109/LSP.2017.2657381>
- Saraiva, A., Santos, D., Costa, N., Sousa, J., Ferreira, N., Valente, A., & Soares, S. (2019). Models of Learning to Classify X-ray Images for the Detection of Pneumonia using Neural Networks. In *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies*. SCITEPRESS - Science and Technology Publications. <https://doi.org/10.5220/0007346600760083>
- Sirazitdinov, I., Kholiavchenko, M., Mustafaev, T., Yixuan, Y., Kuleev, R., & Ibragimov, B. (2019). Deep neural network ensemble for pneumonia localization from a large-scale chest x-ray database. *Computers & Electrical Engineering*, 78, 388–399. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.08.004>
- Stephen, O., Sain, M., Maduh, U. J., & Jeong, D.-U. (2019). An Efficient Deep Learning Approach to Pneumonia Classification in Healthcare. *Journal of Healthcare Engineering*, 2019, 4180949. <https://doi.org/10.1155/2019/4180949>
- Varshni, D., Thakral, K., Agarwal, L., Nijhawan, R., & Mittal, A. (2019). Pneumonia Detection Using CNN based Feature Extraction. In *2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icecct.2019.8869364>
- WHO. (2001). Standardization of interpretation of chest radiographs for the diagnosis of pneumonia in children.
- Zisserman, K. S. and A. (2014). Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. <https://arxiv.org/abs/1409.1556>



## ELECTRICAL AND THERMAL CONDUCTIVITIES OF IRON (II, III) OXIDE ADDED RIGID POLYURETHANE FOAM NANOCOMPOSITES

Meral AKKOYUN

Bursa Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Polymer Materials  
Engineering, Bursa, TURKEY  
[meral.akkoyun@btu.edu.tr](mailto:meral.akkoyun@btu.edu.tr)

(Geliş/Received: 18.09.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 08.12.2020)

**ABSTRACT:** Effect of iron (II, III) oxide particles on the electrical and thermal conductivities and thermal transitions of rigid polyurethane foams, and hence on the final density and microstructure of these porous materials were investigated. The microstructure study of iron (II, III) oxide added rigid polyurethane foam nanocomposites indicated a drop by 27% of the mean cell size from 294  $\mu\text{m}$  for the neat polyurethane to 215  $\mu\text{m}$  for a filler content of 50wt.% and an increase of the mean strut thickness as a function of the filler content. The thermal transition results demonstrated that as the magnetite content rises a visible decrease by 32% of the glass transition temperature appears in the case of soft segments when the glass transition temperature representing hard segments remains constant. Results of the electrical conductivity measurements showed a significant increase by 17% up to the higher filler content of 50wt.% compared to the unfilled polyurethane foam. The thermal conductivity results of iron (II, III) oxide added rigid polyurethane foam nanocomposites revealed a thermal insulating effect of magnetite particles due to the decrease of the thermal conductivity and stabilization after a slight rise from 0.02431W/m.K to 0.02648W/m.K depicted for a filler amount of 4wt.%.

**Keywords:** Rigid polyurethane foam, Iron (II, III) oxide, Thermal conductivity, Electrical conductivity

### Demir (II, III) Oksit Katkılı Rijit Poliüretan Köpük Nanokompozitlerin Elektriksel ve Termal İletkenlikleri

**ÖZ:** Demir (II, III) oksit partiküllerinin rijit poliüretan köpüklerin elektrik ve termal iletkenlikleri ile termal geçişlerine ve dolayısıyla bu gözenekli malzemelerin nihai yoğunluğu ve mikroyapısına etkisi araştırılmıştır. Demir (II, III) oksit eklenmiş rijit poliüretan köpük nanokompozitlerin mikroyapı çalışması, ortalama hücre boyutunun katkısız poliüretan için 294  $\mu\text{m}$  değerinden ağırlıkça %50 katkılı köpük için 215  $\mu\text{m}$  değerine kadar, %27 oranında bir düşüş ve katkı oranına bağlı olarak ortalama duvar kalınlığında bir artış olduğunu göstermiştir. Termal geçiş sonuçları, magnetit oranı arttıkça yumuşak segmentler için camı geçiş sıcaklığında %32 oranında gözle görülür bir düşüşün ortaya çıktığını ve sert segmentleri temsil eden camı geçiş sıcaklığının sabit kaldığını göstermiştir. Elektriksel iletkenlik ölçümlerinin sonuçları, katkısız poliüretan köpüğe kıyasla ağırlıkça %50 katkı oranına kadar %17 oranında önemli bir artış göstermiştir. Demir (II, III) oksit eklenmiş rijit poliüretan köpük nanokompozitlerin termal iletkenlik sonuçları, ağırlıkça %4 katkı oranı için 0.02431W/m.K değerinden 0.02648W/m.K değerine kadar gözlemlenen hafif bir artıştan sonra termal iletkenliğin azalması ve stabilizasyonu nedeniyle manyetit parçacıklarının ısı yalıtım etkisini ortaya çıkarmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Rijit poliüretan köpük, Demir (II, III) oksit, Termal iletkenlik, Elektriksel iletkenlik

## 1. INTRODUCTION

Among organic polymeric materials, polyurethanes (PU) exhibited a wide usage in various technological applications such as insulation, electronic, coatings, furnishing, and biomaterials mainly because of its relatively low manufacturing costs and facile processability (Akkoyun & Suvaci, 2016; Wilkes & Wildnauer, 1975; Sattar, et al., 2015; Usman, et al., 2016; Akkoyun & Akkoyun, 2019).

These polymeric materials can also be exploited as solid foams and depending on their cellular structure they can be categorized in two main groups: rigid foams composed of a closed cell structure and flexible foams composed of an open cell structure (Baferani, et al., 2017; Akkoyun & Akkoyun, 2019). Due to their outstanding properties and performances, the application range of these materials is quite broad and can be extended from construction, automotive to household sectors (Chattopadhyay & Webster, 2009). The distinctions between rigid and flexible PU foams give them various properties which can be designed according to the aimed utilization.

Rigid PU foams can be used in a large range of applications and particularly in construction and other industrial sectors thanks to their excellent properties such as low thermal conductivity, good sound barrier, low density, low water absorption and good dimensional stability while they present poor mechanical strength and thermal stability (Lee, et al., 2005; Saha, et al., 2005; Akkoyun & Akkoyun, 2019; Lee & Ramesh, 2004; Akkoyun & Suvaci, 2016). The desired final properties of these composites are mainly controlled by the processing conditions but also by the microstructure parameters of PU foams such as the mean cell diameter, the mean cell strut thickness, the cell density and the initial polyol and isocyanate used for the synthesis of PU foams (Saha, et al., 2008; Ibeh & Bubacz, 2008).

In the last few years, metal-oxide powders are more commonly utilized in the domain of polymers and particularly for electrotechnical devices. Magnetic particles and particularly iron (II, III) oxide ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) due to their important magnetic, mechanical and thermal properties, have attracted much attention in the preparation of rigid PU foam composites and can be used in a wide range of applications (Alavi Nikje, et al., 2015a; Alavi Nikje, et al., 2015b; Alavi Nikje, et al., 2013; Moghaddam & Naimi-Jamal, 2018; Silva, et al., 2020; Zhou, et al., 2010). Furthermore, metal-oxide added polymer composites are good candidates to replace for example metals or metal oxides in numerous applications as radio frequency interference shielding. These materials, due to their higher thermal conductivity compared to their neat counterparts are preferred in applications requiring lower sizes and improved power production (Saha, et al., 2008).

As the surface of iron (II, III) oxide particles presents low amount of functional groups, in the literature several studies were investigated for the compatibilization of these magnetic particles with different polymers (Chen, et al., 2017; Zhang, et al., 2017; Zou, et al., 2015). In the same way, the studies about iron (II, III) oxide filled rigid PU foams are mainly focused on the surface modification of magnetic particles in order to improve the properties of nanocomposites (Alavi Nikje, et al., 2015a; Alavi Nikje, et al., 2013; Alavi Nikje, et al., 2015b; Moghaddam & Naimi-Jamal, 2018). However, the electrical and thermal conductivity properties of modified iron (II, III) oxide added rigid PU foam composites were not investigated in the literature. Limited works can be found in the literature about unmodified iron (II, III) oxide added rigid PU foams (Silva, et al., 2020; Zhou, et al., 2010). Silva et al. (2020) were focused on the effect of the filler content on the attenuation of incident radiation properties of these  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  added rigid foam nanocomposites to produce electromagnetic radiation absorbent materials. In another work, Zhou et al. (2010) studied the properties of rigid PU/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  foams and particularly the immobilization of microbial biomass of microorganisms in order to use these composites as carrier for wastewater treatment. As a result, the effect of unmodified  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  powder content on the electrical and thermal conductivities of highly  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  filled rigid PU foam were not explored yet.

The aim of this study is to use unmodified  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  for the fabrication of iron (II, III) oxide added rigid PU foam nanocomposites and to investigate their electrical and thermal conductivities, microstructure and thermal transition properties in order to i) detect the optimum properties of these materials without surface treatment and ii) simplify the processing of these foam nanocomposites by eliminating the surface treatment step of the fillers and then reduce costs. In this work, rigid PU foams filled with iron (II, III) oxide at different concentrations were prepared using a three-step procedure (Saha, et al., 2008). All

samples were obtained by free rise method into a custom-made rectangular mold. Electrical and thermal conductivities, thermal transitions and microstructure of rigid PU foams filled with  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  particles were investigated. The effect of the filler content on the final properties of these rigid PU foam nanocomposites was studied. Then, the relationship between these properties was examined in an attempt to identify the parameters influencing their evolution.

## 2. MATERIALS and METHODS

### 2.1. Materials

Iron (II, III) oxide powder which has an average initial particle size of about 30 nm was provided from Nanokar/Turkey. Figure 1 shows the scanning electron microscopy (SEM) image of magnetite nanoparticles. Polyol (KIMrigid RD 057) and isocyanate (Izokim RD 001) obtained from Kimteks/Turkey were used in this work. The density, NCO content and viscosity of isocyanate are respectively 30.5-32.5%, 1.23 g/cm<sup>3</sup> and 200 ± 40 mPa.s. The density and viscosity of polyol are respectively 1.03 g/cm<sup>3</sup> and 400 mPa.s.

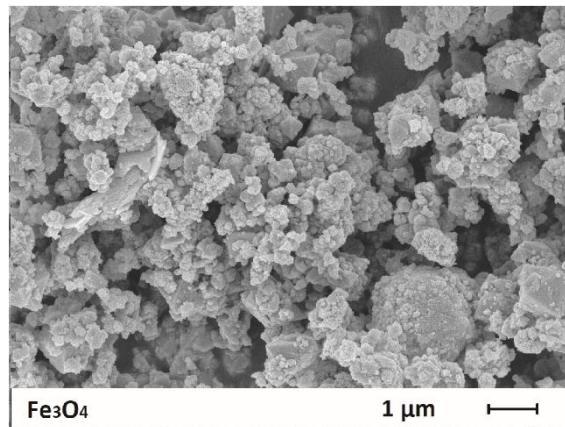


Figure 1. SEM image of Iron (II, III) oxide nanoparticles

### 2.2. Preparation of unfilled and $\text{Fe}_3\text{O}_4$ filled rigid PU foam nanocomposites

First of all, iron (II, III) oxide powder was dried at 100°C during 12 hours using an oven. PU/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  composites were prepared at different filler content in polyol (4, 8, 16, 32, 40 and 50wt.%). Then, during the first step of PU synthesis, the powder was added in the polyol and the polyol/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  blend was mixed using an ultrasonic sonicator (Bandelin, UW 3200) for 10 min in order to obtain a well dispersed suspension. In the second step, the suspension was mixed for 1 minute at 2000 rpm using a mechanical stirrer (DLAB, OS20-PRO). Then, the isocyanate was immediately added into the polyol/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  mixture and the stirring continued for another 5 seconds. The prepared blend was poured into an aluminum mold (30x30x4 cm) designed for this work. Then, the samples were cured at standard ambient conditions (room temperature and atmospheric pressure) during 24 hours. All sample characterizations were performed after 24 hours of curing time.

### 2.3. Characterization methods

The microstructure analyses of the unfilled and iron (II, III) oxide added rigid PU foam composites were performed with a Carl Zeiss Gemini 300 scanning electron microscope at 10 kV. A gold/palladium coating was realized for all foam samples before the measurement. SEM micrographs were recorded for foam sections perpendicular to the foaming direction. Image J software was used for the detection of cell

sizes from SEM micrographs. A mean cell diameter was calculated from 100 cells using SEM micrographs for sample sections perpendicular to the foaming direction.

Apparent density of the unfilled and iron (II, III) oxide added rigid PU foams was measured according to the ASTM D-1622 standard.

Thermal transitions of unfilled and magnetite added rigid PU foams were characterized using a TA Instrument Discovery DSC25 Differential Scanning Calorimeter (DSC) under nitrogen atmosphere. The measurements were realized in a temperature range of  $-80^{\circ}\text{C}$ - $300^{\circ}\text{C}$  and at a heating rate of  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

The thermal conductivity measurements of unfilled and iron (II, III) oxide added rigid PU foam composites (dimensions:  $30\text{cm}\times 30\text{cm}\times 4\text{cm}$ ) were carried out using a Laser comp. Fox 314 (TA Instruments) heat flow meter according to ASTM Standard C518. Three replicates were analyzed for each sample.

The electrical conductivity of unfilled and iron (II, III) oxide added rigid PU foam composites were detected with a KEITHLEY 6517-B multimeter equipped with a resistivity test fixture (8009). Three replicates of the PU foam nanocomposites ( $3\times 3\text{cm}^2$ ) were used for the measurements.

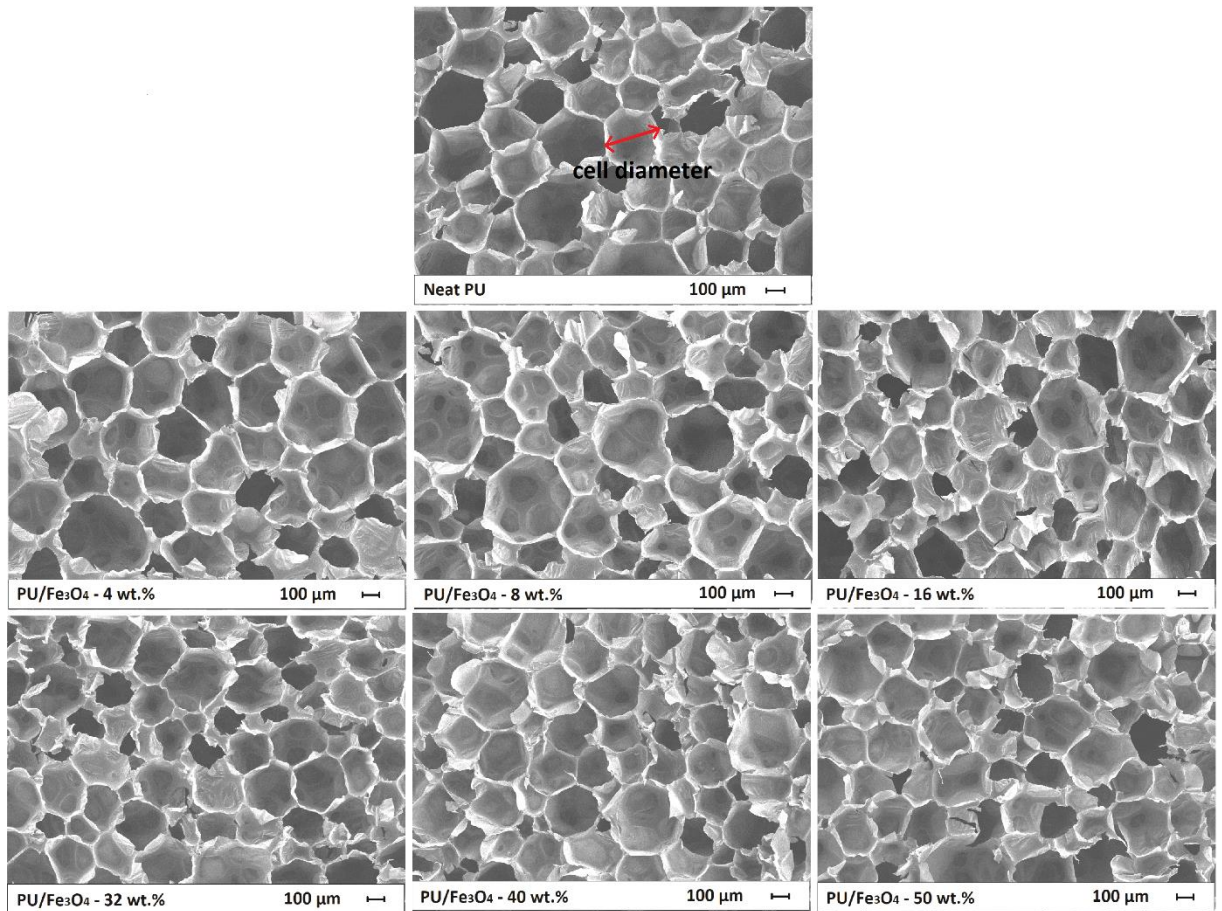
### 3. RESULTS and DISCUSSIONS

#### 3.1. Effect of filler concentration on the microstructure of rigid PU/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ foam nanocomposites

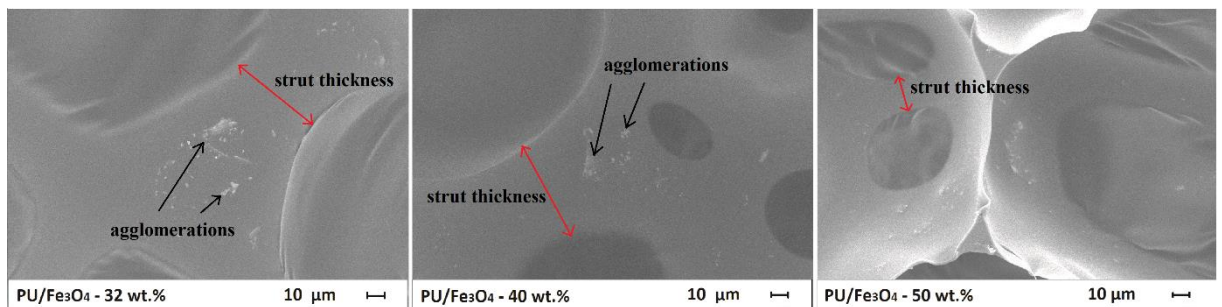
SEM images of 0, 4, 8, 16, 32, 40 and 50wt.%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  added rigid PU/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  porous foam samples were given in Figure 2. The measurements were carried out for foam sections perpendicular to the foaming direction. For these samples, the structure of the cells seems to be isotropic for all filler concentrations. The average cell diameters (Figure 2) and average strut thicknesses (Figure 3) of the foams were calculated from SEM micrographs as described in Materials and Methods part. The apparent densities of the foams were also obtained and all results were gathered in Table 1.

From Figure 2 and 4 and Table 1, the mean cell diameters of rigid PU/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  foam nanocomposites decreases from  $294\ \mu\text{m}$  for the neat PU to  $215\ \mu\text{m}$  for a filler content of 50wt.% indicating that the mean cell diameter was diminished by 27%. These results are in correlation with those determined for nanofiller reinforced rigid PU foam nanocomposites where a drop is also observed as the nanofiller amount rises (Akkoyun & Suvaci, 2015). In addition from Figure 4 and Table 1 an increase of the cell density and the strut thickness is observed and it can be concluded that these results support the previous values detected for the cell size evolutions. Actually, as mentioned in the literature (Akkoyun & Suvaci, 2015) nanofillers allow an augmentation of the amount of the nucleation sites inducing an increase of the density and at the same time a decrease of the cell size of the foams as demonstrated in Table 1.

Figure 3 shows SEM images recorded for rigid PU/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  foams filled at high concentrations of magnetite (32, 40 and 50wt.%) in order to detect the dispersion state of the fillers into the PU matrix. As a result of the use of unmodified iron (II, III) oxide particles with high surface energy, SEM images revealed the presence of iron (II, III) oxide agglomerates related with the lower interactions between the particles and the polymer matrix as largely reported in the literature (Alavi Nikje, et al., 2015a; Moghaddam & Naimi-Jamal, 2018).



**Figure 2.** SEM images obtained for unfilled PU foam and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> filled rigid PU foams prepared at 4, 8, 16, 32, 40 and 50 wt.% for a magnification of X50



**Figure 3.** SEM images obtained for Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> filled rigid PU foams prepared at 32, 40 and 50 wt.% for a magnification of X500

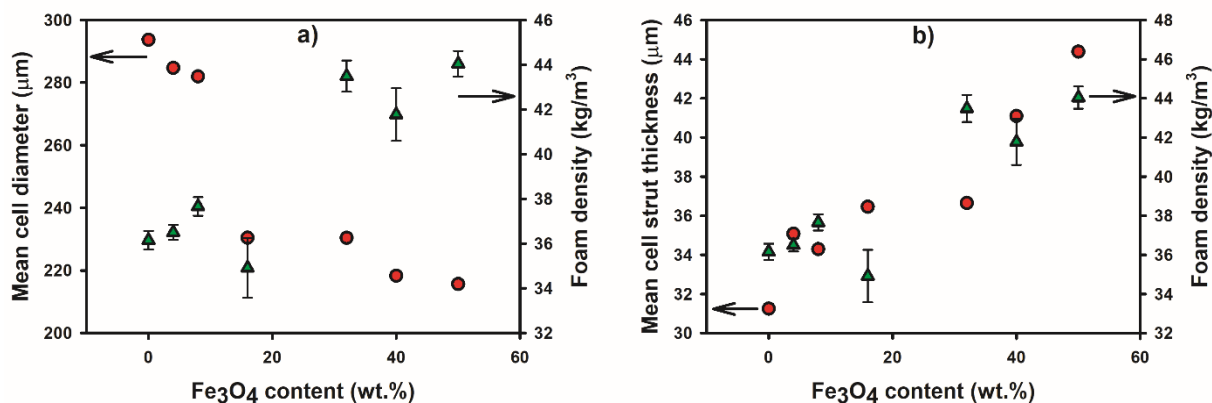


Figure 4. Evolution of the a) Mean cell diameter and b) Mean cell strut thickness of unfilled and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  filled rigid PU foams with increasing filler content

Table 1. Foam density, mean cell diameter and mean strut thickness of unfilled and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  filled rigid PU foams

PU/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ foams	Foam density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Mean cell diameter ( $\mu\text{m}$ )	Mean strut thickness ( $\mu\text{m}$ )
PU0	$35.41 \pm 1.33$	294	31
PU4	$37.56 \pm 1.85$	285	35
PU8	$37.66 \pm 0.41$	282	34
PU16	$36.00 \pm 2.30$	231	36
PU32	$43.49 \pm 0.70$	231	37
PU40	$41.77 \pm 1.17$	218	41
PU50	$44.04 \pm 0.57$	215	44

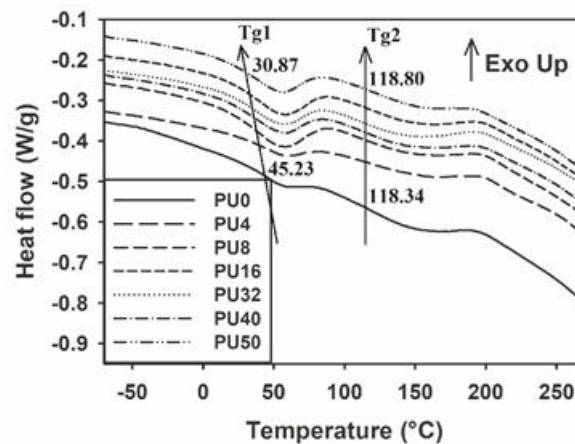
### 3.2. Effect of filler concentration on the thermal transitions of rigid PU/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ foam nanocomposites

Figure 5 represents the DSC thermograms obtained for rigid PU/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  foam nanocomposites prepared at various filler amount (0, 4, 8, 16, 32, 40 and 50wt.%). From these graphs, two main transitions can be seen: the glass transitions of soft and hard segments of magnetite filled rigid PU foams ( $T_{g1}$  and  $T_{g2}$ ). The first transition represents the soft segments and was determined from the inflection point at the 0-50°C temperature domain whereas the second transition illustrates the hard segments and in the same way was obtained from the inflection point at the 75-150°C temperature area.  $T_{g1}$  and  $T_{g2}$  values were gathered in Table 2. From these results, as the magnetite content rises a visible diminution by 32% of  $T_{g1}$  appears in the case of soft segments when  $T_{g2}$  representing hard segments remains constant. The drop of the glass transition value for soft segments is probably due to the disorganization of entanglement meshes present in the PU matrix caused by the magnetite particles (Gu, et al., 2014). From Figure 5, it can also be observed that the gap between  $T_{g1}$  and  $T_{g2}$  is increasing with increasing the filler content. This behavior can be explained by the notable separation of soft and hard segments in the PU system as the magnetite amount rises (Ma, et al., 2019).



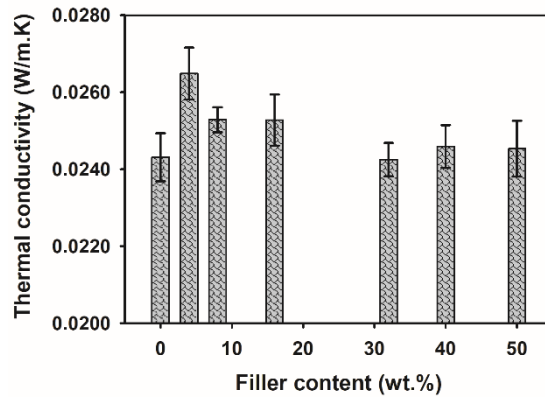
**Table 2.** Glass transition temperatures Tg1 and Tg2 of unfilled and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> filled rigid PU foams

PU/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> foams	Tg <sub>1</sub> (°C)	Tg <sub>2</sub> (°C)
PU0	45.23	118.34
PU4	38.88	119.11
PU8	36.58	119.81
PU16	35.15	118.13
PU32	33.53	118.19
PU40	31.89	118.79
PU50	30.87	118.80

**Figure 5.** DSC traces obtained for unfilled PU foam and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> filled rigid PU foams

### 3.3. Effect of filler concentration on the thermal conductivity of rigid PU/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> foam nanocomposites

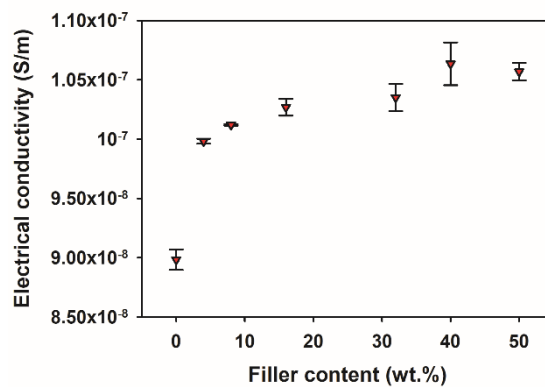
The thermal conductivity results obtained for rigid PU/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> foam nanocomposites prepared at different concentrations of magnetite (0, 4, 8, 16, 32, 40 and 50wt.%) are presented on Figure 6. The results exhibit a slight increase from 0.02431W/m.K to 0.02648W/m.K for an optimum rise obtained in the case of a filler content of 4wt.%. Then, a decrease and a stabilization of the thermal conductivity can be observed. This behavior can be explained by the percolation threshold theory where a critical value is reached when a continuous pathway is produced by the fillers into the polymer matrix allowing an optimum thermal conductivity of the prepared rigid PU foam nanocomposites. In addition, the cell size of PU foams is a significant parameter which impact the thermal conductivity of these materials. In the literature, smaller cell size is related with lower thermal conductivity (Chen, et al., 2013; Lee, et al., 2016). The thermal conductivity of PU foams is the result of conduction by cell walls, convection, by gas blowing within cells and heat radiating across cells (Almanza, et al., 2000; Kang, et al., 2010). As a result, in this study, a decrease of the thermal conductivity is observed due to the decrease of the mean cell diameters with the increase of the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> content. This result shows a thermal insulating effect of magnetite particles. In this work, the decrease of the thermal conductivity of rigid PU/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> foam nanocomposites allows their application in construction and other industrial sectors requiring improved thermal insulating properties such as their use in refrigerators.



**Figure 6.** Thermal conductivity of un-filled and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> filled rigid PU foams prepared with various magnetite content

### 3.4. Effect of filler concentration on the electrical conductivity of rigid PU/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> foam nanocomposites

Figure 7 shows the electrical conductivity of rigid PU/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> foam nanocomposites prepared at different filler amount (0, 4, 8, 16, 32, 40 and 50wt.%). From Figure 7, a sharp increase up to 4wt.% of filler and then a stabilization of the electrical conductivity between 0 and 50wt.% of magnetite in polyol can be seen. Then, a rise by 17% can be observed as the iron (II, III) oxide amount reaches 50wt.%. As previously presented in the case of the thermal conductivity, this behavior can be explained by the percolation theory mainly reported in the literature (Akkoyun & Akkoyun, 2019). A critical concentration of magnetite can be determined as 4wt.% representing the electrical percolation threshold from which the magnetite particles forms an uninterrupted network in the PU matrix. The improved electrical conductivity of these materials as the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> content increases, allows their use in areas such as magnetic and electromagnetic wave absorption.



**Figure 7.** Electrical conductivity of un-filled and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> filled rigid PU foams prepared with various magnetite content

## 4. CONCLUSIONS

The electrical and thermal conductivities, microstructure and thermal transition properties of rigid PU/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> foam nanocomposites prepared at various filler content were investigated. A drop of the average cell diameter by 27% was obtained as the filler concentration increases up to 50wt.%. The thermal transition results showed a visible decrease by 32% of the glass transition temperature appears in the case of soft segments when the glass transition temperature representing hard segments remains constant. Results of the electrical and thermal conductivities revealed the presence of a percolation threshold which

is determined as 4wt.% for each case. When a thermal insulating effect of magnetite particles can be concluded, the electrical conductivity of rigid PU/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> foam nanocomposites showed an important increase by 17% as the filler concentration rises up to 50wt.%. In this work, the decrease of the thermal conductivity of rigid PU/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> foam nanocomposites allows their application in construction and other industrial sectors requiring improved thermal insulating properties such as their use in refrigerators. At the same time, due to their improved electrical conductivity as the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> content increases, these materials can also be used in areas such as magnetic and electromagnetic wave absorption.

## ACKNOWLEDGEMENT

Kimteks/Turkey is gratefully acknowledged for the supply of polyol and isocyanate.

## REFERENCES

- Akkoyun, M., Akkoyun, S., 2019 "Blast furnace slag or fly ash filled rigid polyurethane composite foams: A comprehensive investigation", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 136, pp. 47433.
- Akkoyun, M., Suvaci, E., 2016 "Effects of TiO<sub>2</sub>, ZnO, and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofillers on rheological behavior, microstructure, and reaction kinetics of rigid polyurethane foams", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 133, pp. 43658.
- Alavi Nikje, M. M., Akbar, R., Ghavidel, R., Vakili, M., 2015a, "Preparation and Characterization of Magnetic Rigid Polyurethane Foam Reinforced with Dipodal Silane Iron Oxide Nanoparticles Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@APTS/GPTS", *Cellular Polymers*, Vol. 34, No. 3, pp. 137-156.
- Alavi Nikje, M. M., Farahmand Nejad, M. A., Shabani, K., Haghshenas, M., 2013, "Preparation of magnetic polyurethane rigid foam nanocomposites", *Colloid and Polymer Science*, Vol. 291, pp. 903–909.
- Alavi Nikje, M. M., Noruzian, M., Moghaddam, T. S., 2015b, "Novel Polyurethane Rigid Foam/Organically Modified Iron oxide Nanocomposites", *Polymer Composites*, Vol. 38, No. 5, pp. 877-883.
- Almanza, O. A., Rodriguez-Perez, M. A., de Saja, J. A., 2000, "Prediction of the Radiation Term in the Thermal Conductivity of Crosslinked Closed Cell Polyolefin Foams", *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, Vol. 38, pp. 993-1004.
- Baferani, A. H., Katbab, A. A., Ohadi, A. R., 2017, "The role of sonication time upon acoustic wave absorption efficiency, microstructure, and viscoelastic behavior of flexible polyurethane/CNT nanocomposite foam" *European Polymer Journal*, Vol. 90, pp. 383–391.
- Caba, V., Borgese, L., Agnelli, S., Depero, L. E., 2019, "A green and simple process to develop conductive polyurethane foams for biomedical applications", *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, Vol. 68, pp. 126–133.
- Chattopadhyay, D. K., Webster, D. C., 2009, "Thermal stability and flame retardancy of polyurethanes", *Progress in Polymer Science*, Vol. 34, No. 10, pp. 1068–1133.
- Chen, L., Rende, D., Schadler, L. S., Ozisik, R., 2013, "Polymer nanocomposite foams", *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 1, pp. 3837.
- Chen, Y., Huang, X., Gong, Z., Xu, C., Mou, W., 2017, "Fabrication of High Performance Magnetic Rubber from NBR and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> via in Situ Compatibilization with Zinc Dimethacrylate", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 56, No. 1, pp. 183–190.
- Ghariniyat, P., Leung, S. N., 2018, "Development of thermally conductive thermoplastic polyurethane composite foams via CO<sub>2</sub> foaming-assisted filler networking", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 143, pp. 9-18.
- Gu, S.-Y., Liu, L.-L., Yan, B., 2014, "Effects of ionic solvent-free carbon nanotube nanofluid on the properties of polyurethane thermoplastic elastomer", *Journal of Polymer Research*, Vol. 21, pp. 356.
- Han, X., Koelling, K., Tomasko, D., Lee, L., 2002, "Continuous microcellular polystyrene foam extrusion with supercritical CO<sub>2</sub>", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 42, pp. 2094.
- Ibeh, C. C., Bubacz, M., 2008, "Current Trends in Nanocomposite Foams", *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 44, No. 6, pp. 493-515.

- Kang, M. J., Kim, Y. H., Park, G. P., Han, M. S., Kim, W. N., Park, S. D., 2010, "Liquid nucleating additives for improving thermal insulating properties and mechanical strength of polyisocyanurate foams", *Journal of Materials Science*, Vol. 45, pp. 5412–5419.
- Król, P., Król, B., Pielichowska, K., Špírková, M., 2015, "Composites prepared from the waterborne polyurethane cationomers-modified graphene. Part I. Synthesis, structure, and physicochemical properties", *Colloid and Polymer Science*, Vol. 293, pp. 421–431.
- Lee, L. J., Zeng, C., Cao, X., Han, X., Shen, J., Xu, G., 2005, "Polymer nanocomposite foams", *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 344–2363.
- Lee, S.-T., Ramesh, N. S., 2004, "Polymeric foams: mechanisms and materials", Boca Raton: CRC Press.
- Lee, Y., Jang, M. G., Choi, K. H., Han, C., Kim, W. N., 2016, "Liquid-type nucleating agent for improving thermal insulating properties of rigid polyurethane foams by HFC-365mfc as a blowing agent", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 133, pp. 43557.
- Lorusso, C., Vergaro, V., Conciauro, F., Ciccarella, G., Congedo, P., 2017, "Thermal and mechanical performance of rigid polyurethane foam added with commercial nanoparticles", *Nanomaterials and Nanotechnology*, Vol. 7, pp. 1–9.
- Ma, X., Shi, C., Huang, X., Liu, Y., Wei, Y., 2019, "Effect of natural melanin nanoparticles on a self-healing cross-linked polyurethane", *Polymer Journal*, Vol. 51, pp. 547-558.
- Moghaddam, S. T., Naimi-Jamal, R. M., 2018, "Reinforced magnetic polyurethane rigid (PUR) foam nanocomposites and investigation of thermal, mechanical, and sound absorption properties", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 32, No. 9, pp. 1224-1241.
- Paciorek-Sadowska, J., Borowicz, M., Isbrandt, M., Czuprynski, B., Apiecioneck, L., 2019, "The Use of Waste from the Production of Rapeseed Oil for Obtaining of New Polyurethane Composites", *Polymers*, Vol. 11, pp. 1431.
- Patcharapon, S., Kalman, M., Timea, L.-K., Csaba, K., 2018, "Polyurethane elastomers with improved thermal conductivity part I: elaborating matrix material for thermal conductive composites", *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, Vol. 6, pp. 2320-2092.
- Pillai, P. K., Li, S., Bouzidi, L., Narine, S. S., 2015, "Metathesized palm oil polyol for the preparation of improved bio-based rigid and flexible polyurethane foams", *Industrial Crops and Products*, Vol. 83, pp. 568-576.
- Saha, M. C., Kabir, M. E., Jeelani, S., 2008, "Enhancement in thermal and mechanical properties of polyurethane foam infused with nanoparticles", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 479, No. 1-2, pp. 213-222.
- Saha, M. C., Mahfuz, H., Chakravarty, U. K., Uddin, M., Kabir, M. E., Jeelani, S., 2005, "Effect of density, microstructure, and strain rate on compression behavior of polymeric foams", *Materials Science and Engineering*, Vol. 406, pp. 328–336.
- Sattar, R., Kausar, A., Siddiq, M., 2015, "Advances in thermoplastic polyurethane composites reinforced with carbon nanotubes and carbon nanofibers: A review", *Journal of Plastic Film & Sheeting*, Vol. 31, No. 2, pp. 86–224.
- Silva, A. M., Pereira, I. M., Silva, T. I., da Silva, M. R., Rocha, R. A., Silva, M. C., 2020, "Magnetic foams from polyurethane and magnetite applied as attenuators of electromagnetic radiation in X band", *Journal of Applied Polymer Science*, pp. 49629.
- Usman, A., Zia, K. M., Zuber, M., Tabasum, S., Rehman, S., Zia, F., 2016, "Chitin and chitosan based polyurethanes: A review of recent advances and prospective biomedical applications", *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 86, pp. 630–645.
- Wilkes, G. L., Wildnauer, R., 1975, "Kinetic behavior of the thermal and mechanical properties of segmented urethanes", *Journal of Applied Physics*, Vol. 46, pp. 4148.
- Zhang, G., Zhang, S., Qiu, J., Jiang, Z., Xing, H., Li, M., Tang, T., 2017, "Insight into the influence of OA-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles on the morphology and scCO<sub>2</sub> batch-foaming behavior of cocontinuous LLDPE/PS immiscible blends at semi-solid state", *Polymer*, Vol. 129, pp. 169-178.

- Zhou, L., Li, G., An, T., Li, Y., 2010, "Synthesis and characterization of novel magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/polyurethane foam composite applied to the carrier of immobilized microorganisms for wastewater treatment", *Research on Chemical Intermediates*, Vol. 36, pp. 277–288.
- Zou, H., Weder, C., Simon, Y. C., 2015, "Shape-Memory Polyurethane Nanocomposites with Single Layer or Bilayer Oleic Acid-Coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles", *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 9, pp. 885-892.



## BATMAN İLİNDEKİ ŞİŞEN ZEMİNLERİN JEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN NİCEL ve NİTEL YÖNTEMLERLE DEĞERLENDİRİLMESİ

<sup>1</sup>Mehmet Emin TUTUŞ , <sup>2</sup>Habib AKGÜL , <sup>3</sup>Nuray ALPASLAN 

<sup>1</sup>Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği ABD, Van, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Doğu Zemin Laboratuvarı, Kültür Mahallesi, Batman, TÜRKİYE

<sup>3</sup>Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Batman, TÜRKİYE

<sup>1</sup> mehmettutus72@gmail.com, <sup>2</sup> akgl.3030@gmail.com, <sup>3</sup> nuray.alpaslan@batman.edu.tr

(Geliş/Received: 19.06.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 10.12.2020)

**ÖZ:** Mühendislik yapılarının inşasında zeminlerdeki kil birimlerinde meydana gelen şişme problemi büyük sorunlara yol açabilmektedir. Özellikle zemindeki kil birimi seviyelerinde şişme potansiyelinin yüksek derecelerde olmasıyla yapılarda büyük deformasyonlar ve hasarlar meydana gelmektedir. Bu çalışmada Batman kent merkezinde belirlenen lokasyonlarda açılan altı adet jeoteknik sondaj kuyusundan elde edilen kil numuneler üzerinde şişme potansiyelinin araştırılması amacıyla nicel, nitel yöntemler ve ampirik bağıntılar kullanılarak değerlendirilmeler yapılmıştır. Bu amaçla öncelikli olarak her sondaj kuyusunun killi seviye birimlerinden alınan örselenmemiş numuneler (UD) için dane boyutu dağılımı analizleri, kıvam limitleri, hidrometre, üç eksenli basınç ve ödometre (konsolidasyon) deneyleri yapılarak çıkan sonuçlar yorumlanmıştır. Çalışmanın devamında killerin şişme potansiyelini belirlemede kullanılan yöntemlerle korelasyonlara gidilerek, nitel olarak belirlenen deneysel değerlerle karşılaştırması yapılmıştır. Sonuç olarak kil birimi için bütün yapılan analizlerde farklı değerler elde edilmiştir. Çıkan bu sonucun Batman kenti genelinde hakim olan Şelmo formasyonunun litolojik olarak yanal ve düşey yönlerde değişkenlik göstermesi ve formasyonun ayrışma zonu özelliği göstermesinden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Batman, Şişme potansiyeli, Kil, Ödometre

### The Evaluation of the Geotechnical Properties of the Swelling Soils in Batman Province with Quantitative and Qualitative Methods

**ABSTRACT:** The problem of swelling potential occurring in clay units in the soil in the construction of engineering structures can lead to major problems. Especially with the high level of swelling potential at the clay units in the soil, major deformations and damages occur in the buildings. In this study, quantitative, qualitative methods and empirical correlations were employed to examine the potential of swelling on clay samples obtained from six geotechnical boreholes drilled in the locations determined in Batman city center. For this purpose, firstly, grain size distribution analyzes, consistency limits, hydrometer, triaxial pressure and oedometer (consolidation) tests were performed on undisturbed samples (UD) obtained from clay level units of each borehole. In the later of the study, the correlations were made with the methods used to determine the swelling potential of the clays, and these correlations were compared with the experimental values determined qualitatively. In conclusion, different values were obtained in all analyzes conducted for the clay unit. It is thought that this result may be due to the

fact that the Şelmo formation, which is dominant throughout the city of Batman, varies in horizontal and vertical directions and that the formation exhibits a weathering zone feature.

**Key Words:** *Batman, Swelling potential, Clay, Oedometer*

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mühendislik yapılarındaki çeşitli deformasyonlar zeminlerdeki killerin şişme özellikleri ve karakteristiklerine bağlı olarak gelişebilmektedir. Dünyada zeminlerin büyük bir bölümünü oluşturan şişen zemin türleri ile geoteknik mühendisliğinde önemli bir problem olarak karşılaşılabilmektedir. Şişme potansiyeli yüksek olan zeminlerde, üzerine inşa edilen her tip yapıda, zemin kabarmaları, yapının yukarı doğru, kaldırma kuvvetine maruz kalmasıyla kırılmalar çatlamlar oluşması ve yapının belli bir süre sonunda kullanılamaz hale gelmesi şeklinde birçok farklı deformasyonlar meydana gelebilmektedir. Geoteknik mühendisliğinde en önemli zemin problemlerinden biri olan şişen zeminlerin özelliklerinin, davranış ve karakterlerinin çok iyi analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır. Dünyada şişen kil zeminlerde oluşan problemlerle ilgili birçok araştırmacı çeşitli çalışmalar yapmıştır (Wise ve Hudson, 1971; Dakshanamurthy ve Raman, 1973; Fredlund, 1975; King, 1981; Zentar ve diğ., 2002; Gasparre, 2005; Kassa 2005; Lucian, 2006). Türkiye’de yapılan çalışmalarda; Yıldırım ve Acar (1994), çalışmalarında zeminlerin şişme potansiyelini etkileyen başlıca faktörler arasında yer alan aşırı konsolidasyon oranının şişme davranışı üzerindeki etkisini araştırmış ve kil mineralleri içeren zemin numuneleri üzerinde sabit hacim şartları altında şişme basınçlarını belirlemiştir. Yılmaz ve Karacan (1998) zeminlerin şişme özellikleri, zemin sınıflamaları, şişen zeminlerde temel tasarımı ve şişen zeminlerin üzerine inşaat uygulamaları ile ilgili değerlendirmeler yapmıştır. Şişme basıncının kil üzerine etkileyen inşaat yükünü aşması durumunda zeminde oluşabilecek kabarmaların önemli temel sorunlarına yol açabileceğine dikkat çekmişlerdir. Yıldırım (2002) şişen killerin belirlenmesinde emme kapasitesi ve şişme basıncının hesaplanması çok uzun zaman aldığından, şişme basıncına etki eden kuru birim hacim ağırlık, PI (Plastisite İndisi) ve başlangıç su muhtevası zemin özellikleri kullanarak, şişme basıncı ve emme deneyleri yapılmadan şişme basınçlarının ve emme kapasitelerinin belirlenmesi amacıyla çalışmalar yapmıştır. Yıldırım (2002), yüksek emme kapasitesine sahip olan killi zeminlerin yüksek şişme potansiyeli de göstereceklerini, dolayısıyla bu tip zeminlerde yüksek şişme basınçları ve önemli şişme problemleri bekleneceğini belirtmiştir. Mollamahmutoğlu ve Güngör (2002), Bursa Çevre Otoyolu İnşaatı işi kapsamında, kazılarda karşılaşılan yüksek şişme potansiyeline sahip killerin, yol dolgularında kullanımı amacıyla, uçucu kül ile ıslahı üzerinde deneysel çalışmalar yürütmüştür. Bozkurtoğlu, Şans ve Eyüboğlu (2015), kohezyonlu zeminlerin şişme potansiyelini tespit etmek amacıyla literatürde yapılan eski çalışmaları değerlendirmiş ve kohezyonlu zeminlerdeki doğal su muhtevası ve likit limit (LL) değerlerini kullanarak şişme yüzdesinin bulunmasına dair yeni bir denklem geliştirilmişlerdir.

## MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Çalışma sahası kilinin şişme özelliklerini tespit etmek amacıyla, elek analizi, atterberg (kıvam limitleri), hidrometre, konsolidasyon (ödometre) ve üç eksenli basınç deneyleri Doğu Zemin Laboratuvarında yapılmıştır. Bu çalışmada elek analizi deneyi, numunelerin dane boyu dağılımlarını belirlemek amacıyla değişik göz açıklıklarına sahip elekler (Şekil 1a) kullanılarak yapılmıştır. Elek altında kalan zemin miktarının toplam zemin miktarına oranıyla her bir elek için geçen yüzde bulunmuştur. İnce taneli zeminlerin kıvamında su muhtevasına bağlı değişimleri deneysel olarak belirleyebilmek için bazı sınır su muhtevası değerleri tanımlanmıştır. Kıvam limitleri olarak bilinen bu değerleri belirleyebilmek için Atterberg (kıvam limitleri) deneyi kullanılır. Atterberg (kıvam limitleri) deneyinde, etüvde kurutulan örneğin kuru ağırlığı ve su içeriği belirlendikten sonra su içeriği artırılarak vuruş sayıları saptanmıştır (Şekil 1b). Hidrometre analizi ise ince taneli zeminlerin hidrometre yöntemi ile tane çapı dağılımını bulmak için yapılan bir deneydir. Bu deneyde, yaklaşık 50 gr killi zeminden etüvde kurutulmuş örnekler alındıktan sonra, silindirik bir cam kap içinde 1000 cm<sup>3</sup> lük bir süspansiyon hazırlanmış (Şekil 2) ve deney

başlangıcından başlayarak, belli süreler sonunda, süspansiyonun birim hacim ağırlığı, hidrometre aleti ile ölçülmüştür. Konsolidasyon deneyi aşamalı ve kontrollü aksenal gerilim altında, zeminin tek yönlü drenajına izin verildiği koşullardaki konsolidasyon hızı ve miktarının belirlenmesi amacıyla yapılır. Bu deneyde, numune halkasına alt ve üst yüzeyleri düzgün olacak şekilde numune yerleştirildikten sonra tartılmış, konsolidasyon hücresine yerleştirilmiştir. Yüklemeler 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32 kg/cm<sup>2</sup> adımlarını takip ederek, her adımda adımın başlangıcından itibaren, belli süreler sonunda (0,25,1,2,4,8,...dak.) oturma değerleri, deformasyon saatleri gözlenerek kaydedilmiştir (Şekil 3a). En yüksek yük kademesinde basınçlar uygulandıktan sonra, yükleme kademesine uygun olarak boşaltma yapılmıştır (Uzuner,1998). Serbest basınç deneyinde, silindirik zemin numunesi yalnızca aksenal doğrultuda yüklemeye tabii tutularak aksenal yük artışları altında meydana gelen boy kısalması ölçülmüş ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Aksenal gerilmenin en büyük değeri zeminin serbest basınç mukavemeti olarak alınmıştır. Üç aksenli basınç deneyi, zeminlerin kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan önemli bir deneydir. Bu çalışmada üç aksenli basınç deneyi, numunelere hücredeki sıvı ile çevresel bir basınç verildikten sonra makaslama yenilmesi olması için düşey yönde hidrolik yüklemeler şeklinde uygulanmıştır (Şekil 3b). Deneyler deformasyon ve yük kontrollü olarak yapılmıştır. Aksenal yük, yükleme halkası içerisindeki yük ölçer ile, boy değişimi ise deformasyon ölçer yardımı ile okunmuştur.



Şekil 1 a) Elek analizi deneyi b) Atterberg (kıvam limitleri) deneyi

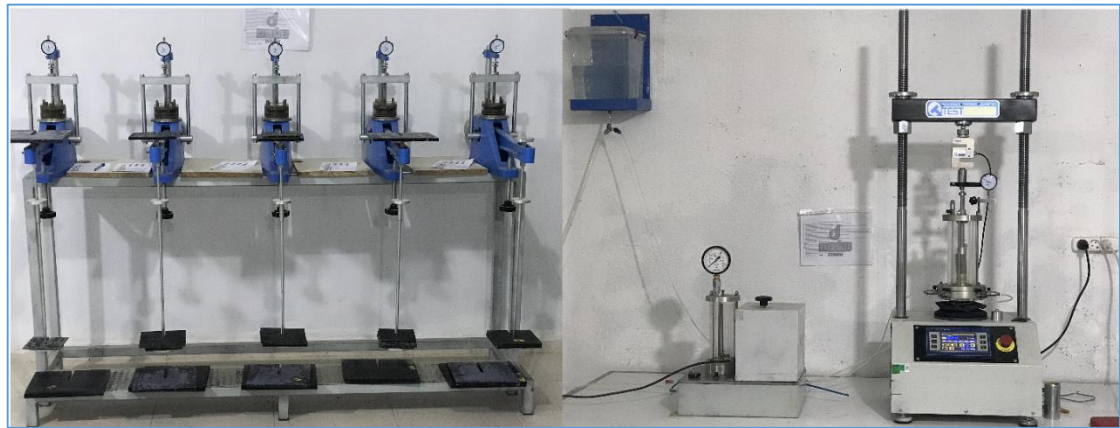
Figure 1. (a) Sieve analysis test b) Atterberg (consistency limits) test





Şekil 2. Hidrometre deneyi

Figure 2. Hydrometer test



Şekil 3. a) Konsolidasyon deneyi b) Üç eksenli basınç deneyi

Figure 3.(a) Consolidation test b) Triaxial pressure test

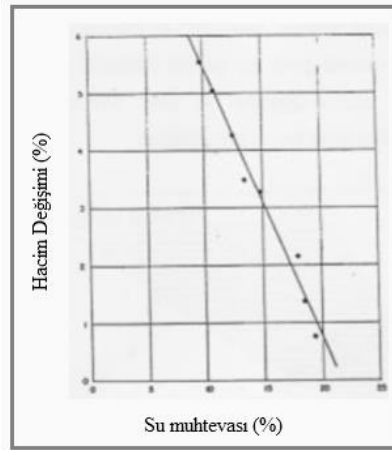
Şişen zeminler kil türü birimlerde su muhtevasının artması sonucunda hacimde artış ve büzülme meydana gelmesiyle oluşur. Şişme potansiyeli veya şişme yüzdesi (Eşitlik 1) tabii bir zemin numunesinin belirli yük altında, suya doygun duruma ulaşincaya kadar gösterdiği düşey şişme miktarının, numunenin ilk yüksekliğinin yüzdesi olarak ifade edilir.

$$S_w = [\Delta H / H_0 * 100] \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de  $S_w$  ; şişme yüzdesi,  $\Delta H$  ; yükseklik artışı,  $H_0$  ;başlangıç numune yüksekliğidir.

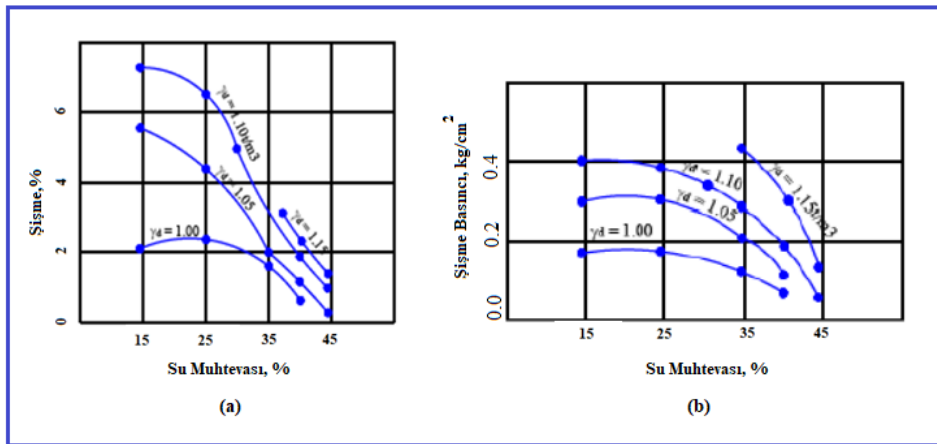
Zeminlerdeki kil birimlerinde meydana gelen şişme olayının mekanizması McBride (1989) tarafından kil yüzeyi, iyonlar ve su arasındaki etkileşim kuvvetlerinin dengelenmesi olarak tanımlanmıştır. Sıvı miktarının değişmesi sonucunda, zemindeki su değişmekte ve dolayısıyla iç kuvvetler etkilenmektedir. Dışarıdan uygulanan gerilmeler arasındaki denge bozulduğunda; denge yeniden sağlanıncaya kadar, zeminde şişme-büzülme şeklinde hacim değişiklikleri meydana gelmektedir (Nelson ve Miller, 1992). Zeminlerin fiziksel parametreleri kullanılarak şişme potansiyelinin tanımlanması konusunda birçok araştırmacı çalışmalar yapmışlardır. Parker, Amos ve Kaster (1977), karmaşık mineralojiye sahip killerde aktivitenin çok belirsiz bir değerde olduğunu ortaya koymuşlardır. Bununla birlikte, Schreiner (1988)

aktivite ile şişme-büzülme potansiyeli arasında kararlı bir ilişki olduğunu gözlemlemiştir. Schafer ve Singer (1976) şişen kil yüzdesinin, zeminin şişme potansiyelindeki değişimin büyük bir bölümünü etkilediğini belirtmişlerdir. Chen (1975) yaptığı çalışmalar sonucunda su içeriğinin hacim değişimine etkisini Şekil 4 deki gibi ifade etmiştir. Kassiff (1971) başlangıç su içeriğinin şişme yüzdesi (Şekil 5a) ve şişme basıncına (Şekil 5b) etkisini araştırmış ve sabit birim hacim ağırlıkta su içeriğindeki artışın şişme basıncı ve şişme yüzdesini azalttığını ortaya koymuştur.



Şekil 4. Su içeriğinin hacim değişimine etkisi (Chen, 1975)

Figure 4. Effect of water content on volume change



Şekil 5. a) Başlangıç su içeriğinin şişme yüzdesine etkisi b) Başlangıç su içeriğinin şişme basıncına etkisi (Kassiff, 1971)

Figure 2. (a) Effect of initial water content on swelling percentage b) Effect of initial water content on swelling pressure

Chen (1975), şişen zeminlerde başlangıç su içeriğinin ve kuru birim hacim ağırlığının şişme oranını etkilediğini ve doğal su içeriği % 15'in altındaki killerin, şişme yönünden problemlili olduğunu, su içeriği % 30'nun üzerindeki killerde ise daha düşük değerlerde şişme olabileceğini tespit etmiştir. Holtz (1959), yaptığı deney sonuçlarından su muhtevası % 15'in altındaki çok kuru killerin şişme yönünden riskli olduğunu belirtmiştir. Şişme derecesinin belirlenmesinde Holtz ve Gibbs (1956) tarafından etkili endeks özellikleri kullanılarak yeni bir yöntem (Çizelge 1) önerilmiştir. Şişme potansiyelinin en iyi göstergelerinden biri olan plastisite indisine bağlı olarak şişen zeminlerin tanımlanması Çizelge 2'de verilmiştir. Holtz ve Gibbs (1956), Seed ve arkadaşları (1962), Likit Limit (LL) ve Plastisite İndisine (PI) bağlı sınıflandırma kartı (Şekil 6) geliştirmişlerdir. Mollamahmutoğlu ve Taşkıran (2000) tarafından önerilen şişme potansiyelinin zemin deneyleri ile korelasyonu Çizelge 3'de, Yıldırım ve Acar, 1994'e göre plastisite indisine bağlı şişme potansiyeli Çizelge 4'de gösterilmiştir. Şekil 7'de Seed ve arkadaşları (1962)

tarafından kil yüzdesi ve aktivite kullanılarak oluşturulan sınıflandırma sistemi ve Şekil 8'de kil yüzdesi ile plastisite indisine göre tanımlanmış Van Der Merve (1964) sınıflandırma abağı verilmiştir.

**Çizelge 1.** Endeks özellikleri ile şişme derecesinin belirlenmesi (Holtz ve Gibbs, 1956)

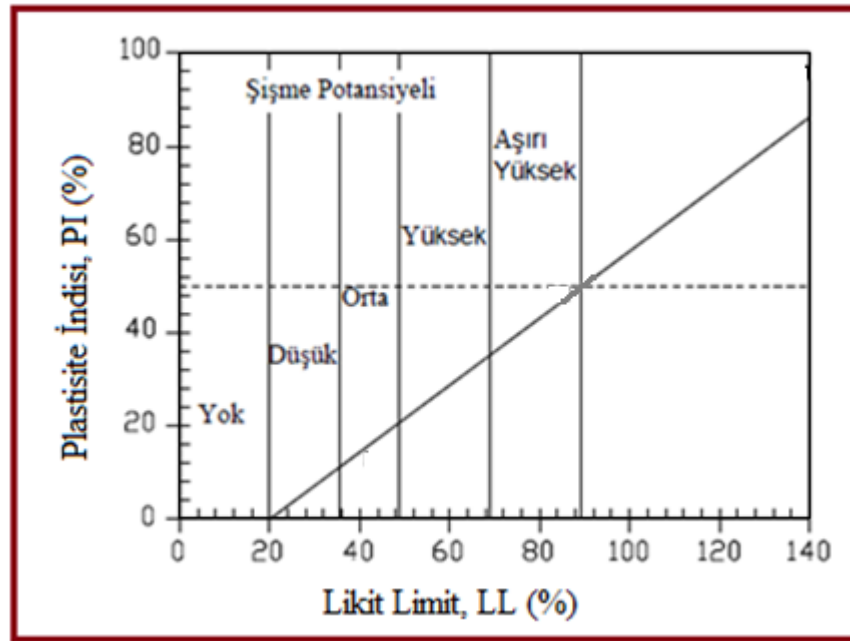
*Table 1. Determination of the degree of swelling with index properties*

Şişme Derecesi	Şişme Yüzdesi (%)	Rötre Limiti (%)	Plastisite İndisi (%)	0.001'den küçük dane yüzdesi (%)	Serbest Şişme (%)
Çok yüksek	>30	< 10	> 32	> 27	> 100
Yüksek	20 - 30	6- 12	23 - 45	18 - 37	> 100
Orta	10 - 20	8-18	12 - 34	12 - 27	50 - 100
Düşük	< 10	> 13	< 20	< 17	< 50

**Çizelge 2.** Plastisite indisi ile şişen zeminlerin tanımlanması (Carter ve Bentley, 1991)

*Table 2. Identification of swollen soils with plasticity index*

Şişme Potansiyeli	Plastisite İndisi (Seed ve diğ.,1962)	Plastisite İndisi (Krebs ve Walker, 1971)
Düşük (%0-1.5)	0-15	0 - 15
Orta (%1.5-5)	10 - 30	15 - 24
Yüksek (%5-25)	20 - 55	24 - 46
Çok yüksek (>25)	>40	>46



**Şekil 6.** Şişme potansiyeli sınıflandırma kartı (Holtz ve Gibbs, 1956; Seed ve diğ., 1962)

*Figure 6. Swelling potential classification card*

Çizelge 3. Zemin deneyleri ile şişme potansiyeli korelasyonları (Mollamahmutoğlu ve Taşkıran, 2000)

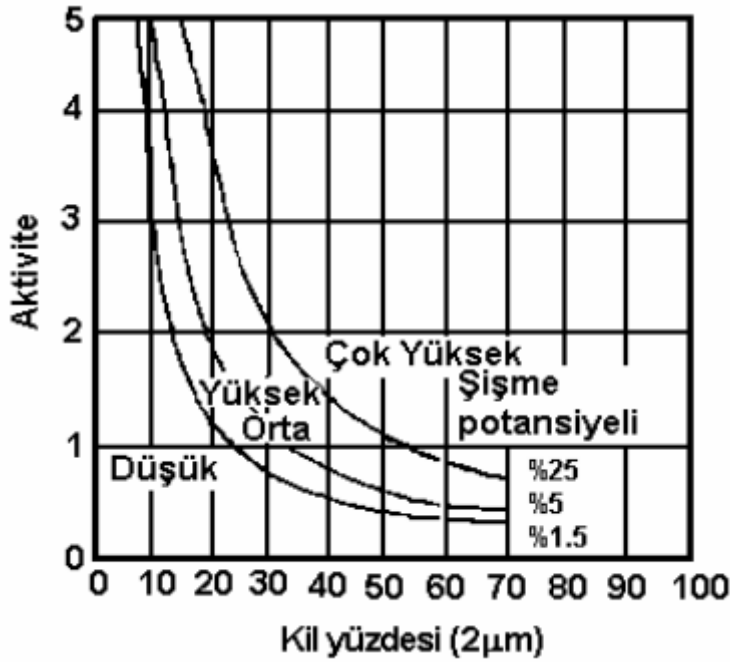
Table 3. Swelling potential correlations with soil tests

Laboratuvar ve arazi verileri			Şişme dereceleri		
200 no'lu elekten geçen	Likit Limit (LL)	SPT-N değeri	Muhtemel şişme (%)	Şişme Basıncı (kPa)	Şişme Potansiyeli
< 30	< 30	< 10	< 1	50	Düşük
30-60	30-40	10-20	1-5	150-250	Orta
60-90	40-60	20-30	3-10	250-1000	Yüksek
> 95	> 60	> 30	< 10	> 1000	Çok yüksek

Çizelge 4. Plastisite indisine bağlı şişme potansiyeli (Yıldırım, 2004)

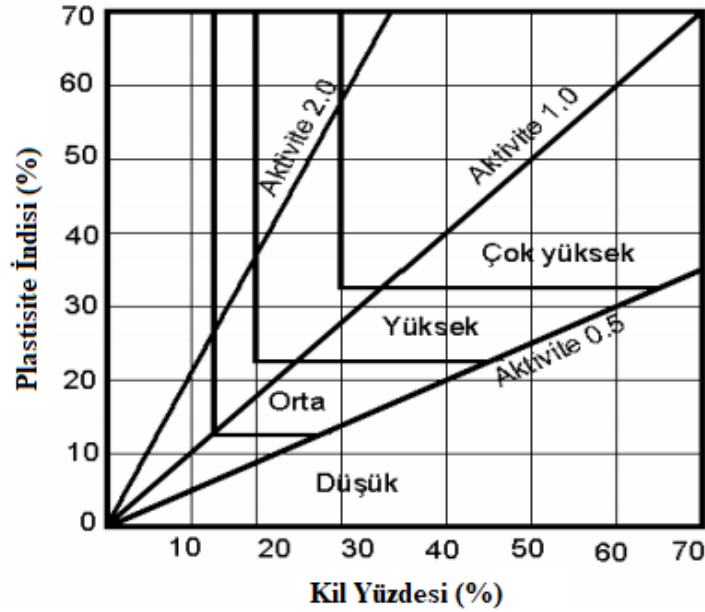
Table 4. Swelling potential due to plasticity index

Plastisite İndisi	Şişme Potansiyeli
0-15	Düşük
15-20	Orta
20-35	Yüksek
>35	Çok yüksek



Şekil 7. Seed ve arkadaşları tarafından önerilen sınıflandırma sistemi (Seed ve diğ., 1962)

Figure 7. The classification system proposed by Seed et al



Şekil 8. Van Der Merve tarafından önerilen sınıflandırma sistemi (Van Der Merve, 1964)

Figure 8. The classification system proposed by Van Der Merve

#### Ampirik Yaklaşımlar (Empirical Approaches)

Şişme karakteristiğinin ortaya çıkarılmasında önemli bir parametre olan şişme potansiyeli (şişme yüzdesi) hesaplanmasında birçok ampirik bağıntı geliştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ampirik bağıntılar aşağıda verilmiştir.

#### Vijayvergiya ve Ghazzaly (1973)'e göre şişme potansiyeli hesabı (Swelling potential calculation according to Vijayvergiya and Ghazzaly (1973))

Atterberg limitlerini kullanarak lineer şişme yüzdesini tanımlamışlardır. Lineer çoklu regresyon analizleri yapılarak eşitlik (2) önerilmiştir.

$$S = 2.27 + 0.131W_L - 0.274W \quad (2)$$

Eşitlik (2)'de,  $S$ ; Lineer serbest şişme yüzdesi,  $W_L$ ; Likit Limit,  $W$ ; başlangıç su muhtevasıdır.

#### Nayak ve Christensen (1974)'e göre şişme potansiyeli hesabı (Swelling potential calculation according to Nayak ve Christensen (1974))

Plastisite indisi, kil yüzdesi ve başlangıç su muhtevasını kullanarak eşitlik (3)'ü önermiştir.

$$S = \frac{(0.00229PI)(1.45C)}{(W_0 + 6.38)} \quad (3)$$

Eşitlik (3)'te,  $S$ ; Şişme yüzdesi (%),  $PI$ ; Plastisite İndisi,  $C$ ; Kil yüzdesi (%),  $W_0$ ; Başlangıç su muhtevasıdır.

**Acar ve Nyeretse (1992)'e göre şişme potansiyeli hesabı** (Swelling potential calculation according to Acar ve Nyeretse (1992))

Şişme yüzdesini, aktivite ve kil yüzdesine bağlı olarak önerdikleri eşitlik (4)'de verilmiştir.

$$S = 0.63 \cdot A^{1.05} \cdot C^{0.58} \quad (4)$$

Eşitlik (4)'de,  $S$ ; Şişme yüzdesi,  $A$ ; Aktivite,  $C$ ; Kil yüzdesi dir.

**Şekercioğlu (1998)'e göre şişme potansiyeli hesabı** (Swelling potential calculation according to Şekercioğlu (1998))

Şişme potansiyelini ampirik bir metotla belirlemek için önerdikleri eşitlik (5)'de verilmiştir.

$$S = 3.6 \cdot 10^{-5} \cdot A^{2.44} \cdot C^{3.44} \quad (5)$$

Eşitlik (5)'te,  $S$ ; Şişme potansiyeli,  $A$ ; Aktivite,  $C$ ; Kil yüzdesi ( $< 0.002 \text{ mm}$ ) dir.

**Sabtan (2005)'e göre şişme potansiyeli hesabı** (Swelling potential calculation according to Sabtan (2005))

Şişme potansiyelinin, kil yüzdesi, plastisite indisi ve su muhtevası kullanılarak hesaplanmasında eşitlik (6) önerilmiştir.

$$S = 1.0 + 0.06 \cdot (C + PI - W) \quad (6)$$

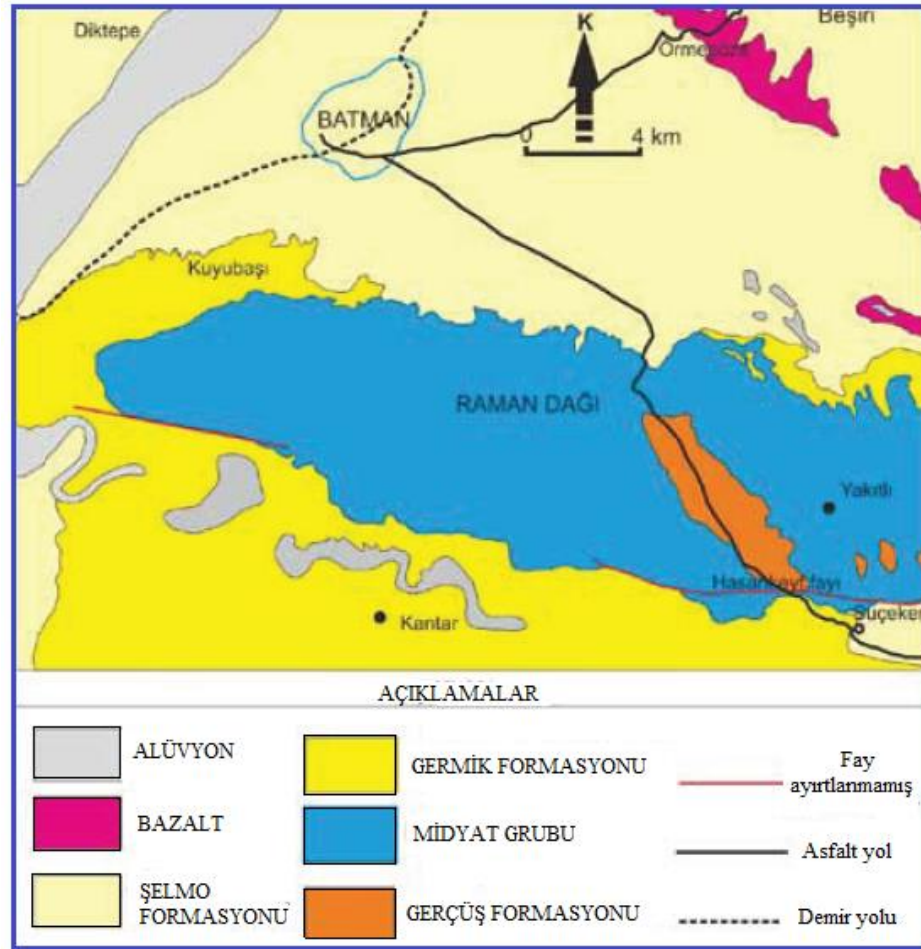
Eşitlik (6)'da,  $S$ ; Şişme yüzdesi (%),  $C$ ; Kil yüzdesi,  $PI$ ; Plastisite İndisi,  $W$ ; Su içeriğidir.

## ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA (RESEARCH FINDINGS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada inceleme alanı olan Batman ilinde yaygın olarak görülen kil biriminin şişme karakteristiğini araştırmak amacıyla niteliksel ve niceliksel yöntemler kullanılarak elde edilen şişme potansiyeli sonuçları değerlendirilmiştir. Bununla birlikte farklı araştırmacılara ait ampirik bağıntılar ile de şişme potansiyeli değerleri hesaplanmış ve sunulmuştur.

### İnceleme Alanının Jeolojisi (Geology of the Study Area)

Batman ili ve çevresinde gözlemlenen en yaşlı birim, Midyat grubuna ait Alt Eosen-Alt Oligosen yaşlı, seyrek killi kireçtaşı seviyeli, kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve dolomitlerden oluşan Hoya Formasyonu, Hoya formasyonu üzerine Oligosen yaşlı, yer yer dolomitik kireçtaşı, killi kireçtaşlarından oluşan Germik Formasyonu, bu formasyonların üzerini Orta-Üst Miyosen yaşlı, konglomera, kumtaşı ve çamurtaşı'ndan oluşmuş Şelmo formasyonu örter. Kıra Dağı'nı oluşturan Kuvaterner yaşlı bazaltlar Şelmo formasyonu üzerine gelmiş olup, alüvyonlardan oluşan Kuvaterner birimler Batman Çayı Vadisi ve çevresinde görülmektedir. Şelmo formasyonu İnce-orta-kalın tabakalı, kırmızı, kahve, gri, açık gri çakıltası, kumtaşı, siltaşı, çamurtaşı, ve yer yer de tutturulmamış, çamur, kum, çakıl, çakıllı-kumlu çamurlardan oluşur. Yer yer beyaz renkli jips seviyeleri içerir. Germik ve Midyat kireç taşları üzerine uyumsuz olarak gelen Şelmo formasyonu bölgede 1400 m kalınlığa kadar erişebilmektedir (Eren ve diğ., 2012). Grimsi yeşil, pembe, belli kısımlarında kahvems mor renkli kumtaşı, şeyl, kumlu siltaşı, jips ara tabakalı, kötü boylanmalı, alt seviyelerinde ince tabakalı, dağınık kireçtaşı çakıllı olan Şelmo Formasyonu, üst seviyelerinde kalın ve çapraz tabakalı sertçe kumtaşı halindedir (Bolgi, 1961). İnceleme alanı olan Batman kent merkezi yerleşiminin büyük bir bölümü Şelmo formasyonun (Şekil 9) üzerindedir.



Şekil 9. İnceleme alanı jeoloji haritası (Eren ve diğ., 2012)

Figure 9. Geological map of the study area

#### Arazi ve Laboratuvar Çalışmaları (Land and Laboratory Studies)

İnceleme alanında kil biriminin şişme potansiyelinin araştırılması amacıyla altı adet jeoteknik amaçlı sondaj kuyusu açılmıştır. Şekil 10'da temel sondaj kuyularının lokasyon yerleri verilmiştir. Her temel sondaj kuyusunun killi seviye birimlerinden alınan örselenmemiş numuneler (UD) (Şekil 11) için dane boyutu dağılımı analizleri, kıvam limitleri, hidrometre, üç eksenli basınç ve ödometre (konsolidasyon) deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen fiziksel ve mekanik zemin parametreleri Çizelge 5'te, kil birimin ortalama zemin parametreleri değerleri Çizelge 6'da verilmiştir.



Şekil 10. İnceleme alanındaki sondaj kuyularının lokasyon yerlerinin gösterimleri  
 Figure 10. Representation of location locations of drilling wells in the study area



Şekil 11. Killi seviye birimlerinden alınan örselenmemiş numunelerin bir bölümünün görünümü  
 Figure 11. View of some of the undisturbed samples taken from clayey level units



**Çizelge 5.** İnceleme alanına ait laboratuvar deneylerinden elde edilen fiziksel ve mekanik zemin parametreleri değerleri

*Table 5. Physical and mechanical soil parameters values obtained from laboratory experiments belonging to the study area*

Sondaj Numarası	SK-1	SK-2	SK-3	SK-4	SK-5	SK-6
<b>Doğal su muhtevası</b>	20,47	20,74	20,55	19,80	19,68	18,94
<b>Tane Boyu Analizi</b>						
# 4 geçen (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
# 200 geçen %	95,05	91,24	91,27	97,22	93,49	96,01
<b>Atterberg Limitleri</b>						
LL	42,7	49,7	37,0	51,8	47,2	32,2
PL	24,5	27,3	23,1	22,0	24,3	17,3
PI	18,2	22,4	13,9	29,8	22,9	14,9
<b>Zemin Sınıfı</b>	CL	CL	CL	CH	CL	CL
<b>Doğal birim hacim ağırlık (t/m<sup>3</sup>)</b>	2,030	1,950	1,950	1,770	1,980	2,010
<b>Kuru birim hacim ağırlık (t/m<sup>3</sup>)</b>	1,685	1,615	1,617	1,477	1,654	1,689
<b>Boşluk oranı</b>	0,561	0,448	0,514	0,512	0,568	0,523
<b>Aktivite</b>	0,191	0,245	0,152	0,306	0,244	0,155
<b>Likitlik indisi</b>	1,053	0,885	1,392	0,584	0,763	1,197
<b>Kıvam indisi</b>	1,22	1,29	1,18	1,07	1,20	0,88
<b>Mukavemet Parametreleri</b>						
Kohezyon (c) (kg/cm <sup>2</sup> )	0,68	0,70	0,65	0,62	0,67	0,70
İçsel sürtünme açısı (Ø) (Derece)	2,00	3,00	3,00	4,00	2,00	2,00

**Çizelge 6.** İnceleme alanına ait kil birimin ortalama zemin parametreleri değerleri

*Table 6. The average values of the parameters of the study area soil clay unit*

<b>Doğal su muhtevası</b>	20.03
<b>Başlangıç su muhtevası</b>	20.47
<b>Likit Limit</b>	43.4
<b>Plastik Limit</b>	23.0
<b>Plastisite İndisi</b>	20.3
<b># 200 Elekten geçen</b>	94.04
<b>Aktivite</b>	0.313
<b>Kuru Birim Hacim Ağırlık</b>	1.622

Ödometre (Konsolidasyon) deneyi ile zeminin tek eksenli şişme değerleri hesaplanmış (Çizelge 7) ortalama şişme potansiyeli % 1.66 ve şişme basıncı 0.183 kg/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. İnceleme alanına ait kil birimin ortalama zemin parametreleri değerleri (Çizelge 8) ile niteliksel yöntemler kullanılarak elde edilen şişme potansiyeli sonuçları *Yüksek-Orta-Düşük* olarak belirlenmiştir. Aynı ortalama zemin parametreleri ile farklı araştırmacılara ait ampirik bağıntılar kullanılarak yapılan hesaplamalarda en

düşük şişme potansiyeli değeri % 1.90 en yüksek % 6.68 olarak bulunmuştur. Niteliksel yöntemlere göre elde edilen değerlendirmelere bakıldığında (Çizelge 8) plastisite indisi değeri kullanılarak Seed ve arkadaşları (1962), Yıldırım ve Acar (2004)'a göre *yüksek*, Krebs ve Walker (1971)'a göre *orta*, Holtz ve Gibbs (1956)'e göre yine orta derecede şişme potansiyeli, su içeriği değeri kullanılarak Chen (1975) ve Holtz (1959)'a göre düşük derecede şişme potansiyeli, likit limit ve plastisite indisi değerleri birlikte kullanılarak Holtz ve Gibbs (1956), Seed ve arkadaşları (1962)'na göre orta derecede şişme potansiyeli belirlenmiştir. Mollamahmutoğlu ve Taşkıran (2000)'a göre yapılan analizde Likit Limit (LL) değeri kullanılmış, Standart Penetrasyon Testi (SPT) ile elde edilen darbe sayısı kullanılmamıştır. Standart Penetrasyon Deneylerinin (SPT) darbe sayılarından elde edilen değerlerinin doğruluğunun kontrolü zordur. Dolayısıyla zemine verilen güç her defasında aynı olamayacağından elde edilen darbe sayıları yanıltıcı olabilmektedir. Bununla birlikte Seed ve arkadaşları (1962)'nın önerdiği Aktivite ve kil yüzdesine göre önerilen grafikte düşük, Van Der Merve (1964)'nın plastisite indisi (PI) ve kil yüzdesine göre önerdiği sınıflandırma sisteminde ise yüksek derecede şişme potansiyeli olduğu görülmüştür. Genel olarak su içeriği ve kıvam limitleri kullanılarak inceleme alanındaki kil birimi için uygulanan nitel yöntem sonuçlarında şişme potansiyelinin birbirinden farklı sonuçlar verdiği, bununla birlikte yüksek olduğu görülmüştür. Şişme potansiyelinin ampirik bağıntılar kullanılarak farklı araştırmacılara göre sonuçlarına bakıldığında (Şekil 12a ve Şekil 12b) Sabtan (2005) ile Nayak ve Christensen (1974)'e göre yapılan hesaplamalarda sonuçların birbirine yakın değerlerde olduğu, bunda her iki bağıntıda plastisite indisi, kil yüzdesi ve su içeriği parametrelerinin kullanılması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte ampirik bağıntılarda Vijayvergiya ve Ghazzaly (1973) Acar ve Nyeretse (1992) ve Şekercioğlu (1998)'na göre yapılan şişme potansiyeli hesaplamalarında elde edilen değerlerin ödometre konsolidasyon (ödometre) deneyinden çıkan sonuçla daha yakın ve uyumlu olduğu belirlenmiştir.

**Çizelge 7.** İnceleme alanındaki şişme potansiyeli ve şişme basıncının niteliksel yöntem olan konsolidasyon (ödometre) deneyi kullanılarak elde edilen değerleri

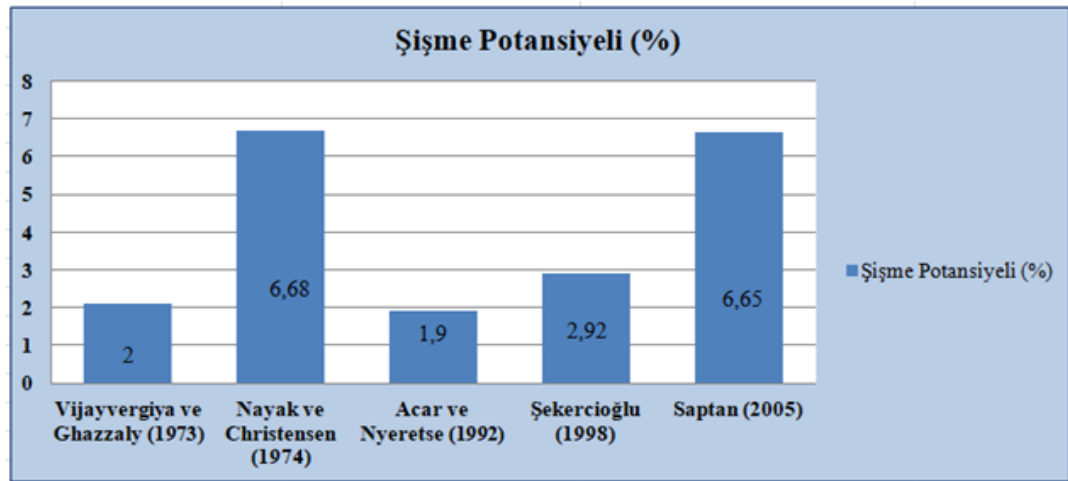
*Table 7. The swelling potential in the study area and the values obtained by using the swelling pressure (consolidation) test, which is a qualitative method*

Sondaj No	Numune	Derinlik (m)	Şişme Basıncı, (kg/cm <sup>2</sup> )	Şişme, (%)
SK-1	UD	3,00	0,10	1,40
SK-2	UD	3,00	0,075	1,30
SK-3	UD	3,00	0,25	2,50
SK-4	UD	3,00	0,399	2,75
SK-5	UD	3,00	0,15	1,00
SK-6	UD	3,00	0,125	1,05

**Çizelge 8.** İnceleme alanındaki şişme potansiyelinin niteliksel yöntemlerden elde edilen farklı araştırmacılara göre sonuçları

Table 8. Results of the swelling potential in the study area according to different researchers obtained from qualitative methods

Holtz ve Gibbs (1956); Seed ve arkadaşları (1962)	Holtz ve Gibbs (1956)	Holtz (1959)	Seed ve arkadaşları (1962)	Seed ve arkadaşları (1962)	Van Der Merve (1964)	Krebs ve Walker, (1971)	Chen (1975)	Mollama hmutoglu ve Taşkiran (2000)	Yıldırım ve Acar (2004)
Plastisite İndisi (PI) ve Likit Limit (LL) kullanılarak sınıflandırmaya kartına göre	Endeks özellikle rine göre	Su muhtevasına göre	Plastisite İndisine (PI) göre	Aktivite ve kil yüzdesine göre	Plastisite İndisi (PI) ve kil yüzdesine göre	Plastisite İndisine (PI) göre	Su muhtevasına göre	Likit Limit (LL) değerlerine göre	Plastisite İndisine (PI) göre
Orta	Orta	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek	Orta	Düşük	Yüksek	Yüksek



Vijayvergiya ve Ghazzaly (1973)	Nayak ve Christensen (1974)	Acar ve Nyeretse (1992)	Şekercioğlu (1998)	Saptan (2005)
2.12	6.68	1.90	2.92	6.65

**Şekil 12 a)** İnceleme alanındaki şişme potansiyelinin ampirik bağıntılardan elde edilen farklı araştırmacılara elde edilen sonuçların grafiksel b) Çizelge gösterimi

Figure 12. (a) Graphical results of the results obtained from different researchers from the empirical relations of the swelling potential in the study area b) Chart representation

## SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada Batman kentine ait kil numuneleri üzerinde laboratuvar deney sonuçlarına göre elde edilen parametrelerle şişme potansiyelinin derecesi nitel ve nicel yöntemlerle araştırılmıştır. Bununla birlikte mühendislik yapılarının inşa edilmesinde sık görülen zemin problemlerinden biri olan şişme

probleminin daha geniş irdelenmesinin önemi üzerinde durulmuştur. İnceleme alanında limit, likit limit, aktivite v.b. temel zemin parametreleri ile uygulanan korelasyonların tümünde ağırlıklı olarak 'yüksek veya orta derecede şişme' sonuçları elde edilmiştir. Konsolidasyon (Ödometre) deneyi ile zeminin tek eksenli şişme değerleri hesaplanmış ve ortalama şişme potansiyeli % 1.66 olarak bulunmuştur. Niteliksel yöntemlere göre elde edilen sonuçlarda, plastisite indisi değeri kullanılarak Seed ve arkadaşları (1962), Yıldırım ve Acar (2004)'a göre *yüksek*, Krebs ve Walker (1971)'a göre *orta*, Holtz ve Gibbs (1956)'e göre yine orta derecede şişme potansiyeli, su içeriği değeri kullanılarak Chen (1975) ve Holtz (1959)'a göre düşük derecede şişme potansiyeli, likit limit ve plastisite indisi değerleri birlikte kullanılarak Holtz ve Gibbs (1956), Seed ve arkadaşları (1962)'na göre orta derecede şişme potansiyeli belirlenmiştir. Su içeriği ve kıvam limitleri kullanılarak uygulanan nitel yöntem sonuçlarında ise şişme potansiyelinin birbirinden farklı sonuçlar verdiği ve yüksek değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Şişme potansiyelinin ampirik bağıntılar kullanılarak farklı araştırmacılara göre yapılan analizlerinde, Sabtan (2005) ile Nayak ve Christensen (1974)'ün hesaplama sonuçlarının birbirine yakın değerlerde olduğu, Vijayvergiya ve Ghazzaly (1973) Acar ve Nyeretse (1992) ve Şekercioğlu (1998)'na göre yapılan şişme potansiyeli hesaplamalarında ise elde edilen değerlerin konsolidasyon (ödometre) deneyinden çıkan sonuçla daha yakın ve uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Ancak kil birimi için bütün yapılan analizlerde, sonuçların birbirinden farklı değerler verdiği gözlemlenmiştir. Çalışmada elde edilen bu farklı sonuçlar, Batman kenti genelinde hakim olan Şelmo formasyonunun litolojik olarak yanal ve düşey yönlerde değişkenlik göstermesi ve ayrışma zonu özelliğinde olmasından kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır. Bu çalışmada, son yıllarda hızlı bir kentleşmenin görüldüğü Batman şehrinde yapılan mühendislik amaçlı tüm çalışmalarda sonradan daha büyük zemin problemlerinin ortaya çıkmasını önlemek amacıyla tüm zemin parametrelerinde olduğu gibi şişme potansiyelinin de farklı analizlerle yorumlanmasının daha fazla önem kazandığı sonucuna varılmıştır.


#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Acar, Y. B., Nyeretse, P., 1992, "Total suction of artificial mixtures of soil compacted at optimum water content", *Geotechnical Testing Journal*, Cilt 15, Sayı 1, ss. 65-73.
- Bozkurtoğlu, E., Şans, G., Eyüboğlu, R., 2015, "Kohezyonlu zeminlerin şişme potansiyeli için bir yaklaşım: Avclar-Esenyurt örneği", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 21, Sayı 6, ss. 270-275.
- Carter, M., Bentley, S. P., 1991, *Correlations of soil properties*, Pentech Press, London.
- Chen, F. H., 1975, *Foundations on expansive soils, developments in geotechnical engineering 12*, Elsevier Scientific, New York.
- Dakshanamurty, V., Raman V., 1973, "A Simple Method of Identifying an Expansive", *Soils and Foundations*, Cilt 13, Sayı 1, ss. 97-104.
- Eren, Y., Nalbantçılar, M. T., Beyaz, T., Dinç, S., Ünal, M., Arslan, Ş., Polat, S., 2012, "Esentepe (Gültepe/Batman) çukurunun oluşum mekanizması", *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, Cilt 1, Sayı 2, ss. 385-394.
- Fredlund, D. G., 1975, "Engineering Properties of Expansive Clays", Paper presented to the seminar on Shallow Foundations on Expansive Clays, Regina, Saskatchewan, Canada.
- Gasparre, A., 2005, *Advanced Laboratory Characterization of London Clay*. Phd Thesis, Imperial College, London.
- Holtz, W. G., 1959, "Expansive clays-properties and problems", *Journal of the Colorado School of Mines*, Cilt 54, Sayı 4, ss. 89-125.
- Holtz, W. G., Gibbs, H. J., 1956, "Engineering properties of expansive clays, transactions", *ASCE*, Sayı 121, ss. 641-677.
- Kassa, M., 2005, *Relationship Between Consolidation and Swelling Characteristics of Expansive Soils of Addis Ababa*, Master Thesis, Addis Ababa University, Department of Civil Engineering, Addis Ababa.
- Kassiff, G., 1971, "Swelling potential of compacted clay", *ASCE*, Cilt 97.
- Kassif, G., 1971. Swelling Potential of Compacted Clay, *ASCE*, Vol.97.

- King P. M., 1981, "Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement", *Aust. J. Soil Res.*, Cilt 19, Sayı 3, ss. 275–285.
- Krebs, R. D., and Walker, E. D. (1971). "Highway materials." Publication 272, Department of Civil Engrg., Massachusetts Institute of Technology, McGraw-Hill Company, New York, 107.
- Lucian, C., 2006, *Geotechnical Aspects of Buildings on Expansive Soils in Kibaha, Tanzania: Preliminary Study*, Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, Department of Civil and Architectural Engineering, Stockholm, Sweden.
- McBride, M. B., 1989, *Surface chemistry of soil minerals, Minerals in soil environments*, 2nd ed, Soil Sci. Soc. Am. Book Ser, No. 1, Madison, WI. 35- 88.
- Mollamahmutoğlu, M., Güngör, G., 2002, *Bursa Yöresi Şişebilen Kil Zeminlerin Yol Dolgularında Kullanılması Amacıyla Uçucu Kül ile Islahı*, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara.
- Mollamahmutoğlu, M., Taşkıran, T., 2000, *Diyarbakır İli, KayapınarYeniköy- Bağcular Yöresi Kilinin Şişme Potansiyelinin İrdelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Ankara.
- Nayak, N. V., Christensen, R. W., 1974, Swell characteristics of compacted expansive soils, *Clay and Clay Minerals*, Cilt 19, ss. 251-261.
- Nelson, J., Miller, D. J., 1992, *Expansive soils problem and practice in foundation and pavement engineering*, John Wiley & Sons.
- Parker, J. C., Amos, D. F., Kaster, D. L., 1977, "An evaluation of several methods of estimating soil volume change", *Soil Soc. Am. J.*, Cilt 41, Sayı 6, ss. 1059– 1064.
- Sabtan A. A., 2005, "Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia", *Journal of Asian Earth Sciences*, Cilt 25, Sayı 5, ss. 747–757.
- Schafer, W.M., Singer, M.J., 1976, Influence of physical and mineralogical properties on swelling of soils in Yolo County, California, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Cilt 40, Sayı 4, ss. 557-562.
- Schreiner, H. D., 1988, *Identification and classification of expansive soils*, Proc. 6th Intl. Conf. on Expansive Soils. New Dehli, 23-29.
- Seed, H. B., Moodward, R. J., Lungreen, R., 1962, "Prediction of swelling potential for compacted clays", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Cilt 88, Sayı 3, ss. 53-87.
- Şekercioğlu, E., 1998, *Yapıların projelendirilmesinde mühendislik jeolojisi*, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara.
- Uzuner, B., 1998, *Temel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi. 4.B.*, Ankara.
- Van Der Merve D. H., 1964, "The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction", *Trans SAICE*, Cilt 6, Sayı. 5, ss. 103-107.
- Vijayvergiya, V. N., Ghazzaly, O. I., 1973, Prediction of Swelling Potential of Natural Clays, *Proceedings, Third International Research and Engineering Conference on Expansive Clays*, 227-234.
- Wise, J. R., Hudson W. R., 1971, *An examination of expansive clay problems in Texas; study of expansive clays in roadway structural systems research project 118-5*, The Texas Highway Department, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Austin.
- Yıldırım, H., 2002, "Şişme basıncının tespiti ve emme kapasitesi ilişkisi", *İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi*, Sayı 176, ss. 2617-2625.
- Yıldırım, H., Acar, C., 1994, *Killi Zeminlerin Şişme Davranışına Ön Yüklemenin Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Yılmaz, I., Karacan E., 1998, "Zeminlerin şişme özellikleri", *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, Sayı 52, ss. 17-26.
- Zentar, R., Karstunen, M., Wheeler, S. J., 2002, "Influence of Anisotropy and Destructuration on Undrained Shearing of Natural Clays", 5th European Conf. On Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2002), Paris, 21-26.



## TRİBOELEKTRİK NANOJENERATÖRLER İLE ENERJİ HASADI: TEORİK KÖKEN, ÇALIŞMA PRENSİBİ VE ÇALIŞMA MODLARI

Nazire Deniz YILMAZ 

Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Uşak, TÜRKİYE  
[naziredyilmaz@gmail.com](mailto:naziredyilmaz@gmail.com), [nazire.yilmaz@usak.edu.tr](mailto:nazire.yilmaz@usak.edu.tr)

(Geliş/Received: 29.05.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 08.10.2020)

**ÖZ:** Cep telefonları ve giyilebilir elektronik aygıtların fonksiyonlarını kesintisiz biçimde yerine getirebilmeleri için gereksinim duyulan enerjinin üretimi ve depolanması, hafif ve esnek elemanlarla sağlanmalıdır. Konvansiyonel piller; gerekli pratiklik, esneklik, konfor ve hafifliği sağlama konusunda yetersizlik kalmaktadır. Bu durum, enerji hasatçılara yönelen ilginin artmasına neden olmuştur. Enerji hasatçıları, çevresel enerjileri elektrik enerjisine dönüştürürler. Enerji hasatçıları, yalnızca pratiklik sağlamaz aynı zamanda çevre dostu enerji üretimi gerçekleştirir. Enerji hasatçıları, faydalanılan enerji kaynağına ve elektrik enerjisine dönüştürme prensibine göre fotovoltaik, termoelektrik, elektromanyetik, piezoelektrik ve triboelektrik gibi sınıflara ayrılabilir. Triboelektrik enerji hasatçıları sürtünme sırasında oluşan statik elektriği kullanılabilir enerjiye dönüştürür. Triboelektrik enerji hasatçıları ile; dikey temas ayrılma, düzlem içi kaydırma, tek elektrotlu, serbest triboelektrik tabaka modları gibi farklı çalışma modlarında enerji elde edebilir. İlk defa 2012 yılında geliştirilen, ardından yoğun biçimde araştırma çalışmalarına konu olan triboelektrik enerji hasatçıları; yüksek güç çıkışları, nanoteknoloji ile uyumları, geniş malzeme ve tasarım seçenekleri, küçük boyutları, hafif ve esnek yapıları, düşük maliyetleri ve giyilebilir aygıtlara eklenebilmeleri ile geleceğin enerji teknolojisi olmaya adaydır.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji hasadı, Giyilebilir aygıtlar, Nanogeneratörler, Triboelektrik nanogeneratörler

### Energy Harvesting with Triboelectric Nanogenerators: Theoretical Roots, Working Principles and Working Modes

**ABSTRACT:** Light-weight and flexible components are needed for energy generation and storage in order for cell phones and wearable electronics to carry out their functions uninterruptedly. Conventional batteries are insufficient in terms of practicability, flexibility, comfort and light weight. This situation causes energy harvesters to attract more interest. Energy harvesters collect energy present in the environment and transfer it into electrical energy which can be used by wearables and other electronics. Harvesting environmental energy not only provides ease of use, but it also generates environmentally-friendly energy. According to the energy source and conversion principle; energy harvesters can be classified in groups such as photovoltaic, thermoelectric, electromagnetic, piezoelectric, and triboelectric energy harvesters. Triboelectric energy harvesters convert static electricity induced by friction, into usable energy. With triboelectric energy harvesters, energy can be generated using vertical contact separation, in-plane sliding, single electrode and free-standing triboelectric layer modes. Triboelectric energy harvesters were developed for the first time in 2012, and then have been the subject of intense research studies. With their high power output, compliance with nanotechnology, broad material and design choices, small

dimensions, light and flexible structure, low cost and adaptability to wearable systems, triboelectric energy harvesters show promise to be the energy technology of the future.

**Key Words:** *Energy harvesting, Nanogenerators, Triboelectric nanogenerators, Wearables.*

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hayat standardına olumlu katkılarından dolayı giyilebilir elektronik sistemlerin yakın gelecekte çok yaygın biçimde kullanılacakları öngörülmektedir. Günümüzde giyim bileşenlerin yalnızca estetik beklentileri karşılması yetmemekte, giyiciye birçok fonksiyon sağlaması beklenmektedir (Islam, Zubair, & Fairuz, 2019; Zeng et al., 2014). Elektronik tekstillere (akıllı tekstiller veya e-tekstiller) entegre edilen elektronik veya optoelektronik aygıtlar (Jeong ve diğ., 2019), elektronik sektörünün gelişmesi için de önemli katkı sağlama kapasitesindedir (Pu ve diğ., 2018). Giyilebilir aygıtlara örnek olarak sıcaklık sensörleri (Komolafe ve diğ., 2019), basınç sensörleri (Pizarro ve diğ., 2018), tıbbi teşhis sensörleri (Kim ve diğ., 2016; Miyata ve diğ., 2002), ışık yayan diyotlar (LED) (Choi ve diğ., 2017; Kim ve diğ., 2015), tekstil devreler (Tao ve Koncar, 2016) ve giyilebilir ekranlar (Yin ve diğ., 2020) sayılabilir. Bu giyilebilir aygıtların fonksiyonlarını yerine getirebilmeleri için enerjiye gereksinimleri vardır (Lancos ve diğ., 2017; Pu ve diğ., 2018; Zeng ve diğ., 2014). Güç üretimi ve depolanması, giyilebilir sistemlere uygun biçimde hafif ve esnek elemanlarla sağlanmalıdır. Böyle bir çözümün bulunmaması başta giyilebilir sistemler olmak üzere nanorobotlar (Mavroidis ve Ferreira, 2013), mikroelektromekanik sistemler (MEMS) (Rajdi ve diğ., 2012), küçük kişisel elektronik aygıtlar gibi birçok elektronik cihazın kullanımını kısıtlayacaktır (Huang ve diğ., 2003; Lancos ve diğ., 2017; Zeng ve diğ., 2014). Konvansiyonel piller portatif elektronik aygıtlarda yaygın kullanıma sahiptir. Ne var ki sık şarj edilme veya değiştirilme mecburiyetlerinin yanında, rijit ve ağır yapıları ile giyilebilir sistemlerin gerektirdiği pratiklik, esneklik, konfor ve hafifliği sağlama konusunda yetersizlik gösterirler (Pu ve diğ., 2018). Pillerin çevreye toksik etki göstermesi diğer bir dezavantajdır (Zhu, Bai, Chen, & Lin Wang, 2013). Bu eksikliklerin giderilmesi amacıyla pillerin lif ve tekstil yapılarına dâhil edilmesi konusunda emek harcanmıştır. Fakat enerji yoğunluklarının sınırlı olması, güvenlik sakıncaları ve şarj edilme sıklığı; bu elektrokimyasal enerji depolama aygıtlarının dezavantajları olmaya devam etmektedir. Bu durum enerji hasatçılara ilginin artmasına neden olmuştur. Enerji hasatçıları olan elektromanyetik jeneratörler, piezoelektrik ve triboelektrik nanojeneratörler, çevresel enerjileri giyilebilir sistemler ve diğer elektronik aygıtlarda kullanılmak üzere elektrik enerjisine dönüştürürler (Pu ve diğ., 2018). Çevresel enerjilerin elektriğe çevrilmesi yalnızca pratiklik sağlamaz, aynı zamanda düşük karbon salımlı, dünyadaki kaynakları tüketmeyen çevre dostu enerji elde etme olanağı sunar (Lin ve diğ., 2016).

Bu çalışmada çevrede mevcut enerjileri elektrik enerjisine dönüştüren enerji hasatçıları genel olarak gözden geçirilmiş, bunlar arasında öne çıkan triboelektrik nanojeneratörler incelenmiştir. Triboelektrik nanojeneratörlerin teorik temelleri, çalışma modları açıklanmış, üretimlerinde kullanılan malzemeler listelenmiş ve bu konuda literatürde yer alan bazı çalışmalar irdelenmiştir.

## ENERJİ HASATÇILARI (ENERGY HARVESTERS)

Çevresel enerjilerden elektrik üretebilen enerji hasatçıları, zor ve uzak yerlerde kullanılan elektronik cihazların ve giyilebilir elektronik cihazların çalışabilmesi için gerekli enerjiyi sağlayabilme potansiyeline sahiptir. İlgili enerji kaynağı; güneş ışığı (Hashemi ve diğ., 2020), vücut ısısı (Hyland ve diğ., 2016), su dalgası (Wang, 2017), ses (Choi ve diğ., 2019), yağmur damlası (Nie ve diğ., 2020), insan bedenindeki *in vitro* veya *in vivo* hareketler (Khalid ve diğ., 2019) olabilir. Enerji hasatçıları; fotovoltaik, termoelektrik, elektromanyetik, piezoelektrik ve triboelektrik enerji dönüşümü gibi farklı yöntemlerle elektrik enerjisi üretimi sağlayabilir (Islam ve diğ., 2019; Khalid ve diğ., 2019; Pu ve diğ., 2018; Zeng ve diğ., 2014).

Termoelektrik enerji hasatçıları, sıcaklık farkının olduğu durumlarda ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilir (Feng ve diğ., 2019). Termoelektrik enerji hasatçıları genelde katı-hal p- ve n- tipi yarıiletkenlerdir, ne var ki, verimlilikleri ve çıkış performansları çoğunlukla düşüktür (Pu ve diğ., 2018; Zeng ve diğ., 2014) ve üretilen güç mikro Watt mertebesinde (Jokic ve Magno, 2017).

Farklı çeşitlerde güneş hücreleri (fotovoltaik piller) ile güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi konusunda çalışmalar yapılmıştır (Hashemi ve diğ., 2020; Jokic ve Magno, 2017; Veligorskiy ve diğ., 2018). Ne var ki, güneş hücrelerinin kullanımı; coğrafi konum, mevsim, ve hava koşullarına bağlı olup enerji üretimi süreklilik arz etmemektedir (Pu ve diğ., 2018).

Diğer bir önemli bir enerji hasatçı sınıfı, elektromanyetik jeneratörlerdir. Elektromanyetik jeneratörler, Faraday'ın elektromanyetik endüksiyonu keşfetmesinden beri elektromanyetizma enerji üretimi için kullanılmaktadır. Konvansiyonel elektromanyetik jeneratörler de mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviriyor olsa da giyilebilir aygıtlar için uygun değildir. Bunun birinci sebebi, ağır ve sert mıknatıs kullanımının gerekmesidir. Diğeri ise düşük frekanstaki insan bedeni hareketlerinden elde edilebilen güç çıktısının yetersiz olmasıdır (Khalid ve diğ., 2019; Pu ve diğ., 2018).

Mekanik titreşim veya insan hareketleri, giyilebilir aygıtlar için genel olarak geçerli enerji kaynaklarıdır. Nanojeneratörlerin iki sınıfını oluşturan piezoelektrik nanojeneratörler ve triboelektrik nanojeneratörler ile, titreşim, rüzgar, deniz dalgası (Wang, 2017) ve insan hareketleri (Khalid ve diğ., 2019) gibi çeşitli mekanik enerjilerin toplanması için yoğun biçimde çalışılmıştır.

Piezoelektrik aygıtlar, basit yapıları ve kullanım kolaylığı nedeniyle enerji hasadı alanında önem kazanmıştır (Jung ve diğ., 2015). Ne var ki, bu yöntem insan hareketlerinden enerji elde etme konusunda bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Bu dezavantajların biri, insan hareketlerinin aşırı düşük frekansa sahip olmasıdır (Li ve diğ., 2018). İnsan hareketlerinin frekansı 1 Hz civarındadır. Piezoelektrik enerji toplayıcıların çalışma bant aralıkları ise yüksektir. Diğer bir dezavantaj, insan hareket genliğinin, genelde cihaz boyutlarından çok yüksek olmasıdır. Buna ilaveten, insan hareketleri çok yönlüdür: doğrusal titreşimler dışında eğilme, gerilme, kayma ve diğer hareketleri içerir. Bu karmaşık hareketler, piezoelektrik enerji toplayıcılarının enerji üretmesini zorlaştırır. Bu zorluklar, piezoelektrik nanojeneratörler ile elde edilen güç miktarını birkaç mili Watt ile sınırlı tutar (Khalid ve diğ., 2019; Qian ve diğ., 2018).

Triboelektrik nanojeneratörler; düşük ağırlıkları, küçük boyutları, esneklikleri, çok sayıda malzeme seçeneği, kullanışlı tasarım yapıları ve düşük frekanslarda üstün performansları ile öne çıkmıştır. Triboelektrik, temas elektriklenmesi olarak da adlandırılabilir. Triboelektrik terimi "tribo" ve "elektrik" kelimelerinden oluşur. Burada "tribo", Yunanca bir kelime olup sürtünme anlamına gelmektedir. Anlamının işaret ettiği biçimde, "Triboelektrik" sürtünme ile elektrik oluşması anlamına gelmektedir (Khushboo ve Azad, 2017). Triboelektrik etki, triboelektrik seriye göre değişik polar özellik gösteren, yani farklı elektron çekme karakteristiğine sahip iki maddenin, temas veya sürtünme hallerinde elektriksel yüklenmesi olayıdır (Pu ve diğ., 2018; Zeng ve diğ., 2014).

Triboelektrik nanojeneratörler, cep telefonu ve diğer küçük elektronik aygıtlara, akıllı tekstillere (Shi, He, & Lee, 2019; Zhu, Peng ve diğ., 2014) ve Nesnelerin İnternetine (IoT, "internet of things") enerji sağlama kapasitesi ile yeni çağın enerji teknolojisi olma potansiyeli taşımaktadır (Ahmed ve diğ., 2019). Nesnelerin internetinde (IoT) milyarlarca sensörün şarj edilmesi mümkün olmadığı için konvansiyonel pillerin kullanımı uygun olmamaktadır. *In situ* enerji çevirimi yapan nanojeneratörler ise sürekli güç tedariki için uygun bir alternatiftir (Pu ve diğ., 2018).

## TRİBOELEKTRİK NANOJENERATÖRLER VE NANOTEKNOLOJİ (TRİBOELECTRIC NANOGENERATORS AND NANOTECHNOLOGY)

Nanoteknoloji; malzeme, yapı, aygıt ve sistemlerin tasarım, karakterizasyon, üretim ve uygulamalarının nanometre ölçeğindeki olaylardan faydalanarak gerçekleştirildiği bilim ve mühendislik alanlarını içerir (Baker ve diğ., 1975). Nanoteknoloji, hızla gelişen disiplinlerarası bir çalışma alanıdır. Değişik bilim ve teknoloji dalları ile ilgilidir; bunlar arasında elektronik, tıp ve malzeme bilimleri sayılabilir. Nanoteknoloji, değişik alanlarda gittikçe daha yüksek sayıdaki uygulamada gelişmiş özellikler ve performans kazandırılmasına katkı sağlamaktadır (Yılmaz, 2018a).

"Nanomalzeme" terimi, en azından bir boyutu nano ölçekte yani 100 nm'den düşük olan malzemeleri işaret eder (Gashti ve diğ., 2012). Bu malzemeler, fonksiyonellik ve yüksek performans isteyen uygulamalarda gösterdikleri yüksek spesifik özellikleri sayesinde kullanım potansiyeli taşımaktadır.



Nanomalzemelerin diğer malzemelere karşı başlıca avantajı, çok yüksek alan-hacim oranına sahip olmalarıdır (Joshi ve diğ., 2008; Yılmaz, 2018a). Birim hacim başına elde edilen yüksek yüzey alanı, maddenin ortam ile etkileşime girebilen miktarını artırır. Dolayısıyla küçük hacim ve miktardaki nanomalzeme ile büyük etki elde etmek mümkündür (Crosby ve Lee, 2007).

Nanobilim ve nanoteknolojinin hızlı gelişimi, elektronik aygıtların minyatürize edilme sürecini de hızlandırmıştır (Zeng ve diğ., 2014). Nanomalzemeler ile, konvansiyonel malzemelerin ulaşamayacağı tasarım ve özellik kombinasyonları elde edilebilir. Nanomalzemelerden oluşan nanokompozitler; sensör, aktuatör, enerji toplama ve depolama gibi farklı uygulamalarda kullanım potansiyeline sahiptir (Yılmaz, 2018b).

Yeni nesil giyilebilir elektronik aygıtlar doğrudan insan bedeni üzerine giyilmektedir. Dolayısıyla, insan bedeninin kıvrımlı şekline ve esnekliğine uyum sağlamalıdır. Cildin nefes almasına izin vermelidir (Yılmaz, 2018a). Hafif olmalı ve az yer kaplamalı, böylece giyilebilir aygıtların estetik ve konfor özelliklerine olumsuz etki etmemelidir (Zeng ve diğ., 2014). Nanoteknolojinin kullanımı ile enerji hasadı ve depolanması gibi ileri fonksiyonlar; nano-ölçekli boyutlar sayesinde, giyilebilir cihazlarda estetik ve konfor performansına zarar vermeden elde edilebilmektedir (Misra ve Bera, 2018).

### TRIBOELEKTRİK NANOJENERATÖRLERİN TEORİK KÖKENİ (THEORETICAL BACKGROUND OF TRIBOELECTRIC NANOGENERATORS)

Elektromanyetik jeneratörlerin, piezoelektrik ve triboelektrik nanogeneratörlerin temelleri Maxwell denklemlerine dayandırılabilir (Zhang ve Wang, 2018). Maxwell denklemlerinin basit formları aşağıdaki gibi verilebilir (Maxwell, 1861a, 1861b, 2010; Pu ve diğ., 2018):

$$\nabla \cdot D = \rho, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}. \quad (4)$$

Yukarıda, Maxwell denklemlerini oluşturan Gauss Yasası, manyetizma için Gauss Yasası, Faraday Endüksiyon Yasası ve Ampere Yasası sırası ile verilmiştir. Burada  $D$  elektrik yerdeğiştirme alanını,  $B$  manyetik alanı,  $E$  elektrik alan şiddeti,  $H$  mıknatıslama alanını,  $\rho$  serbest elektrik yükü yoğunluğunu,  $J$  serbest akım yoğunluğunu,  $t$  ise zamanı singeler.  $\nabla$ , diverjans operatörü;  $\nabla \times$  ise rotasyonel operatördür.

Elektromanyetik jeneratörün çıktı akımı, manyetik alanın zamana göre değişiminden kaynaklanır ve akım  $\frac{\partial B}{\partial t}$  ile ilişkilidir. Triboelektrik ve piezoelektrik nanogeneratörlerin akımı ise Maxwell yerdeğiştirme akımı kısmı ile ilgilidir. Bu akım polarize yüzey yükleri nedeniyle polarizasyon alanının değişimine bağlıdır (Pu ve diğ., 2018). Maxwell'in yer değiştirme akımı 1861' de açıklanmış (Maxwell, 1861a, 1861b, 2010) ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Schwinger ve diğ., 2019):

$$D = \epsilon_0 E + P. \quad (5)$$

Burada,  $\epsilon_0$  vakum elektrik geçirgenlik katsayısı ve  $P$  polarizasyon alanıdır. Bu eşitliğin zamana göre türevi aşağıdaki gibidir:

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} \quad (6)$$

burada  $J_D$  yer değiştirme akımıdır. İzotropik ortam için, yer değiştirme akımı aşağıdaki biçimde ifade edilebilir:

$$J_D = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t}, \quad (7)$$

burada  $\epsilon$  dielektriklerin elektrik geçirgenliğidir. Yüzey polarize yükleri varsa, yer değiştirme akımı aşağıdaki gibidir (Pu ve diğ., 2018):

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P_s}{\partial t}, \quad (8)$$

Burada  $P_s$ , polarize olan yüklerin indüklediği polarizasyon alanıdır. Sağ kısımdaki ilk terim değişken elektrik alanının oluşturduğu akımdır. Aynı kısımdaki ikinci terim ise yüzey yüklerinin değişken polarizasyon alanının indüklediği akımdır. Triboelektrik nanojeneratörlerde, dielektrik iki malzemenin fiziksel teması ile her iki yüzeyde birbirinin zıttı elektrik yüklenme oluşacaktır. Oluşan elektrostatik alan dış devre boyunca elektron akışına neden olacaktır. İç devre, yer değiştirme akımı ile ilgili olurken; dış akım, kapasitif iletkenlik akımı olacaktır (Pu ve diğ., 2018).

6 numaralı eşitlikte gösterilen Maxwell yer değiştirme akımı denkleminin sağ kısmındaki ilk terim,  $\epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$ , elektromanyetik dalga teorisinin ve dolayısıyla radyo (Jondral, 2008), telsiz iletişim (Sengupta ve Sarkar, 2003), radar (Scott, 2005) gibi teknolojilerin gelişmesini sağlamıştır. İkinci terim ise, yani yüzey polarize yüklerin zamana bağlı değişiminin yol açtığı polarizasyon alanı ise, piezoelektrik (Guo, 2010) ve triboelektrik nanojeneratörlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Triboelektrik nanojeneratörlerin, Georgia Institute of Technology'den Prof. Wang ve ekibi tarafından 2012 yılında akademik dünyaya tanıtılması ile (Fan ve diğ., 2012); Nesnelerin İnterneti (IoT) çağı için gereken yeni enerji teknolojisi için "mavi enerji", "kendi gücünü sağlayan sensörler" ve "kendini şarj eden sistemler" gibi kavramların geliştirilmesine yol açılmıştır (Pu ve diğ., 2018; Zhang ve Wang, 2018).

#### TRİBOELEKTRİK NANOJENERATÖRLERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ (WORKING PRINCIPLE OF TRIBOELECTRIC NANOGENERATORS)

Farklı polarite gösteren iki malzeme birbiri ile temas haline getirilince, triboelektrik etki nedeniyle yük transferi meydana gelerek her iki yüzeyde birbirinin zıt yüklenme meydana gelir. Bu malzemeler temas halinde olmayan yüzeylerinden metal elektrotlara bağlı olması durumunda, temas yüzeylerinin ayrılması elektrostatik indüksiyon etkisi ile yük birikimine yol açar. Matematiksel olarak, yüzeylerdeki yük birikimi  $Q_f$  ise, iki elektrot arasındaki başlangıç voltajı  $V_{tr}$  aşağıdaki eşitlikteki gibi gösterilebilir (Khalid ve diğ., 2019):

$$V_{tr} = -\frac{Q_f d_{tr}}{\epsilon_0 S_{tr}} \quad (9)$$

Burada  $d_{tr}$  katmanlar arası uzaklığı,  $S_{tr}$  metal elektrotun yüzey alanını,  $\epsilon_0$  da vakum elektriksel geçirgenliği simgelemektedir. Aşağıdaki eşitlik ise dış elektrotlarda indüklenen akımı,  $I_{tr}$ , göstermektedir (Khalid ve diğ., 2019):

$$I_{tr} = C_{tr} \frac{\partial V_{tr}}{\partial t} + V_{tr} \frac{\partial C_{tr}}{\partial t} \quad (10)$$

burada  $C_{tr}$  sistemin sığasıdır. Triboelektrik etki yalnız kitlesel özelliklere bağlı değildir, temas yüzeyinden etkilenir. Temas yüzey morfolojisinin manipülasyonu, yüksek temas ve ayrılma hızına sahip aygıt yapı tasarımı ve elektron çekmede büyük farka sahip yüzey malzemelerinin kullanımı ile triboelektrik nanojeneratör performansı geliştirilebilir (Zeng ve diğ., 2014).

Çizelge 1, malzemelerin temas elektriklenmesi ile pozitif veya negatif yük alma eğilimlerini gösterir. Bu liste triboelektrik seri olarak bilinmektedir. İki malzeme triboelektrik seride birbirinden ne kadar uzaksa, temas halinde yüklenme o kadar şiddetli olur. Listede birbirine yakın yerleşmiş malzemelerin teması sonucu arasında çok az yüklenme meydana gelebilir veya hiç yüklenme olmaz (Miller, 2011). Literatürde farklı triboelektrik seri listeleri mevcuttur (Khalid ve diğ., 2019; Miller, 2011; Pan ve Zhang, 2019; Pu ve diğ., 2018).

**Çizelge 1.** Triboelektrik seri (Khalid ve diğ., 2019; Miller, 2011; Pan ve Zhang, 2019; Pu ve diğ., 2018)*Table 1. Triboelectric series (Khalid ve diğ., 2019; Miller, 2011; Pan ve Zhang, 2019; Pu ve diğ., 2018)*

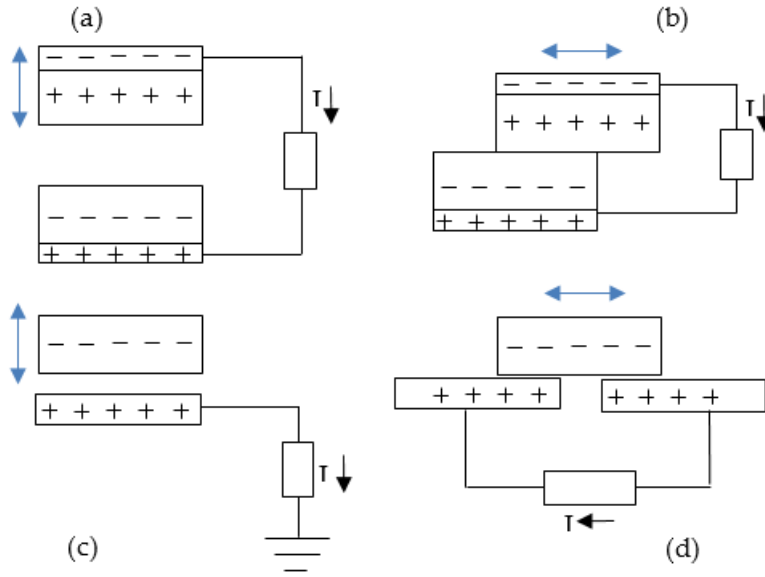
<b>Pozitif yük almaya eğilimli malzemeler (aşağı doğru pozitif eğilim azalıyor)</b>	<b>Negatif yük almaya eğilimli malzemeler (aşağı doğru negatif eğilim artıyor)</b>
İnsan teni	Pamuk
Asbest	Çelik
Asetat	Odun
Cam	Amber
Mika	Balmumu
İnsan saçı	Sert kauçuk
Naylon	Nikel
Yün	Bakır
Kürk	Pirinç
Kurşun	Gümüş
İpek	Çelik
Alüminyum	Altın, platin
Kağıt	Kükürt
Pamuk	Asetat, viskoz rayon
	Polimetilmetakrilat (PMMA)
	Polivinilalkol
	Polyester
	Stiren
	Orlon
	Akrilik
	Poliüretan
	Polietilen
	Polipropilen
	Poliimid (kapton)
	Polietilenteraftalat
	Polivinilklorür
	Silikon
	Teflon (politetrafloroetilen-PTFE)
	Silikon kauçuk
	Ebonit

## TRİBOELEKTRİK NANOJENERATÖRLERİN ÇALIŞMA MODLARI (WORKING MODES OF TRIBOELECTRIC NANOGENERATORS)

Triboelektrik elektrik hasatçıları, genelde dört farklı çalışma modu altında incelenir. Bunlar Şekil 1’de gösterildiği gibi; dikey temas ayrılma modu, düzlem içi kayma modu, tek elektrotlu mod ve serbest triboelektrik tabaka modudur (Khushboo ve Azad, 2017; Shi ve diğ., 2019).

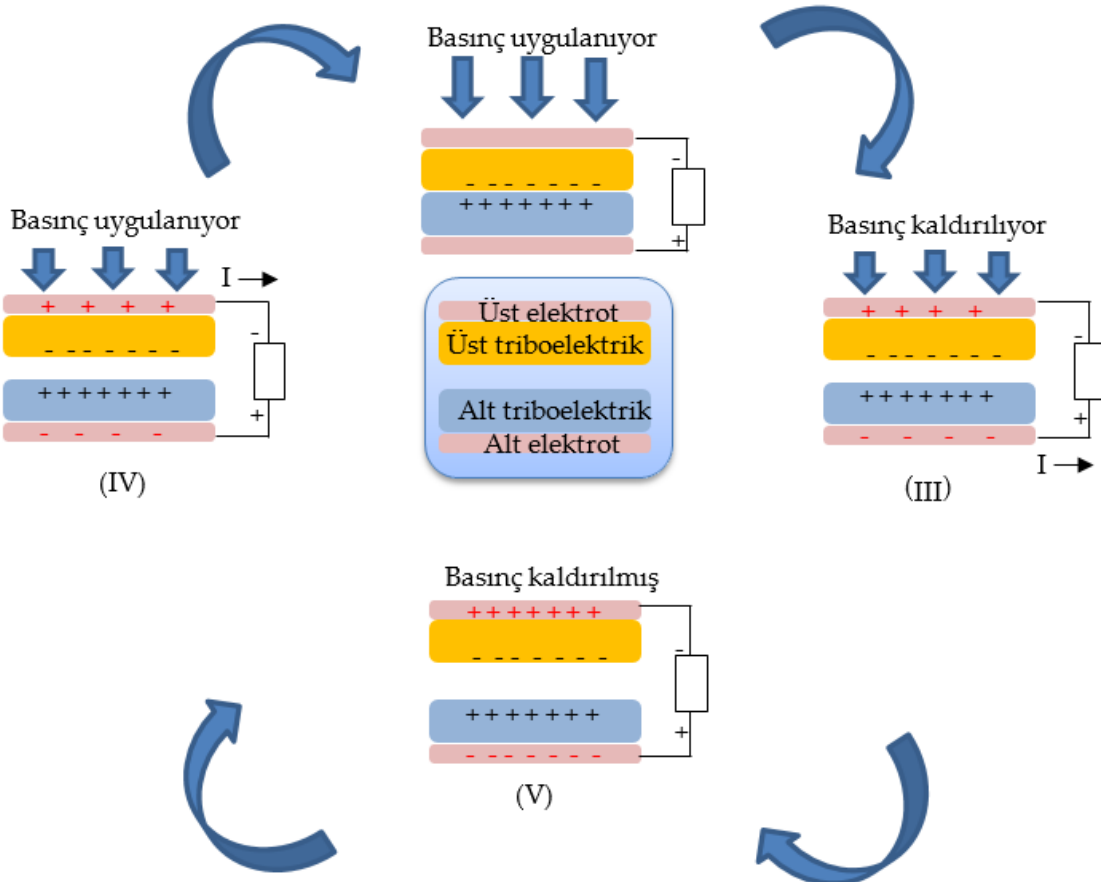
### Dikey Temas-Ayrılma Modu (Vertical Contact Separation Mode)

Dikey temas-ayrılma modu, triboelektrik enerji hasatçılarının tasarlanan ilk formudur. 2012 yılında Prof. Wang ve ekibi tarafından geliştirilmiştir (Wang ve diğ., 2012; Zhu ve diğ., 2012). Elektrik akımı oluşturmak için Şekil 2’de gösterildiği gibi iki yüzeyin devirli biçimde temas ve ayrılma hareketi yapmasından yararlanır.



**Şekil 1.** Triboelektrik nanojeneratör çalışma modları: (a) dikey temas ayrılma, (b) düzlem içi kayma, (c) tek elektrot ve (d) serbest triboelektrik tabaka modları.

*Figure 1.* Working modes of triboelectric nanogenerators: (a) vertical contact separation, (b) in-plane sliding, (c) single-electrode (d) freestanding triboelectric layer modes.



**Şekil 2.** Dikey temas-ayrılma modunun çalışma prensibi.

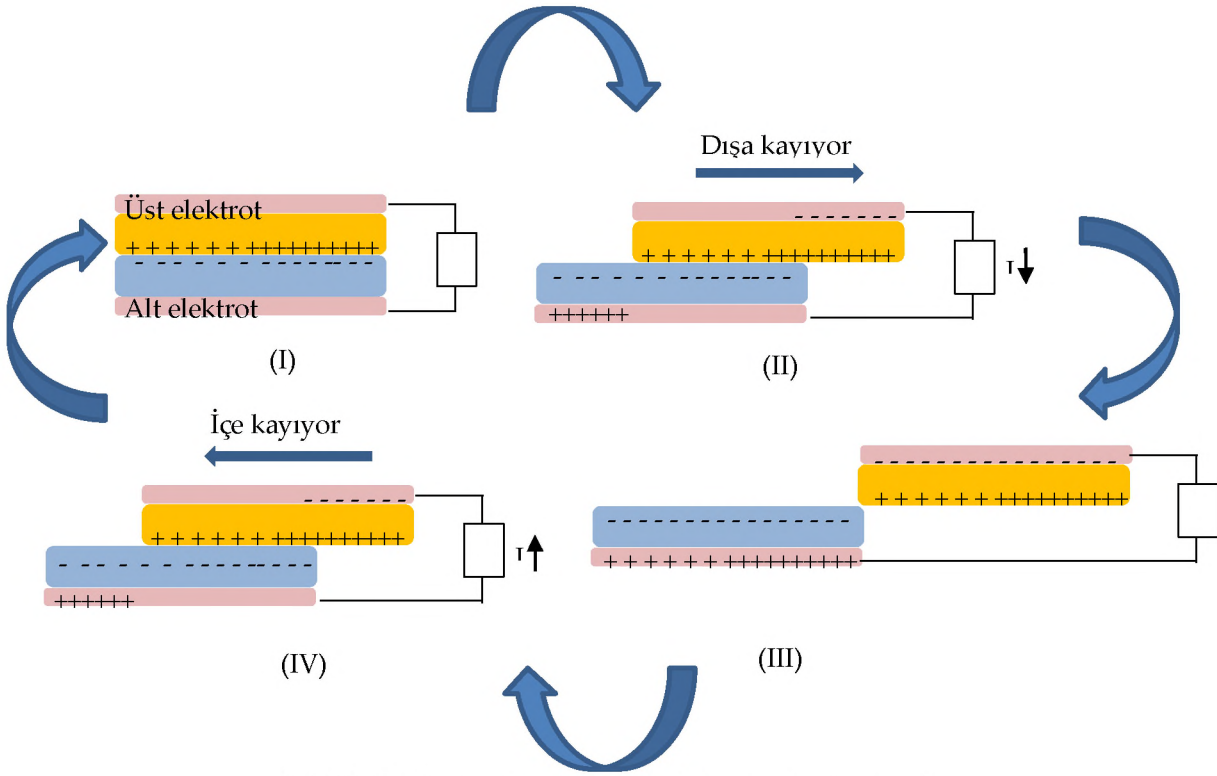
*Figure 2.* Working principle of vertical contact separation mode.

Bu modda, birbirine yakın biçimde yerleştirilen iki farklı dielektrik film, birbirinden uzak olan taraflarından ayrı elektrotlara bağlanmıştır. Dielektrik filmlere dikey doğrultuda tekrarlı temas ve ayrılma hareketi yaptırılır. Temas sırasında, elektron çekme kabiliyetlerindeki farklılıktan dolayı iki yüzeyde birbirine zıt elektrostatik yükler oluşur. Yüzeyler ayrıldığında uzak kısımlarından bağlı oldukları elektrotlarda serbest yüklerin oluşmasına neden olur. Bu serbest yükler, dielektrik yüzeylerin devirli temas-ayrılma hareketi devam ettikçe dış devrede akıma yol açacaktır (Pu et al., 2018). Dikkat edilmesi gereken husus, hareket eden yüklerin triboelektrik yüzeylerdeki elektrostatik yüklerin değil, bağlı buldukları elektrotlarda indüklenen yüklerdir. Bu durum, bu ve benzeri diğer modlar için de geçerlidir (Zhu, Peng, ve diğ., 2014). Wang ve ekibi, geliştirdikleri dikey temas ayrılma moduna göre çalışan triboelektrik nanojeneratörde dielektrik çifti olarak polimetil metakrilat (PMMA) and poliimid (Kapton) ve elektrot malzemesi olarak alüminyum kullanmıştır (Zhu ve diğ., 2012). 2013 yılında ayakkabı tabanına uyguladıkları dikey temas moduna göre çalışan triboelektrik nanojeneratörle, Wang ve ekibi, yürüyüş sırasında ayakkabıya ışıklandırma sağlamış ve cep telefonu şarj etmiştir (Zhu, Bai ve diğ., 2013).

### **Düzlem İçi Kaydırma Modu (In-Plane Sliding Mode)**

Düzlem içi kaydırma modu, ilk olarak Prof. Wang ve ekibi tarafından 2013 yılında geliştirilmiştir (Wang ve diğ., 2013). Bu mekanizma, düzlemsel, disk rotasyon ve silindirik rotasyon hareketleri için kullanılabilir (Khalid ve diğ., 2019). Düzlem içi kaydırma hareketi, dikey temas ayrılma hareketine göre daha pratik ve kolaylık sağlayan bir hareket modudur (Wu ve diğ., 2018). Düzlem içi kaydırma modunda ilk triboelektrik hasatçı, Wang ve diğ. (2013) tarafından naylon ve politetrafloroetilen (PTFE) filmi gibi iki farklı yüzey arasındaki görece kayma hareketi kullanılarak sunulmuştur. Şekil 3, düzlem içi kaydırma modunun çalışma prensibini gösterir.

Başlangıçta, iki yüzey (teflon film ve naylon) tam temas sağlayacak biçimde üst üste durur. İki yüzeyin elektron çekme özellikleri arasında büyük farkın oluşturduğu triboelektriklenme nedeniyle naylon yüzeyde pozitif yükler belirirken, PTFE film de eşit miktarda negatif yük çeker. Yalıtkan malzemelerde biriken yükler başka yere akmadan yalnızca yüzeyler üzerinde yer alacaktır. Üst yüzey yana kaymaya başlayınca, yüzeylerin temas alanının azalmasıyla düzlemsel yük ayrılması meydana gelir. Yük ayrılması elektrik alanı oluşumuna yol açar. Üst elektrotta daha yüksek potansiyel oluşturularak, üst elektrottan alt elektrotta akım oluşmasına neden olur. Bu proses, iki yüzey birbiri üzerinden tamamen kayıncaya kadar devam eder. İdeal koşullarda elektrotlar ve triboelektrik yüzeyler arasındaki dikey uzaklık düzlemsel kayma uzaklığına nispeten ihmal edilebilecek kadar küçüktür ve elektrotlara transfer olan yük miktarı, yüzeylerin kayması sırasında ayrılan yük miktarına eşittir. Benzer şekilde, üst yüzey geri hareket etmeye başlayınca, artan temas alanı ile birlikte ayrılmış yükler birbiri ile temas etmeye başlar ve iki yüzey tamamen üst üste gelinceye kadar alt elektrottan üst elektrotta akım oluşmaya başlar. Sonuçta, aygıt orijinal pozisyonuna geri döner ve elektrotlar üzerinde yük bırakmaz. Temas yüzeyleri yalıtkan olduğu için zıt yükler birbirini iptal edemez. Düzlem içi kaydırma modunda oluşan çıkış akımı, birbiri üzerinde kayan iki yüzeyin hızına bağlıdır (Zhang, Wang, 2018; Zhu, Peng ve diğ., 2014).

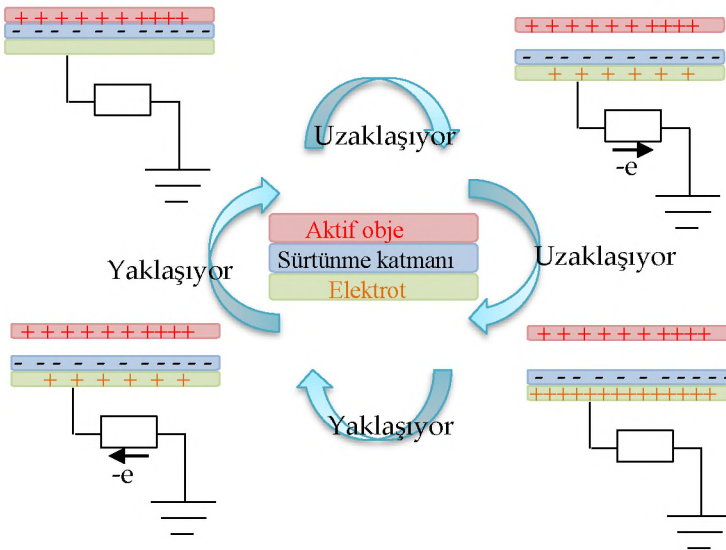


Şekil 3. Düzlem içi kaydırma modunun çalışma prensibi.

Figure 3. Working principle of in-plane sliding mode.

#### Tek Elektrotlu Mod (Single-Electrode Mode)

Tek elektrotlu mod, düzlem içi kaydırma modunun geliştirildiği yıl olan 2013 yılında Prof. Wang ve ekibi tarafından geliştirilmiştir (Yang ve diğ., 2013). Tek elektrotlu mod genelde bir topraklanmış elektrot, hareketli aktif eleman ve sürtünme tabakası içerir. Triboelektrik enerji hasatçıları için tek elektrotlu modun çalışma mekanizması Şekil 4'te gösterilmiştir.



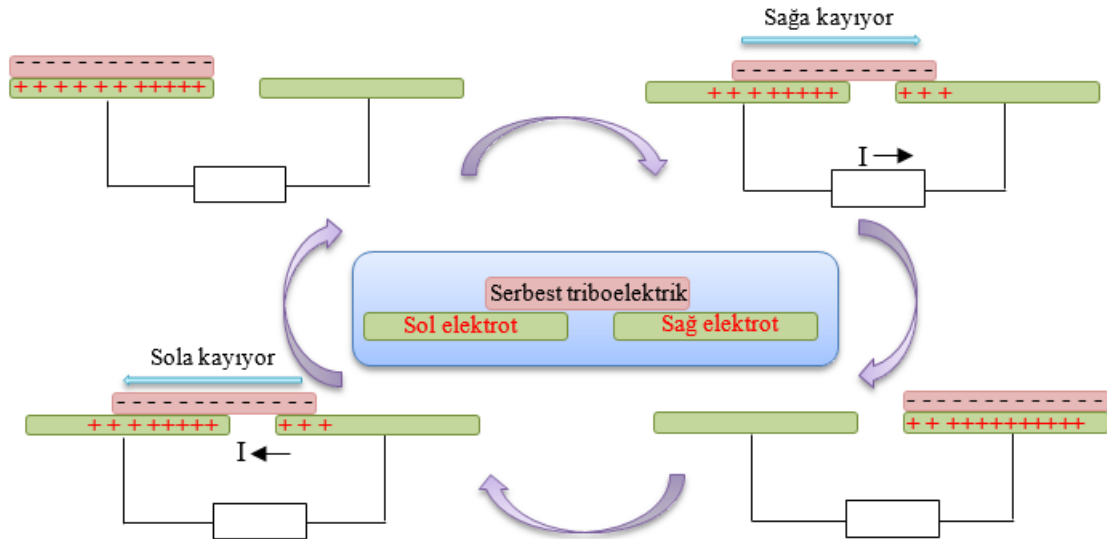
Şekil 4. Tek elektrotlu modun çalışma prensibi.

Figure 4. Working principle of single-electrode mode.

Başlangıçta; aktif eleman, arka kısmında elektrot bulunan sürtünme katmanı ile temas halindedir. Elektrostatik etki ile aktif elemanda pozitif yük, sürtünme yüzeyinde ise negatif yük belirir. Aktif parça, sürtünme tabakasından uzaklaşırken; elektrot, sürtünme yüzeyindeki yükün aksine pozitif yük alır. Bu da, toprak ve elektrot arasında potansiyel farkı oluşturarak elektrottan toprağa elektron akışına yol açar. Aktif elemanın yeterince uzak olduğu durumda, elektrotla sürtünme yüzeyi arasında elektriksel denge oluşur ve elektrik akımının durmasına neden olur. Benzer şekilde aktif tabaka, sürtünme yüzeyine doğru geri hareket ettiğinde toprakla elektrot arasında oluşan potansiyel farkı ile elektronlar bu sefer aksi yöne yani topraktan elektrotta akar. Böylece, toprak ve aktif elemanın devrimsel temas ve ayrılma hareketi dış devre üzerinde yük akımı oluşmasına neden olur (Khalid ve diğ., 2019; Ning ve diğ., 2018). 2013 tarihli çalışmalarında Wang ve ekibi, aktif obje olarak insan teni, sürtünme yüzeyi olarak polidimetilsiloksan (PDMS) tabaka, elektrot olarak da indiyum kalay oksit (ITO) kullandıkları tek elektrotlu triboelektrik nanojeneratörü dokunmaya duyarlı yüzeylerde kullanılmak üzere geliştirmişlerdir (Yang ve diğ., 2013).

### Serbest Triboelektrik Tabaka Modu (Freestanding triboelectric layer mode)

Serbest triboelektrik tabaka modu, ilk olarak Wang ve diğ. tarafından 2014 yılında geliştirilmiştir (Wang ve diğ., 2014). Bu mod, farklı konfigürasyonlar kullanılarak uygulanabilmektedir. Şekil 5'te serbest triboelektrik tabaka modunun bir konfigürasyonu gösterilmiştir. Burada, iki sabit metal elektrot ve serbest hareket eden bir triboelektrik tabaka mevcuttur.



Şekil 5. Serbest triboelektrik tabaka modunun çalışma mekanizması.

Figure 5. Working principle of freestanding triboelectric layer mode.

Triboelektrik tabaka, aynı düzlemde yer alan iki elektrotun üzerinde yine aynı düzlemde ileri geri kayma hareketi yapar. Her iki elektrot, kayan tabaka tarafından değişen oranda triboelektrik yüke maruz kalır. Bu değişken yük, elektrostatik indüksiyon etkisi ile elektrotlarda farklı miktarda yüklenmeye ve bu durum da elektrotlar arası elektrik akımının oluşmasına neden olur (Wang ve diğ., 2014).

Anlatılan dört çalışma modunun birbirine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Örneğin dikey temas ayrılma modunda nanojeneratörü oluşturan malzemelerin düzlemi ile hareket düzlemi birbirinden farklı iken; düzlem içi kaydırma modunda hareket, malzeme ile aynı düzlemde bulunur. Dikey temas ayrılma modunda, serbest durumda, triboelektrik yüzeylerin birbirinden belirli bir uzaklıkta kalmasının sağlanması gerekir. Wang ve ekibi, 2013 tarihli çalışmalarında bu mesafeyi dört yay yardımı ile sağlamıştır (Zhu, Lin, ve diğ., 2013). Tek elektrotlu modda, yalnızca bir elektrotun kullanımı yeterli iken bunun topraklanması gerekliliği bulunmaktadır. Serbest triboelektrik tabaka modu, düzlem içi kaydırma modu gibi malzeme düzleminde hareket eder. Serbest triboelektrik modunda tabakalara triboelektrik/elektrot malzemeleri ızgara biçiminde kesikli yerleştirilir. Bu şekilde, kayma hareketi düzlemsel kayma modu ile

aynı olsa da etkili frekans yüksek olur. Her bir kesikli triboelektrik/elektrot paneli bağımsız bir triboelektrik nanojeneratör gibi davranır. Düzlem içi kayma metodunda olduğu gibi iki tabakanın birbiri üzerinden tamamen kayması gerekmez, ızgara deseninin bir birimi kadar kayma yeterli olur (Zhu, Peng ve diğ., 2014). Dikey temas ayrılma modunda ise performansın artırılması için, çok katlı yapı kullanılabilir (C. Wu et al., 2018; Zhu, Bai ve diğ., 2013).

Bahsedilen modlar birbiri ile karşılaştırılırken dikkat edilmesi gerek diğer bir husus ise her bir modun kendine uygun kullanım alanlarının bulunmasıdır. Örneğin, dikey temas ayrılma modu, basınç ve/veya darbe kuvveti etkisi ile çalışır (Zhu, Peng ve diğ., 2014). Buna uygun biçimde ayakkabı tabanına veya yer karosuna (Zhu, Lin ve diğ., 2013) uygulanabilir. Düzlem içi kaydırma modunda ise iki yüzeyin birbiri üzerinden kayma hareketi söz konusudur. Dolayısıyla, düzlem içi kaydırma modundan, kol içi-gövde kısımlarında (Pu ve diğ., 2016), cep telefonu tablet ekran kaydırma, yüzey silme (Wu ve diğ., 2018) uygulamalarında yararlanabilir. Literatürdeki çalışmalarda, tek elektrotlu moda göre çalışan triboelektrik nanojeneratörler, genelde dikey temas ayrılma moduna benzer hareket gösterirken (Wang ve diğ., 2013), serbest triboelektrik tabakalı modda, düzlem içi kaydırma moduna benzer düzlemsel kayma hareketi gözlemlenir (Zhu, Chen, Zhang, Jing ve Wang, 2014).

Prof. Kim ve ekibi 2018 yılında yayımladıkları çalışmalarında geliştirdikleri nanojeneratörü farklı modlarda çalıştırmış; aynı düzenek ile dikey temas modunda daha yüksek gerilime ulaşırken, düzlem içi kaydırma modunun daha pratik uygulanabileceğini rapor etmişlerdir (Wu ve diğ., 2018). Farklı çalışma modlarında faaliyet gösteren triboelektrik nanojeneratörler, Çizelge 2'de listelenmiş, değişik enerji hasatçıları ile karşılaştırılmıştır.

## TRIBOELEKTRİK NANOJENERATÖRLERİN ÜRETİMİNDE KULLANILAN MALZEMELER (MATERIALS USED IN PRODUCTION OF TRIBOELECTRIC NANOGENERATORS)

Triboelektrik nanojeneratörlerin üretiminde malzeme seçimi çok önemlidir (Shi ve diğ., 2019). Elektriksel özelliklerinin yanında; hafiflik, esneklik, dayanıklılık, biyo-uyumluluk ve ince tabaka oluşturabilme gibi pek çok kistasın sağlanması gerekir (Zhu, Peng ve diğ., 2014). Triboelektrik nanojeneratörler, genel olarak dielektrik malzeme ve elektrotlardan oluşmaktadır.

Triboelektrik nanojeneratörlerde dielektrik olarak farklı malzemeler kullanılmıştır. Triboelektrik malzeme çifti triboelektrik seride birbirinden uzak malzemelerden seçilmelidir. Pozitif yüklenen malzeme olarak polyamid ve metaller, negatif yüklenen malzemeler olarak PTFE, PVDF ve FEP (florlu etilen propilen) kullanılabilir (Zhu, Peng ve diğ., 2014). Bunlar dışında polidimetilsiloksan (PDMS), ticari olarak kolay tedarik edilebilirliği ve sınanmış özellikleri sayesinde birçok giyilebilir aygıtta olduğu gibi triboelektrik nanojeneratörlerde de dielektrik malzeme ve substrat olarak kullanım bulmuştur (Dong ve diğ., 2017; Seung ve diğ., 2015; Song ve diğ., 2019; Yang ve diğ., 2013). Benzer şekilde, polietilen teraftalat (PET) (polyester) (Dong ve diğ., 2017; Fan ve diğ., 2012; Pu ve diğ., 2015; Zhou ve diğ., 2014), politetrafloretillen (PTFE) (Ning ve diğ., 2018; Wang ve diğ., 2013; Xia ve diğ., 2019; Zhong ve diğ., 2014), poliüretan (CITE), polivinilidenflorür (PVDF) (Huang ve diğ., 2014), poliimid (Kapton) (Bai ve diğ., 2013; Fan ve diğ., 2012; Wang ve diğ., 2012; Zhu ve diğ., 2012), naylon (S. Wang ve diğ., 2013; Zhou ve diğ., 2014), polimetil metakrilat (PMMA) (Zhu ve diğ., 2012), polivinilklorür (PVC) (Wu ve diğ., 2018), parilen (Pu ve diğ., 2015, 2016), pamuk (Zhong ve diğ., 2014),- ve kâğıt da (Wu ve diğ., 2018) dielektrik serilerdeki konumlarına göre kullanım bulan malzemeler arasında gelmektedir.

Triboelektrik nanojeneratörlerde elektrot olarak yine farklı iletken malzemeler kullanılmıştır. Örnek olarak, metaller (alüminyum (Bai ve diğ., 2013; Wang ve diğ., 2014), bakır (Song ve diğ., 2019)), nikel (Pu ve diğ., 2015, 2016), gümüş (Seung ve diğ., 2015; Wu ve diğ., 2018; Zhou ve diğ., 2014), altın (Fan ve diğ., 2012) paslanmaz çelik (Dong ve diğ., 2017), indiyum kalay oksit (ITO) (Yang ve diğ., 2013)), karbon nanotüp (Zhong ve diğ., 2014) ve grafen (Chung ve diğ., 2018) verilebilir. Dikkat edilmelidir ki; anılan malzemeler, elektrot olarak kullanılabilirlikleri gibi, elektrik triboelektrik serideki konumlarına göre triboelektrik malzeme olarak da kullanım bulabilmektedir (Zhu, Peng ve diğ., 2014). Çizelge 2, enerji hasatçı üretiminde kullanılan malzemeleri listelemektedir.



**Çizelge 2.** Bazı enerji hasatçıların; enerji hasat teknolojisi, güç, gerilim, kullanılan malzeme, uygulama alanı ve çalışma modu açısından karşılaştırılması

*Table 1. Comparison of various energy harvesters in terms of energy harvesting technology, power, voltage, utilized materials, application areas and working modes*

Enerji hasat prensibi	Güç çıktısı (mW)	Açık devre gerilimi (V)	Kullanılan malzeme	Uygulama alanı	Çalışma modu-Referans
Fotovoltaik	-	2,0-10,5	Silikon fotovoltaik modüller	Sırt çantası	-(Veligorskyi ve diğ., 2018)
	16	4	SP3-12 fotovotaik panel	Bilek bandı	-(Jokic ve Magno, 2017)
Termoelektrik	11,14 mW/cm <sup>2</sup>	0,52	Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> , PET, Bi,Te,Sb, Se alaşımları, Nikel kaplama	İnsan teni	-(Feng ve diğ., 2019)
	-	55,2 $\mu$ V	Karbon nanotüp, pamuk	İnsan teni	-(Islam ve diğ., 2019)
Elektromanyetik	1,15	0,24	Neodyum-demir-bor mıknatısları, bakır yay, akrilik tüp, sargı teli	Kol ve bacak	-(Fan ve diğ., 2019a)
	1,09- 2,58	0,5	Neodyum-demir-bor mıknatısları, reçine tüp, sargı teli	Kol	-(Fan ve diğ., 2019b)
	0,5-2,28	0,3-0,5	Sabit mıknatıs, alüminyum hazne, emaye sargı teli, elastik ip	Ayakkabı	-(Wu ve diğ., 2017)
	2,48-2,81	1,15-1,9	Neodyum-demir-bor mıknatısları, yumuşak demir, bakır sargı	Kol saati	-(Halim ve diğ., 2016)
	0,284	2,5	Neodyum-demir-bor mıknatısları, PTFE, bakır sargı, paslanmaz çelik bağlantı, vidalar, somunlar	Arka cep	-(Dai ve Liu, 2014)
	-	1,4	Neodyum-demir-bor mıknatısları, NiZn ferrit bobin göbeği, bakır bobin	Diz protezi	-(Luciano ve diğ., 2014)
Piezoelektrik	12-60	6-27	PZT tabaka, gümüş elektrot, alüminyum çerçeve	Ayakkabı topuğu	-(Qian ve diğ., 2018)
	0,0002	0,7	Alüminyum nitrür film, molibden film, poliimid folyo, PDMS, silikon	İnsan teni	-(Guido ve diğ., 2016)
	0,1-1,7	10-60	Alüminyum kiriş, M2814-P2, neodyum mıknatıs	Kol ve bacak	-(Izadgoshasb ve diğ., 2019)
Triboelektrik	31,2 mW/cm <sup>3</sup>	110	Triboelektrik: poliimid, PMMA Elektrot: alüminyum	-	Dikey temas ayrılma modu (Zhu ve diğ., 2012)
	128 mW/cm <sup>3</sup>	230	Triboelektrik: poliimid, PDMS Elektrot: alüminyum	-	Dikey temas ayrılma modu (Wang ve diğ., 2012)
	31,3 mW/cm <sup>2</sup>	1200	Triboelektrik: PDMS, Substrat: PMMA Elektrot: altın tabaka	Ayakkabı tabanı, yer	Dikey temas ayrılma modu (Zhu, Lin ve diğ., 2013)
	9,8 mW/cm <sup>2</sup>	215	Triboelektrik: PTFE, alüminyum Substrat: poliimid Elektrot: alüminyum	Ayakkabı içi	Dikey temas ayrılma modu (Bai ve diğ., 2013)
	-	220	Triboelektrik: PTFE, alüminyum Elektrot: alüminyum Substrat: poliimid	Ayakkabı tabanı içi	Dikey temas ayrılma modu (Zhu, Bai ve diğ., 2013)
	2,1	210	Triboelektrik: PVDF Elektrot: İletken kumaş	Ayakkabı tabanı	Dikey temas ayrılma modu (Huang ve diğ., 2014)
	1,1	120-170	Triboelektrik: Gümüş kaplı tekstil, PDMS kaplı tekstil, ZnO Elektrot: gümüş kaplı tekstil	Giysi kolu	Dikey temas ayrılma modu (Seung ve diğ., 2015)
	-	17- 100	Triboelektrik: Kâğıt peçete, PVC	Peçete	Dikey temas modu (Wu ve diğ., 2018)

4,67	392	Elektrot:gümüş nanotel Triboelektrik: PTFE, kağıt, karton Elektrot: iletken mürekkep	İnsan parmağı	Dikey temas ayrılma (Xia ve diğ., 2019)
5,3 mW/cm <sup>2</sup>	<1300	Triboelektrik: naylon 6,6; PTFE Elektrot: metal	-	Düzlem içi kaydırma modu (Wang ve diğ., 2013)
-	5-19	Triboelektrik: Kağıt peçete, PVC Elektrot: gümüş nanotel	Peçete	Düzlem içi kaydırma modu (Wu ve diğ., 2018)
0,05 mW/cm <sup>2</sup>	1000	Triboelektrik: insan teni, PDMS Elektrot: ITO	Dokunmatik yüzey	Tek elektrotlu mod – (Yang ve diğ., 2013)
19 mW/cm <sup>2</sup>	850	Triboelektrik: Bakır Elektrot: altın- florlu etilen propilen (FEP)	El	Serbest triboelektrik tabaka modu (Zhu, Chen ve diğ., 2014)
0,32 mW/cm <sup>2</sup>	-	Triboelektrik: Parilen Elektrot: nikel	Kol altı	Serbest triboelektrik mod (Pu ve diğ., 2016)
0,026 mW/cm <sup>2</sup>	-	Triboelektrik: PDMS Elektrot: paslanmaz çelik- polyester iplik	Dans matı	Tek elektrotlu mod (Dong ve diğ., 2017)
-	1050	Triboelektrik: PTFE Elektrot: bakır	Kumaş	Tek elektrotlu mod (Ning ve diğ., 2018)
0,3	305	Triboelektrik: poliimid, bakır Elektrot: bakır	Bilek bandı	Serbest triboelektrik mod (Song ve diğ., 2019)

## SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada çevrede mevcut enerjileri elektrik enerjisine dönüştürebilen enerji hasatçıları genel olarak gözden geçirilmiş, bunlar arasında yüksek güç çıkışları, nanoteknoloji ile uyumları ve giyilebilir aygıtlara eklenebilmeleri açısından öne çıkan triboelektrik nanojeneratörler incelenmiştir. Triboelektrik nanojeneratörler; teorik temelleri, çalışma modları ve kullanılan malzemeler açısından açıklanmış, bu konuda literatürde yer alan bazı çalışmalar irdelenmiştir.

Triboelektrik nanojeneratörler; hafif ve minyatürize olmaları, estetik ve konfor özellikleri olumsuz yönde etkilememeleri, geniş malzeme yelpazesine sahip olmaları gibi pek çok olumlu özellik gösterirler. Diğer enerji hasat biçimlerine göre çok daha genç bir enerji elde etme teknolojisi olan triboelektrik enerji hasadının; biyoyuumluluk, dayanıklılık, kullanım kolaylığı ve enerji üretim performanslarında meydana gelmesi beklenen iyileşmelerle yakın gelecekte toplum hayatı üzerinde daha yaygın etkiye sahip olması beklenmektedir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ahmed, A., Hassan, I., El-Kady, M. F., Radhi, A., Jeong, C. K., Selvaganapathy, P. R., ... Kaner, R. B. (2019). Integrated Triboelectric Nanogenerators in the Era of the Internet of Things. *Advanced Science*, 6(24), 1802230. <https://doi.org/10.1002/advs.201802230>
- Bai, P., Zhu, G., Lin, Z. H., Jing, Q., Chen, J., Zhang, G., ... Wang, Z. L. (2013). Integrated multilayered triboelectric nanogenerator for harvesting biomechanical energy from human motions. *ACS Nano*, 7(4), 3713–3719. <https://doi.org/10.1021/nn4007708>
- Baker, R. R., Dowdall, M. J., & Whittaker, V. P. (1975). The involvement of lysophosphoglycerides in neuro-transmitter release; The composition and turnover of phospholipids of synaptic vesicles of guinea-pig cerebral cortex and torpedo electric organ and the effect of stimulation. *Brain Research*, 100(3), 629–644. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(75\)90162-6](https://doi.org/10.1016/0006-8993(75)90162-6)
- Choi, J., Jung, I., & Kang, C. Y. (2019). A brief review of sound energy harvesting. *Nano Energy*, 56, 169–183. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.11.036>

- Choi, S., Kwon, S., Kim, H., Kim, W., Kwon, J. H., Lim, M. S., ... Choi, K. C. (2017). Highly Flexible and Efficient Fabric-Based Organic Light-Emitting Devices for Clothing-Shaped Wearable Displays. *Scientific Reports*, 7(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06733-8>
- Chung, I. J., Kim, W., Jang, W., Park, H. W., Sohn, A., Chung, K. B., ... Park, Y. T. (2018). Layer-by-layer assembled graphene multilayers on multidimensional surfaces for highly durable, scalable, and wearable triboelectric nanogenerators. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(7), 3108–3115. <https://doi.org/10.1039/c7ta09876f>
- Crosby, A. J., & Lee, J. (2007). Polymer Nanocomposites: The “Nano” Effect on Mechanical Properties. *Polymer Reviews*, 47(2), 217–229. <https://doi.org/10.1080/15583720701271278>
- Dai, D., & Liu, J. (2014). Hip-mounted electromagnetic generator to harvest energy from human motion. *Frontiers in Energy*, 8(2), 173–181. <https://doi.org/10.1007/s11708-014-0301-2>
- Dong, K., Deng, J., Zi, Y., Wang, Y. C., Xu, C., Zou, H., ... Wang, Z. L. (2017). 3D Orthogonal Woven Triboelectric Nanogenerator for Effective Biomechanical Energy Harvesting and as Self-Powered Active Motion Sensors. *Advanced Materials*, 29(38). <https://doi.org/10.1002/adma.201702648>
- Fan, F. R., Tian, Z. Q., & Lin Wang, Z. (2012). Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*, 1(2), 328–334. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.01.004>
- Fan, K., Cai, M., Liu, H., & Zhang, Y. (2019). Capturing energy from ultra-low frequency vibrations and human motion through a monostable electromagnetic energy harvester. *Energy*, 169, 356–368. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.053>
- Fan, K., Zhang, Y., Liu, H., Cai, M., & Tan, Q. (2019). A nonlinear two-degree-of-freedom electromagnetic energy harvester for ultra-low frequency vibrations and human body motions. *Renewable Energy*, 138, 292–302. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.105>
- Feng, R., Tang, F., Zhang, N., & Wang, X. (2019). Flexible, High-Power Density, Wearable Thermoelectric Nanogenerator and Self-Powered Temperature Sensor. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11(42), 38616–38624. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b11435>
- Gashti, M. P., Alimohammadi, F., Song, G., & Kiumarsi, A. (2012). Characterization of nanocomposite coatings on textiles : a brief review on Microscopic technology. *Current Microscopy Contributions to Advances in Science and Technology*, 1424–1437.
- Guido, F., Quattieri, A., Algieri, L., Lemma, E. D., De Vittorio, M., & Todaro, M. T. (2016). AlN-based flexible piezoelectric skin for energy harvesting from human motion. *Microelectronic Engineering*, 159, 174–178. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2016.03.041>
- Guo, S. (2010). *The Eigen Theory of Waves in Piezoelectric Solids*. IntechOpen. Retrieved from [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)
- Halim, M. A., Cho, H., Salauddin, M., & Park, J. Y. (2016). A miniaturized electromagnetic vibration energy harvester using flux-guided magnet stacks for human-body-induced motion. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 249, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.08.008>
- Hashemi, S. A., Ramakrishna, S., & Aberle, A. G. (2020). Recent progress in flexible–wearable solar cells for self-powered electronic devices. *Energy & Environmental Science*, 13(3), 685–743.
- Huang, T., Wang, C., Yu, H., Wang, H., Zhang, Q., & Zhu, M. (2014). Human walking-driven wearable all-fiber triboelectric nanogenerator containing electrospun polyvinylidene fluoride piezoelectric nanofibers. *Nano Energy*, 14, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.01.038>
- Huang, Z. M., Zhang, Y. Z., Kotaki, M., & Ramakrishna, S. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 63(15), 2223–2253. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00178-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00178-7)
- Hyland, M., Hunter, H., Liu, J., Veety, E., & Vashaee, D. (2016). Wearable thermoelectric generators for human body heat harvesting. *Applied Energy*, 182, 518–524. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.150>
- Islam, F., Zubair, A., & Fairuz, N. (2019). Wearable Thermoelectric Nanogenerator Based on Carbon Nanotube for Energy Harvesting. In *2019 IEEE Student Conference on Research and Development, SCOReD 2019* (pp. 253–258). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

- <https://doi.org/10.1109/SCORED.2019.8896333>
- Izadgoshasb, I., Lim, Y. Y., Tang, L., Padilla, R. V., Tang, Z. S., & Sedighi, M. (2019). Improving efficiency of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system. *Energy Conversion and Management*, 184, 559–570. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.001>
- Jeong, E. G., Jeon, Y., Cho, S. H., & Choi, K. C. (2019). Textile-based washable polymer solar cells for optoelectronic modules: Toward self-powered smart clothing. *Energy and Environmental Science*, 12(6), 1878–1889. <https://doi.org/10.1039/c8ee03271h>
- Jokic, P., & Magno, M. (2017). Powering smart wearable systems with flexible solar energy harvesting. In *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2017.8050615>
- Jondral, F. K. (2008). From Maxwell's equations to cognitive radio. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, CrownCom 2008*. <https://doi.org/10.1109/CROWNCOM.2008.4562458>
- Joshi, M., Bhattacharyya, A., & Ali, S. W. (2008). Characterization techniques for nanotechnology applications in textiles. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 33(3), 304–317.
- Jung, W. S., Kang, M. G., Moon, H. G., Baek, S. H., Yoon, S. J., Wang, Z. L., ... Kang, C. Y. (2015). High Output Piezo/Triboelectric Hybrid Generator. *Scientific Reports*, 5(1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/srep09309>
- Khalid, S., Raouf, I., Khan, A., Kim, N., & Kim, H. S. (2019). A Review of Human-Powered Energy Harvesting for Smart Electronics: Recent Progress and Challenges. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*. <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00144-y>
- Khushboo, & Azad, P. (2017). Triboelectric nanogenerator based on vertical contact separation mode for energy harvesting. In *Proceeding - IEEE International Conference on Computing, Communication and Automation, ICCCA 2017 (Vol. 2017-Janua, pp. 1499–1502)*. Greater Noida, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCAA.2017.8230037>
- Kim, H., Kwon, S., Choi, S., & Choi, K. C. (2015). Solution-processed bottom-emitting polymer light-emitting diodes on a textile substrate towards a wearable display. *Journal of Information Display*, 16(4), 179–184. <https://doi.org/10.1080/15980316.2015.1091391>
- Kim, Y. K., Wang, H., & Mahmud, M. S. (2016). Wearable body sensor network for health care applications. In *Smart Textiles and Their Applications* (pp. 161–184). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100574-3.00009-6>
- Komolafe, A., Torah, R., Nunes-Matos, H., Tudor, M., & Beeby, S. (2019). Integration of temperature sensors in fabrics. In *FLEPS 2019 - IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems, Proceedings*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/FLEPS.2019.8792294>
- Lancos, L., Thronickle, W., & Ristol, S. (2017). Smart fabrics white paper. Retrieved March 3, 2020, from <https://atos.net/wp-content/uploads/2018/01/atos-smartfabric-white-paper-1.pdf>
- Li, K., He, Q., Wang, J., Zhou, Z., & Li, X. (2018). Wearable energy harvesters generating electricity from low-frequency human limb movement. *Microsystems and Nanoengineering*, 4(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41378-018-0024-3>
- Lin, Z., Chen, J., & Yang, J. (2016). Recent Progress in Triboelectric Nanogenerators as a Renewable and Sustainable Power Source. *Journal of Nanomaterials*. <https://doi.org/10.1155/2016/5651613>
- Luciano, V., Sardini, E., Serpelloni, M., & Baronio, G. (2014). An energy harvesting converter to power sensorized total human knee prosthesis. *Measurement Science and Technology*, 25(2), 025702. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/2/025702>
- Mavroidis, C., & Ferreira, A. (2013). Nanorobotics: Past, present, and future. In *Nanorobotics: Current Approaches and Techniques* (pp. 3–27). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2119-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2119-1_1)
- Maxwell, J. C. (1861a). XXV. On physical lines of force, PART I--The Theory of Molecular Vortices applied to Magnetic Phenomena. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and*

- Journal of Science*, 21(139), 281–291, 838–849. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786446108643033>
- Maxwell, J. C. (1861b). XXV. On physical lines of force, PART I--The Theory of Molecular Vortices applied to Magnetic Phenomena. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 21(139), 12–24. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786446108643033>
- Maxwell, J. C. (2010). On physical lines of force. *Philosophical Magazine*, 90(SUPPL.1), 11–23. <https://doi.org/10.1080/14786431003659180>
- Miller, K. (2011). Triboelectric series. Retrieved April 3, 2020, from [http://soft-matter.seas.harvard.edu/index.php/Triboelectric\\_series](http://soft-matter.seas.harvard.edu/index.php/Triboelectric_series)
- Misra, S., & Bera, S. (2018). Introduction to Smart Grid. In N. D. Yilmaz (Ed.), *Smart Grid Technology* (1st ed., pp. 3–17). Hoboken, MA, USA: Wiley Scrivener. <https://doi.org/10.1017/9781108566506.003>
- Miyata, T., Uragami, T., & Nakamae, K. (2002). Biomolecule-sensitive hydrogels. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 54(1), 79–98. [https://doi.org/10.1016/S0169-409X\(01\)00241-1](https://doi.org/10.1016/S0169-409X(01)00241-1)
- Nie, S., Guo, H., Lu, Y., Zhuo, J., Mo, J., & Wang, Z. L. (2020). Superhydrophobic Cellulose Paper-Based Triboelectric Nanogenerator for Water Drop Energy Harvesting. *Advanced Materials Technologies*, 2000454. <https://doi.org/10.1002/admt.202000454>
- Ning, C., Tian, L., Zhao, X., Xiang, S., Tang, Y., Liang, E., & Mao, Y. (2018). Washable textile-structured single-electrode triboelectric nanogenerator for self-powered wearable electronics. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(39), 19143–19150. <https://doi.org/10.1039/c8ta07784c>
- Pan, S., & Zhang, Z. (2019). Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review. *Friction*. <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0217-7>
- Pizarro, F., Villavicencio, P., Yunge, D., Rodríguez, M., Hermosilla, G., & Leiva, A. (2018). Easy-to-build textile pressure sensor. *Sensors (Switzerland)*, 18(4). <https://doi.org/10.3390/s18041190>
- Pu, X., Hu, W., & Wang, Z. L. (2018). Nanogenerators for smart textiles. In N. D. Yilmaz (Ed.), *Smart textiles: wearable nanotechnology* (1st ed., pp. 177–210). Hoboken, MA, USA: Wiley Scrivener.
- Pu, X., Li, L., Song, H., Du, C., Zhao, Z., Jiang, C., ... Wang, Z. L. (2015). A self-charging power unit by integration of a textile triboelectric nanogenerator and a flexible lithium-ion battery for wearable electronics. *Advanced Materials*, 27(15), 2472–2478. <https://doi.org/10.1002/adma.201500311>
- Pu, X., Song, W., Liu, M., Sun, C., Du, C., Jiang, C., ... Wang, Z. L. (2016). Wearable Power-Textiles by Integrating Fabric Triboelectric Nanogenerators and Fiber-Shaped Dye-Sensitized Solar Cells. *Advanced Energy Materials*, 6(20). <https://doi.org/10.1002/aenm.201601048>
- Qian, F., Xu, T. B., & Zuo, L. (2018). Design, optimization, modeling and testing of a piezoelectric footwear energy harvester. *Energy Conversion and Management*, 171, 1352–1364. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.069>
- Rajdi, N. N. Z. M., Bakir, A. A., Saleh, S. M., & Wicaksono, D. H. B. (2012). Textile-based Micro Electro Mechanical System (MEMS) accelerometer for pelvic tilt measurement. In *Procedia Engineering* (Vol. 41, pp. 532–537). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.208>
- Schwinger, J., DeRaad, L. L., Milton, K. A., & Tsai, W. (2019). *Classical Electrodynamics. Classical Electrodynamics* (3rd ed.). New York: Wiley. <https://doi.org/10.1201/9780429503542>
- Scott, A. W. (2005). *Understanding Microwaves*. New York: Wiley.
- Sengupta, D. L., & Sarkar, T. K. (2003). Maxwell, Hertz, the Maxwellians, and the early history of electromagnetic waves. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 45(2), 13–19. <https://doi.org/10.1109/MAP.2003.1203114>
- Seung, W., Gupta, M. K., Lee, K. Y., Shin, K. S., Lee, J. H., Kim, T. Y., ... Kim, S. W. (2015). Nanopatterned textile-based wearable triboelectric nanogenerator. *ACS Nano*, 9(4), 3501–3509. <https://doi.org/10.1021/nn507221f>
- Shi, Q., He, T., & Lee, C. (2019). More than energy harvesting – Combining triboelectric nanogenerator and flexible electronics technology for enabling novel micro-/nano-systems. *Nano Energy*, 57, 851–871. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.002>

- Song, Y., Wang, H., Cheng, X., Li, G., Chen, X., Chen, H., ... Zhang, H. (2019). High-efficiency self-charging smart bracelet for portable electronics. *Nano Energy*, *55*, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.10.045>
- Tao, X., & Koncar, V. (2016). Textile electronic circuits based on organic fibrous transistors. In *Smart Textiles and Their Applications* (pp. 569–598). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100574-3.00025-4>
- Veligorskiy, O., Khomenko, M., Chakirov, R., & Vagapov, Y. (2018). Performance analysis of a wearable photovoltaic system. In *Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems, IESES 2018* (Vol. 2018-January, pp. 376–381). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/IESES.2018.8349905>
- Wang, S., Lin, L., & Wang, Z. L. (2012). Nanoscale triboelectric-effect-enabled energy conversion for sustainably powering portable electronics. *Nano Letters*, *12*(12), 6339–6346. <https://doi.org/10.1021/nl303573d>
- Wang, S., Lin, L., Xie, Y., Jing, Q., Niu, S., & Wang, Z. L. (2013). Sliding-triboelectric nanogenerators based on in-plane charge-separation mechanism. *Nano Letters*, *13*(5), 2226–2233. <https://doi.org/10.1021/nl400738p>
- Wang, S., Xie, Y., Niu, S., Lin, L., & Wang, Z. L. (2014). Freestanding triboelectric-layer-based nanogenerators for harvesting energy from a moving object or human motion in contact and non-contact modes. *Advanced Materials*, *26*(18), 2818–2824. <https://doi.org/10.1002/adma.201305303>
- Wang, Z. L. (2017). Catch wave power in floating nets. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/542159a>
- Wu, C., Kima, T. W., Sung, S., Park, J. H., & Li, F. (2018). Ultrasoft and cuttable paper-based triboelectric nanogenerators for mechanical energy harvesting. *Nano Energy*, *44*, 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.11.080>
- Wu, S., Luk, P. C. K., Li, C., Zhao, X., Jiao, Z., & Shang, Y. (2017). An electromagnetic wearable 3-DoF resonance human body motion energy harvester using ferrofluid as a lubricant. *Applied Energy*, *197*, 364–374. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.006>
- Xia, K., Zhu, Z., Zhang, H., Du, C., Fu, J., & Xu, Z. (2019). Milk-based triboelectric nanogenerator on paper for harvesting energy from human body motion. *Nano Energy*, *56*, 400–410. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.11.071>
- Yang, Y., Zhang, H., Lin, Z. H., Zhou, Y. S., Jing, Q., Su, Y., ... Wang, Z. L. (2013). Human skin based triboelectric nanogenerators for harvesting biomechanical energy and as self-powered active tactile sensor system. *ACS Nano*, *7*(10), 9213–9222. <https://doi.org/10.1021/nn403838y>
- Yilmaz, N. D. (2018a). Introduction to Smart Nanotextiles. In N. D. Yilmaz (Ed.), *Smart textiles: wearable nanotechnology* (pp. 3–38). Beverly, MA: Wiley Scrivener.
- Yilmaz, N. D. (2018b). Nanocomposites for Smart Textiles. In N. D. Yilmaz (Ed.), *Smart Textiles* (1st ed., pp. 211–245). Hoboken, MA, USA: Wiley Scrivener. <https://doi.org/10.1002/9781119460367.ch7>
- Yin, D., Chen, Z. Y., Jiang, N. R., Liu, Y. F., Bi, Y. G., Zhang, X. L., ... Sun, H. B. (2020). Highly transparent and flexible fabric-based organic light emitting devices for unnoticeable wearable displays. *Organic Electronics*, *76*, 105494. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2019.105494>
- Zeng, W., Shu, L., Li, Q., Chen, S., Wang, F., & Tao, X.-M. (2014). Fiber-based wearable electronics: a review of materials, fabrication, devices, and applications. *Advanced Materials*, *26*(31), 5310–5336.
- Zhang, C., & Wang, Z. L. (2018). *Triboelectric Nanogenerators* (pp. 1335–1376). Switzerland: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-5945-2\\_38](https://doi.org/10.1007/978-981-10-5945-2_38)
- Zhong, J., Zhang, Y., Zhong, Q., Hu, Q., Hu, B., Wang, Z. L., & Zhou, J. (2014). Fiber-based generator for wearable electronics and mobile medication. *ACS Nano*, *8*(6), 6273–6280. <https://doi.org/10.1021/nn501732z>
- Zhou, T., Zhang, C., Han, C. B., Fan, F. R., Tang, W., & Wang, Z. L. (2014). Woven structured triboelectric nanogenerator for wearable devices. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *6*(16), 14695–14701. <https://doi.org/10.1021/am504110u>
- Zhu, G., Bai, P., Chen, J., & Lin Wang, Z. (2013). Power-generating shoe insole based on triboelectric

- nanogenerators for self-powered consumer electronics. *Nano Energy*, 2(5), 688–692.  
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2013.08.002>
- Zhu, G., Chen, J., Zhang, T., Jing, Q., & Wang, Z. L. (2014). Radial-arrayed rotary electrification for high performance triboelectric generator. *Nature Communications*, 5(1), 1–9.  
<https://doi.org/10.1038/ncomms4426>
- Zhu, G., Lin, Z. H., Jing, Q., Bai, P., Pan, C., Yang, Y., ... Wang, Z. L. (2013). Toward large-scale energy harvesting by a nanoparticle-enhanced triboelectric nanogenerator. *Nano Letters*, 13(2), 847–853.  
<https://doi.org/10.1021/nl4001053>
- Zhu, G., Pan, C., Guo, W., Chen, C. Y., Zhou, Y., Yu, R., & Wang, Z. L. (2012). Triboelectric-generator-driven pulse electrodeposition for micropatterning. *Nano Letters*, 12(9), 4960–4965.  
<https://doi.org/10.1021/nl302560k>
- Zhu, G., Peng, B., Chen, J., Jing, Q., & Lin Wang, Z. (2014). Triboelectric nanogenerators as a new energy technology: From fundamentals, devices, to applications. *Nano Energy*, 14, 126–138.  
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.11.050>



## DÖRT AYAKLI ROBOTLARIN MODELLENMESİ, KONTROLÜ VE ENGEBELİ YÜZEYLERDE YÜRÜYÜŞÜ ÜZERİNE BİR LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

<sup>1</sup>Muhammed Arif ŞEN , <sup>2</sup>Mete KALYONCU 

<sup>1,2</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü,  
Konya, TÜRKİYE

<sup>1</sup> [masen@ktun.edu.tr](mailto:masen@ktun.edu.tr), <sup>2</sup> [mkalyoncu@ktun.edu.tr](mailto:mkalyoncu@ktun.edu.tr)

(Geliş/Received: 01.10.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 20.11.2020)

**ÖZ:** Robotik alanındaki gelişmelerin günümüzdeki en belirgin örneklerinden birisi olan dört ayaklı robotlar; doğadaki hayvanlardan esinlenerek geliştirilen ve üstün hareket kabiliyetleri sayesinde tekerlekli sistemlerin sınırlı kaldığı dinamik hareketleri ustalıkla gerçekleştirebilen, eklemli bacak yapısına sahip, yürüyen mobil sistemlerdir. Bu çalışmada, literatürde öne çıkan mevcut dört ayaklı robotlar ve bu robotların modellenmesi, eyleyici türleri, düz ve engebeli zeminlerde yürüyüşü ve kontrolü üzerine yapılan araştırmalar sunulmuştur. Karmaşık bir sistem olması nedeniyle belirli konuların incelendiği sınırlı derlemelerin aksine, bu çalışmada geniş bir literatür derlenmiştir. Girişte, dört ayaklı robotların üstün özelliklerine ve bu alandaki araştırmaların temel motivasyon kaynaklarına değinilmiştir. Öncelikle, son yıllarda geliştirilen dört ayaklı robotlar ve teknik özellikleri kronolojik sırayla belirtilmiştir. Devamında, bacaklı sistemler için önerilen modelleme ve kontrol yöntemlerine ve yaygın kullanılan eyleyicilere ait örnekler sunulmuştur. Sonrasında, dört ayaklı robotların diğer mobil robotlara kıyasla önemli bir avantajı olan, engebeli yüzeylerde yürüyüş ve denge-hareket kontrolü ile ilgili temel yaklaşımların yanı sıra güncel teorik ve uygulamalı çalışmalar sunulmuştur. Sonuç kısmında ise, dört ayaklı robotik alanında devam eden çalışmalara ve yakın gelecekte gerçekleşmesi muhtemel gelişmelere değinilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bacaklı robotik, Dört ayaklı robotlar, Yürüyüş kontrolü, Engebeli yüzey

### A Literature Review on Modeling, Control and Walking on Rough Surfaces of Quadruped Robots

**ABSTRACT:** Quadruped robots, one of the most considerable samples of the developments in robotics nowadays; are mobile systems that are inspired by animals in nature and can perform dynamic movements in which wheeled systems are limited thanks to their superior abilities, and have a jointed leg structure. In this study, the existing prominent quadruped robots in the literature and the modeling of these robots, types of actuators, gait, and control on flat and rough surfaces are presented. Due to its complex structure, a wide literature is reviewed in this study, unlike the limited reviews in which investigate specific subjects. In the introduction, the advantage of quadruped robots and the main motivation sources of researches in this field are mentioned. First of all, quadruped robots developed in recent years, and their technical features are specified in chronological order. Next, proposed modeling and control methods for legged systems and examples of commonly used actuators are presented. Afterward, as well as basic approaches, theoretical and experimentally studies are presented, to walking on rough surfaces and balance-motion control, which is an important advantage compared to other mobile robots. In the conclusion section, the continuing studies and probable forthcoming improvements in the field of quadruped robotics are mentioned.

**Key Words:** Legged robotics, Quadruped robots, Gait control, Rough/Uneven surface



## GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsanoğlu varoluşundan itibaren doğadaki canlıları incelemeye, onların etkileyici yeteneklerinden ve sezgisel davranışlarından ilham alarak, yaşadığı çağın yenilikçi fikirlerini üretmeye ve hayatını kolaylaştıracak yeni teknolojiler geliştirmeye gayret etmiştir. Bu çabanın son yıllardaki en belirgin örneklerinden birisi; üstün kabiliyetleri sayesinde mükemmel yürüyüşler sergileyen, dinamik hareketleri ustalıkla gerçekleştirebilen, hayvanlardan esinlenerek geliştirilmiş dört ayaklı robotlardır.

Geleneksel tekerlekli/paletli mobil robotlara kıyasla, belirli bir yol veya ray üzerinde ilerlemek zorunda olmadan, zorlu arazi şartlarında dahi yüksek hareket kabiliyeti sayesinde önemli görevleri yerine getiren bacaklı robotlar; biyolojik canlılara benzerliği sebebiyle insanların dikkatini çekmekte, geliştirilmeye müsait yönlerinin çeşitliliği sayesinde robotik alanındaki yerini giderek artırmaktadır.

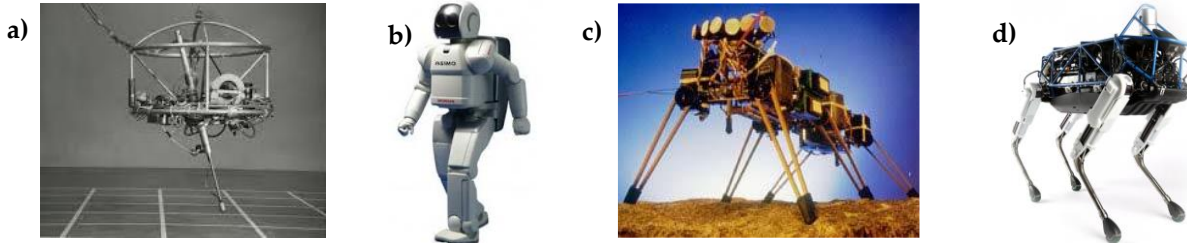
Tekerlekli bir sistemin hareketi zemin koşulları ile sınırlı kalmak zorunda iken, tasarlanabilir bir bacak yapısı ve kontrol edilebilir bir yürüyüş ile bulunduğu zeminle etkileşimli ancak engeller ile kısıtlı olmadan hareket edebilen bacaklı robotlar, araştırmacıları heyecanlandırmakta ve motive etmektedir. Ancak, insanlara ve kendilerine zarar vermeyecek güvenli bir bacaklı robot geliştirmek, teknolojik açıdan önemli ancak uzun bir çaba gerektiren karmaşık bir görevdir.

Bacaklı bir robotun en az sayıda bacağına sahip olması, toplam gövde kütlelerinin azalması ve bacaklar arası koordinasyonun kolaylaşması açısından avantajlıdır. Ayrıca, bacak sayısı azaldıkça zemin ile temas da azaldığı için robotun zorlu arazilerde hareketi daha uygun hale gelir. Ancak, bacaklı robotların en temel problemi olan denge problemi bacak sayısının azalmasıyla dramatik bir şekilde artmaktadır. Robotun dinamik olarak kararlı olabilmesi için ağırlık merkezinin yerini değiştirebilecek veya düzenleyici kuvvetler uygulayarak kendisi aktif dengeleyebilecek minimum bacak sayısına sahip olması gerekir. Bu sebeple bacaklı bir robotun inşa sürecinde tanımlanacak ilk özellik bacak sayısıdır. Bu sayı, stabilite ve güvenilirlik gibi robotun sahip olması gerekli temel özellikler ile; hız, en az ağırlık ve maliyet gibi özel uygulama gereksinimleri arasındaki bir dengenin kurulması sonucu belirlenir.

Tek ayaklı robotlar (Şekil 1a), zemine tek bir noktadan temas halinde ve zıplayarak hareket ederler. Hareketsiz halde dahi dengelenmeye muhtaç, oldukça kararsız bir yapılarıdır. *Asimo* gibi iki ayaklı insansı robotlar (Şekil 1b), zemine ayak tabanları ile yüzeysel temas ettikleri için statik halde dengededirler. Ancak, yürüyüş sırasında bir bacak adım atarken, diğer bacağın tüm gövde ağırlığını destekleyecek ve dengeleyecek bir yapıya sahip olması gerekir. Altı ayaklı robotlar (Şekil 1c) (*Genghis-MIT*) ise, stabil bir yürüyüş ve kontrol edilebilirlik açısından en avantajlı robotlar olsa da bacak sayısının artması farklı problemleri beraberinde getirmektedir. Gövde dengesini garanti edecek sayıdan fazla bacak kullanmak; toplam kütlelerin artmasına, bacaklar arası koordinasyonun karmaşıklaşmasına ve maliyetin yükselmesine sebep olmaktadır. Optimum bacak sayısı kararlılık, karmaşıklık, toplam kütle ve maliyet açısından değerlendirildiğinde, dört ayaklı robotların (Şekil 1d) (*Spot*) daha optimum çözümler sunabileceği görülmektedir. Serbest hareketli bir kütleli dengede tutmak için en az üç noktadan kuvvet uygulamak gerekir. Benzer şekilde, statik kararlı bir yürüyüş için de en az üç noktadan zemin ile temas gerekmektedir. Dört ayaklı robotlarda bir bacak adım atarken diğer üç bacak zeminle temas ederek gövdeyi taşır ve hareket ettirir. Böylece, zemindeki ayaklar gövde dengesini garanti eden bir destek üçgeni oluşturarak, robotun kararlı bir şekilde yürümesini sağlarlar.

Genel olarak dört ayaklı robotlar, tek ve iki ayaklı robotlara kıyasla daha kararlı ve güvenilir, altı ve daha fazla ayaklı robotlara kıyasla daha az karmaşık, hafif ve ucuz olabilmektedir. Diğer bir ifadeyle; dört ayaklı robotların, güvenli ve kararlı bir yürüyüş ile kolay kontrol edilebilirlik ve toplam kütle arasında bir dengenin kurulabilmesi için gerekli en ideal bacak sayısına sahip olduğu söylenebilir.

Dört ayaklı robotların, tekerlekli sistemlere kıyasla en belirgin avantajı ve zorlu görevler için tercih edilmesini sağlayan özelliği, düzensiz arazide hareket edebilme kabiliyetidir. Düzensiz arazilerde hareketin ve denge kontrolünün karmaşık olması nedeniyle, çalışmalar çoğunlukla robotun düz yüzeylerdeki hareketlerine odaklanmamıştır. Ancak, engebesiz bir yüzeyde robottan istenen hareketi elde edebilmek için bacak koordinasyonları ve adımlar daha esnek seçilebilmesine karşın, engelbeli bir arazide yürüyüş planlamasının ve kararlı bir gövde hareketinin sağlanabilmesi önem arz etmektedir. Yani, engelbeli arazide robotun hareketliliğini belirleyen ve sınırlayan zemindeki düzensizliklerdir.



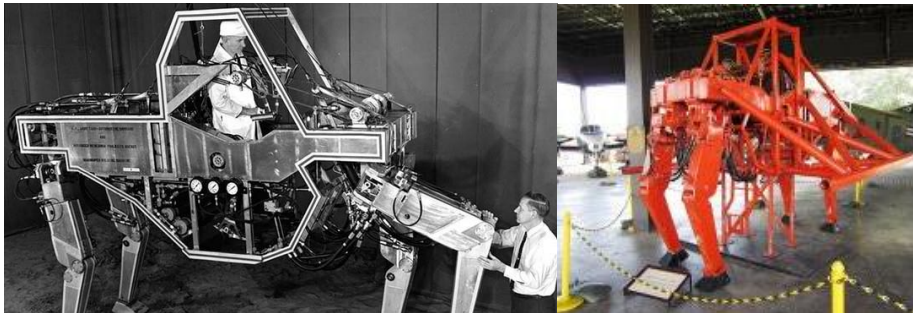
**Şekil 1. a) Tek, b) İki, c) Altı ve d) Dört ayaklı robotlar**  
 Figure 1. a) One leg, b) Biped, c) Six legs and d) Quadruped legged robots

Bacaklı mobil robotlar, literatürde yeni olmamasına rağmen, gelişen teknoloji ile çeşitlenmekte ve halen araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Dış çevreye ve yol şartlarına bağlı olmadan neredeyse her yerde hareket edebilen ayaklı yürüyen sistemler kurma fikri, araştırmacıları etkilemektedir. Bacaklı yürüyüşün (legged locomotion) sahip olduğu yüksek hareket kabiliyeti; engebeli arazi şartlarında arama-kurtarma, yük ve canlı taşıma vb. gibi önemli görevlerde, geleneksel yöntemlere kıyasla büyük avantaj sağlamakta ve bu alandaki çalışmalarını motive etmektedir. Dört ayaklı robotlar ile ilgili yapılan çalışmaların sayısı artış eğiliminde ancak, sistemin karmaşık dinamik yapısı nedeniyle bacaklı robotik alanında ki araştırmalar halen ileri düzey teorik hesaplamalar gerektirmektedir. Bu nedenle, dünya genelinde birkaç kurum hariç, kayda değer deneysel çalışmalar yapılamamakta ve bacaklı robot teknolojisinin laboratuvar ortamından çıkıp ticarileşmesi uzun sürmektedir.

#### DÖRT AYAKLI ROBOTLARA GENEL BAKIŞ (OVERVIEW OF QUADRUPED ROBOTS)

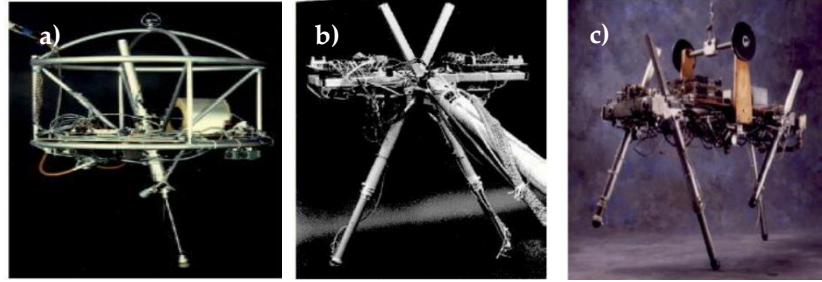
Son on yıldaki bacaklı robotlar üzerine yapılan araştırmalar ve eyleyici, sensör, yazılım, donanım vb. gibi alanlardaki teknolojik gelişmeler; biyolojik canlılara benzer, çok yönlü ve çevik hareket etme potansiyeline sahip bacaklı yürüyebilen mobil robotların geliştirmesinin önünü açmıştır. Özellikle, dinamik hareketler için yeterli beceriye sahip dört ayaklı robotlar geliştirilmeye başlanmıştır. Tekerlekli sistemlere göre üstün olmalarına rağmen, bacaklı robotların performansı, esinlenerek geliştirildikleri canlılara kıyasla halen yetersiz kalmaktadır. Çünkü dinamiklerini ve çevreleriyle etkileşimlerini kontrol etmek için yeni yöntemler, algoritmalar tasarlamak veya mevcut olanları geliştirebilmek halen büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Bacaklı yürüyüş kontrolü için, farklı yöntemlere ve arazinin türüne bağlı olarak değişkenlik (adaptasyon) göstermesi gereken yeni yaklaşımlara ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu nedenle, özellikle yüksek hız ve ivmelerde, robot dinamiklerinin ve gövde dengesinin kontrolüne yönelik çalışmalar önem arz etmektedir (Michele, 2013).

Geçmişteki otonom yürüyüş makinelerinin ilk başarılı örneklerinden birisi, Liston ve Mosher (1968) tarafından, *General Electric* firması adına geliştirilen hidrolik tahrikli 'Walking Truck' isimli dört ayaklı makinedir. Şekil 2'den anlaşılacağı üzere, bu makine 1400 kg ağırlığında ve oldukça büyük boyutlarda (3530 x 1066 x 4572 mm) olmasına rağmen, bacakların hareketi için yüksek kazançlı pozisyon kontrolü kullanılmasından dolayı, 8 km/s yürüyüş hızına kadar çıkabilmekteydi.



**Şekil 2. Dört ayaklı otonom makine Walking Truck**  
 Figure 2. Quadruped autonomous machine Walking Truck

Marc Raibert, Carnegie Mellon Üniv. ve sonrasında Massachusetts Teknoloji Enstitüsünde yaptığı çalışmalar sonrasında, *Boston Dynamics* firmasının (Boston Dynamics, 2020) kurucusu ve yöneticisi olarak bu alanda önemli bir otorite olmuştur. İlk çalışmalarına, 1979 yılında tek bacaklı zıplayan robotlar ile başlayan Raibert, bacaklı robotlar alanında yaptığı önemli ve yol gösterici çalışmalar ile araştırmacılara ilham kaynağı olmuştur. Raibert'ın, tek (Monoped), iki (Biped) ve dört ayaklı (Quadruped) robotları Şekil 3'te gösterilmiştir (Raibert, 1986). Tek bacaklı zıplama hareketinde; zıplama yüksekliğini, gövde duruşunu ve ilerleme hızını birbirinden bağımsız olarak kontrol etmiştir (Silva ve Tenreiro Machado, 2007). Daha sonra önerdiği bu kontrol algoritmasını iki ve dört ayaklı sistemler için de uygulamıştır.

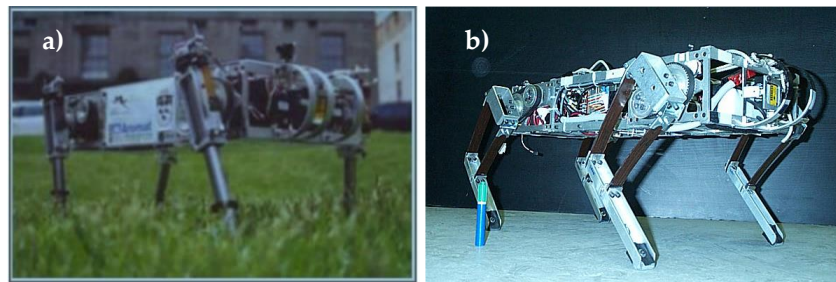


Şekil 3. Raibert tarafından geliştirilen a) Tek, b) İki ve c) Dört ayaklı robotlar

Figure 3. a) Single, b) Two and c) Four legged robots developed by Raibert

Bacaklı robotlar pnömötik, hidrolik ve elektrikli eyleyiciler ile tahrik edilmektedir. Elektrikli eyleyiciler kolay kontrol edilebilirliği, boyut ve maliyet avantajları nedeniyle, öncelikli olarak tercih edilmektedir. Ancak, güç yoğunluklarının yetersiz olması nedeniyle yüksek dinamik hareketler için mekanik enerji depolayan yayların kullanılmasını gerektirmektedir. Yaylar, robotun doğal dinamiklerini kullanabilme kapasitesini artırmakla birlikte, iş yükünü azaltarak enerji tasarrufu sağlamakta ve pasif dinamik yürüyüş konusunda geniş bir araştırma alanı oluşturmaktadır (McGeer, 1990). Bu sebeple, çıkışlarında elastik bileşenlerin bulunduğu, yüksek çevrim oranına sahip Seri Elastik Eyleyiciler yaygın olarak kullanılmaktadır (Pratt, 2002). 1990'lı yıllarda geliştirilmeye başlanan *Scout I* isimli robot, elektrikli eyleyici kullanılarak geliştirilen ilk robotlardandır (Yamazaki, 1999). Raibert'ın robotlarından sonra, Sang-Ho Hyon ve ark. tarafından 1998 yılında geliştirilmeye başlanan *KenKen I* isimli robot, hidrolik tahrikli robotların belirgin bir örneğidir (Hyon ve ark., 2003b). Krupp ve Pratt tarafından geliştirilen tek bacaklı bir robotta, ilk defa hidro-elastik eyleyiciler kullanılmıştır. (Krupp ve Pratt, 2006). 2008 yılında geliştirilen *Airhopper* isimli robotta ise pnömötik eyleyiciler kullanılmıştır. Semini (2010), bacaklı robotların eyleyicileri üzerine kapsamlı bir çalışma sunmuştur.

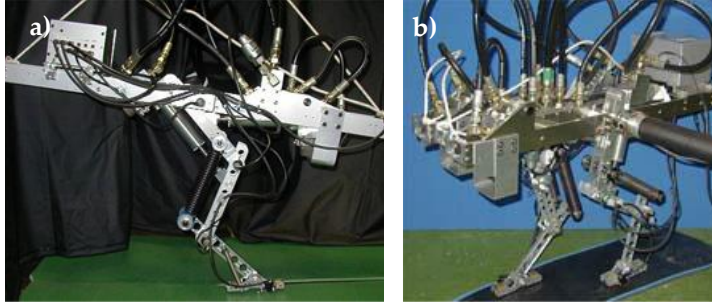
Poulakakis ve ark. (2005), McGill Üniversitesi'nde 1990 yılında geliştirmeye başladıkları prizmatik bacak yapısına sahip *Scout I* isimli robotun (Şekil 4a) devamı olarak, 1999 yılında dört nala koşabilen *Scout II* isimli robotu (Şekil 4b) geliştirmişlerdir. Robotun iki uzuvlu bacak yapısı, sadece düzlemsel dairesel hareketli tek bir eyleyici ile gövdeye bağlıdır. Basit bir mekanizmaya sahip olmasına rağmen dinamik olarak kararlı bir şekilde koşabilme kabiliyetine sahiptir.



Şekil 4. Elektrik tahrikli dört ayaklı robotlar, a) *Scout I* ve b) *Scout II*

Figure 4. Electric driven quadruped robots, a) *Scout I* and b) *Scout II*

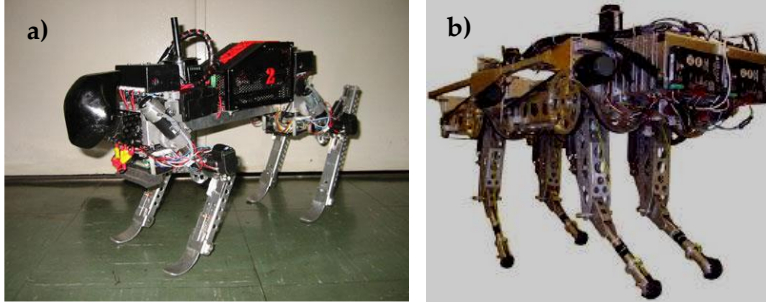
Hyon ve ark. (2003a), geliştirdikleri tek bacaklı *KenKen I* isimli robotun (Şekil 5a) ardından, iki bacaklı *KenKen II* isimli robotu (Şekil 5b) geliştirmişlerdir. Dört bacaklı versiyonunu ise hayata geçirememişler, ancak bu konuda önemli sonuçlar sunmuşlardır. Bacak yapısı, hidrolik tahrikli kalça (hip) ve baldır (knee) eklemlerinin yanı sıra yay ile pasif hareketli ve zemin ile temas sensörü içeren bir ayak bileğiden (ankle) oluşur. Güç ünitesi hariç, valfler ve kontrol bileşenleri robotun bünyesinde. *KenKen* robotunun bacak yapısı, sonrasında geliştirilen hidrolik bacaklı robotlara ilham kaynağı olmuştur.



Şekil 5. Hidrolik tahrikli dört ayaklı robotlar, a) *KenKen I* ve b) *KenKen II*

Figure 5. Hydraulically driven quadruped robots, a) *KenKen I* and b) *KenKen II*

Dört ayaklı robotlar; çalışma konularına, kullanım amaçlarına ve esinlenildiği biyolojik canlıların fiziksel özelliklerine göre farklı boyutlarda tasarlanmıştır. Hiroshi Kimura tarafından geliştirilen, elektrik tahrikli *Tekken II* isimli robot (Şekil 6a), ağırlığı 4.3 kg ve uzunluğu 0.3 m olan küçük boyutlu bir robottur. Ayrıca Kimura, mekanik sistemin doğal dinamiklerini kullanarak, dört ayaklı sıçrama (bounding) hareketi üzerine çalışmalar yapmıştır (Kimura ve ark., 1999; Zhang ve ark., 2006). Stanford Üniversitesinde Kenneth Waldron tarafından elektrik tahrikli olarak geliştirilen, 80 kg ağırlığında ve 1.75 m x 0.6 m x 0.8 m boyutlarında *KOLT* isimli robot (Şekil 6b), büyük boyutlu dört ayaklı robotların belirgin bir örneğidir (Estremera ve Waldron, 2008).

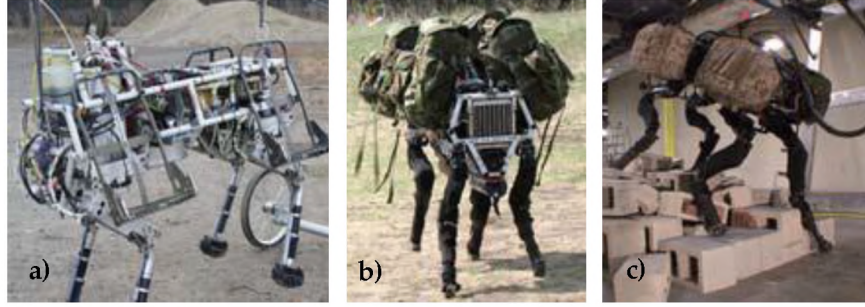


Şekil 6. Küçük ve büyük boyutlu dört ayaklı robotlar, a) *Tekken II* ve b) *KOLT*

Figure 6. Small and large quadruped robots, a) *Tekken II* and b) *KOLT*


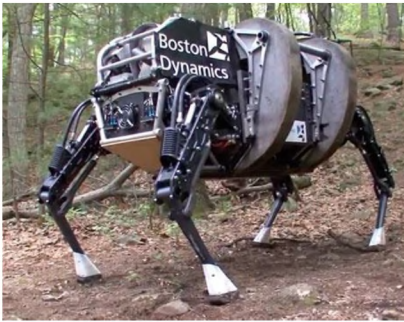
Marc Raibert ve arkadaşları, 1922 yılında kurdukları Boston Dynamics firmasında; otonom 50 kg yük taşıma kapasitesi olan, engebeli alanlarda ve yüksek hızlarda dinamik yürüyebilen dört bacaklı robotlar geliştirmek üzerine çalışmalara başlamışlardır. 2005 yılında, Amerikan ordusunun Savunma Gelişmiş Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA) tarafından finanse edilen, *BigDog* isimli dört ayaklı robotun ilk versiyonunu sunmuşlardır (Şekil 7a). Her bir bacağı dört uzuvlu olan hidrolik tahrikli *BigDog-2005* versiyonu, 1 m x 0.3 m x 1 m boyutlarında ve 90 kg ağırlığındadır (Buehler ve ark., 2005). Boston Dynamics firması, 2006 yılında yayınladığı çalışmalarında (Buehler ve ark., 2006; Playter ve ark., 2006), eğimli yüzeylerde yürüyebilen, çapraz (X şeklinde) bacak düzenine sahip *BigDog-2006* versiyonunu etkileyici bir video ile sunmuştur (Şekil 7b). Ancak, bacak yapısının neden değiştirildiği hakkında bilgi verilmemiştir. 2008 yılında, karlı ve ormanlık bir arazide yürüyebildiği görülen, dış bozucu girişlere karşın dengesini koruyabilen, daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip *BigDog-2008* isimli yeni bir versiyonu daha yayınlanmıştır (Şekil 7c).

Raibert ve ark. (2008), *BigDog-2008* versiyonunun tasarımını kısa bir bildiri ve video kaydı ile tanıtmışlar, diğer versiyonlara göre en belirgin farkının; ek bir aktif dönme eklemi içeren, yeni bir kinematik yapıya sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu alanda en popüler yayınlardan biri olan bu bildiride, ne yazık ki çok az ayrıntı yer almaktadır ve ilave dönme eklemının nedenlerinden söz edilmemektedir. Sonraki yıllarda, Boston Dynamics firması *BigDog*'un gelişimini ve hareket kabiliyetini sergileyen birkaç video daha yayınlanmıştır. Ancak, Amerikan ordusu destekli geliştirilmesi ve gizlilik gibi nedenlerden dolayı, bacaklı robotik alanda büyük ilham kaynağı olan *BigDog* robotunun tasarımı, kontrolü, bileşenleri ve teknik özellikleri hakkında çok az bilgi ve bilimsel yayın mevcuttur.

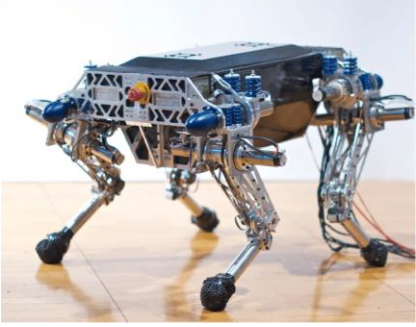








Şekil 7. Boston Dynamics firmasının ilk robotu, a) BigDog-2005, b) BigDog-2006 ve c) BigDog-2008  
Figure 7. Boston Dynamics company's first robot, a) BigDog-2005, b) BigDog-2006 and c) BigDog-2008

Son yıllarda geliştirilen dört ayaklı robotların görselleri, fiziksel özellikleri ve maksimum yürüyüş kapasiteleri gibi genel teknik detayları aşağıda tarihsel sıraya göre sunulmuştur. Bakırcıoğlu ve Kalyoncu (2020) tarafından bacaklı robotların geneli hakkında bir literatür çalışması sunulmuştur.

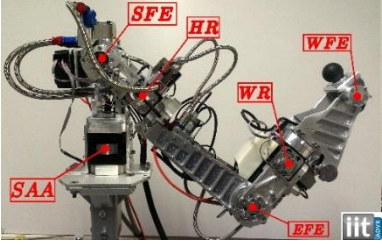
Yıl	Robot	Açıklama
2005 2006 2008	<p><i>BigDog</i></p> 	<p>Boston Dynamics firması tarafından 2005 yılında geliştirilmeye başlanmış, büyük boyutlu ve hidrolik tahrikli en popüler robotlardandır. Farklı kinematik yapılarla ve yük taşıma kapasitelerinde 3 farklı versiyonu sunulmuştur. Engeli alanlarda engel aşma, tırmanma gibi yüksek dinamik hareket kapasitesine sahiptir (Raibert ve ark., 2008).</p> <p>Ağırlık: 90 kg, Yük taşıma kapasitesi: 50 kg, Yürüyüş hızı: 1.6 m/s, Boyutları: 1 m x 0.3 m x 1 m</p>
2008	<p><i>AlphaDog</i></p> 	<p>2008 yılında Boston Dynamics firması ve DARPA tarafından, <i>Bigdog</i> robotu temel alınarak, önemli askeri görevler için geliştirilmiştir. <i>Legged Squad Support System (LS3)</i> ismiyle de bilinmektedir. İçten yanmalı motor ile tahrik edilmektedir. 24 saat hareket edebilme süresi ve 20 mil yol alabilme kapasitesine sahiptir. Askeri uygulamalardaki başarı potansiyeli dikkat çekicidir.</p> <p>Ağırlık: 450 kg Yük taşıma kapasitesi: 181 kg Yürüyüş hızı: 1.1 m/s Boyutları: 2 m x 1.9 m x 0.9 m.</p>

2010	<p style="text-align: center;"><b>HyQ</b></p> 	<p>Semini ve arkadaşları tarafından, İtalyan Teknoloji Enstitüsü (IIT) bünyesinde geliştirilmiştir. Labrador Retriever köpeğinin biyolojik yapısından ilham alınarak tasarlanmıştır. İki hidrolik, biri elektrik tahrikli olmak üzere 3 eklemlilik bacak yapısına sahiptir. Toplamda 12 serbestlik derecesine sahip <i>HyQ</i> robotunun avantajları; göreceli olarak hafif ve ucuz olması, zorlu arazilerde ilerleyebilmesi, yük taşıyabilmesi ve yüksek hareket kabiliyetine sahip olmasıdır. Semini (2010) tez çalışmasında, <i>HyQ</i> robotunun bacak yapısının ve tüm gövde prototipinin mekanik tasarımları ve sistemin hidrolik özellikleri hakkında kapsamlı bilgiler verilmiştir. <i>HyQ</i> robotu ve geliştiricileri bu alandaki çalışmalara önemli katkılar sağlamıştır. (Semini ve ark., 2011).</p> <p>Ağırlık: 80 kg, 98 kg (hidrolik ünite dahil)  Yük taşıma kapasitesi: 154 kg  Yürüyüş hızı: 0.2 ~ 2 m/s  Yürüyüş süresi- mesafesi: 2.5 saat – 10 km  Boyutları: 1 m x 0.5 m x 0.98 m</p>
2011	<p style="text-align: center;"><b>ALoF</b></p> 	<p>İsviçre/Zürich Federal Teknoloji Enstitüsü (ETH Zürich) bünyesindeki otonom robotik sistem laboratuvarının ilk çalışması olan <i>ALoF</i> isimli robot, CD Remy tarafından 2011 yılında geliştirilmiştir. Emekleme (crawling) yürüyüşü ile elverişsiz alanlarda geniş hareket becerisine sahip, küçük boyutlu bir robottur (Remy ve ark., 2011).</p> <p>Ağırlık: 15 kg,  Boyutları: 0.55 m x 0.38 m x 0.4 m</p>
2012	<p style="text-align: center;"><b>Cheetah</b></p> 	<p><i>Cheetah</i> robotu, <i>WildCat</i> robotunun devamı olarak, DARPA'nın maksimum mobilite ve manevra kabiliyeti elde etmek amaçlı yürüttüğü proje kapsamında geliştirilmiştir. Yüksek hızlarda hareket edebilme kapasitesine sahiptir. Bu alandaki hız rekorunu aşarak, en hızlı bacaklı robot olmuştur. Bir önceki rekor 13.1 mph (21.1 km/h; 5.9 m/s) ile MIT'te 1989 yılında kaydedilmiştir (Seok ve ark., 2013).</p> <p>Koşma hızı: 28 mph (45 km/h, 12.5 m/s)</p>
2012	<p style="text-align: center;"><b>Scalf-1</b></p> 	<p><i>Scalf-1</i> robotu, Shandong Üniversitesi tarafından Çin'de geliştirilmiştir. Her bir bacağı 3 serbestlik derecesine sahiptir ve hidrolik silindir ile tahrik edilmektedir. Yük dahil maksimum 120 kg ağırlığındadır. Boyutuna göre hızlı ve hareket kabiliyeti yüksektir (Rong ve ark., 2012).</p> <p>Ağırlık: 65 kg (güç ünitesi hariç)  Yürüyüş hızı: 1.8 m/s  Yük taşıma kapasitesi: 80 kg  Boyutları: 1 m x 0.4 m x 0.68 m</p>

2012	<p style="text-align: center;"><b>StarLETH</b></p> 	<p><i>StarLETH</i> robotu, ETH Zürich'de M. Hutter ve ekibi tarafından, elektrikli tahrikli olarak geliştirilmiştir. Model tabanlı teorik ve deneysel çalışmaları ile literatürde önemli bir yer tutar. Elastik eyleyiciler sayesinde tork ve konum kontrolü başarılı bir şekilde sağlanmıştır. Enerji verimliliği de dikkate alınarak, yüksek dinamik hareketleri yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Simetrik bacak yapısına sahip, orta ölçekli bir robottur. (Hutter ve ark., 2012a; Hutter, 2013).</p> <p>Ağırlık: 23 kg Yük taşıma kapasitesi: 25 kg Boyutları: 0.71 m × 0.64 m × 0.58 m</p>
2013	<p style="text-align: center;"><b>Jinpoong</b></p> 	<p><i>Jinpoong</i> robotu, Endüstriyel Teknoloji Enst. tarafından Güney Kore'de geliştirilmiştir. Engelibeli arazilerde ağır yükleri taşıyabilmesi amaçlanmıştır. Daha geniş bir hareket kabiliyeti elde etmek amacıyla, her bir bacağı 4-DoF olmak üzere, toplamda 16 serbestlik dereceli yapıda tasarlanmıştır. <i>BigDog</i>'a göre daha büyük ve ağırdır (Kim ve ark., 2013).</p> <p>Ağırlık: 120 kg Boyutları: 1.2 m × 0.4 m × 1.1 m</p>
2013	<p style="text-align: center;"><b>Spot</b></p> 	<p>Boston Dynamics firmasının Google tarafından satın alınmasından sonra geliştirilen, <i>Spot</i> serisinin ilk robotudur. Kapalı mekanlarda insanlarla etkileşimli hareket edebilecek ve engelibeli arazilerde arama amaçlı kullanılacak şekilde tasarlanmıştır. <i>BigDog</i> serisinin dördüncü versiyonudur. <i>BigDog</i>'a göre hafif ve boyutları daha küçüktür. Hızlı ve çevik hareket yetenekleri ile dikkat çekmiştir (Boston Dynamics, 2020).</p> <p>Ağırlık: 75 kg Yük taşıma kapasitesi: 14 kg Yürüyüş süresi: 1.5 saat Yürüyüş hızı: 1.6 m/s</p>
2013	<p style="text-align: center;"><b>HyQ Blue</b></p> 	<p><i>HyQ Blue</i>, <i>HyQ</i> robotunun yeni bir versiyonu olarak, IIT enstitüsü tarafından 2013 yılında geliştirilmiştir. Trento Üniversitesi ile işbirliği kapsamında, üç yıl süreyle Trento'ya gönderilmiştir. Robotunun arama ve kurtarma, orman ve inşaat teknolojileri gibi yüksek potansiyelli görevlerde kullanılması amaçlanmıştır. Kalça uzvu eklenmiş bu versiyonu, birçok hidrolik ve elektronik sensör ile donatılmıştır. Kablosuz uzaktan yönlendirilebilmekte ve gerçek zamanlı çevre haritalaması yapabilecek kameralar içermektedir.</p> <p>Ağırlık: 90 kg</p>

2014	<p style="text-align: center;"><b>Baby Elephant</b></p> 	<p><i>Baby Elephant</i>, yüksek yük taşıma amacıyla, fil görünümlü olarak geliştirilmiştir. Seri-paralel hibrit mekanizma şeklinde tasarlanan bacak yapısı, 3 serbestlik dereceli ve hidrolik silindirler ile tahrik edilmektedir. Zemin tepkisini azaltmak için ayak ucuna yay eklenmiştir. Araştırmacılar bu robotta kullanmak üzere, “Hy-Mo” isimli bir mikro-motor kontrolcü, filtre, soğutucu, akümülatör ve tank gerektirmeyen yeni bir hidrolik eyleyici geliştirmişlerdir (Gao ve ark., 2014).</p> <p>Ağırlık: 130 kg, Yürüyüş hızı: 0.5 m/s Boyutları: 1.2 m x 0.6 m x 1m</p>
2015	<p style="text-align: center;"><b>MiniHyQ</b></p> 	<p><i>HyQ</i> ekibi tarafından tasarlanmış ve şimdiye kadar inşa edilmiş en hafif ve en küçük hidrolik dört ayaklı robot ünvanına sahiptir. <i>MiniHyQ</i> tamamen tork kontrollü olup geniş hareket kabiliyetine sahiptir ve güç ünitesi üzerindedir. <i>HyQ</i> ile yaklaşık aynı boyutlara sahip olmasına rağmen 3 kat daha hafif, % 30 daha fazla tork gücüne sahip ve eklem hareket aralığı % 40 daha fazladır. Bacağın dönme eksenini değiştirebilmek için alt ve üst eklemlerin boyları ayarlanabilmektedir. Robot bacaklarına ait uzuvlar tam kapalı olduğunda %15 kısalabilmektedir. Ağırlığı, hidrolik güç ünitesi hariç, sadece 24 kg'dır. Bir kişi tarafından kolayca taşınabilir. Robotu hafifletmek için minyatür hidrolik eyleyiciler kullanılmıştır. Ayrıca, diz eklemlerinde Isogram mekanizması kullanılmış, mekanizma ile uyumlu bir tork sensörünün tasarımı önerilmiştir. (Khan, 2015; Khan ve ark., 2015)</p> <p>Ağırlık: 35 kg, Boyutları: 0.85 m x 0.35 m x 0.77 m Yürüyüş hızı: 2.5 m/s</p>
2015	<p style="text-align: center;"><b>HyQ2Max</b></p> 	<p><i>HyQ2Max</i>, <i>HyQ</i>'nun gelişmiş bir versiyonudur. Gücü, sağlamlığı ve çok yönlülüğü maksimize etme amacıyla geliştirilmiştir. Önceki versiyonlara göre, daha büyük eklem açılma konum aralıkları ve daha yüksek tork değerleri tercih edilmiştir. Ortalama maliyeti aynı kalacak şekilde belli iyileştirmeler yapılmıştır. Robot donanımının kararlılığı ve güvenilirliği artırılmış, daha yüksek tork üretebilen eyleyiciler kullanılmıştır. Ayaklı robotlar için dış darbeler ve kire karşı dayanıklılık önemli bir gereksinimdir. <i>HyQ2Max</i> çevresel etkilere karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanmıştır. Sensörler, vanalar, aktüatörler ve elektronik aksam gibi tüm hassas parçalar robot gövdesi içinde korumaya alınmıştır. Bacaklar ve gövde alüminyum alaşımdan (7000 serisi) imal edilmiştir (Semini ve ark., 2015b; Semini ve ark., 2015c).</p> <p>Ağırlık: 80 kg, Yük taşıma kapasitesi: 40 kg Boyutları: 1.3 m x 0.54 m x 0.91 m, Yürüyüş hızı: 1.5 m/s</p>



2015	<p style="text-align: center;"><b>HyQ-Centaur</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>Hyarm</b></p> 	<p><i>HyQ-Centaur</i>'un <i>HyQ</i> ekibi tarafından, tehlikeli ve kirli ortamlarda kullanılmak amacıyla, <i>HyQ</i> robotuna iki adet kol eklenerek geliştirilmesi planlanmıştır. Geleneksel dört ayaklı robotların kabiliyeti yük taşıma ve gözlem ile sınırlıdır. Bu sınırlamayı aşabilmek amacıyla, robota tutucu işlevi kazandıran ve hareketi sırasında gövde dengesini koruma yardımcı olabilecek bir robot kol ilave edilmiştir. Tekerlekli araçların ulaşamayacağı arazilerde, nükleer santral gibi tehlikeli alanlarda arama-kurtarma faaliyetlerine yönelik planlanmıştır. Eklenen kol sayesinde robot; nesnelere tutma, dengede kalma, dış etkilere tepki verebilme gibi yeni özelliklere sahip olabilecektir. Bu sayede <i>HyQ</i>'e kıyasla birçok farklı görevi yapabileceği belirtilmiştir (Semini ve ark., 2015c; Ur Rehman ve ark., 2016).</p> <p>Robot kolun ağırlığı: 12.5 kg, yük taşıma kapasitesi: 10 kg ve uzanma mesafesi: 0.74 m</p>
2016	<p style="text-align: center;"><b>ANYmal</b></p> 	<p><i>ANYmal</i>, ETH Zurich Enstitüsü ve ANYbotics firması tarafından, zorlu ortamlarda otonom operasyonlar için tasarlanmış yeni nesil, elektrik tahrikli bir robottur. Özel uyumlu ve hassas bir şekilde tork kontrollü eyleyiciler tarafından tahrik edilen robot, yüksek dinamik güce ve hareketliliğe sahiptir. Bünyesindeki lazer sensörleri, kameralar ve navigasyon sistemleri sayesinde; çevresini algılayabilir, kendini doğru bir şekilde konumlandırabilir, yörüngesini otonom bir şekilde planlayabilir ve yürürken adım hareketini ayarlayabilir. <i>ANYmal</i> gelişmiş bataryaları sayesinde 2 saatten fazla otonom hareket edebilir ve 5-10 kg yük taşıyabilir. Bir kişi tarafından kolayca taşınabilen, görece düşük ağırlıkta ve orta ölçekli bir robottur. Zorlu ortamlarda kullanım için tasarlanmıştır. Su ve toz geçirmez, darbelere karşı dayanıklıdır. 70 Hz tork kontrol hızına sahip ve en fazla 280 W'lık bir güç gereksinimi vardır. Teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda geliştirilmiş ve nihai hedef olarak ticarileştirilmiştir. <i>ANYmal</i> robotu literatüre önemli katkılar sunmuştur. (Hutter ve ark., 2016).</p> <p>Ağırlık: 30 kg, Yük taşıma kapasitesi: 10 kg Boyutları: 0.8 m x 0.4 m x 0.7 m, Yürüyüş hızı: 1.6 m/s</p>
2016 2018	<p style="text-align: center;"><b>SpotMini</b></p> 	<p>Laboratuvar ortamından çıkarak ticarileşen ilk robotlardan olan <i>SpotMini</i>, Boston Dynamic firmasına ait Massachusetts ticari şirketi tarafından, ev ve ofis ortamlarına yönelik tasarlanmış ve ticari pazara sunulmuştur. Stereo kamera ve navigasyon gibi birçok gelişmiş teknolojiye sahip, yeni nesil, elektrik tahrikli, küçük, çevik ve kompakt bir robottur. Engel aşma, tırmanma çevresini algılayabilme ve haritalayabilme gibi çok yönlü kabiliyetleri vardır. Biyolojik canlılardan ilham alınarak geliştirilmiştir. Dinamik denge ve konum kontrol</p>

		<p>sistemlerine sahiptir. Uzaktan kumanda ile yönetilebilmesinin yanı sıra, bazı zorlu görevleri otonom gerçekleştire-bilmektedir. Gelişmiş bataryaları sayesinde 1.5 saat çalışabilmektedir. 2018 yılında ise, robot kol eklenmiş versiyonu sunulmuştur. Güncel robotlardan olması nedeniyle hakkında az bilgi paylaşılmıştır (Niquille, 2019; Boston Dynamics, 2020).</p> <p>Ağırlık: 25 kg, Yürüyüş hızı: 1.6 m/s Robot kol ağırlığı: 5 kg, Uzunluğu: 0.84 m ve Yük taşıma kapasitesi: 14 kg</p>
2017	<p><b>Laikago</b></p> 	<p><i>Laikago</i>, Unitree Robotics şirketi tarafından, akademik ve ticari amaçlı olarak Çin'de geliştirilmiştir. Elektrik tahrikli, engel aşma kabiliyetleri olan, küçük boyutlu bir dört ayaklı robottur. İleri, geri ve yana doğru hareket edebilme gibi çok yönlü hareket kabiliyeti vardır. Kablosuz bağlantı (Wi-Fi) ile uzaktan kontrol edilebilir. Stereo kameralar ve Lidar sensörler içermediği için henüz otonom hareket edemeyen <i>Laikago (XDog)</i> robotu, günlük hayatta basit ve kolay işlerde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Mekanik yapısı ve kontrol sisteminin özgün ve sade olması nedeniyle maliyeti düşüktür (Pan ve ark., 2020).</p> <p>Ağırlık: 27 kg, Boyutları: 0.6 m x 0.37 m x 0.57 m Yürüyüş hızı: 0.8 m/s</p>
2019	<p><b>ANYmal C</b></p> 	<p><i>ANYmal C</i>, endüstriyel uygulamalara yönelik geliştirilen ve <i>ANYbotics</i> firması bünyesinde ticarileşen, <i>ANYmal</i> robotunun güncel bir versiyonudur. Endüstriyel alanlarda karmaşık görevleri güvenli ve otonom bir şekilde gerçekleştirebilmesi için görsel ve termal kamera, mikروفon, gaz detektörü gibi birçok donanıma sahiptir. 2 saatten fazla pil gücüyle çalışabilir ve kendi kendini şarj edebilir. 360 derece etrafını algılayarak gerçek zamanlı ortam haritalaması yapabilen, engelli ve eğimli zeminlerde otonom ve uzaktan kumanda ile hareket edebilen, merdiven çıkabilen, gelişmiş kontrolcülere sahip <i>ANYmal C</i>; birçok sektörde izleme, denetleme ve veri toplama gibi görevleri yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Henüz test aşamasında olmasına rağmen, gelecekte denetim operatörlüğü stratejisini temelden değiştirecek ve tamamen optimize edilmiş denetim sistemlerine imkân sağlayacaktır.</p> <p>Ağırlık: 50 kg, Yük taşıma kapasitesi: 10 kg Boyutları: 1.05 m x 0.5 m x 0.83 m, Yürüyüş hızı: 1 m/s</p>

2019	<p style="text-align: center;"><b>HyQReal</b></p> 	<p><i>HyQReal</i>, <i>HyQ</i> ekibinin yüksek güç ve dayanıklılık temelinde tasarladığı, acil durum senaryolarında insanları desteklemek için geliştirdiği ve ticarileştirdiği, hidrolik tahrikli, büyük boyutlu, güncel bir robottur. Tümleşik hidrolik sistemlere ve bataryalara sahip, kablosuz iletişim ile tamamen otonom hareket edebilen <i>HyQReal</i>, yüksek sağlamlık, güvenilirlik ve enerji verimliliği sunabilmektedir. Tasarımı ve mekanik donanımı IIT enstitüsü, yazılımı ve kontrolcüsü ise, kontrol sistemleri tasarımcısı ve üreticisi olan Moog firması tarafından geliştirilmiştir. <i>HyQReal</i>'in 3300 kg ağırlığındaki yolcu uçağını 10 m çekebilmesi, rakiplerine göre çok güçlü olduğunu göstermiştir. Enerji verimliliği ve yüksek performansı ile pazarda avantajlıdır (Semini ve ark., 2019; Villarreal ve ark., 2020).</p> <p>Ağırlık: 130 kg, Boyutları: 1.33 m x 0.67 m x 0.9 m Yürüyüş hızı: 0.5 m/s</p>
------	---	--

Yukarıda belirtilen güncel dört ayaklı robotlara bakıldığında; Boston Dynamics firması, İtalyan Teknoloji Enstitüsü ve ETH Zürih Enstitüsü olmak üzere, dünya çapında üç temel kurumun ön plana çıktığı görülmektedir. Robotların yapılarını, kullanım amaçlarını ve tarihsel sıralamalarını genel olarak incelediğimizde;

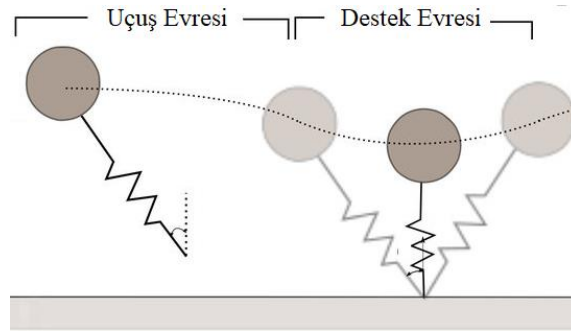
- Bacaklı robotik alanda öncü ve yönlendirici konumda olan ancak gizlilik nedeniyle çok az bilgi paylaşılan, Amerikan ordusu destekli, M. Raibert liderliğindeki Boston Dynamics firması; yüksek yük taşıma ve dayanıklılık temelli, hidrolik tahrikli ve büyük boyutlu *BigDog* isimli robot ile başlattığı serüvenini; ev ve ofis ortamında basit görevleri insan ile etkileşimli olarak yapabilecek, elektrik tahrikli ve küçük boyutlu *SpotMini* isimli robot ile sürdürmektedir (Boston Dynamics, 2020).
- Akademik boyutta başlattıkları çalışmalar ile literatüre önemli kazanımlar sağlamanın yanı sıra, yakın zamanda ticarileşme yoluna giden C Semini liderliğindeki İtalyan Teknoloji (IIT) Enstitüsü; yüksek güç ve sağlamlık gerektiren zorlu işler için hidrolik tahrikli, büyük boyutlu robotlar geliştirmektedir. *HyQ*, *HyQ2Max* isimli robotların daha güçlü versiyonu olan, birçok sektörde ve alanda kullanılacak otonom *HyQReal* isimli robot ile yüksek güç ve enerji verimliliği sunmaktadır (Semini, 2010; Boaventura, 2013; Focchi, 2013; Khan, 2015; Mastalli, 2017; Orsolino, 2019).
- Benzer şeklide, M. Hutter liderliğindeki ETH Zurich Enstitüsü ise; fazla zorlu olmayan ancak karmaşık hareketleri gerçekleştirebilen, seri elastik elektrikli eyleyiciler ile tahrikli, küçük boyutlu, hızlı çevik *StarETH* isimli robot ile literatürde önemli bir yere sahiptir. İlk robotları küçük boyutlarda olmasına rağmen, sonrasında güçlü ve dayanıklı *ANYmal* robot serisini geliştirmişler ve *ANYbotics* firmasını kurmuşlardır. Endüstriyel alanlarda denetim ve veri toplama gibi görevlere yönelik tasarladıkları, yüksek algılama ve çevresini haritalandırabilme kabiliyetlerine sahip otonom *ANYmal C* versiyonu geliştirmeyi sürdürmektedirler (Hutter, 2013; Bloesch, 2017; Gehring, 2017).

Günümüzde dört ayaklı robotlar ile ilgili çalışmalar; robotun tasarımı ve modellenmesinin yanı sıra, eklemlerin tork/kuvvet kontrolü ve gövdenin denge kontrolü, yürüyüş planlaması, ortam haritalaması ve engelbeli yüzeylerde yürüyüş gibi ana başlıklar altında, teorik ve deneysel olarak sürdürülmektedir.

## MODELLEME, KONTROL VE EYLEYİCİLER (MODELING, CONTROL, AND ACTUATORS)

İnsanların ve hayvanların yürüme, koşma gibi hareketleri, basit dinamik modeller üzerinden açıklanabilmektedir. Bunların en önemlilerinden biri olan doğrusal ters sarkaç modeli üzerinden, yürüyüş sırasında gövdenin hareketi ve dengelenmesi tam olarak ifade edilebilir (Winter, 1995). 1980 yıllarında M. Raibert tarafında geliştirilen Yay Eklenmiş Ters Sarkaç modeli (Spring-Loaded Inverted Pendulum, SLIP), rijit bir sarkaç modeline kıyasla koşma hareketini çok daha iyi temsil edebilmektedir (Alexander, 1990). SLIP yöntemi çok karmaşık sistemlere dahi uygulanabilmekte, basit modeller ve kontrol kuralları ile etkili çözümler sunabilmektedir.

Park ve ark. (2014) ise, dört ayaklı zıplamayı kontrol etmek için açıl momentumu da hesaba katan farklı bir model kullanmışlardır. SLIP modeli, robot bacağına noktasal bir kütle varsayarak, yay eklenmiş bir ters sarkaç sistemi olarak modeller. Yay, kütlelerin ağırlık merkezini dengeleyerek hareket evreleri (uçuş ve destek evresi) arasındaki geçişte momentumu koruma işlevi görür. Uçuş evresinden destek evresine iniş açısı, gövdenin nasıl ivmeleneceğini belirler. Ters sarkaç dinamiklerinin kontrol edilmesiyle stabil bir hareket sağlanır. Bu yaklaşım her biri SLIP model formunda tasarlanmış birden çok bacağına sahip bir robot için de uygulanabilir. SLIP gibi mekanik modeller, karmaşık denklemlerin sayısal olarak çözülmesini gerektiren kompleks modellere kıyasla, daha basit çözümler sunabilir ve eğrisel formlarda tasarlanan temel ayak ucu yörüngeleri için hızlı sonuçlar verebilirler. Bu tür mekanik modeller, kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi ve denge probleminin çözümü için bacaklı robotik alanındaki araştırmacılara ilham vermişlerdir (Ubellacker, 2016). Şekil 8’de SLIP modelinin hareketi şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 8.** Yay eklenmiş ters sarkaç modeli (SLIP)  
**Figure 8.** Inverted pendulum with spring added (SLIP)

Robotlar; uzuvları genellikle rijit cisimler olarak modellenen, girişleri eyleyici torqları çıkışları ise eklemlere ait açıl konumlar olan sistemlerdir. Endüstriyel robotların tork/kuvvet kontrolü üzerine araştırmalar 1950'lere dayanır. Mafsallı robotların geliştirilmesiyle, tork kontrolü büyük ilgi odağı olmuştur (Whitney, 1985). Bacaklı robotik alanında ise, Raibert (1986)'ın düzlemsel zıplayan tek bacağın kontrolüne yönelik çalışmaları bir dönüm noktasıdır. Önerilen kontrol yönteminin iki temel bileşeni; kalça eklemi üzerinden gövde kontrolü ve ayak ucu pozisyon kontrolü ile dengenin sağlanmasıdır. Bu temel ve basit metot, iki ve dört ayaklı sistemler için de başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Sonrasında, bacaklı sistemler için tork/kuvvet kontrol yöntemlerinin gelişimi devam etmiş ve son yıllarda yoğunlaşmaktadır.

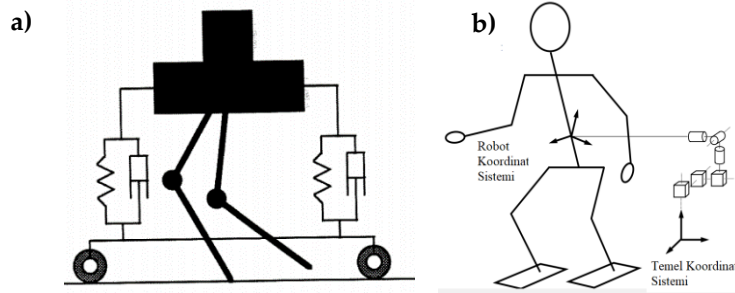
Tork tabanlı kontrol, çeşitli empedans kontrol formlarında temas (kontakt) kuvvetlerinin kontrolüne, rijit cisim dinamiği modeline dayalı kontrole ve diğer birçok model tabanlı kontrol uygulamalarına imkân verir. Yaygın olarak kullanılan empedans ve model tabanlı tork/kuvvet kontrol teknikleri mevcuttur.

N. Hogan tarafından sunulan çalışmaların, eklemli manipulatörlerin empedans kontrolü için temel olduğu düşünülmektedir (Hogan, 1985a; Hogan, 1985b). Hogan, dinamik etkileşim halindeki iki sistemin, birbirini fiziksel olarak tamamlaması gerektiğini vurgulamıştır. Robotun çevre ile fiziksel uyumunu sağlamak için genellikle, çevrenin giriş (admittance) kabul edildiği ve uç işlevcinin ise empedans davranışı gösterdiği yaklaşımlar kullanılmıştır. Genel olarak empedans kontrol, kartezyen koordinat sisteminde çevre tarafından uygulanan bir harekete cevap olarak üretilen kuvveti denetler ve istenilen dinamik

kapasitif-sönüm-endüktif etkiye göre eklemlere uygulanacak torkları üretir. Kazerooni ve ark. (1986), sınırlı model belirsizlikleri için çok değişkenli Nyquist kriterlerini kullandıkları, çevre ile uyumu denetleme yönelik farklı bir yöntem sunmuşlardır. Albu-Schaffer ve Hirzinger (2002), eklem sertliklerinin kontrolünü dikkate alarak, gelişmiş bir empedans denetleyici yapısı önermişlerdir. Bu yapı, Hogan'ın önerdiği klasik yöntemle göre daha iyi bir empedans kontrol performansı sağlayabilmesine karşın daha düşük geometrik doğruluk göstermiştir.

O. Khatib, hareket ve kuvvet kontrolünü birlikte ele alarak, Operasyonel Alan Kontrolü (Operational Space Control-OSC) kavramı ve formülasyonları ile farklı bir yaklaşım sunmuştur. Eklemlerin kontrolünden daha çok robota verilen göreve, yani uç işlevcinin performansına odaklanan bir yaklaşım önermiştir (Khatib, 1987). Bu yaklaşımda, uç işlevcinin hem konumunun hem de temas kuvvetlerinin kontrolü, eklem torklarının denetimine dayanır.

Bacaklı hareket kontrolü için Pratt ve ark. (2001) sezgisel tabanlı Sanal Model Kontrolü (Virtual Model Control) tekniğini önermişlerdir. Bu teknikte; yay, damper gibi mekanik parçalar ile fiziksel olarak eşdeğer sanal bileşenler, robotun içine veya robot ile çevre arasındaki uygun konumlara tanımlanır. Daha sonra, bu sanal bileşenler ile robotun etkileşimi, eyleyicilerden istenen torkları ve kuvvetleri üreten Jacobian matrisi ile ifade edilir. Şekil 9a'da, sanal model kontrolü yöntemiyle geliştirilmiş yürüyüş mekanizması verilmiştir. Diğer model tabanlı yaklaşımlarda ise, genellikle rijit cisim dinamiği tabanlı matematiksel modeller kullanılmıştır. Buchli ve ark. (2009), bacaklı hareket kontrolünün gürbüzlüğüne artırmaya yönelik, rijit cisimler için model tabanlı ve ters dinamik kontrole dayalı bir çözüm sunmuşlardır. Bu yöntem, yörünge takibinde önemli bir kayba sebep olmaksızın pozisyon geri besleme kazancının azaltılmasına imkân verir. Bu düşük geri besleme kazançları sayesinde, robot bilinmeyen muhtemel engeli arazide daha gürbüz ve kararlı hareket edebilir. Mistry ve ark. (2010), kayan nokta (floating base) tabanlı koordinat sistemine sahip robotların, noktasal temasların dinamik olarak sürekli değişmesinden kaynaklı sorunların üstesinden gelmek için, rijit cismin ters dinamiğini hesaplayan bir ortogonal ayrışma yöntemi önermişlerdir. Kayan nokta tabanlı bir sistemde, robot gövdesine ait (body frame) koordinat sistemi ve temel (inertial frame) koordinat sistemi Şekil 9b'de görülmektedir.



**Şekil 9. a) Sanal model kontrollü yürüyüş mekanizması b) Kayan nokta tabanlı robot modeli**

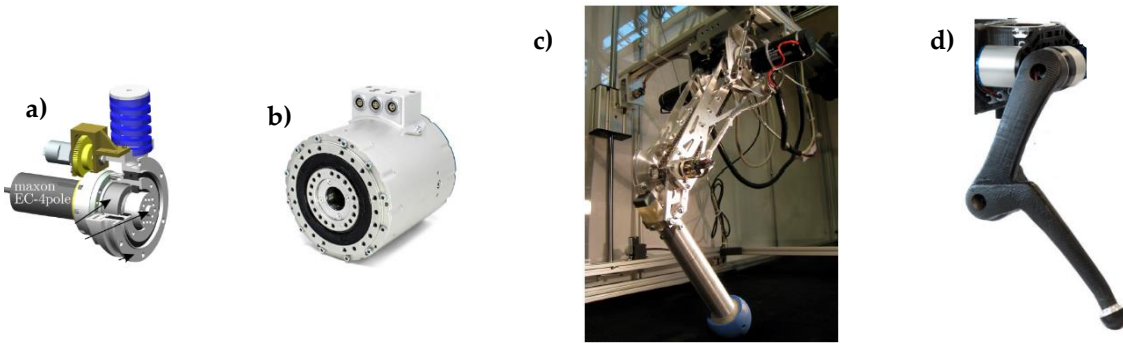
**Figure 9. a) Virtual model controlled walking mechanism b) Floating point based robot model**

Kuvvet kontrolü gerektiren sistemlerde eyleyicilerin güç aktarımdaki sertlik, denge ve kararsızlık problemlerinin ana nedenidir. Ayrıca, eyleyicilerin çalışma frekanslarının sınırlı olması ve yetersiz sayısal hesaplama hızı nedeniyle oluşan gecikmeler, kapalı çevrim kontrol sistemlerinin kararlılığını olumsuz etkilemektedir (Whitney, 1985). Bu tür sorunların üstesinden gelmek için, eyleyicilere esnek yaylar eklenerek aktarım sertliğinin azaltılması sağlanmıştır (Pratt ve Williamson, 1995).

Seri Elastik Eyleyicilerin (Series Elastic Actuators-SEA), aktarım sertliğini azaltmanın yanı sıra, darbe kuvvetlerinden kaynaklanan hasarları önlemek, enerji depolamak, daha güvenli bir insan/çevre ve robot etkileşimi sağlamak gibi özellikleri vardır. SEA'ların tasarımı, sağlamlık ve performans arasında bir denge kurulmasını gerektirir. Robotun çok yönlü hareket kabiliyeti açısından uygun yay sertliğini seçmek önemlidir. Yüksek eklem sertliği istenmediği gibi, düşük eklem sertliği ise robotun kontrol edilebilirliğini ve ayak ucu yörünge izleme yeteneğini düşürmektedir. Bu sebeple, Grebenstein ve ark. (2011) ve Tsagarakis ve ark. (2011), ayarlanabilir değişken sertlik değerlerine sahip farklı SEA tasarımları ve çalışma

prensipieri önermişlerdir. Değişken sertliğe sahip eyleyiciler önemli çözümler sunabilmelerine karşın ağırlık, hacim, mekanik karmaşıklık, düşük sağlamlık ve hız gibi özellikleri nedeniyle yüksek dinamik hareketli robotlar için yetersiz kalmaktadır. Kuvvet, eyleyiciden yüke sonlu sertliğe (rijit olmayan) sahip hidrolik akışkan veya yay ile aktarıldığından dolayı yükün hızı geri beslenir. Gelişmiş model tabanlı kontrol teknikleri, bu geri beslemeyi telafi etmek üzerine tasarlanmaktadır (Boaventura ve ark., 2012a).

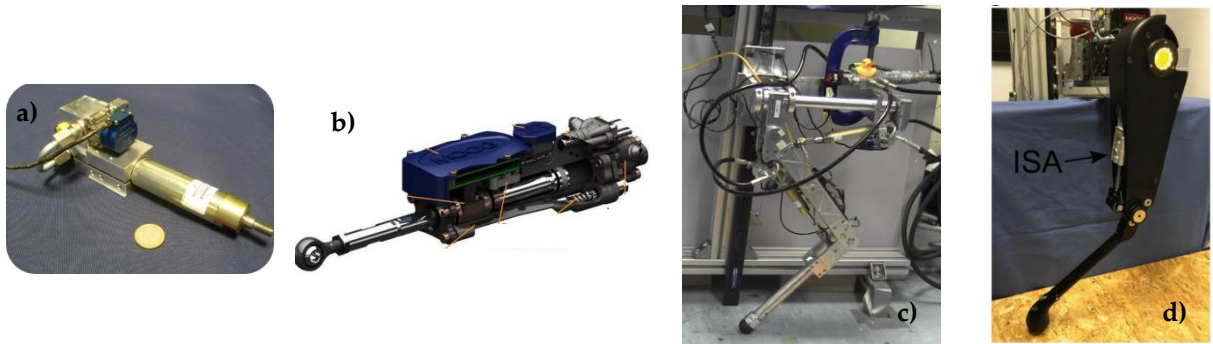
M. Hutter ve ekibi, geliştirdikleri *StarLETH* (Hutter, 2013) ve *ANYmal* (Hutter ve ark., 2016) isimli elektrik tahrikli robotların; tasarımlarını, eyleyici dinamiğinin ayrıntılı modelini, mekanik analizlerini ve düşük seviye kontrol tekniğini (low-level controller) detaylı olarak sunmuşlardır. Yüksek verimli ve zıplama/koşma gibi çok yönlü hareketlere uyumlu, insan/hayvan bacak yapılarından ilham alınarak tasarlanan, iki uzuvlu *StarLETH* robotuna ait bacak yapısını ve aktif sönümleme içeren entegre bir eklemlerin tork, pozisyon kontrolüne yönelik bir yaklaşım tanıtmışlar, detaylı analizler sunmuşlardır (Hutter ve ark., 2012b; Hutter ve ark., 2013). Güçlü bir öğrenme metodu kullanarak (reinforcement learning), *StarLETH* robotunun optimal tek-bacak zıplama hareketinin kontrolünü gerçekleştirmişlerdir (Fankhauser ve ark., 2013). Önerilen tek-bacak zıplama kontrol tekniğinin, yüksek hızlardaki sürtünme etkisinde yetersiz kaldığını ve büyük güç gereksinimlerini karşılamadığını belirtmişlerdir (Heijnen, 2014). Eklem kinematiği ile ters dinamik operasyonel alan kontrolünün birleşiminden oluşan hibrit bir operasyonel alan kontrolcü geliştirmişler ve *StarLETH* robotuna başarıyla uygulamışlardır (Hutter ve ark., 2014). Büyük adımlar ile robotun çevresini görmeden/haritalandırmadan kör yürüyüşüne yönelik (blind walking) hiyerarşik bir optimizasyon formüle etmişlerdir (Bellicoso ve ark., 2016). Robotun daha hızlı ve düşük enerji tüketimine yönelik modelleme, yürüyüş planlaması ve gürbüz bir model tabanlı kontrolcü sunmuşlardır (Gehring, 2017). Fankhauser ve Hutter (2018), yüksek hareketliliğe ve çok yönlülüğe sahip dört ayaklı robotlar için, klasik mekanik dişli sistemine sahip eyleyicilerin kullanılmayacağını, klasik eyleyicilerin sadece yavaş ve statik hareketler üretebileceğini belirtmişlerdir. Eklem torkunu, pozisyonunu ve empedansını herhangi bir ek bileşene gerek kalmadan doğrudan düzenleyebilen, kompakt ve küçük boyutlu, ANYdrive isimli bir yeni nesil SEA sunmuşlar ve geliştirdikleri *ANYmal* isimli robotta kullanmışlardır. Grandia ve ark. (2019) bacaklı robotlar için daha gürbüz kontrol çözümleri geliştirmek amacıyla, eyleyicilerin performans sınırları ile yürüyüş planlarını uyumlu hale getiren, frekans tabanlı, ayarlanabilir bir model öngörücü (model predictive) kontrol önermişler ve uygulamışlardır. Deneysel sonuçların *ANYmal* robotunun hareket ve tork performansını iyileştirdiğini ve önceden tanımlanmamış zeminlerde daha kararlı yürüyüş sağlayabildiğini bildirmişlerdir. Şekil 10'da, *StarLETH* ve *ANYmal* robotları için geliştirilen elektrikli eyleyiciler ve bacak yapıları verilmiştir.



**Şekil 10.** ETH Zürih'te geliştirilen a),c) *StarLETH* ve b),d) *ANYmal* robotlarına ait eyleyiciler ve bacak yapıları  
**Figure 10.** Actuators and leg structures of a), c) *StarLETH* and b), d) *ANYmal* robots developed at the ETH Zurich

C. Semini ve ekibi, geliştirdikleri *HyQ* (Semini, 2010), *HyQ2Max* (Semini ve ark., 2015c) ve *HyQ-Real* (Semini ve ark., 2019) isimli hidrolik tahrikli robotların; tasarımlarını, hidrolik eyleyicilerinin analizlerini ve geliştirilen kontrolcülerini kapsamlı olarak sunmuşlardır. Çalışmalarına, düşey bir kızak üzerine doğrusal hareketli olarak sabitlenmiş, iki uzuvlu, *Hy* isimli bir hidrolik robot bacağın geliştirilmesi ve kontrolü ile başlamışlardır. Başlangıçta, sistemin denge problemi olmadığı için, öncelikle eklemlerin kuvvet ve pozisyon kontrolü üzerinde durmuşlardır. Eklemlerin açılma konumlarının ölçümünde enkoder kullanmışlar ve

bu sayede bacağın pozisyonunu tayin etmişlerdir. İlk olarak, benzetim ve uygulama çalışmaları için gerçek zamanlı bir kontrol yazılımı (Schaal, 2009) kullanmışlardır. Koşma ve zıplama gibi oldukça dinamik hareketlere uyumlu bu bacak yapısı birçok kontrol tekniklerinin test edilmesine ve analizine imkân sağlamıştır. Semini ve ark. (2008), bacak yapısının fiziksel parametrelerini ve test sisteminin kurulumunu açıklamış, bacağın zıplama hareketine ait deneysel sonuçları, analizleri rapor etmişlerdir. Yüksek güç ve hızlı bir dinamik tepki sunabilmesi nedeniyle hidrolik eyleyiciler tercih edilmiş, performans ve fiziksel boyutlar açısından elektrikli eyleyiciler ile karşılaştırılması yapılmıştır. Cunha ve ark. (2009) bacağın ilk kontrol yaklaşımı olarak, kazançlarının yürüyüş döngüsüne ve eklem konumuna göre ayarlanabildiği bir PID kontrol algoritması uygulamışlardır. Semini ve ark. (2011), *HyQ* robotunun tasarım yapısı, hidrolik eyleyici ve kontrolcü bileşenleri hakkında detaylı bilgiler vermişlerdir. *HyQ* robotu, aktif uyumlu kontrol sağlayan, tam tork kontrolcüye sahiptir (Boaventura ve ark., 2012b; Boaventura ve ark., 2013). Ugurlu ve ark. (2013) hidrolik tahrikli robotlarda dinamik ve uygulanabilir yürüyüş hareketi üretmek için birleştirilmiş bir yörünge sentezleyici ve aktif kontrol şeması önermişler, *HyQ* robotunda uygulamışlardır. Semini ve ark. (2015a), yay gibi pasif elemanların aksine gerçek zamanlı eklem sertliği ve sönümleme ayarı sağlayan, tork kontrol tabanlı aktif bir empedans kontrolcü önerilmişler ve *HyQ* robotun yürüyüşündeki etkisini değerlendirmişlerdir. Focchi ve ark. (2016) empedans sertlik ve sönüm parametrelerinin etkisi üzerine deneysel ve benzetim çalışmaları ile kapsamlı bir analiz çalışması sunmuşlardır. Koivumäki ve ark. (2017) hidrolik bacak kontrolü için sanal ayrışma kontrol (Virtual Decomposition Control-VDC) yaklaşımı ile doğrusal olmayan model tabanlı bir kontrol tekniği sunmuşlardır. Semini ve ark. (2017) çalışmalarıyla, *HyQ* robotuna göre daha sağlam ve güçlü olması amaçlanan, mevcut hareket kabiliyetini genişletmek amacıyla farklı kinematik yapıda tasarlanan bacak yapısına ve optimize edilmiş hidrolik mekanizmalara sahip *HyQ2Max* isimli versiyonu geliştirmişlerdir. Önerilen yeni tasarımın ve tork kontrolcünün, robotun önceki versiyonlarına kıyasla, farklı yüksek dinamikteki hareketleri gerçekleştirmedeki performansını araştırmak için deneysel ve simülasyon çalışmaları yapmışlar, detaylı analizler sunmuşlardır. Barasuol ve ark. (2018), *HyQ-REAL* robot bacağına kullanılmak üzere; yüksek güç, sağlamlık ve geniş çalışma frekansı sunan, hidrolik silindir, servo valf ve elektronik bileşenlerden oluşan, basınç/konum/sıcaklık algılayıcıları sayesinde aktif empedans ve kuvvet kontrolüne uygun, hidrolik bir Entegre Akıllı Eyleyici (Integrated Smart Actuator-ISA) geliştirmişlerdir. Önerilen akıllı eyleyicinin dinamik modelini ve tasarladıkları kontrol mimarisini tanıtmışlar, tek bacak yapısı üzerinde deneysel olarak doğrulama çalışmaları ve değerlendirmeler sunmuşlardır. Bu eyleyicinin, robot ile yüksek oranda entegre edilmiş, bu alanda geliştirilen ilk hidrolik akıllı eyleyici olduğunu bildirmişlerdir. Şekil 11'de, *HyQ* ve *HyQ-REAL* robotları için geliştirilen hidrolik eyleyiciler ve bu robotların bacak yapılarına ait görseller sunulmuştur.



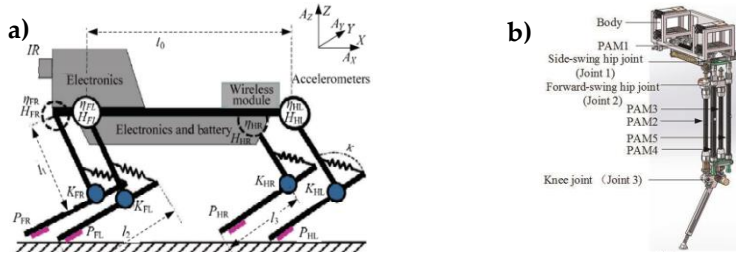
**Şekil 11.** IIT Enst. geliştirilen a),c) *HyQ* ve b),d) *HyQ-REAL* robotlarına ait eyleyiciler ve bacak yapıları  
*Figure 11. Actuators and leg structures of a), c) HyQ and b), d) HyQ-REAL robots developed at the Italian IIT Institute*

Hoffmann ve Simanek (2017), geliştirdikleri dört ayaklı bir robotun diz eklemlerine yay ekleyerek aktif/pasif eklem (Active/Passive Compliant Joint) oluşturup, deneysel ve benzetim çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Yay eklenerek oluşturulan eklem yapısının; yürüyüş algoritmasının öğretilmesi, enerji verimliliği ve ölçüm alma üzerine etkileri, avantajları incelenmiştir. Pasif eklem yapısının, düz zeminlerde aktif eklem yapısına kıyasla, robotun %30-50 oranında daha stabil ve verimli bir yürüyüş

gerçekleştirebildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, pasif eklem yapısının ucuz olmasının yanı sıra, arazi şartlarına daha iyi uyum sağlayabildiği belirtilmiştir. Önerilen eklem yapısının, hassas kontrol gerektirmeyen uygulamalarda, karmaşık yapının, maliyetin ve toplam ağırlığın azaltılması; enerji verimliliğinin ve güvenilirliğin artırılması açısından avantajları olduğu ifade edilmiştir (Şekil 12a).

Lei ve ark. (2017), çitanın biyolojik anatomisinden ve kas yapısından esinlenerek, pnömatik yapay kaslarla çalışan, hafif ve esnek bir biyonomik bacak geliştirmişlerdir. Sistemin jakobiyen matrisi ve kinematik çözümleri yapılmıştır. Bacağın yüksek hızda hareketi ve yumuşak teması için, ayak temas kuvvetlerine göre ayak esnekliğine bağlı potansiyel enerjisi analiz edilmiş ve ayağın katılığını veren bir model sunulmuştur. Önerilen bacak modeli deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır (Şekil 12b).

Kitano ve ark. (2016), yüksek hızlı ve enerji tüketimi açısından verimli bir yürüme yeteneğine ve genişleyen tipte (sprawling-type) bacak yapısına sahip *TITAN-XIII* isimli bir dört ayaklı robot geliştirmişlerdir. Bu robot, geniş bir ayak destek poligonu ve hafif gövde ağırlığı sayesinde yüksek kararlılığa sahiptir. Yürüme hızını ve enerji verimliliğini artırmak için hafif ve kompakt bir bacak yapısı tasarlamışlar ve yürüme hızını 1.38 m/s hıza kadar artırmışlardır. Böylece, örümceğe benzer bir yapıda geliştirilmiş ancak, memeli hayvan yapısındaki bir robot ile aynı hız ve enerji verimliliğine sahip olabileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 12. a) Aktif/pasif eklem yapısına sahip model b) Pnömatik tahrikli biyonomik  
Figure 12.a) Model with active / passive joint structure b) Pneumatic driven bionic

## ENGBELİ YÜZEYLERDE YÜRÜYÜŞ KONTROLÜ VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI (GAIT CONTROL AND SIMULATION STUDIES ON ROUGH SURFACES)

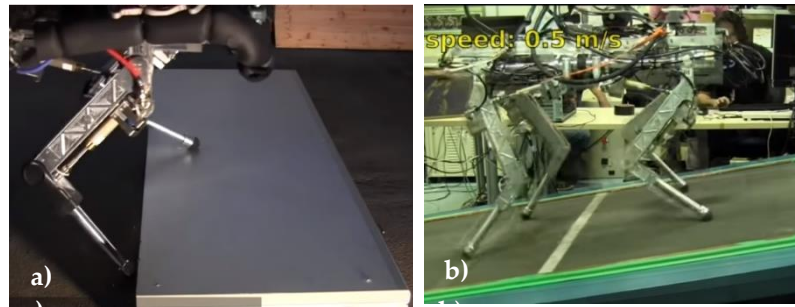
Bacaklı sistemlerin en önemli avantajları, zorlu arazi şartlarındaki yüksek hareketlilik sağlayabilme potansiyelleridir. Ancak engebeli arazi koşullarına yönelik tüm gövde hareket planlanmasının ve kontrolünün karmaşıklığı, dört bacaklı robotların hareketliliğini düz araziler ile sınırlamaktadır. DARPA'nın yürüyüş öğrenme programı kapsamında gerçekleştirilen, *LittleDog* isimli küçük boyutlu robotun engebeli, düzensiz bir zemindeki yürüyüş çalışması, bu alandaki diğer araştırmalara yön vermiştir. Bu çalışmada Rebula ve ark. (2007), robotun engebeli arazide statik yürüyüşü için kaymayı, çarpmayı ihmal eden reaktif bir kontrolcü geliştirmişlerdir. Önceden tasarlanmış küçük boyutlardaki engebeleri aşmak için geliştirilen bu kontrolcü, birden fazla yürüyüş modeline ve bunlar arasında geçişe uygundur. Bu sayede, robot 7.5 cm (bacak uzunluğunun % 40'ı) engebelerden geçebilmektedir (Şekil 13).



Şekil 13. *LittleDog* robotunun engebeli zeminde yürüyüşü  
Figure 13. *LittleDog* robot walking on rough/uneven ground

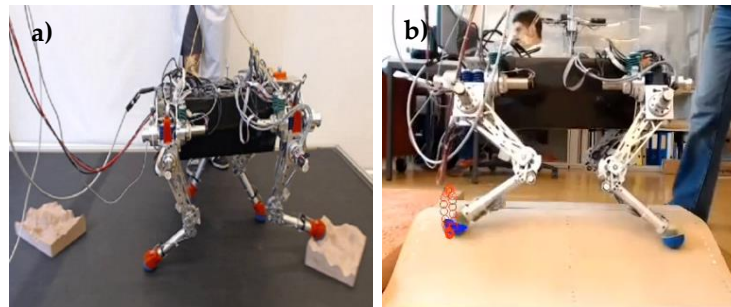


Literatürde, engelibeli arazide hızlı ve sağlam bir yürüyüş için önerilen farklı hareket planlama ve kontrol yöntemleri mevcuttur. Kalakrishnan ve ark. (2011), üç ana alt sistemden oluşan, temel bir hiyerarşik yaklaşım önermişlerdir. Bu yaklaşım; gövde duruş planlayıcısı, adım hareket planlayıcısı ve kayan nokta tabanlı ters dinamik kontrolcüden oluşmaktadır. Bu hiyerarşik ayrışmanın en önemli avantajı, hesaplama süresini azaltmasıdır. Focchi ve ark. (2013), robotun yüzeydeki düzensizlikleri bilmediği ve görsel bir geri bildirim alamadığı durumlarda, ayak ucu reaksiyonu tepki hızının çok önemli olduğunu bildirmişler ve HyQ robotunun reaktif olarak yüksek engelleri (Şekil 14a) aşabilmesi için yerel bir refleks yöntemi önermişlerdir. Benzer şekilde, Barasuol ve ark. (2013), eğimli ve düzensiz zeminlerde gürbüz bir yürüyüş sağlamak amacıyla, gövdenin duruşunu da dikkate alarak, eliptik ayak ucu yörüngeleri üreten Merkezi Örüntü Üretimi (CPG) tabanlı bir reaktif kontrol algoritması önermişlerdir (Şekil 14b).



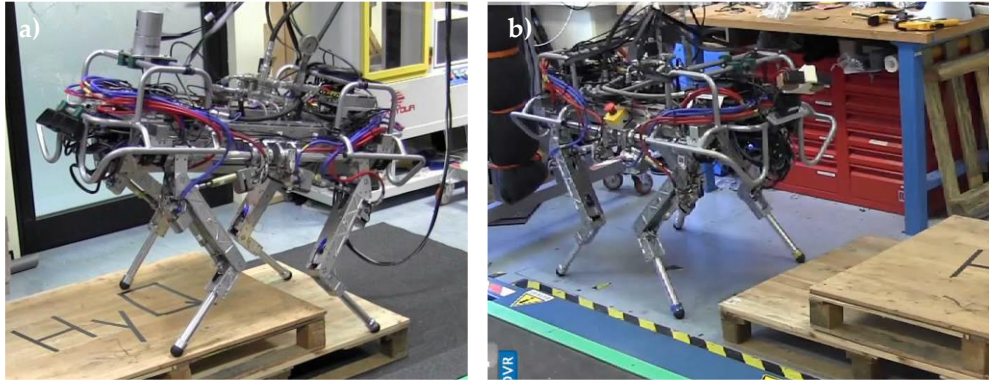
**Şekil 14.** HyQ robotunun ayak ucu reaktif yöntem ile **a)** basamak aşması ve **b)** eğimli zeminde hareketi  
*Figure 14.* The movement of the HyQ robot with foot-end reactive method **a)** stepping on steps and **b)** sloping ground

Gehring ve ark. (2013), StarLETH isimli robotun farklı yürüyüş çeşitleri ve farklı hızlarda yürüyüşü için esnek bir kontrol algoritmasını geliştirmişler ve deneysel olarak doğrulamışlardır. Önerilen algoritmanın, yürüyüş çeşitleri arasında geçişlere izin verebildiğini ve beklenmedik arazi şartlarına göre parametrelerinin ayarlanabilir olduğunu bildirmişlerdir. Robotun yürüyüş sırasında 5 cm yüksekliğindeki üç boyutlu engelleri aşabildiğini belirtmişlerdir (Şekil 15a). Wagner ve ark. (2017), zeminine ait teğetsel tepki kuvvetlerini en aza indirmek ve kayma riskini azaltmak amacıyla, ayak ucuna yerleştirilen bir kuvvet sensörü ile temas kuvvetlerini tahmin etmeye dayalı bir yöntem önermişler ve doğrulamışlardır. Optik bir kuvvet sensörü modellemişler ve Kalman filtresi kullanılarak elde edilen eklem tork ölçümleri ile entegre edilmişlerdir. (Şekil 15b).



**Şekil 15.** StarLETH robotunun temas kuvvetlerine dayalı **a)** engelibeli ve **b)** eğimli zeminlerde hareketi  
*Figure 15.* Movement of StarLETH robot based on contact forces on **a)** uneven and **b)** sloping ground

Winkler ve ark. (2014) zorlu arazi şartları için, ayak ucu tepki kuvvetlerine göre kendini güncelleyebilen, sanal model tabanlı tork bir kontrolcü kullanan, gürbüz ve esnek bir ayak ucu yörünge planlayıcısı önermişlerdir (Şekil 16a). Daha sonra, Winkler ve ark. (2015) tepki kuvvetleri yerine, online ortam modellemesi üzerinden yörünge güncellemesi yapabilen, sanal modelini ve sistem dinamiklerini birlikte dikkate alan, ZMP denge kriterine dayalı, daha hızlı bir yöntem önermişlerdir. (Şekil 16b).

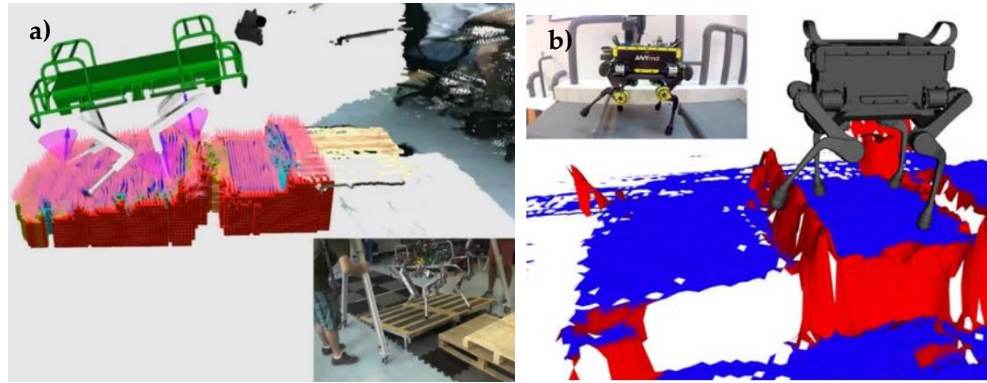


**Şekil 16.** HyQ robotunun a) tepki kuvvetleri ve b) adım yörüngesinin güncellenmesi temelli hareketi  
*Figure 16.* Movement of the HyQ robot based on a) reaction forces and b) updating the step trajectory.

Focchi ve ark. (2017), HyQ robotun 'V' şeklinde 50 derece eğimli bir kanalın ortasında yarı-statik yürüyüş planlaması ve kontrolü üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Robotun ağırlık merkezinin denge kontrolü; ayağa etki eden kuvvetlere göre, gövde ağırlığının o anda zemin ile temas halindeki ayaklara dağıtılmasıyla sağlanmıştır. Bunun için, eklem torklarını ayakların kaymasını önleyecek şekilde hesaplayabilen Kuadratik Programlama tabanlı bir metod kullanmışlar ve önerdikleri yöntemi deneysel olarak doğrulamışlardır.

Mastalli (2017) ve Mastalli ve ark. (2020), robot dinamiklerini ve arazi modellemeyi uygun bir formülasyonda birleştirerek, ayak ucu yörünge ve gövde hareket planlaması (coupled planner) için yeni bir optimizasyon metodu önermişlerdir. Önerilen yöntemde, yürüyüş sırasında eş zamanlı arazi haritalaması ile elde edilen arazi topolojisi dikkate alınarak; gövdenin hareketi, ayağın temas noktaları ve adım süresi birlikte optimize etmişlerdir. Adım evrelerinin sürelerini ve gövdenin duruşunu ayarlayarak, robot yürüyüşünün araziye uyumunu artırmışlardır. Online arazi verisi kullanan gerçek zamanlı tüm gövde kontrolcüsü ve parametrik olarak ifade edilmiş dinamik model sayesinde, robotun farklı arazi koşullarına kolayca uyum sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Önerilen yöntem, HyQ robotunun artan zorluk seviyelerindeki karmaşık zeminlerde yürüyüşü için gerçekleştirilen deneysel ve gerçekçi simülasyon çalışmaları ile doğrulanmıştır. Engeli araziler için yürüyüş zamanlamasını otomatik ayarlayan ilk yaklaşım olduğu belirtilmiştir. (Şekil 17a).

Fankhauser ve ark. (2018), dört ayaklı robotların engeli arazilerde hareketliliği için gürbüz bir hareket planlayıcısı sunmuşlardır. Online arazi haritalaması kullanılarak, ayak havada (uçuş evresinde) iken ayak ucunun herhangi bir yere çarpmadan güvenli bir basma noktası bulması ve robotun engelleri aşmasını sağlayacak yeni bir gövde duruş optimizasyonu amaçlamışlardır. Önerilen yöntemin doğruluğu, ANYmal robotu üzerinde test edilmiş ve robot eğim, basamak ve merdiven gibi engelleri otonom şekilde geçmeyi başarmıştır. Değişen arazi şartları ve bozucu giriş durumunda hareket planlayıcısı, hareketi her adımda tekrar planlamaktadır. Robotun ortam hakkında önceden bir bilgisi yoktur ve ortam haritalamasını, gövde duruş kontrolünü, yürüyüş planlamasını gerçek zamanlı gerçekleştirmektedir. Birbiriyle bağlantılı birkaç modülden oluşan yöntem, belirli bir duruş pozisyonu veya hız girişi ile başlar, mesafe sensörleri ve stereo kameralar ile sürekli ölçümler yaparak elde ettiği yükselti bilgileri ve arazi haritası sayesinde pozisyon tahmini yaparak bir sonraki duruş pozisyonu hesaplayabilmektedir. Gerçek zamanlı haritalama verileri ile, her ayağın adım atacağı yerin güvenilirliğini yansıtan bir uygunluk değeri hesaplanır. Hareket planlayıcının nihai çıkışı, ayak ucunun basacağı güvenli bir nokta ve bir sonraki adım hareketidir. Bu şekilde gövdenin mevcut pozisyonu ve hedef pozisyonu dikkate alınarak düzlemsel ayak temas noktaları üretilir. Bu ayak temas noktalarını gerçekleştirebilecek, kinematik ve denge kısıtlarına uygun, kararlı bir robot konfigürasyonunun bulunup bulunmadığını kontrol etmek için bir pozisyon denetleyicisi kullanılır. Önerilen hareket planlayıcısı, her bir bacak için her bir adımda tekrar hesaplanır. Robotun genel hareket kontrolü, tüm gövde kontrolcüsü ile gerçekleştirilir (Şekil 17b).



**Şekil 17.** a) HyQ ve b) ANYmal robotlarının haritalama yöntemi ile engeli zeminlerde hareketi  
*Figure 17. Movement of a) HyQ and b) ANYmal robots on uneven ground by mapping method*

Aceituno-Cabezas ve ark. (2018), HyQ robotunun yürüyüş hareketini ve ayak ucu kontak konumlarını eş zamanlı ve verimli bir şekilde hesaplamak amacıyla 'mixed-integer convex' isimli bir formülasyon sunmuşlardır. Düz bir zeminde belirli yürüyüş çeşitleri ile sınırlı kalmamışlar, konik yüzeyler için sürtünmeyi, yaklaşık eyleyici tork limitlerini ve yürüyüş planlamasını birlikte ele almışlardır. Yaklaşımlarını, konveks ve düz arazi varsayımlarına yol açabilecek düzeyde optimal olmayan, kararsız, farklı zorlu arazi şartlarında deneysel olarak doğrulamışlardır. Önerilen yöntemin hesaplama süresinde bir artışa sebep olmadan yürüyüş kararlılığını artırdığı, en karmaşık senaryolarda bile bir saniyenin altında yürüyüş planı hesaplayabildiğini ve bu sürenin benzer uygulamalara göre yaklaşık iki kat daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 18'de deneysel çalışmalarını gerçekleştirdikleri, zorlu arazi koşullarını temsil eden, farklı yükseltilerdeki rampa, basamak ve boşluklardan oluşan parkur görülmektedir.



**Şekil 18.** HyQ robotunun engeli parkurda (rampa, basamak ve boşluk) yürüyüşü  
*Figure 18. HyQ robot walking on a rugged parkur (ramp, step and space)*

Dört ayaklı robotların düz ve engeli yüzeylerde yürüyüş simülasyonu ile ilgili çalışmalarda; üç boyutlu katı model tasarımı, yürüyüş planlaması, kontrolcü geliştirilmesi ve gerçeğe yakın dinamik çözümler için çeşitli programlar kullanılmıştır.

Adak (2013) dört ayaklı yürüyüş için, Merkezi Örüntü Üretici tabanlı referans sentezi ve evrimsel algoritmalar ile ayarlanmasına yönelik bir çalışma sunmuştur. Çok serbestlik dereceli robot modelini Solidworks programında tasarlamış ve 3D animasyon yazılımları ile dinamik benzetimler gerçekleştirmiştir. Çalışmada, robotun dengesi ve enerji verimliliği incelenmiştir. Önerilen referans üretme yönteminin ve parametrelerinin ayarlanması için kullanılan algoritmaların yararlı olduğu bildirilmiştir (Şekil 19a).

Dat ve Phuc (2014), küçük boyutlu bir dört ayaklı robotun modellenmesi ve MSC ADAMS ortamında, düz bir zeminde yürüyüş simülasyonuna yönelik temel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bacak eklemlerinin açısal hareketlerine ve gövde ağırlık merkezinin yörüngesine ait sonuçlar sunmuşlardır. Ayak ucu ile yüzey etkileşiminden kaynaklı dinamiklerinin ihmal edilmesi sebebiyle, çalışmanın sınırlı kaldığını ancak gelecekte yapılabilecek kontrolcü tasarımı, farklı yüzeylerde hareket, enerji tasarrufu ile ilgili çalışmalar için teorik bir temel teşkil edeceğini bildirmişlerdir (Şekil 19b).

Xu ve ark. (2016), küçük boyutlardaki dört ayaklı bir robotun katı modellemesini ve MSC ADAMS ortamında tırs yürüyüş simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Basit modellerin aksine, gerçek canlılara daha yakın bir fiziksel model tasarlamışlardır. Bacaklarının adım hareket planlamasında trigonometrik fonksiyonlar kullanmışlar, çalışmanın geliştirilmeye açık olduğunu bildirmişlerdir (Şekil 19c).

Hui-shu ve Jian-Jun (2018), yüksek tork üreten elektrik motor tahrikli, biyonomik bir dört ayaklı robotun tasarımını ve yörünge kontrolünü sunmuşlardır. Koordinat dönüşümü yöntemi ile sistemin kinematik modelini oluşturmuşlardır. Adım hareketinin uçuş ve destek evreleri arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Tırs yürüyüş için, düşük kuvvet gerektiren ve enerji tüketimi açısından tasarruflu bir ayak yörünge planlaması geliştirmişlerdir. Sistemin sanal modeli MATLAB ortamına aktarılarak kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiş, robotun tırs yürüyüşü simüle edilmiş ve enerji tüketimi incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, önerilen yörünge planlamasının sürekli ve dengeli bir yürüyüş sağlayabildiğini belirtmişlerdir (Şekil 19d).

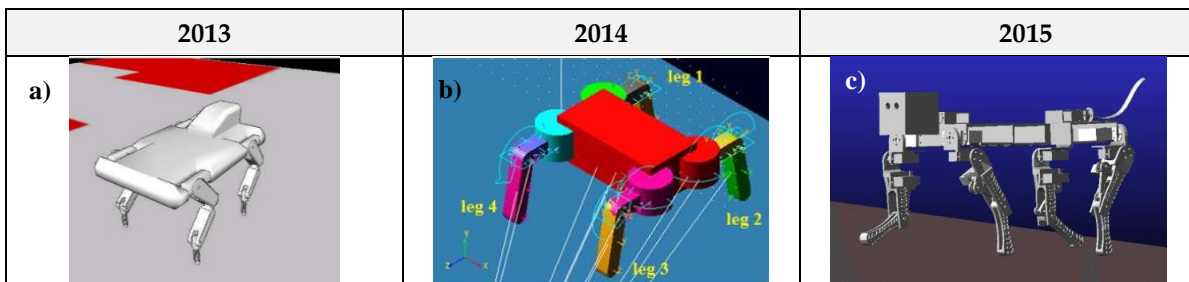
Zhang ve ark. (2019), iki ayaklı insansı bir robotun dinamiklerinin incelenmesi, dengeli yürüyüşü ve yapısal tasarımı üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Sistemin Lagrange dinamikleri de belirtilerek, CATIA yazılımında tasarlanan katı modeli üzerinden MSC ADAMS'da dinamik yürüyüş simülasyonu gerçekleştirilmiştir. (Şekil 19e).

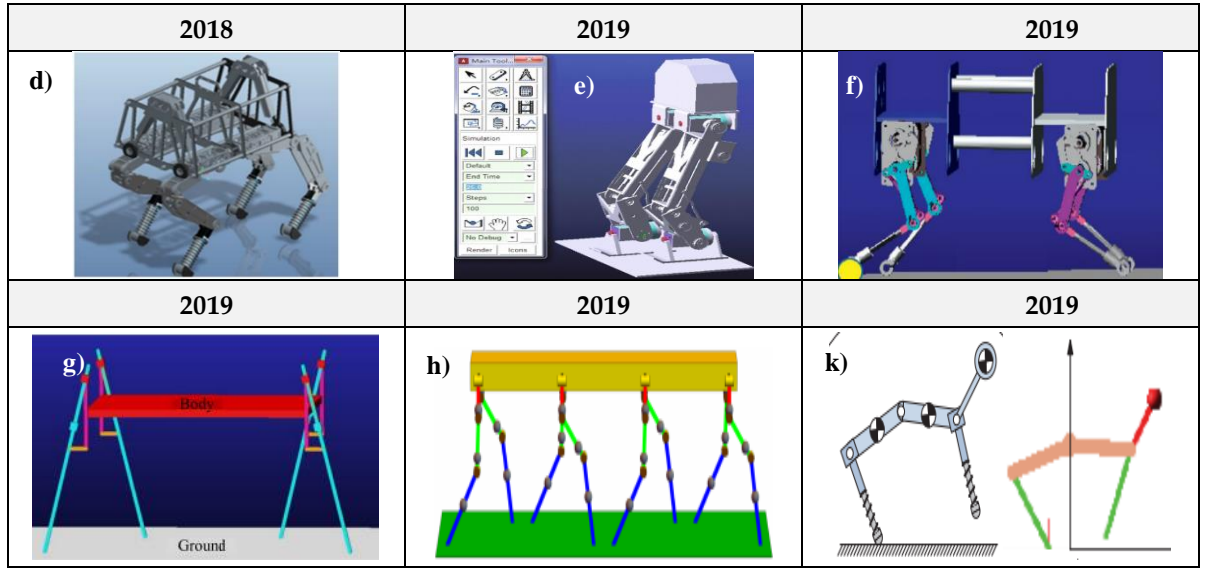
Chen ve ark. (2019b), dayanımı artırmaya yönelik antiparallelogram bir bacak yapısı geliştirmişler, CPG tabanlı yürüyüş planlaması ile robotun statik yürüyüşten tırs yürüyüşe geçişi için bir algoritma önermişlerdir. Simulink&ADAMS yazılımlarının eş zamanlı koşturulmasıyla yürüyüş simülasyonları gerçekleştirmişler ve deneysel olarak doğrulamışlardır. Önerilen bacak yapısının robotun yük taşıma kapasitesini artırdığını, yürüyüş çeşitleri arasında yumuşak geçişler yapabildiğini ve eş zamanlı simülasyon yönteminin başarılı sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir (Şekil 19f).

Wang ve ark. (2019), dört ayaklı robotlar için bacak boyunun uzayabildiği yeni bir bacak mekanizması (crank-rocker) önermişler ve ADAMS ortamında oluşturdukları sanal model üzerinden emekleme yürüyüşüne ait simülasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Robot gövdesine ve ayak ucu yörüngesine ait analiz sonuçlarını sunarak, önerilen bacak mekanizmasının sorunsuz çalıştığını belirtmişlerdir (Şekil 19g).

Grzelczyk ve Awrejcewicz (2019), sekiz bacaklı bir robotun kinematik/dinamik analizlerini ve Mathematica programında tasarladıkları sade bir sanal model üzerinden yürüyüş simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Yürüyüşü, adım genişliğinin ve yüksekliğinin değişken olduğu basit sinüs fonksiyonları ile planlamışlardır. (Şekil 19h).

Chen ve ark. (2019a), dört ayaklı robot yapısına biyolojik canlılara benzer şekilde bir kafa uzvu eklemiş, kafa hareketinin etkisi üzerine deneysel ve Simulink&ADAMS ile eş zamanlı simülasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Kafa uzvunun ve hareketinin, gövde pozisyonunun aktif kontrolünde ve eğim açısının düzenlenmesinde etkili olduğunu, robotun daha kararlı ve dengeli hareketi için önem arz ettiğini analiz sonuçları ile birlikte belirtmişlerdir (Şekil 19k).





Şekil 19. Düz zeminde yürüyüş ile ilgili simülasyon çalışmaları

Figure 19. The Simulation studies for walking on flat ground

Park ve Park (2012), engebeli arazilerde hareket için değişken bir empedans algoritması önermişler, dört ayaklı bir robot modelinin tırs yürüyüşüne yönelik Simulink ortamında kontrolcü tasarımı ve bir dinamik simülasyon programında simülasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Empedans parametrelerini ikinci dereceden sistem modeli tabanlı sezgisel yöntemler ile elde etmişlerdir (Şekil 20a).

Krishna ve ark. (2013), esnek (flexible) uzuvlara sahip dört bacaklı bir robot modeli tasarlayarak, engebeli zeminlerde yürüyüş üzerine benzetim çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Robotun simülasyonu için MSC ADAMS ve MATLAB/Simulink programlarını eş zamanlı koşturmuşlardır. Rijit uzuvlu modellere kıyasla esnek uzuvlu yapının, enerji tasarrufu yönünden daha verimli ve engebeli arazilerde yürüyüş için daha uyumlu olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 20b).

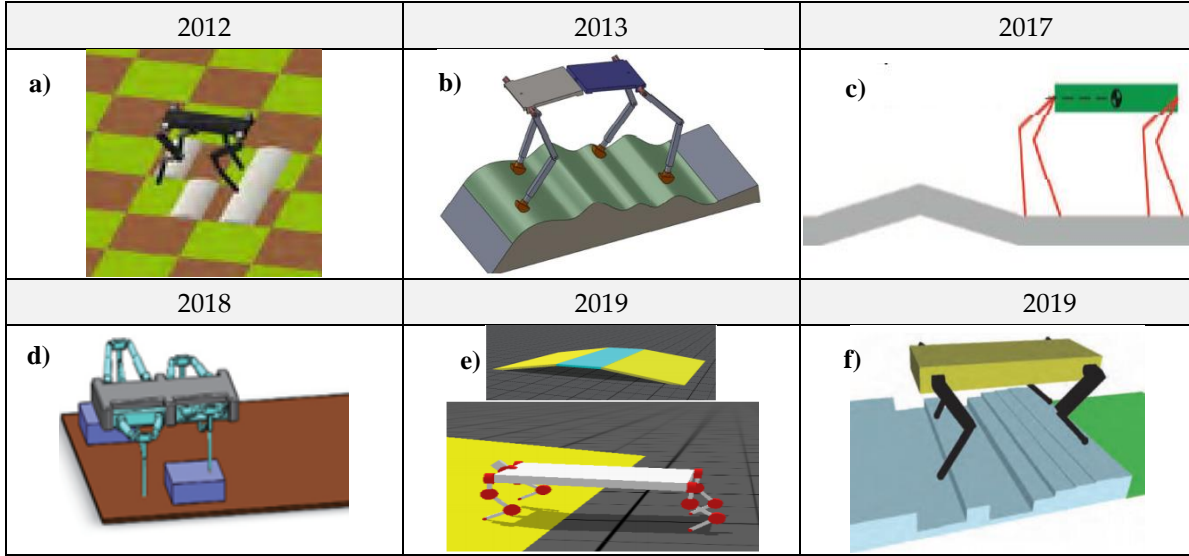
Wang ve ark. (2017), düzensiz zeminlerde yürüyüş için ZMP tekniği ve doğrusal ters sarkaç modeli tabanlı, gövde yörüngesinin sezgisel optimizasyonu da içeren bir yürüyüş planlaması önermişlerdir. Webot yazılımında oluşturulan sanal bir model üzerinden sistemi simüle etmişler, önerilen yürüyüş planlamasının başarılı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir (Şekil 20c).

Han ve ark. (2018), suyun altındaki karmaşık çalışma ortamlarında kullanılmaya yönelik geliştirdikleri, dört ayaklı bir amfibi (yüzer-gezer) robotun yürüyüş planlaması ve simülasyonuna ait bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmada, robotun ayakları paralel bir mekanizma olarak tasarlanmış ve sistemin ters kinematik çözümleri çıkartılmıştır. Yürüyüş boyunca robot ağırlık merkezinin, ayak destek noktalarının oluşturduğu poligon içinde kalmasına dayalı bir denge ve kararlılık kriteri belirlemişlerdir. Robotun sanal modeli bir CAD programında tasarlanmış, dinamik analizi ve yürüyüş benzetimi ADAMS programında gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları ile önerilen yürüyüş planının kararlı bir şekilde gerçekleştiğini göstermişlerdir (Şekil 20d).

Yu ve ark. (2018), eğimli zeminlerde yürüyüşte gövdenin pozisyon denetimine yönelik adaptif bir kontrolcü tasarımı ve uygulaması gerçekleştirmişlerdir. IMU sensöründen geri bildirim alan kontrolcü, gövdenin dengesini sürekli sağlamak amacıyla ayak ucu yörünge planlayıcısı ile etkileşimli olarak çalışmaktadır. Önerilen kontrolcü, Webots yazılımı ile tasarlanan dinamik model ve küçük boyutlu bir dört ayaklı robot prototipi üzerinden hem simülasyon hem de deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Sadece ayak ucu yörünge planlamasına dayalı denge kontrolçülere kıyasla, geliştirilen kontrolcünün eğimli yüzeylerde (en fazla 10 derece) gövdenin pozisyonunu ve dengesini ayarlayarak, daha yüksek hareket kabiliyetinde, daha istikrarlı ve stabil bir yürüyüş sunabildiğini belirtmişlerdir (Şekil 20e).

Li ve ark. (2019), robotun engebeli arazide hareketi boyunca ağırlık merkezinin yörünge kontrolü için hiyerarşik yapıda bir kontrol algoritması ve yürüyüş planlama tekniği önermişlerdir. Engelibeli içeren bir yüzey modellemişler ve sezgisel A\* algoritması kullanılarak ağırlık merkezine ait optimal bir yörünge

tasarlamışlardır. Bu yörüngeyi gerçekleştirilmesi için gerekli durum değişkenleri yürüyüş boyunca hesaplatılmaktadır. Dinamik robot modeli ve engebeli yüzey OpenRAVE simülasyon programında tasarlanmış, önerilen kontrol algoritmasının performansı robotun düzlemsel statik yürüyüşü için benzetim çalışmaları ile incelenmiştir (Şekil 20f).



Şekil 20. Engebeli parkurlarda yürüyüş ile ilgili simülasyon çalışmaları

Figure 20. Simulation studies related to walking on the rugged parkurs

Genel olarak engebeli arazilerde yürüyüş çalışmalarında; ayak tepki kuvvetlerine göre reaktif davranışlar üretmeye dayalı, küçük boyutlu arazi düzensizlikleri ile sınırlı ve yavaş çözümler geliştirilmiştir. Güncel yürüyüş planlaması yaklaşımlarında ise; ayak ucu yörünge kontrolü ile gövde denge kontrolünün birlikte ele alındığı, tüm gövdenin hareketlerini sentezlemeye odaklanılmaktadır. Bazı gelişmiş tüm gövde hareket sentezleme çalışmalarında, robot dinamiği ile arazinin özellikleri ve modellenmesi birlikte çok boyutlu bir problem olarak ele alınmıştır. Bu yaklaşımda, önceden tanımlanmış, öngörülebilir bir arazi modeli tasarlanmakta (planning) ya da robot bünyesindeki kameralar ile çevre modeli yürüyüş boyunca gerçek zamanlı haritalandırılmaktadır (mapping). Ancak deneysel uygulama maliyetleri, gelişmiş teknoloji gereksinimi nedeniyle halen oldukça yüksektir. Bu sebeple, genellikle gerçeğe yakın sanal dinamik robot modelleri üzerinden simülasyon çalışmaları yürütülmektedir.

## SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında, dört ayaklı robotlar üzerine, literatürdeki sınırlı derlemelerin aksine, temel ve güncel çalışmalar sunulmuştur. Tarih sırasına göre bacaklı robotların gelişimlerini ve teknik bilgileri içeren genel bir bakışın ardından; sistemin modellenmesi, kontrolü, eyleyici seçimi ve yürüyüşü ile ilgili deneysel ve benzetim çalışmalarının açıklandığı, geniş kapsamlı ve sistematik bir literatür derlenmiştir.

Dört ayaklı robotların, geleneksel tekerlekli/paletli araçların sağlayamayacağı avantajlara sahip olması, robotik alanındaki araştırmacıların temel motivasyon kaynağıdır. Hareketli bir gövdeye bağlı eklemli bacaklardan oluşan karmaşık yapısı ve kontrolündeki zorluklar nedeniyle dört ayaklı robotlar, günümüz robotiğinin önemli bir çalışma konusunu teşkil etmektedir.

Önemli bir kilometre taşı niteliğindeki *BigDog* (2005) ve ilk kapsamlı akademik çalışmaların sunulduğu *HyQ* (2008), *StarLETH* (2012) temelinde, son yıllarda dört bacaklı robot alanında önemli çalışmalar sürdürülmektedir. Büyük bütçeler ve ekip çalışması gerektirmesi sebebiyle, deneysel uygulama çalışmaları sınırlı kalmakta ve dolayısıyla dört ayaklı yürüyen robotların geliştirilmesi ve ticarileşmesi yavaş ilerlemektedir.

Geliştirilmeye açık, çok yönlü ve popüler bir konu olan bacaklı robotlar üzerine, Mete Kalyoncu ve ekibi Konya Teknik Üniversitesi bünyesinde çalışmalar sürdürmekte ve hidrolik tahrikli bir dört ayaklı robot geliştirmeyi hedeflemektedirler. Literatürdeki mevcut dört ayaklı robotların inşa süreçlerine benzer şekilde, öncelikle tek bir bacak yapısının geliştirilmesi ve kontrolü odaklı araştırmalar yürütmüşlerdir. Robotun yürüyüş performansını doğrudan etkileyen adım atma hareketinin iyileştirilmesine yönelik; modelleme, kinematik analiz, kontrol ve optimizasyon gibi başlıklarda birçok çalışma sunmuşlardır (Bakırcıoğlu ve ark., 2015; 2016b; 2016a; Sen ve ark., 2017a; Sen ve ark., 2017b; Sen ve Kalyoncu, 2018; Bakırcıoğlu ve ark., 2019; Sen ve ark., 2019; Sen ve Kalyoncu, 2019; Bakırcıoğlu, 2020; Şen, 2020).

Yakın gelecekte dört ayaklı robotların, kullanım amacına ve yerine göre, sistemin tümüne veya belirli bir kısmına yönelik; fiziksel boyutlandırma, yürüyüş planlaması, ortam haritalaması, enerji verimliliği, makine öğrenmesi, kontrolcü/boyut/süreç optimizasyonu vb. gibi birçok konuda, disiplinler arası başarılı çalışmaların yürütülmesi ve yüksek motivasyona sahip bu alanda önemli gelişmelerin kaydedilmesi kaçınılmazdır. Ülkemizde yürütülen çalışmalar henüz yeterli seviyede olmasa da, bu alandaki araştırmacıların ve desteklerin artmasıyla, sivil amaçlara ve stratejik önem arz eden savunma uygulamalarına yönelik, yerli dört ayaklı robotların geliştirilmesi ve yaygınlaşması kaçınılmaz olacaktır.

Bu derleme çalışmasının; ayaklı robotik alandaki Türkçe literatürün genişlemesine katkı sağlayabileceği, bu konu ile ilgili bazı kavram ve tanımlardaki eksiklikleri giderebileceği, gelecekteki çalışmalara rehberlik edebileceği, farklı yöntemlerin ve stratejilerin geliştirilmesine katkı sunabileceği öngörülmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aceituno-Cabezas, B., Dai, H., Mastalli, C., Focchi, M., Radulescu, A., Caldwell, D. G., Cappelletto, J., Grieco, J. C., Fernández-López, G. ve Semini, C., 2018, "Simultaneous contact, gait, and motion planning for robust multilegged locomotion via mixed-integer convex optimization", *IEEE Robotics and Automation Letters* Vol. 3, No. 3, pp. 2531-2538.
- Adak, Ö. K., 2013, "Quadruped locomotion reference synthesis with central pattern generators tuned by evolutionary algorithms", Ms. Thesis, *Sabancı University*.
- Albu-Schaffer, A. ve Hirzinger, G., "Cartesian impedance control techniques for torque controlled light-weight robots", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, DC, USA, 657-663, 2002.
- Alexander, R., 1990, "Three uses for springs in legged locomotion", *J International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 53-61.
- Bakırcıoğlu, V., Şen, M. A. ve Kalyoncu, M., "Dört Ayaklı Robotun bir Bacacağı için PID Kontrolcü Tasarımı ve Arı Algoritması Kullanarak Optimizasyonu", *Uluslararası katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu (UMTS 2015)*, İzmir, Türkiye, 661-665, 2015.
- Bakırcıoğlu, V., Sen, M. A. ve Kalyoncu, M., "Optimization of PID controller based on the bees algorithm for one leg of a quadruped robot", *MATEC Web of Conferences*, Barcelona, Spain, 1-4, 2016a.
- Bakırcıoğlu, V., Sen, M. A. ve Kalyoncu, M., "Adaptive neural-network based fuzzy logic (ANFIS) based trajectory controller design for one leg of a quadruped robot", *5th International Conference on Mechatronics and Control Engineering*, Venice, Italy, 82-85, 2016b.
- Bakırcıoğlu, V., Şen, M. A. ve Kalyoncu, M., "Yörünge Takibi İçin Kendinden Kazanç Ayarlamalı Bir PID Kontrolcü Tasarımı ve Uygulaması", *Ulusal 19. Makina Teorisi Sempozyumu (UMTS 2019)*, İskenderun, Türkiye, 38-45, 2019.
- Bakırcıoğlu, V., 2020, "Dört ayaklı hidrolik tahrikli bir robotun modellenmesi ve uygulaması", Doktora Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi*, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Bakırcıoğlu, V. ve Kalyoncu, M., 2020, "Bacaklı robotların yürüme stratejileri üzerine bir literatür taraması", *J Politeknik Dergisi*, Vol. 23, No. 4, pp. 961-986.
- Barasuol, V., Buchli, J., Semini, C., Frigerio, M., De Pieri, E. R. ve Caldwell, D. G., "A reactive controller framework for quadrupedal locomotion on challenging terrain", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, Germany, 2554-2561, 2013.

- Barasuol, V., Villarreal-Magaña, O. A., Sangiah, D., Frigerio, M., Baker, M., Morgan, R., Medrano-Cerda, G. A., Caldwell, D. G. ve Semini, C., 2018, "Highly-integrated hydraulic smart actuators and smart manifolds for high-bandwidth force control", *J Frontiers in Robotics AI*, Vol. 5, No. 51, pp. 1-15.
- Bellicoso, C. D., Gehring, C., Hwangbo, J., Fankhauser, P. ve Hutter, M., "Perception-less terrain adaptation through whole body control and hierarchical optimization", *IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, Cancun, Mexico, 558-564, 2016.
- Bloesch, M., 2017, "State estimation for legged robots-kinematics, inertial sensing, and computer vision", PhD Thesis, *ETH Zurich*, Switzerland.
- Boaventura, T., Focchi, M., Frigerio, M., Buchli, J., Semini, C., Medrano-Cerda, G. A. ve Caldwell, D. G., "On the role of load motion compensation in high-performance force control", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Algarve, Portugal, 4066-4071, 2012a.
- Boaventura, T., Semini, C., Buchli, J., Frigerio, M., Focchi, M. ve Caldwell, D. G., "Dynamic torque control of a hydraulic quadruped robot", *IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, Algarve, Portugal, 1889-1894, 2012b.
- Boaventura, T., 2013, "Hydraulic compliance control of the quadruped robot HyQ", PhD Thesis, *University of Genoa, Italy*.
- Boaventura, T., Medrano-Cerda, G. A., Semini, C., Buchli, J. ve Caldwell, D. G., "Stability and performance of the compliance controller of the quadruped robot HyQ", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Tokyo, Japan, 1458-1464, 2013.
- Boston Dynamics Company, 2020, "Boston Dynamics Company", Waltham, Massachusetts, ABD, <https://www.bostondynamics.com>:
- Buchli, J., Kalakrishnan, M., Mistry, M., Pastor, P. ve Schaal, S., "Compliant quadruped locomotion over rough terrain", *IEEE/RSJ international conference on Intelligent robots and systems (IROS)*, Missouri, USA, 814-820, 2009.
- Buehler, M., Playter, R. ve Raibert, M., "Robots step outside", *Int. Symp. Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM)*, Ilmenau, Germany, 1-4, 2005.
- Buehler, M., Grimminger, F., Campbell, D. ve Raibert, M., "Biologically inspired robots at boston dynamics", *J bionic Industrie Congress*, Berlin, Germany, 2006.
- Chen, D., Gong, C., Xing, F., Zhou, C., Qi, M. ve Wang, L., 2019a, "The effect of head movement on the bounding gait of a quadruped robot with an active spine", *J Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 9, pp. 1687814019876184.
- Chen, J., San, H. ve Wu, X., 2019b, "Gait regulation of a bionic quadruped robot with antiparallelogram leg based on CPG oscillator", *J Complexity*, Vol. 2019, No., pp. 1-11.
- Cunha, T. B., Semini, C., Guglielmino, E., De Negri, V. J., Yang, Y. ve Caldwell, D. G., "Gain scheduling control for the hydraulic actuation of the HyQ robot leg", *Proc. of COBEM*, Gramado, Brazil, 2009.
- Dat, T. T. K. ve Phuc, T. T., 2014, "A Study on Locomotions of Quadruped Robot", In: *AETA 2013: Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences*, Eds: Springer, 595-604.
- Estremera, J. ve Waldron, K. J., 2008, "Thrust control, stabilization and energetics of a quadruped running robot", *J The International Journal of Robotics Research*, Vol. 27, No. 10, pp. 1135-1151.
- Fankhauser, P., Hutter, M., Gehring, C., Bloesch, M., Hoepflinger, M. A. ve Siegwart, R., "Reinforcement learning of single legged locomotion", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, Japan, 188-193, 2013.
- Fankhauser, P., Bjelonic, M., Bellicoso, C. D., Miki, T. ve Hutter, M., "Robust rough-terrain locomotion with a quadrupedal robot", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Brisbane, Australia, 1-8, 2018.
- Fankhauser, P. ve Hutter, M., 2018, "ANYmal: A unique quadruped robot conquering harsh environments", *J Research Features*, Vol., No. 126, pp. 54-57.
- Focchi, M., 2013, "Strategies to improve the impedance control performance of a quadruped robot", PhD Thesis, *University of Genoa, Italy*.



- Focchi, M., Barasuol, V., Havoutis, I., Buchli, J., Semini, C. ve Caldwell, D. G., 2013, "Local reflex generation for obstacle negotiation in quadrupedal locomotion", In: *Nature-Inspired Mobile Robotics*, Eds: World Scientific, 443-450.
- Focchi, M., Medrano-Cerda, G. A., Boaventura, T., Frigerio, M., Semini, C., Buchli, J. ve Caldwell, D. G., 2016, "Robot impedance control and passivity analysis with inner torque and velocity feedback loops", *J Control Theory and Technology*, Vol. 14, No. 2, pp. 97-112.
- Focchi, M., Del Prete, A., Havoutis, I., Featherstone, R., Caldwell, D. G. ve Semini, C., 2017, "High-slope terrain locomotion for torque-controlled quadruped robots", *J Autonomous Robots*, Vol. 41, No. 1, pp. 259-272.
- Gao, F., Qi, C., Sun, Q., Chen, X. ve Tian, X., "A quadruped robot with parallel mechanism legs", *IEEE international conference on Robotics and automation (ICRA 2014)*, Hong Kong, China, 2566-2566, 2014.
- Gehring, C., Coros, S., Hutter, M., Bloesch, M., Hoepflinger, M. A. ve Siegwart, R., "Control of dynamic gaits for a quadrupedal robot", *IEEE international conference on Robotics and automation (ICRA 2013)*, Karlsruhe, Germany, 3287-3292, 2013.
- Gehring, C., 2017, "Planning and control for agile quadruped robots", PhD Thesis, *ETH Zurich*, Switzerland.
- Grandia, R., Farshidian, F., Dosovitskiy, A., Ranftl, R. ve Hutter, M., 2019, "Frequency-aware model predictive control", *J IEEE Robotics Automation Letters*, Vol. 4, No. 2, pp. 1517-1524.
- Grebenstein, M., Albu-Schäffer, A., Bahls, T., Chalon, M., Eiberger, O., Friedl, W., Gruber, R., Haddadin, S., Hagn, U. ve Haslinger, R., "The DLR hand arm system", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2011)*, Shanghai, China, 3175-3182, 2011.
- Grzelczyk, D. ve Awrejcewicz, J., 2019, "Modeling and control of an eight-legged walking robot driven by driven by different gait generators", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol. 19, No. 5, pp. 76-89.
- Han, S., Chen, Y., Ma, G., Zhang, J. ve Liu, R., 2018, "Gait planning and simulation analysis of a new amphibious quadruped robots", *J Journal of Robotics Mechatronics*, Vol. 30, No. 2, pp. 257-264.
- Heijnen, H., 2014, "Learning jumping maneuvers for a quadrupedal robot", MSc Thesis, *ETH Zurich*, Switzerland.
- Hoffmann, M. ve Simanek, J., 2017, "The merits of passive compliant joints in legged locomotion: Fast learning, superior energy efficiency and versatile sensing in a quadruped robot", *J Journal of Bionic Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-14.
- Hogan, N., 1985a, "Impedance control: An approach to manipulation: Part I—Theory", *ASME, Transactions, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 107, No. 1, pp. 1-7.
- Hogan, N., 1985b, "Impedance control: An approach to manipulation: Part II—Implementation", *ASME, Transactions, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 107, No. 1, pp. 8-16.
- Hui-shu, M. ve Jian-Jun, F., 2018, "Foot trajectory planning and optimization simulation of low foot-terrain impact by quadruped robot based on the trot gait", *J Journal of Electrical Electronic Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 26-30.
- Hutter, M., Gehring, C., Bloesch, M., Hoepflinger, M. A., Remy, C. D. ve Siegwart, R., 2012a, "StarlETH: A compliant quadrupedal robot for fast, efficient, and versatile locomotion", In: *Adaptive Mobile Robotics*, Eds: Azad, A. K. M., USA: World Scientific, 483-490.
- Hutter, M., Holenstein, C., Fenner, D., Remy, C. D., Hoepflinger, M. A. ve Siegwart, R., 2012b, "Improved efficiency in legged running using lightweight passive compliant feet", In: *Adaptive Mobile Robotics*, Eds: USA: World Scientific, 491-498.
- Hutter, M., 2013, "StarlETH & Co-design and control of legged robots with compliant actuation", PhD Thesis, *ETH Zurich*, Switzerland.
- Hutter, M., Remy, C. D., Hoepflinger, M. A. ve Siegwart, R., 2013, "Efficient and versatile locomotion with highly compliant legs", *J IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 18, No. 2, pp. 449-458.

- Hutter, M., Sommer, H., Gehring, C., Hoepflinger, M., Bloesch, M. ve Siegwart, R., 2014, "Quadrupedal locomotion using hierarchical operational space control", *J The International Journal of Robotics Research*, Vol. 33, No. 8, pp. 1047-1062.
- Hutter, M., Gehring, C., Jud, D., Lauber, A., Bellicoso, C. D., Tsounis, V., Hwangbo, J., Bodie, K., Fankhauser, P. ve Bloesch, M., "Anymal-a highly mobile and dynamic quadrupedal robot", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2016)*, Daejeon, South Korea, 38-44, 2016.
- Hyon, S., Abe, S. ve Emura, T., "Development of a biologically inspired biped robot KenkenII", *Japan-France Congress on Mechatronics & 4th Asia Europe Congress on Mechatronics*, Fukuoka, Japan, 404-409, 2003a.
- Hyon, S. H., Emura, T. ve Mita, T., 2003b, "Dynamics-based control of a one-legged hopping robot", *J Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems Control Engineering*, Vol. 217, No. 2, pp. 83-98.
- Kalakrishnan, M., Buchli, J., Pastor, P., Mistry, M. ve Schaal, S., 2011, "Learning, planning, and control for quadruped locomotion over challenging terrain", *J The International Journal of Robotics Research*, Vol. 30, No. 2, pp. 236-258.
- Kazerooni, H., Houpt, P. ve Sheridan, T., 1986, "Robust compliant motion for manipulators, Part II: Design method", *J IEEE Journal on Robotics Automation*, Vol. 2, No. 2, pp. 93-105.
- Khan, H., 2015, "MiniHyQ - development of a lightweight highly-dynamic hydraulic quadruped robot", PhD Thesis, *University of Genoa, Italy*.
- Khan, H., Kitano, S., Frigerio, M., Camurri, M., Barasuol, V., Featherstone, R., Caldwell, D. G. ve Semini, C., "Development of the lightweight hydraulic quadruped robot—MiniHyQ", *IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA 2015)*, Boston, MA USA, 1-6, 2015.
- Khatib, O., 1987, "A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation", *J IEEE Journal on Robotics Automation*, Vol. 3, No. 1, pp. 43-53.
- Kim, J. T., San Cho, J., Park, B.-Y., Park, S. ve Lee, Y., "Experimental investigation on the design of leg for a hydraulic actuated quadruped robot", *IEEE 44th International Symposium on Robotics (ISR 2013)*, Seoul, Korea, 1-5, 2013.
- Kimura, H., Akiyama, S. ve Sakurama, K., 1999, "Realization of dynamic walking and running of the quadruped using neural oscillator", *J Autonomous Robots*, Vol. 7, No. 3, pp. 247-258.
- Kitano, S., Hirose, S., Horigome, A. ve Endo, G., 2016, "TITAN-XIII: Sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking", *J Robomech Journal*, Vol. 3, No. 8, pp. 1-16.
- Koivumäki, J., Mattila, J., Semini, C. ve Caldwell, D. G., "Stability-guaranteed nonlinear model-based control of hydraulically actuated lightweight structures", *ASME/BATH Symp. on Fluid Power and Motion Control (FPMC 2017)*, Florida, USA, 2017.
- Krishna, P. M., Kumar, R. P. ve Srivastava, S., 2013, Dynamic gaits and control in flexible body quadruped robot. 1st International Conference on Machines and Mechanisms (iNaCoMM2013). IIT Roorkee, India: 706-713.
- Krupp, B. T. ve Pratt, J. E., "A power autonomous monopodal robot", *The International Society for Optical Engineering (SPIE 2006)*, Washington DC, USA, 1-12, 2006.
- Lei, J., Zhu, J., Xie, P. ve Tokhi, M. O., 2017, "Joint variable stiffness of musculoskeletal leg mechanism for quadruped robot", *J Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 1-11.
- Li, X., Gao, H., Li, J., Wang, Y. ve Guo, Y., 2019, "Hierarchically planning static gait for quadruped robot walking on rough terrain", *J Journal of Robotics*, Vol. 2019, No., pp. 1-12.
- Liston, R. A. ve Mosher, R. S., 1968, A versatile walking truck. In Proceedings of the Transportation Engineering Conference. Institution of Civil Engineers, London, England.
- Mastalli, C., 2017, "Planning and Execution of Dynamic Whole-Body Locomotion on Challenging Terrain", PhD Thesis, *University of Genoa, Italy*.

- Mastalli, C., Havoutis, I., Focchi, M., Caldwell, D. ve Semini, C., 2020, "Motion planning for quadrupedal locomotion: coupled planning, terrain mapping and whole-body control", *arXiv preprint arXiv:2003.05481*, Vol., No., pp. 1-17.
- McGeer, T., 1990, "Passive dynamic walking", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 62-82.
- Michele, F., 2013, "Strategies to improve the impedance control performance of a quadruped robot", PhD Thesis, *University of Genoa*, Italy.
- Mistry, M., Buchli, J. ve Schaal, S., "Inverse dynamics control of floating base systems using orthogonal decomposition", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010)*, Anchorage, Alaska,, 3406-3412, 2010.
- Niquille, S. C., 2019, "Regarding the pain of spotmini: Or what a robot's struggle to learn reveals about the built environment", *J Architectural Design*, Vol. 89, No. 1, pp. 84-91.
- Orsolino, R., 2019, "Actuation-Aware Simplified Dynamic Models for Robotic Legged Locomotion", PhD Thesis, *University of Genoa*, Italy.
- Pan, X., Zhang, T., Ichter, B., Faust, A., Tan, J. ve Ha, S., 2020, "Zero-shot imitation learning from demonstrations for legged robot visual navigation", *J arXiv preprint arXiv:12971v2*, Vol., No., pp. 1-7.
- Park, H.-W., Chuah, M. Y. ve Kim, S., "Quadruped bounding control with variable duty cycle via vertical impulse scaling", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, Illinois, USA, 3245-3252, 2014.
- Park, J. ve Park, J. H., "Impedance control of quadruped robot and its impedance characteristic modulation for trotting on irregular terrain", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012)*, Algarve, Portugal, 175-180, 2012.
- Playter, R., Buehler, M. ve Raibert, M., "Bigdog", *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)* 6230, Florida, United States, 2006.
- Poulakakis, I., Smith, J. A. ve Buehler, M., 2005, "Modeling and experiments of untethered quadrupedal running with a bounding gait: The Scout II robot", *J The International Journal of Robotics Research*, Vol. 24, No. 4, pp. 239-256.
- Pratt, G. A. ve Williamson, M. M., "Series elastic actuators", *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 1995)*, Pittsburgh, PA, USA, 399-406, 1995.
- Pratt, G. A., 2002, "Low impedance walking robots", *J Integrative Comparative Biology*, Vol. 42, No. 1, pp. 174-181.
- Pratt, J., Chew, C.-M., Torres, A., Dilworth, P. ve Pratt, G., 2001, "Virtual model control: An intuitive approach for bipedal locomotion", *J The International Journal of Robotics Research*, Vol. 20, No. 2, pp. 129-143.
- Raibert, M., 1986, "Legged robots that balance", *The MIT press*, pp. 223.
- Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G. ve Playter, R., 2008, "BigDog, the rough-terrain quadruped robot", *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 41, No. 2, pp. 10822-10825.
- Rebula, J. R., Neuhaus, P. D., Bonnlander, B. V., Johnson, M. J. ve Pratt, J. E., "A controller for the littledog quadruped walking on rough terrain", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007)*, Roma, Italy, 1467-1473, 2007.
- Remy, C. D., Baur, O., Latta, M., Lauber, A., Hutter, M., Hoepflinger, M. A., Pradalier, C. ve Siegwart, R., 2011, "Walking and crawling with ALoF- A robot for autonomous locomotion on four legs", *The International Journal Of Robotics Research And Application*, Vol. 47, No. 1, pp. 501-508.
- Rong, X., Li, Y., Ruan, J. ve Li, B., 2012, "Design and simulation for a hydraulic actuated quadruped robot", *J Journal of mechanical science technology*, Vol. 26, No. 4, pp. 1171-1177.
- Schaal, S., 2009, "The SL simulation and real-time control software package", *J University of Southern California*, Technical Report.

- Semini, C., Tsagarakis, N. G., Vanderborght, B., Yang, Y. ve Caldwell, D. G., "HyQ-Hydraulically actuated quadruped robot: Hopping leg prototype", *2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob 2008)*, Scottsdale, AZ, USA, 593-599, 2008.
- Semini, C., 2010, "HyQ-design and development of a hydraulically actuated quadruped robot", PhD Thesis, *University of Genoa, Italy*.
- Semini, C., Tsagarakis, N. G., Guglielmino, E., Focchi, M., Cannella, F. ve Caldwell, D. G., 2011, "Design of HyQ-A hydraulically and electrically actuated quadruped robot", *J Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems Control Engineering*, Vol. 225, No. 6, pp. 831-849.
- Semini, C., Barasuol, V., Boaventura, T., Frigerio, M., Focchi, M., Caldwell, D. G. ve Buchli, J., 2015a, "Towards versatile legged robots through active impedance control", *J The International Journal of Robotics Research*, Vol. 34, No. 7, pp. 1003-1020.
- Semini, C., Goldsmith, J., Manfredi, D., Calignano, F., Ambrosio, E. P., Pakkanen, J. ve Caldwell, D. G., "Additive manufacturing for agile legged robots with hydraulic actuation", *17th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2015)*, Istanbul, Turkey, 123-129, 2015b.
- Semini, C., Goldsmith, J., Rehman, B. U., Frigerio, M., Barasuol, V., Focchi, M. ve Caldwell, D. G., "Design overview of the hydraulic quadruped robots HyQ2MAX and HyQ2CENTAUR", *15th Scandinavian International Conference on Fluid Power*, Tampere, Finland, 20-22, 2015c.
- Semini, C., Barasuol, V., Goldsmith, J., Frigerio, M., Focchi, M., Gao, Y. ve Caldwell, D. G., 2017, "Design of the hydraulically actuated, torque-controlled quadruped robot HyQ2max", *J IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 22, No. 2, pp. 635-646.
- Semini, C., Barasuol V., Focchi, M., Boelens, C., Emara, M., Casella, S., Villarreal, O., Orsolino, R., Fink, G., Fahmi, S., Medrano-Cerda, G., Caldwell, D. G., Sangiah, D., Lesniewski, J., Fulton, K., Donadon, M. ve Baker, M., 2019, "Brief Introduction to the Quadruped Robot HyQReal", *Istituto di Robotica e Macchine Intelligenti 3D*.
- Sen, M. A., Bakircioglu, V. ve Kalyoncu, M., 2017a, "Inverse kinematic analysis of a quadruped robot", *J International journal of scientific technology research*, Vol. 6, No. 09, pp. 2277-8616.
- Sen, M. A., Bakircioglu, V. ve Kalyoncu, M., 2017b, Design and simulation impedance controller for trajectory control with obstacle of quadruped robot's leg. *International Advanced Researches & Engineering (IAREC 2017)*. Osmaniye, Turkey: 558-568.
- Sen, M. A. ve Kalyoncu, M., 2018, "Optimal tuning of PID controller using grey wolf optimizer algorithm for quadruped robot", *J Balkan Journal of Electrical Computer Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 29-35.
- Sen, M. A., Bakircioglu, V. ve Kalyoncu, M., 2019, "Three degree of freedom leg design for quadruped robots and fractional order PID (PIAD $\mu$ ) based control", *Konya Journal of Engineering Sciences*, Vol. 8, No. 2, pp. 237-247.
- Sen, M. A. ve Kalyoncu, M., 2019, "Grey wolf optimizer based tuning of a hybrid LQR-PID controller for foot trajectory control of a quadruped robot", *J Gazi University Journal of Science*, Vol. 32, No. 2, pp. 674-684.
- Seok, S., Wang, A., Chuah, M. Y., Otten, D., Lang, J. ve Kim, S., "Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT Cheetah robot", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2013)*, Karlsruhe, Germany, 3307-3312, 2013.
- Silva, M. F. ve Tenreiro Machado, J. A., 2007, "A historical perspective of legged robots", *J Journal of Vibration Control*, Vol. 13, No. 9-10, pp. 1447-1486.
- Şen, M. A., 2020, "Dört Ayaklı Bir Robotun Engebeli Yüzeylerde Yürüme Analizi ve Kontrolü", Doktora Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya*.
- Tsagarakis, N. G., Sardellitti, I. ve Caldwell, D. G., "A new variable stiffness actuator (CompAct-VSA): design and modelling", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2011)*, San Francisco, CA, USA, 378-383, 2011.
- Ubellacker, W. L., 2016, "Real-time quadruped gait controller for rough terrain locomotion", MSc Thesis, *Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA*.

- Ugurlu, B., Havoutis, I., Semini, C. ve Caldwell, D. G., "Dynamic trot-walking with the hydraulic quadruped robot—HyQ: Analytical trajectory generation and active compliance control", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2013)*, Tokyo, Japan 6044-6051, 2013.
- Ur Rehman, B., Focchi, M., Frigerio, M., Goldsmith, J., Caldwell, D. G. ve Semini, C., "Design of a hydraulically actuated arm for a quadruped robot", *18th International Conference on CLAWAR 2015*, Zhejiang Province, China, 283-290, 2016.
- Villarreal, O., Barasuol, V., Wensing, P. ve Semini, C., 2020, "MPC-based Controller with Terrain Insight for Dynamic Legged Locomotion", *J arXiv preprint arXiv:13842v2*, pp. 1-8.
- Wagner, L., Fankhauser, P., Bloesch, M. ve Hutter, M., 2017, "Foot contact estimation for legged robots in rough terrain", In: *Advances in Cooperative Robotics*, Eds: World Scientific, 395-403.
- Wang, Y., Wei, Q. ve Ma, T., "Crawling gait planning and simulation analysis of closed-chain walking leg robot", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Kazimierz Dolny, Poland, 012072, 2019.
- Wang, Z., Sun, C., Deng, G. ve Zhang, A., "Locomotion planning for quadruped robot over rough terrain", *Chinese Automation Congress (CAC 2017)*, Jinan, China, 3170-3173, 2017.
- Whitney, D. E., 1985, Historical perspective and state of the art in robot force control. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 1985)*. Missouri, USA. 2: 262-268.
- Winkler, A., Havoutis, I., Bazeille, S., Ortiz, J., Focchi, M., Dillmann, R., Caldwell, D. ve Semini, C., "Path planning with force-based foothold adaptation and virtual model control for torque controlled quadruped robots", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014)*, Hong Kong, China, 6476-6482, 2014.
- Winkler, A. W., Mastalli, C., Havoutis, I., Focchi, M., Caldwell, D. G. ve Semini, C., "Planning and execution of dynamic whole-body locomotion for a hydraulic quadruped on challenging terrain", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2015)*, Seattle, WA, USA, 5148-5154, 2015.
- Winter, D. A., 1995, "Human balance and posture control during standing and walking", *J Gait posture*, Vol. 3, No. 4, pp. 193-214.
- Xu, P., Song, R., Mao, S., Rong, X. ve Li, Y., "Quadruped robot mechanism design and motion simulation based on SolidWorks and Adams", *Proceedings of the 18th International Conference on CLAWAR 2015*, Zhejiang Province, China, 454-460, 2016.
- Yamazaki, K. S., 1999, "The design and control of Scout I, a simple quadruped robot", PhD Thesis, *McGill University*, Canada, UK.
- Yu, C., Zhou, L., Qian, H. ve Xu, Y., "Posture correction of quadruped robot for adaptive slope walking", *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2018)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 1220-1225, 2018.
- Zhang, B., Shao, C., Li, Y., Tan, H. ve Jiang, D. J. J. o. S. J. U., 2019, "Dynamic Simulation Analysis of Humanoid Robot Walking System Based on ADAMS", Vol. 24, No. 1, pp. 58-63.
- Zhang, Z. G., Kimura, H. ve Takase, K., 2006, "Adaptive running of a quadruped robot using forced vibration and synchronization", *J Journal of Vibration Control*, Vol. 12, No. 12, pp. 1361-1383.