



ACADEMIC  
PLATFORM



ISSN: 2147-4575

# APJES

## Journal of Engineering and Science

Volume: 9

Issue : 2

Year : 2021

## *Academic Platform Journal of Engineering and Science*

### **Editor in Chief (Owned By Academic Perspective)**

Prof. Dr. Mehmet SARIBIYIK, Sakarya University of Applied Sciences, Turkey  
mehmets@subu.edu.tr

### **Editors**

Prof. Dr. Barış Tamer TONGUÇ, Sakarya University, Turkey  
btonguc@sakarya.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Özer UYGUN, Sakarya University, Turkey  
ouygun@sakarya.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Mustafa CAN, Sakarya University of Applied Sciences, Turkey  
mustafacan@subu.edu.tr

### **Members of Advisory Board**

Prof. Dr. Abdullah Çavuşoğlu, Council of Higher Education, Turkey

Prof. Dr. Ahmet TÜRK, Celal Bayar University, Turkey

Prof. Dr. Erdal ÇELİK, Dokuz Eylül University, Turkey

Prof. Dr. Erol ARCAKLIOĞLU, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Turkey

Prof. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Turkey

Prof. Dr. Hüseyin AKILLI, Çukurova University, Turkey

Prof. Dr. Kutsi ERDURAN, Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN, University of West of England, England

### **Language Editor**

Asst. Prof. Dr. Hakan ASLAN, Sakarya University, Turkey  
haslan@sakarya.edu.tr

### **Support**

Lec. Gökhan ATALI, Sakarya University, Turkey  
gatali@subu.edu.tr



ISSN: 2147-4575

### **Contact**



### **Academic Platform**

info@apjes.com

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/apjes>

## *Academic Platform Journal of Engineering and Science*

### **Field Editors**

Dr. Ali SARIBIYIK  
alisaribiyik@subu.edu.tr

Dr. Beytullah EREN  
beren@sakarya.edu.tr

Dr. Fatih ÇALIŞKAN  
fcaliskan@subu.edu.tr

Dr. Halil ARSLAN  
harslan@subu.edu.tr

Dr. Harun GÜL  
harungul@subu.edu.tr

Dr. Mehmet UYSAL  
mehmetu@sakarya.edu.tr

Dr. Metin YAMAN  
myaman@sakarya.edu.tr

Dr. Mustafa CAN  
mustafacan@subu.edu.tr

Dr. Mustafa Zahid YILDIZ  
mustafayildiz@subu.edu.tr

Dr. Sinan Serdar ÖZKAN  
sozkan@subu.edu.tr

Dr. Süleyman KALELİ  
skaleli@subu.edu.tr

Dr. Taki DEMİR  
tdemir@sakarya.edu.tr

Dr. Zafer ALBAYRAK  
zalbayrak@karabuk.edu.tr

### **Guest Editors**

Dr. Gürcan YILDIRIM  
yildirim\_g@ibu.edu.tr

Yılmaz UYAROĞLU  
uyaroglu@sakarya.edu.tr

Hasan HACIFAZLIOĞLU  
hasanh@istanbul.edu.tr

### **Editorial Assistants**

Res. Assist. Ahmet Hamdi SERDAR  
ahmetserdar@subu.edu.tr

Res. Assist. M. Asım KESERCİOĞLU  
mkesercioglu@subu.edu.tr

Res. Assist. Ayşe Nur AY  
ay@subu.edu.tr

Res. Assist. Abdullah Feyzi KELEŞ  
abdullahfeyzi@subu.edu.tr

Res. Assist. Mehmet Fatih YAŞAR  
yasarm@subu.edu.tr



ISSN: 2147-4575

### **Contact**

#### **Academic Platform**



info@apjes.com

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/apjes>

### Contents

<b>Determination of the Factors Levels Affecting Performance, NO and Soot Emissions in a Diesel Engine Operating Biodiesel with Taguchi Method</b> (Research Paper)	229 – 237
<b>On the Energy Absorption Capability of Metallic Tubes Subjected to the Radial Wall Crushing Process</b> (Research Paper)	238 - 242
<b>ECU Oriented Simplified Diesel Engine Model</b> (Research Paper)	243 - 247
<b>Investigation of the Effects of Shear Wall Type and Shear Wall Member on Performance in Plane Steel Frame with Monotonic Loading</b> (Research Paper)	248 – 256
<b>A Methodology for Explicit Representation of the Stochastic Demand due to Electric Vehicles in Generation Expansion Planning Problems</b> (Research Paper)	257 – 263
<b>Electrical and Thermal Performance Analysis of a Linear Fresnel Reflector-Photovoltaic/Thermal System</b> (Research Paper)	264 – 273
<b>Immobilization and Characterization of Trypsin on TiO<sub>2</sub> Nanoparticles Activated with Crosslinkers</b> (Research Paper)	274 – 283
<b>Microstructural Evaluation and Influence of Welding Parameters on Electrode Plunge Depth in Resistance Spot Welded Dissimilar DP800HF/1200M Steel Joints</b> (Research Paper)	284 – 291
<b>Nickel (Ni<sup>+2</sup>) Adsorption on Borax Production Waste from Industrial Wastewater</b> (Research Paper)	292 – 295
<b>Investigation of Nuclear Structures of Ne Isotopes by Nuclear Shell Model</b> (Research Paper)	296 – 301
<b>Improving of Lightweight Concrete Properties Produced with Pumice Aggregate of Nevşehir Region with Fly Ash Substitution</b> (Research Paper)	302 – 308
<b>The Effect of Aerophine 3418A Collector Dosage on Niğde (Ulukışla-Madenköy) Complex Pb-Zn Sulphide Ore Flotation</b> (Research Paper)	309 - 313
<b>Control of Lorenz Chaotic System with Linear Feedback, High Gain, High Frequency and Model Predictive Control</b> (Research Paper)	314 - 323
<b>The Effect of Mechanical Activation and Roasting Temperature on the Reduction of Zinc Concentrates</b> (Research Paper)	324 - 331

## Contents

<b>Developing Turbulent Flow in Pipes and Analysis of Entrance Region</b> (Research Paper)	332 – 353
<b>A Mechanical Analysis of Biceps Brachii with Hill Type Muscle Model: a Simulation of Forearm Curl</b> (Research Paper)	354 – 359
<b>Replaceable Acoustic Design in Multi-Purpose Halls: Cinema Anadolu Multi-Purpose Hall Example</b> (Research Paper)	360 - 370
<b>Trend Analysis of Precipitation Data: Case Study of Kızılırmak Basin</b> (Research Paper)	371 - 377
<b>Scheduling Optimization in Automotive Supplier Industry under Sequence Dependent Constraints</b> (Research Paper)	378 - 387

## İçindekiler


<b>Biyodizel Karışımları ile Çalışan Bir Dizel Motorunda Performans, NO ve İş Emisyonlarını Etkileyen Faktör Seviyelerinin Taguchi Yöntemi ile Belirlenmesi</b> (Araştırma Makalesi)	229 – 237
<b>On the Energy Absorption Capability of Metallic Tubes Subjected to the Radial Wall Crushing Process</b> (Araştırma Makalesi)	238 - 242
<b>ECU Oriented Simplified Diesel Engine Model</b> (Araştırma Makalesi)	243 - 247
<b>Düzlem Çelik Çerçeve Perde Tipinin ve Perde Elemanının Performansa Olan Etkilerinin Monotonik Yüklemeyle İncelenmesi</b> (Araştırma Makalesi)	248 – 256
<b>A Methodology for Explicit Representation of the Stochastic Demand due to Electric Vehicles in Generation Expansion Planning Problems</b> (Araştırma Makalesi)	257 – 263
<b>Electrical and Thermal Performance Analysis of a Linear Fresnel Reflector-Photovoltaic/Thermal System</b> (Araştırma Makalesi)	264 – 273
<b>Immobilization and Characterization of Trypsin on TiO<sub>2</sub> Nanoparticles Activated with Crosslinkers</b> (Araştırma Makalesi)	274 – 283
<b>Microstructural Evaluation and Influence of Welding Parameters on Electrode Plunge Depth in Resistance Spot Welded Dissimilar DP800HF/1200M Steel Joints</b> (Araştırma Makalesi)	284 – 291
<b>Nickel (Ni<sup>+2</sup>) Adsorption on Borax Production Waste from Industrial Wastewater</b> (Araştırma Makalesi)	292 – 295
<b>Nükleer Kabuk Modeli ile Ne İzotoplarının Nükleer Yapısının İncelenmesi</b> (Araştırma Makalesi)	296 – 301
<b>Improving of Lightweight Concrete Properties Produced with Pumice Aggregate of Nevşehir Region with Fly Ash Substitution</b> (Araştırma Makalesi)	302 – 308
<b>The Effect of Aerophine 3418A Collector Dosage on Niğde (Ulukışla-Madenköy) Complex Pb-Zn Sulphide Ore Flotation</b> (Research Paper)	309 - 313
<b>Lorenz Kaotik Sisteminin Doğrusal Geri Beslemeli, Yüksek Kazanç, Yüksek Frekans ve Model Öngörülü Kontrol ile Denetlenmesi</b> (Araştırma Makalesi)	314 - 323
<b>Mekanik Aktivasyon Yapılmış Çinko Konsantrlerinde Kavrma Sıcaklığının Redüksiyonuna Etkisinin Termal Analiz Yöntemleri ile İncelenmesi</b> (Araştırma Makalesi)	324 - 331

## İçindekiler

<b>Developing Turbulent Flow in Pipes and Analysis of Entrance Region</b> (Araştırma Makalesi)	332 – 353
<b>Hill Tipi Kas Modeli ile Pazu Kasının Mekanik Analizi: Ön Kol Bükme Hareketinin Benzetimi</b> (Araştırma Makalesi)	354 – 359
<b>Çok Amaçlı Salonlarda Değiştirilebilir Akustik Tasarım: Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu Örneği</b> (Araştırma Makalesi)	360 - 370
<b>Yağış Verilerinin Trend Analizi: Kızılrınmak Havzası Örneği</b> (Araştırma Makalesi)	371 - 377
<b>Scheduling Optimization in Automotive Supplier Industry under Sequence Dependent Constraints</b> (Research Paper)	378 - 387

## Biyodizel Karışımları ile Çalışan Bir Dizel Motorunda Performans, NO ve İS Emisyonlarını Etkileyen Faktör Seviyelerinin Taguchi Yöntemi ile Belirlenmesi

\*<sup>1</sup>Aslan Çoban

<sup>1</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Serdivan, Sakarya, acoban@subu.edu.tr, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 26.10.2020

Kabul Tarihi: 14.03.2021

### Öz

Dizel motorlarının çalışma prensibi gereği buji ateşlemeli motorlara göre sahip oldukları üstünlüklerinin yanında, NO ve is emisyonları açısından büyük dezavantajları vardır. Yakıt sarfiyatlarının düşük olması, birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmasına neden olmaktadır. Yürürlüğe giren yasal düzenlemelerin sağlanması için birçok ülkede dizel yakıtlarına belirli oranlarda biyodizel karıştırılma zorunluluğu vardır. Biyodizel, dizel motorlarında yaygın olarak kullanılan yenilenebilir, alternatif yakıtların başında gelmektedir. Bitkisel ve hayvansal yağlardan elde edilen biyodizel, oksijen içeriğine sahip düşük emisyon profilili bir yakıttır. Bu çalışmada, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda, farklı oranlarda biyodizel karışımlarının optimum oranları motor performans parametreleri, NO ve is emisyonları açısından en uygun çalışma şartları Taguchi yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen faktör ve seviyelerine göre deney tasarımı yapılmıştır. L9 ortogonal dizin seçilmiştir. Çalışma sonucunda, motor performans parametreleri, NO ve is emisyonları açısından en uygun faktör seviyeleri Taguchi yöntemi ile belirlenmiştir. Faktörlerin etki dereceleri ANOVA analizi ile test edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Taguchi metodu, Biyodizel karışımları, NO emisyonu, İS emisyonu

## Determination of the Factors Levels Affecting Performance, NO and Soot Emissions in a Diesel Engine Operating Biodiesel with Taguchi Method

\*<sup>1</sup>Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Serdivan, Sakarya acoban@subu.edu.tr

### Abstract

Although the diesel engines have superior features according to the spark ignited engines, they have disadvantages in terms of NO and black carbon emissions. Nevertheless, they are used in many applications because of their low fuel consumption features. Determined rates of biodiesel fuel mixture to the diesel fuels is forced in many countries due to the effectuated legal regulations. Biodiesel is one of the commonly used renewable and alternative fuels in diesel engines. Biodiesels are obtained from vegetable and animal oils having low emission profile including oxygen. In this study, the optimum operating conditions in terms of engine performance parameters, NO and soot emissions of biodiesel mixtures in different proportions in a direct injection diesel engine are determined through optimization using the Taguchi method. Experimental design is made according to the determined factors and levels. L9 orthogonal array is selected. As a result of the study, the most suitable factor levels in terms of engine performance parameters, NO and soot emissions are stated by Taguchi method. The factors' degrees of influence are tested by ANOVA analysis.

**Keywords:** Taguchi method, Biodiesel mixture, NO emissions, Smoke emissions



## 1. GİRİŞ

Dünya üzerinde birincil enerji kaynaklarının başında fosil yakıtlar gelmektedir. Ancak yapılan araştırmalarda mevcut kaynakların her geçen gün azaldığı vurgulanmaktadır [1]. Ayrıca, fosil yakıtların kullanımı sonucunda hava kirliliği ve küresel ısınmaya neden olan zararlı emisyonlar yüksek oranda atmosfere salınmaktadır. Bundan dolayı hem fosil yakıtlara bağımlılığı azaltacak hem de emisyon miktarlarını azaltacak, yenilenebilir, alternatif yakıtların kullanımı her geçen gün artmaktadır [2]. Dizel motorlarında kullanılan alternatif yakıtların başında biyodizel gelmektedir [3]. Biyodizel motorin ile yanma sonu emisyonları açısından karşılaştırıldığında; daha düşük karbon monoksit, partikül emisyonu ve yanmamış hidrokarbonlara sahiptir [4-6]. Biyodizelin dizel yakıtına göre oksijen içeriğinin fazla olması daha iyi yanma karakteristikleri gösterdiğinden dolayı daha düşük is emisyonlarını dışarıya salmaktadır. Biyodizelin bu avantajları nedeniyle birçok araştırmacı tarafından farklı bitkisel veya hayvansal yağlardan elde edilen biyodizel, motorlarda araştırma konusu olmuştur [7,8].

Literatüre bakıldığında; bitkisel veya hayvansal yağlardan elde edilmiş biyodizel-dizel karışımları, dizel motorlarında yakıt olarak kullanılması durumunda, motor torkunun ve efektif gücün arttığı görülmektedir. Bazı araştırmacılar %20 biyodizel karışımı kullanımında motor torkunda meydana gelen artmanın daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir [9-13]. Ayhan ve ark. [14] Ayçiçek yağından transesterifikasyon yöntemiyle elde ettikleri metil ester-dizel karışımlarının motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde üç karışım yakıtı (B10, B20 ve B50) kullanmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda B10ve B20 yakıtlarında güç ve torkta artmalar olurken, B50 karışımında azalmalar tespit etmişlerdir. Optimum maksimum artmayı B20 yakıtında tespit etmişlerdir. Ayrıca, B20 karışım oranında HC, CO ve is emisyonları azalırken, NO emisyonları artmıştır. Cesur ve ark.[15], tavuk yağından transesterifikasyon yöntemi ile elde ettikleri yakıtı farklı oranlarda (B10, B20 ve B50) dizel yakıt ile karıştırmışlardır. Motor deneylerini tek silindir ve DI bir dizel motorunda gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda; B10 ve B20 yakıtlarında standart dizele göre motor performans parametrelerinde iyileşmelerin meydana geldiğini, B50 de ise bir miktar kötüleşmeler olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca tüm karışım oranları için NOx emisyonlarında dikkate değer kötüleşmeler tespit etmişlerdir.

Yılmaz [16], direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda yakıt olarak % 10 balık yağı biyodizel ve % 90 dizel yakıt karışımları kullanmıştır. Deneysel çalışmada motor devri 2200 ve 4 farklı yük konumunda deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışma sonucunda balık yağı biyodizelin alt ısı değerleri dizel yakıtına göre daha düşük olması sebebiyle performansta bir miktar kötüleşme olduğunu saptamıştır. Uyumaz ve ark. [17], direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda atık zeytinyağından elde

ettikleri biyodizelin motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Motor deneylerini tek devir ve beş farklı motor yükünde gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda, motor torkunda azalma, NOx emisyonlarında ise artmalar saptamışlardır. Sarıdemir [18], bitkisel yağlardan elde ettiği biyodizelin motorda yakıt olarak kullanılmasının egzoz emisyonları üzerine etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışma sonucunda, biyodizel karışımı yakıtların motorda kullanıldığında CO, CO<sub>2</sub>, HC ve gürültü emisyonlarının azaldığını fakat NOx emisyonlarında ise artmalar olduğunu saptamıştır.

İçten yanmalı motorlarda kullanılan petrol kökenli yakıtların sınırlı olması ve emisyon oranlarının yüksek olması, araştırmacıları alternatif yakıtlar konusunda araştırmaya teşvik etmektedir. Biyodizel yakıtlar, dizel motorlar için bitkisel yağlardan üretilen önemli bir yenilenebilir alternatif yakıttır. Biyodizel, dizel yakıtı ile karıştırılabildiği gibi, saf olarak da dizel motorda kullanılabilir. Bu çalışmada, atık bitkisel yağlardan üretilen biyodizel ve standart dizel yakıt karışımlarının tek silindri bir motorun egzoz ve gürültü emisyonlarına olan etkisi incelenmiştir. Yakıt karışımları içeriğindeki biyodizelin CO, CO<sub>2</sub>, HC ve gürültü emisyonlarını azalttığı, NOx emisyonunu ise artırdığı görülmüştür.

Dizel motorlarının buji ateşlemeli motorlara göre en büyük avantajı sıkıştırma oranının yüksek olması ve çok daha fakir karışımlar ile çalışabilmesidir. Fakir karışım çalışabilmeleri nedeniyle düşük kısmi yanma ürünü salmaktır. Ancak, sıkıştırma oranı ve yüksek hava fazlalık katsayısı ile çalışmalarından dolayı çok daha yüksek oranda NO emisyonu açığa çıkarmaktadır. Aynı zamanda heterojen karışım teşkili nedeniyle is emisyonlarının miktarı buji ateşlemeli motorlara göre fazladır [19,20]. NOx emisyonlarının oluşma nedeni; silindir içi yüksek sıcaklık, reaksiyona giren hava miktarı ve reaksiyon süresidir. İis emisyonları ise silindir içerisinde oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Dizel motorlarında, biyodizel kullanıldığında bazı çalışmalarda NOx emisyonlarının arttığı, bazılarında ise azaldığı vurgulanmaktadır. Çalışmalardaki bu farklılıklar, motor ayar parametrelerinden, biyodizelin elde edildiği yağ ve elde edilme yönteminden kaynaklı olmakla birlikte; motor çalışma şartları (motor devir ve yükü) ve yakıt içerisinde bulunan biyodizel karışım oranına göre de değişmektedir. Dolayısıyla karışım oranı ve motor çalışma şartlarının motor performans ve emisyon karakteristikleri açısından optimizasyonu önem arz etmektedir. Literatürde dizel motorlarında biyodizel kullanıldığında deneyler esnasında motor yükünün sabit veya devir sayısının sabit tutulduğu pek çok çalışma mevcuttur [21,22]. Dizel biyodizel karışımları ve motor yüklerine göre yapılan çalışmalar literatürde oldukça azdır. Bu deneylerin tüm parametrelerin denemesi ve kombinasyonlara göre deneylerin tekrarlanması hem uzun zaman almakta hem de deney maliyetlerini arttırmaktadır. Bundan dolayı, tam faktör deney tasarımları yerine kısmi faktöriyel deney tasarım

yöntemlerinin kullanılması uygun olmaktadır. Kısmi faktöriyel deney tasarımı; tam faktöriyel deney tasarımındaki maliyet ve zamandan tasarruf sağlamaya yönelik olarak geliştirilmiş deney tasarım yöntemleridir. Taguchi yöntemi birçok alanda kullanılan kısmi faktöriyel deney tasarım yöntemlerinin başında gelmektedir. Bu yöntem standart deney tasarım yöntemlerinin bir kombinasyonudur ve iki amacı vardır. Bunlar; 1) Kalite değişkenini hedefe olabildiğince yaklaştırmak, 2) Varyansı minimum yapmaktır. Taguchi yönteminde, deneysel çalışmalarda dikkate alınan tüm faktör ve seviyelerinin her bir kombinasyonlarının denenmesi yerine Taguchi tarafından önerilen standart ortogonal dizilerin oluşturduğu kombinasyonlara göre deneyler yapılmaktadır. Elde edilen deney kombinasyonlarına göre yapılan deney gözlem değerlerinin, hedef değere göre belirlenmesinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Deney sonuçları arasındaki farklılığı minimum yapmak için S/N (Signal/Noise) oranlarını geliştirmiştir. Taguchi tarafından belirlenmiş S/N oranları, sistemden istenen hedefe göre seçilmektedir [23-32].

Taguchi yöntemi içten yanmalı motorlar üzerine deney yapan araştırmacılar tarafında da kısmi faktöriyel deney tasarımı olarak kullanılıp, farklı faktör ve seviyelerinin değişik hedefler için optimize edildiği görülmektedir [31,32]. Ayhan ve ark. [23], bir dizel motorunda farklı faktör ve seviyelerin motor performans ve emisyon karakteristiklerini Taguchi yöntemi ile optimize etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda deneysel çalışma maliyetlerinde ve zaman kayıplarında %70'e varan oranda azalma meydana geldiğini vurgulamışlardır. Ansari ve ark. [24] bir dizel motorunda motor performans ve emisyon karakteristikleri açısından optimum faktör ve seviyelerini Taguchi metodunu kullanarak yapmışlardır. Wu ve Wu [25] bir dizel motorunda farklı oranlarda biyodizel ve H2 ile birlikte EGR kullanımının motor yanma ve emisyonlara etkisini Taguchi yöntemi ile incelemişlerdir. L9 ortogonal dizisinin kullanıldığı Taguchi deney tasarım yöntemi ile yapılan deneylerde %67 oranında zaman tasarrufu sağlanabildiğini belirlemişlerdir.

Bu çalışmada, tek silindri direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda farklı oranlarda biyodizel-dizel karışımları yakıt olarak kullanılmıştır. Farklı seviyede karışım ile çalışan motorun performans parametreleri, NO ve is emisyonları açısından en uygun motor yükü ve motor devir sayısının belirlenmesinde Taguchi kısmi faktöriyel deney tasarım ve optimizasyon yöntemi kullanılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Taguchi Yöntemi ile Kısmi Faktöriyel Deney Tasarımı

Taguchi yöntemi ile deney tasarımı yapılmadan önce faktör ve seviyeleri literatür araştırması yapılarak belirlenmiştir. Her bir faktör 3 seviyeli olacak şekilde belirlenmiştir. Biyodizel-dizel karışım oranı için B0, B20 ve B50 oranları

1. faktörün seviyeleri olarak belirlenmiştir. Motor yükü olarak %40, %80 ve %100 çalışma yükleri 2. Faktör seviyeleri olarak seçilmiştir. 3. Faktör olarak ise motor devri 1200 d/d, 1600 d/d ve 2200 d/d olarak seçilmiştir. Bu faktör ve seviyelerin motor döndürme momenti, efektif güç, özgül yakıt sarfıyatı, efektif verim, NO ve İS emisyonları açısından en uygun faktör seviyeleri Taguchi yöntemi ile belirlenmiştir. Çalışmada seçilen faktör ve seviyeleri Tablo 1' de verilmiştir.

**Tablo 1.** Faktör ve seviyeleri.

Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
1.Faktör; Biyodizel Oranı,%, (A)	B0	B20	B50
2.Faktör; Motor Yükü, %, (B)	40	80	100
3.Faktör; Motor Devri, d/d, (C)	1200	1600	2200

Taguchi, yöntemi standart ortogonal dizileri kullanılmaktadır. Ortogonal diziler, çok sayıda deneysel durumu açıklamak için oluşturulmuştur. Ortogonal dizi, deneme sırasında bir faktörün seviyelerinin diğer faktörlerin seviyeleri ile eşleştirilmesidir [31]. Bu çalışmada, 3 faktör 3 seviyeli olarak belirlenmiştir. Belirlenen faktör ve seviyeleri Minitab programına girilmiş, program tarafından L9 ortogonal dizi oluşturulmuştur. L9 olarak ifade edilen ortogonal dizi Tablo 2' de verilmiştir.

**Tablo 2.** L9 Ortogonal dizisi

Deney No	1.Faktör	2.Faktör	3.Faktör
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Çalışmada motor performans parametresi olarak motor döndürme momenti, efektif güç, özgül yakıt sarfıyatı ve efektif verim seçilmiştir. Emisyon karakteristiği olarak ise NO ve İS emisyonları incelenmiştir. Ortogonal diziyeye göre deneyler 3 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiş ve gözlem değerlerinin ortalaması alınmıştır. Elde edilen veriler Minitab programına girilerek analizleri yapılmıştır. Taguchi yönteminin tam faktöriyel deney tasarım yöntemlerinden ayıran en önemli özellik performans kriterini Sinyal/Gürültü oranı ile hesaplamasıdır [32]. Buna göre öncelikle döndürme momenti, efektif güç, özgül yakıt

sarfiyatı, efektif verim, NO ve is emisyonları gözlem değerlerinin S/N sonuçlarının hesaplanması için uygun Sinyal/Gürültü oranı formülleri belirlenmiştir. Motor performans parametrelerinden döndürme momenti, efektif güç ve efektif verim için hedef değerin büyük olması istenildiğinden S/N oranının hesaplanmasında Taguchi tarafından önerilen “En Büyük-En İyi” (Larger is better) formülü kullanılmıştır. Özgül yakıt sarfiyatı (ÖYS) ve emisyon karakteristikleri (NO ve is emisyonları) için ise hedef değerin küçük olması “En Küçük-En İyi” (Smaller is better) formülü kullanılmıştır. Hesaplamalar için kullanılan S/N formülleri aşağıda 1 ve 2 numaralı denklemlerde verilmiştir.

En Büyük-En İyi;

$$S/N = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (1)$$

En Küçük-En İyi;

$$S/N = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (2)$$

S/N oranlarına göre her bir performans parametresi ve emisyon sonuçları için Minitab programında analizler yapılmış ve en uygun faktör seviyeleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre faktörlerin parametrelere etki düzeylerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Varyans analizi hesaplamalarında kullanılan denklemler (3)-(7) arasında gösterilmiştir:

$$SS_T = \left[ \sum_{i=1}^N (S/N)_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (3)$$

$$SS_A = \left[ \sum_{i=1}^{K_A} \left( \frac{A_i^2}{n_{Ai}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (4)$$

$$v_{total} = N - 1 \quad (5)$$

$$V_{faktor} = \frac{SS_{faktor}}{\theta_{faktor}} \quad (6)$$

$$F_{faktor} = \frac{V_{faktor}}{V_{error}} \quad (7)$$

Burada,  $SS_T$  kareler toplamı,  $N$  toplam deney sayısını,  $SS_A$  A faktörüne bağlı karelerin toplamını,  $K_A$ , A faktörü için seviye sayısını belirtir.  $A_i$ , A faktörünün toplam seviyelerinin toplamını,  $n_{Ai}$ , A faktörünün seviyesinin toplamını ifade eder.  $T$ , deneylerin toplam S/N oranı değerlerinin toplamını,  $v$  ise serbestlik derecelerini ifade eder.  $V_{faktor}$ , faktörün varyansını,  $SS_{faktor}$ , faktörün karelerinin toplamını ve  $F_{faktor}$ , faktörün F oranını belirtir.

Motor performans parametrelerinin hesaplanmasında aşağıdaki denklemler kullanılmıştır.

Motor döndürme momenti ve efektif güç hesaplamalarında;

$$M_d = F.L \quad (8)$$

$$P_e = \frac{2\pi.F.L.n}{1000} \quad (\text{kW}) \quad (9)$$

Burada;  $M_d$ , döndürme momentini (Nm),  $F$ , fren terazi kuvvetini (N),  $L$ , moment kolu uzunluğu (m),  $P_e$ , Efektif gücü (kW),  $n$ , ise motor devir sayısını (devir/s) göstermektedir.

Efektif verim, motor milinden alınan işin silindire verilen enerjiye oranıdır ve aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{m}_y.H_u} \quad (10)$$

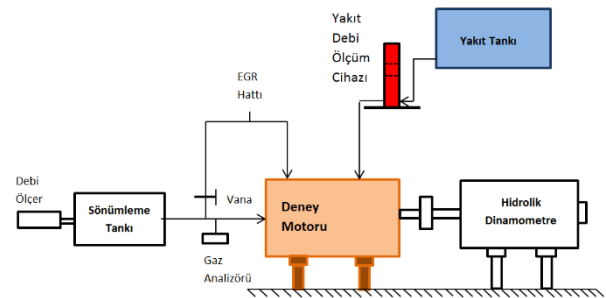
Deneylerde yakıt sarfiyatı hacimsel ölçüm yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Özgül yakıt sarfiyatının hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$b_e = \frac{3600.\Delta V.\rho_y}{P_e.\Delta t} = \frac{3600.\dot{m}_y}{P_e} \quad (11)$$

Burada, motorun  $\Delta V(\text{cm}^3)$  hacmindeki yakıtı  $\Delta t$  (s) zaman aralığında tükettiği dikkate alınarak yakıt debisi ( $\dot{m}_y$ ) hesaplanmaktadır.  $\rho_y$ , yakıtın yoğunluğunu ifade etmektedir [33].

## 2.2. Deneysel çalışmalar

Deneylerde tek silindirli bir dizel motoru hidrolik bir dinamometre ile frenlenmiştir. Deneylerden önce motorun gerekli ayarları katalog değerlerine göre yapılmıştır. Sistemik hataların önüne geçmek için deney düzeneğindeki tüm ölçü aletlerinin kalibrasyonları yapılmıştır. Deneylere başlamadan önce deney motorunun rejim sıcaklığına gelmesi sağlanmıştır. Deneyler esnasında dinamometre tarafından absorbe edilen yük miktarı S tipi loadcell kullanılarak tespit edilmiştir. Sıcaklıkların ölçümünde termokupullar kullanılmıştır. NO ve is emisyonlarının ölçülmesinde Bosch marka emisyon cihazı kullanılmıştır. Deney motorunun teknik özellikleri Tablo 3’ de ve deney düzeneğinin şematik şekli şekil 1’ de verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği

**Tablo 3.** Deney motorunun teknik özellikleri

Parametre	Değer
Motor Tipi	Süper Star
Piston Çapı [mm]	108
Strok [mm]	100
Silindir Sayısı	1
Strok Hacmi [dm <sup>3</sup> ]	0,92
Güç, 2200 d/d, [kW]	13
Enjektör Açma Basıncı [bar]	225
Püskürtme Avansı [Krank Açısı]	29
Sıkıştırma Oranı	17
Maksimum Devir [d/d]	2500
Soğutma Tipi	Su
Püskürtme Tipi	Direkt Enjeksiyon
Piston Tipi	Canak Piston

### 2.3. Biyodizel Üretimi

Deneysel çalışmada kullanılan biyodizel transesterifikasyon yöntemi kullanılarak ayçiçek yağından elde edilmiştir. Esterleştirme işleminde alkol olarak metil alkol, katalizör olarak ise potasyum hidroksit kullanılmıştır. Transesterifikasyon yöntemi bitkisel veya hayvansal yağlardan biyo yakıt elde edilmesinde en fazla kullanılan yöntemdir[6,14,15]. Esterleştirme işleminde genellikle metil veya etilalkol kullanılmaktadır. Metil alkol kullanılarak elde edilen esterlere metil ester, etil alkol kullanılarak elde edilen esterlere ise etil ester denilmektedir. Bu çalışmada alkol olarak metil alkol kullanılmıştır. Elde edilen ayçiçek yağı metil esterleri, dizel yakıtı ile farklı oranlarda karıştırılarak çalışmada seçilen bir faktör ve seviyesi belirlenmiştir. Tablo 4' de biyodizel ve dizel yakıtının özellikleri verilmiştir.

**Tablo 4.** Dizel ve biyodizel yakıtların özellikleri

Yakıt Özellikleri	Biyodizel	Dizel
Kapalı formül	C <sub>19</sub> H <sub>35,2</sub> O <sub>2</sub>	C <sub>12,226</sub> H <sub>23,2950</sub>
Molekül ağırlığı (g/mol)	296	120-320
Özgül ağırlığı (kg/dm <sup>3</sup> )	0,87-0,88	0,82-0,86
Kinematik viskozite (mm <sup>2</sup> /s)	4,3	2,5-3,5
Setan sayısı	>55	49-55
Alevlenme noktası (°C)	>100	>55
Alt ısı değeri (kJ/kg)	39576	42640

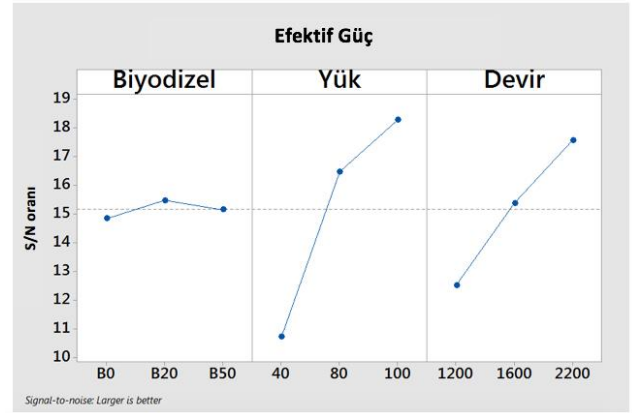
## 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 3.1. Motor performans parametreleri

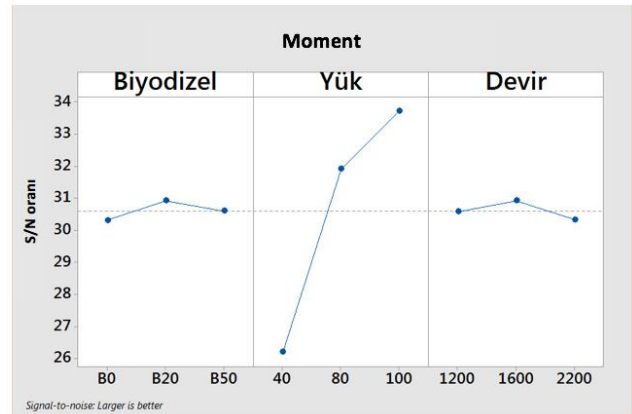
Farklı biyodizel oranları, motor devirleri ve motor yükleri için yapılan deneyel çalışmada motor performans ve egzoz emisyon üzerine etkileri Taguchi istatistiksel deney tasarımı yöntemi kullanılarak incelenmiştir.

Şekil 2'de motor efektif gücüne etki eden faktör ve seviyelerinin değişimleri görülmektedir. Efektif gücün

optimum değeri 2200 d/d'da, B20 biyodizel karışımında ve %100 yük durumunda elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A2B3C3'dir.

**Şekil 2.** Efektif güç için faktör seviyeleri S/N değerleri

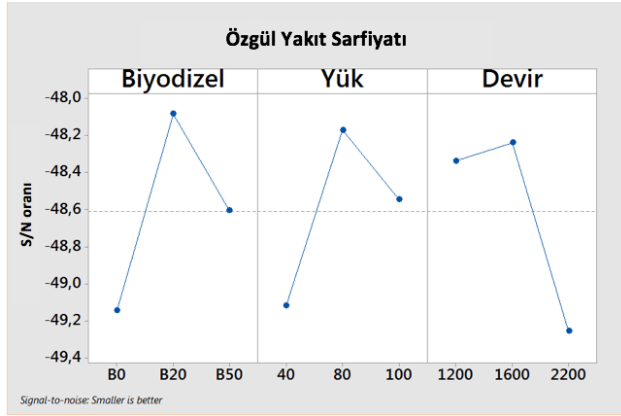
Şekil 3'de motor torkuna etki eden faktör ve seviyelerinin değişimleri görülmektedir. Motor torkunun optimum değeri 1600 d/d'da, B20 biyodizel karışımında ve %100 yük durumunda elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A2B3C2'dir.

**Şekil 3.** Motor torku için faktör seviyeleri S/N değerleri

Deneyel çalışmalar sonucunda motorda farklı oranlarda biyodizel kullanıldığında standart motora göre, efektif gücün ve torkun arttığı görülmektedir. Efektif gücün B20 yakıtına kadar artması ve B20 yakıtında en iyi seviyeye ulaşmasının Biyodizelin içerdiği oksijen miktarı ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Yakıttaki oksijen miktarının fazla olması yanmanın iyileşmesini sağlamaktadır. Bu durum momentin ve dolayısıyla efektif gücün artmasına sebep olmaktadır. Yakıt içerisindeki biyodizel oranının %20'den fazla olduğu durumda biyodizelin alt ısı değerinin dizel yakıttan düşük olması sebebiyle ısı girdisinin daha az olması döndürme momentini ve efektif gücü azaltmaktadır. Motor karakteristik eğrilerinden de bilindiği üzere genel olarak atmosferik motorlarda momentin en yüksek olduğu devir orta bir devirdir. Deney motorunda en yüksek moment 1600 d/d'da elde edilmiştir. Bu devirden sonra devir arttıkça moment azalır. Bunun nedeni silindire girecek karışım miktarının azalması, motorun hacimsel

veriminin düşmesi ve artan sürtünme kayıplarıdır. Efektif güç ise momente bağlı olduğu gibi motor devrine de bağlıdır. Devir arttıkça çevrim sayısındaki artmaya bağlı olarak efektif güç artmaktadır.

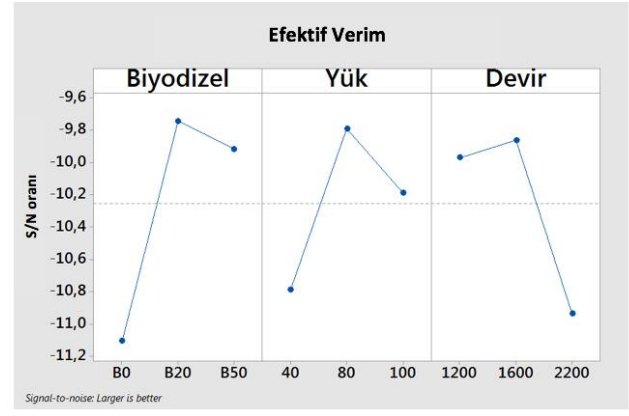
Şekil 4'te motor özgül yakıt sarfiyatına (ÖYS) etki eden faktör ve seviyelerinin değişimleri görülmektedir. Özgül yakıt sarfiyatının optimum değeri, 1600 d/d'da, B20 biyodizel karışımında ve %80 yük durumunda elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A2B2C2'dir.



Şekil 4. ÖYS için faktör seviyeleri S/N değerleri

Şekil 5'te efektif verime etki eden faktör ve seviyelerinin değişimleri görülmektedir. Efektif verimin optimum değeri, 1600 d/d'da, B20 biyodizel karışımında ve %80 yük durumunda elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A2B2C2'dir.

Motor performans parametreleri için varyans analizi sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre faktörlerin efektif güç, motor torku, özgül yakıt sarfiyatı ve efektif verimde %95 ile %99,99 aralığında etkili oldukları tespit edilmiştir.



Şekil 5. Efektif verim için faktör seviyeleri S/N değerleri

Tablo 5. Motor performans parametreleri için varyans analizi sonuçları.

	Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı, SS	Kareler Ortalaması, V	Fteori
Moment	A – Biyodizel	2	0,033	0,0166	1,02
	B – Yük	2	101,906	50,9529	3124,69***
	C – Devir	2	0,675	0,3373	20,69*
	Hata	2	0,033	0,0163	
	Toplam	8	102,646		
Efektif Güç	A – Biyodizel	2	0,028	0,0138	0,62
	B – Yük	2	103,249	51,6246	2327,96***
	C – Devir	2	34,996	17,4979	789,05**
	Hata	2	0,044	0,0222	
	Toplam	8	138,317		
Efektif Verim	A – Biyodizel	2	1,12227	0,56114	26,04*
	B – Yük	2	2,90409	1,45205	67,39*
	C – Devir	2	2,82313	1,41157	65,51*
	Hata	2	0,04309	0,02155	
	Toplam	8	6,89259		
ÖYS	A – Biyodizel	2	0,34723	0,17362	8,8
	B – Yük	2	2,5967	1,29835	65,82*
	C – Devir	2	2,52186	1,26093	63,92*
	Hata	2	0,03945	0,01973	
	Toplam	8	5,50524		

\* %95 etki, \*\*%99 etki, \*\*\*%99,99 etki

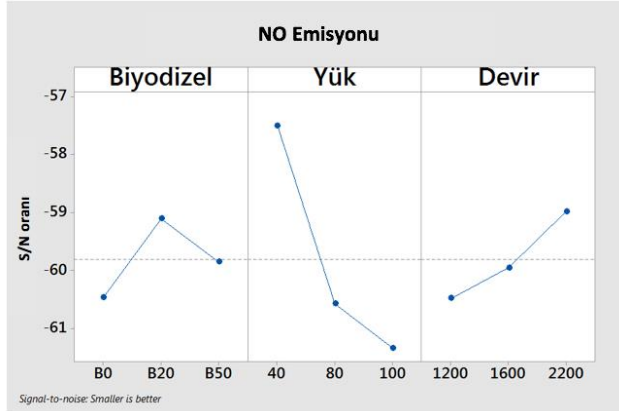
### 3.2. Emisyon karakteristikleri

Şekil 6'da NO emisyonuna etki eden faktör ve seviyelerinin değişimleri görülmektedir. NO emisyonunun optimum değeri %40 yük değerinde, 2200 d/d' ve B20 biyodizel

karışımında elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A2B1C3'dir.

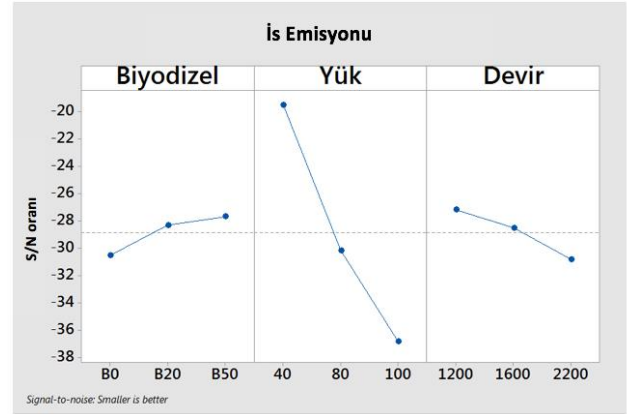
Yakıt olarak biyodizel kullanılması ile NO emisyonları ise artmıştır. NO miktarının artmasının sebebi biyodizel

yakıtının oksijen içeriğinin dizele göre daha yüksek olması nedeniyle yanma veriminin artmasıdır. Yanma verimin iyileşmesi adyabatik alev sıcaklığını yükseltmektedir. Bu nedenle artan sıcaklıklar NO emisyonlarını arttırmıştır.



Şekil 6. NO emisyonu için faktör seviyeleri S/N değerleri

Şekil 7’de is emisyonuna etki eden faktör ve seviyelerinin değişimleri görülmektedir. İs emisyonunun optimum değeri %40 yük değerinde, 1200 d/d ve B50 biyodizel karışımında elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A3B1C1’dir.



Şekil 7. İs emisyonu için faktör seviyeleri S/N değerleri

İs emisyonlarının azalmasının sebebi, biyodizel yakıtının oksijen içeriğinin fazla olması nedeniyle hava fazlalık katsayısının artmasına neden olmaktadır. Hava fazlalık katsayısının değişimi emisyonların değişimini etkileyen en önemli parametredir.

Emisyon karakteristikleri için varyans analizi sonuçları Tablo 6’da verilmiştir. Bu sonuçlara göre faktörlerin egzoz emisyonlarında %95 ile %99,99 aralığında etkili oldukları tespit edilmiştir.

Tablo 6. Emisyon karakteristikleri için varyans analizi sonuçları.

	Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı, SS	Kareler Ortalaması, V	Fteori
NO Emisyonu	A – Biyodizel	2	1,596	0,7979	1,09
	B – Yük	2	22,303	11,1515	15,22
	C – Devir	2	10,307	5,1537	7,03
	Hata	2	1,466	0,7328	
	Toplam	8	35,672		
İs Emisyonu	A – Biyodizel	2	13,15	6,577	0,39
	B – Yük	2	458,65	229,324	13,55
	C – Devir	2	20,13	10,063	0,59
	Hata	2	33,84	16,921	
	Toplam	8	525,77		

\* %95 etki, \*\*%99 etki, \*\*\*%99,99 etki.

#### 4. GENEL DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak, farklı yük ve devirlerde çalışan bir dizel motorunda farklı biyodizel uygulanmasının motor performans parametreleri, NO ve is emisyonlarındaki değişimler incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda motor yükünün, motor devrinin, farklı biyodizel-dizel karışımlarının motor performans parametreleri ve NO-is emisyonları üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

-Etketif güç için en iyi sonuçlar, B20 yakıtında, %100 yük ve 2200 d/d’da elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A2B3C3’dir.

-Motor torku için en iyi sonuçlar; B20 yakıtında, %100 yük ve 1600 d/d’da elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A2B3C2’dir.

-Özgül yakıt sarfıyatı (ÖYS) için optimum sonuçlar; B20 yakıtında, %80 yük ve 1600 d/d’da elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A2B2C2’dir.

-Etketif verim için en iyi sonuçlar; B20 yakıtında, %80 yük 1600 d/d’da elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A2B2C2’dir.

-NOx emisyonları açısından en iyi sonuçlar; B20 yakıtında, %40 kısmi yük ve 2200 d/d’da tespit edilmiştir. En iyi kombinasyon A2B1C3’dir.

-İs emisyonları için en iyi sonuçlar; B50 yakıtta, %40 kısmi yük ve 1200 d/d'da tespit edilmiştir. En iyi kombinasyon A3B1C1'dir.

Sonuç olarak motor performans parametreleri açısından optimum sonuç B20 yakıtı, %100 yük konumu ve 1600 d/d olarak belirlenmiştir. Ayrıca NOx ve is emisyonları açısından optimum değer B20 yakıtı, %40 yük ve 2200 d/d olarak tespit edilmiştir.

Ayrıca Taguchi istatistiksel deney tasarım yönteminin kullanılması ile 16 deney 3 tekrarlı yapılarak zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlanmıştır. Yapılan deneyler %95 ile %99,99 güven aralığında gerçekleştirilmiştir.

## KAYNAKÇA

- [1] K.A. Abed, M.S. Gad, A.K. El Morsi, M.M. Sayed and S.A. Elyazeed, "Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions," Egyptian Journal of Petroleum, Journal Homepage, 2019.
- [2] Ertan ALPTEKİN, Mustafa ÇANAKÇI, Biyodizel ve Türkiye'deki durumu, Mühendis ve makine, Cilt: 47 Sayı: 561,2003.
- [3] J.Suryawanshi, N.Deshpande, "Overview of EGR, injection timing and pressure on emissions and performance of CI engine with pongamia methyl ester", SAE Technical Paper, 2005.
- [4] M.B.Sirman, E.C.Owens, K.A.Whitney, "Emissions comparison of alternative fuels in an advanced automotive diesel engine", SAE Technical Paper, 2000.
- [5] Yücesu, H.S., Altın, R., Çetinkaya, S., "Dizel Motorlarında alternatif yakıt olarak bitkisel yağ kullanımının deneysel incelenmesi", Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, vol. 25, pp. 39-49, 2001.
- [6] A. Parlak, H. Karabaş, İ. Özsert, V. Ayhan and İ. Cesur, "Application of Taguchi's methods to investigate factors affecting emissions of a diesel engine running with tobacco oil seed methyl ester," Int. J. Vehicle Design, Vol. 59, Nos. 2/3, 2012.
- [7] A. Keskin ve K. Ekşi, "Dizel motorlarda mısır yağı biyodizelinin yakıt olarak kullanımının motor performans ve emisyonuna etkisi," C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 2.1 (2006) 49-55.
- [8] C. Haşımoğlu, "Düşük ısı kayıplı bir dizel motorunda biyodizel kullanımının performans ve emisyon parametrelerine etkisi," Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2005.
- [9] A.Parlak, V.Ayhan, İ.Cesur, G.Kökkülünk, "Investigation of the effects of steam injection on performance and emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester", Fuel Processing Technology, vol. 116, pp. 101-109, 2015.
- [10] A.K.Agarwal, L.Das, "Biodiesel development and characterization for use as a fuel in compression ignition engines", Journal of Engineering Gas Turbines Power, vol. 123, pp. 123:440-447, 2007.
- [11] C.A.Sharp, T.W.Ryan, G.Knothe, "Heavy-duty diesel engine emissions tests using special biodiesel fuels", SAE Technical Paper, 2005.
- [12] J.Suryawanshi, N.Deshpande, "Overview of EGR, injection timing and pressure on emissions and performance of CI engine with pongamia methyl ester", SAE Technical Paper, 2005.
- [13] M.B.Sirman, E.C.Owens, K.A.Whitney, "Emissions comparison of alternative fuels in an advanced automotive diesel engine", SAE Technical Paper, 2000.
- [14] Ayhan. V., Tunca S., Cesur İ., Özsert İ., Ergen G., Ayçiçek Yağı Metil Ester Karışımlarının DI Bir Dizel Motorunun Performans ve Emisyonlarına Etkisi, Academic Platform Journal of Engineering & Science APJES, 7-1, 67-73, 2019.
- [15] İ.Cesur, V.Ayhan,P.Parlak, "Bir Dizel Motorunda Tavuk Yağı Metil Esteri Kullanılmasının Performans Ve Emisyonlara Etkisi", 10. Uluslararası Yanma Sempozyumu, Sakarya/ Türkiye, 09-10 Ekim 2008.
- [16]Yılmaz E., %10 Balık Yağı Biyodizeli-%90 Dizel Yakıt Karışımı İle Çalışan Direkt Enjeksiyonlu Bir Dizel Motorunda Yanma ve Performans Karakteristiklerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C Tasarım ve Teknoloji 7(1):12-24, Mart 2019, DOI: 10.29109/gujsc.466544.
- [17]Uyumaz, A., Boz, F., Baydır, Ş.A., Direkt Enjeksiyonlu Bir Dizel Motorunda Atık Zeytinyağı Biyodizelinin Yanma, Performans Ve Emisyon Karakteristikleri, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 2018, <https://doi.org/10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.317409>.
- [18]Saridemir, S., Biyodizel-Dizel Yakıt Karışımlarının Motor Gürültü Ve Egzoz Emisyonlarına Olan Etkisi, 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science 3-5 November 2016 (ISITES2016 Alanya/Antalya - Turkey).
- [19] N. Usta, Ö. Can ve E. Özgürk, "Alternatif dizel motor yakıtı olarak biyodizel ve etanolün karşılaştırılması," Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi Sayı:3, Denizli, 2005.
- [20] Z.Ö. Özdemir ve H. Mutlubaş, "Biyodizel üretim yöntemleri ve çevresel etkileri," Kırklareli University Journal of Engineering and Science 2 (2016) 129-143.
- [21] M.E. Tat, "Investigation of oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fueled engine," Ph. D. Iowa State University, 41, 2003.
- [22] S. Manigandan, P. Gunasekar, J. Devipriya and S. Nithya, "Emission and injection characteristics of corn biodiesel blends in diesel engine," Fuel, 235 (2019) 723-735.
- [23] V. Ayhan, İ. Özsert, Y. Çay, A. Çoban ve İ. Cesur, "DI bir dizel motorunda optimum buhar püskürtme oranı ve yakıt püskürtme zamanının taguchi metodu ile deneysel olarak belirlenmesi," Journal of New Results in Engineering and Natural Science, No:8 (2018) 128-136.
- [24] N.A. Ansari, A. Sharma and Y. Singh, "Performance and emission analysis of a diesel engine implementing polanga biodiesel and optimization using Taguchi method,"

Process Safety and Environmental Protection, 120 (2018) 146–154.

[25] H. Wu and Z. Wu, “Using Taguchi method on combustion performance of a diesel engine with diesel/biodiesel blend and port-inducting H<sub>2</sub>,” *Applied Energy* 104 (2013) 362–370.

[26] D.H. Lee, J.S. Park, M.R. Ryu and J.H. Park, “Development of a highly efficient low-emission diesel engine-powered co-generation system and its optimization using Taguchi method,” *Applied Thermal Engineering* 50 (2013) 491-495.

[27] M. Balkı, C. Sayın and M. Sarıkaya, “Optimization of the operating parameters based on Taguchi method in an s1 engine used pure gasoline,” *Ethanol And Methanol, Fuel* 180 (2016) 630–637.

[28] T. Ganapathy, K. Murugesan and R.P. Gakkhar, “Performance optimization of jatropha biodiesel engine model using Taguchi approach,” *Applied Energy* 86

(2009) 2476–2486.

[29] Ç. Sarpkaya, “Taguchi metoduna dayalı gri ilişkiler analizi ile haşıl prosesinin optimizasyonu,” Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2014.

[30] Z.Y. Wu, H.W. Wu and C.H. Hung, “Applying Taguchi method to combustion characteristics and optimal factors determination in diesel/biodiesel engines with port-injecting LPG,” *Fuel* 117 (2014) 8–14.


[31] S. İzgiz, “Deney tasarımı ve Taguchi metodu-ürün ve proseslerin optimizasyonu, Kocaeli, 1999.

[32] M. Şirvancı, *Kalite için deney tasarımı, Literatür Yayınları*, 1. Basım, İstanbul, 1997.

[33] Ayhan, V., *Bir Dizel Motoruna Buhar Enjeksiyonunun NO<sub>x</sub> ve İş Emisyonlarına Etkisinin Araştırılması. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2009, Doktora Tezi, Sakarya.



## On the Energy Absorption Capability of Metallic Tubes Subjected to the Radial Wall Crushing Process

\*<sup>1</sup>Yaşar Kahraman<sup>1</sup>Sakarya University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, kahraman@sakarya.edu.tr, 

Research Paper

Arrival Date: 06.01.2021

Accepted Date: 01.03.2021

### Abstract

Metallic tubes, under axial loading, are frequently preferred in many different industries due to their high energy absorption efficiency. The studies to increase the energy absorption capacity (EAC) of these structures are still up to date. In this study, the deformation behavior and EAC of regionally pre-deformed identical aluminum and steel tubes under axial loading were investigated experimentally. An increase of regional strength in tubes was obtained by the radial wall crushing (RWC) process. The RWC process is carried out radially by crushing desired regions of metallic tubes from the outside using a specially designed device. Strengthening (hardening) occurs in the pre-deformed regions and as a result, the EAC of the metallic tubes can be increased. It is also noteworthy that the increase in absorbed energy is provided without reinforcement materials. It was seen from the experimental results that the energy absorption value of aluminum and steel tubes were increased by approximately 23% and 33%, respectively by the RWC process. In addition to energy increases, the folding beginning of the metallic tubes can also be directed by using the RWC process.

**Keywords:** radial wall crushing, aluminum, steel, tubular, energy absorption capability

### 1. INTRODUCTION

Energy-absorbing structures are commonly used to minimize injuries to drivers and passengers and also used to protect the main structures from damages. Accordingly, metallic tubes are frequently used in the aviation and automotive industries, where a higher ratio of strength to lightness is desired. Although the studies on metallic tubes are dated to the second half of the 20th century, they are still up to date. In this context, it is possible to reach many studies [1]-[5] on the deformation behavior and energy absorption capability of metallic tubes. Alexander [1] examined the deformation of steel tubes and showed that the absorbed energy by the metallic tubular structures is directly related to the geometric properties of the tube structure. It has been observed from the study that the main factor in the absorbed energy is the tube wall thickness [2].

To increase the absorbed energy values, many researchers used different types of foams [6]-[9] and fibers [10]-[14] as a reinforcement method. In these studies, it has been reported that using reinforcement materials resulted in increasing the absorbed energy value. However, the weight of the tubular structures was also increased which is an undesirable situation for the energy efficiency parameter of specific energy absorption (SEA). The SEA is one of the most important crashworthiness parameters which is defined as

the absorbed energy per unit weight [15]. Accordingly, if the increase in weight is higher compare to the increase in absorbed energy, reinforcement materials using would be useless. It is noted in some of the studies mentioned above the SEA value was obtained lower than the non-reinforced structure. In this context, increasing the SEA value appears as the main target in the studies on tubular structures.

In this study, the absorbed energy of metallic tubes is tried to be increased. Accordingly, the radial wall crushing (RWC) process which contains none of the reinforcement materials was applied to the metallic tubes. Related to the increase in absorbed energy due to the RWC process, the SEA values of tubes are expected to increase as well.

### 2. MATERIAL AND METHODS

#### 2.1. Material Properties and Experimental Set-up

In the experimental studies, 6063-T5 series aluminum alloy and seamless steel tubes with 58 mm diameter, 1.5 mm wall thickness were used. Two different lengths as 34 mm and 100 mm for aluminum and 100 mm for steel tubes were selected and used in the experiments. The short-length aluminum tubes were used to examine that how the RWC process affects the deformation behavior and the energy absorption of tubes. After that, the long-length aluminum

\*<sup>1</sup> Corresponding author: Sakarya University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, kahraman@sakarya.edu.tr

and steel tubes were used for multiple RWC processes to obtain the most sufficient design.

Although aluminum and steel pipes are manufactured by extrusion, there may be differences in wall thickness on cross-section and this causes a wide scattering in the experimental results. For this reason, to obtain homogeneous wall thickness, CNC milling was operated from inside and outside of the pipes (Figure 1). Before CNC milling, steel pipes were heat-treated to increase ductility. Thus, damages that could occur during folding of the tube under axial loading were prevented. To determine the mechanical properties of the tube structure, a tensile test was carried out on an Instron tensile testing device with a capacity of 5 kN. A video extensometer has been used for more precise measurements. The mechanical properties of the tubular structure are given in Table 1. In the axial crushing tests of all tubes with and without an RWC process, a 250 kN capacity, hydraulic driven press was used. The experiments were carried out at a speed of 1 mm/s. The force-displacement data of the experiments were transferred to the computer as approximately 6 data/s. Also, all experiments were recorded with the help of a camera.



Figure 1. CNC milling operation of aluminum and steel pipe

Table 1. Mechanical properties of aluminum and steel tubular structures

	Elasticity modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Poisson ratio
Aluminum 6063-T5	69	188	212	0.33
Steel St-52	200	325	560	0.3

2.2. Radial Wall Crushing (RWC) Process

The RWC process, which is based on strain hardening by applying regional pre-deformation to the tube wall, increases the energy absorption capacity of the metallic tube. Wall

crushing is carried out using the device given in Figure 2. The process starts with placing the tube on the shaft then the idler rotating disk is pressed into the tube wall at the desired rate. Finally, the process completes after a full rotation of the tube around itself. A multiple wall crushed aluminum tube and its schematic view are given in Figure 3. From the figure,  $w$  and  $\lambda$  are related to the wall crushed region and free folding length, respectively. With this process, the absorbed energy value of the tube structure under axial loading is tried to be increased without using any reinforcement material.

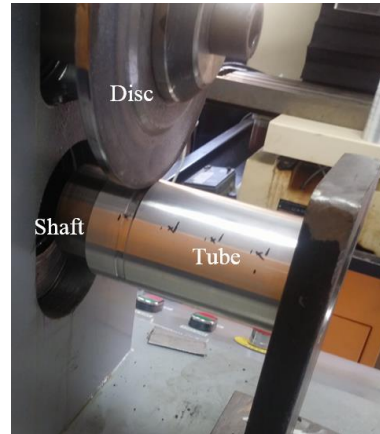


Figure 2. The radial wall crushing (RWC) device

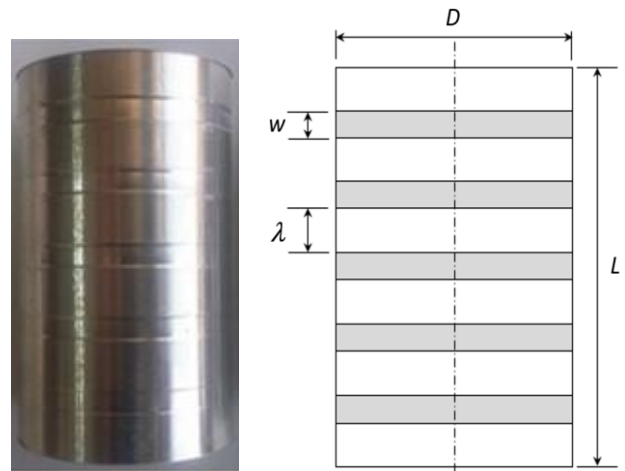
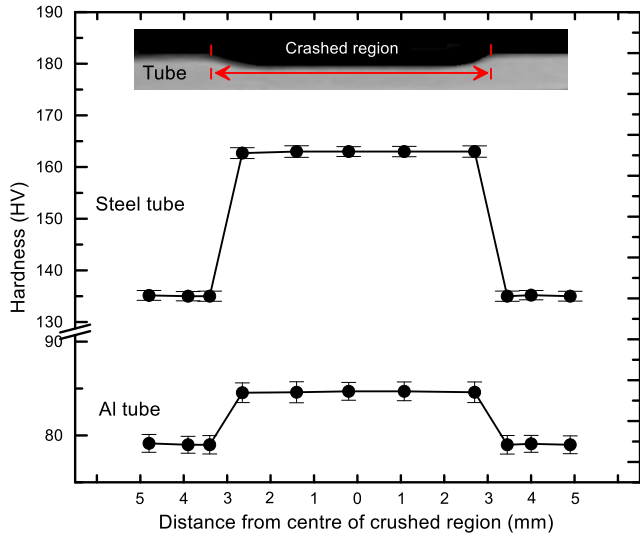


Figure 3. A multiple wall crushed aluminum tube and its schematic view

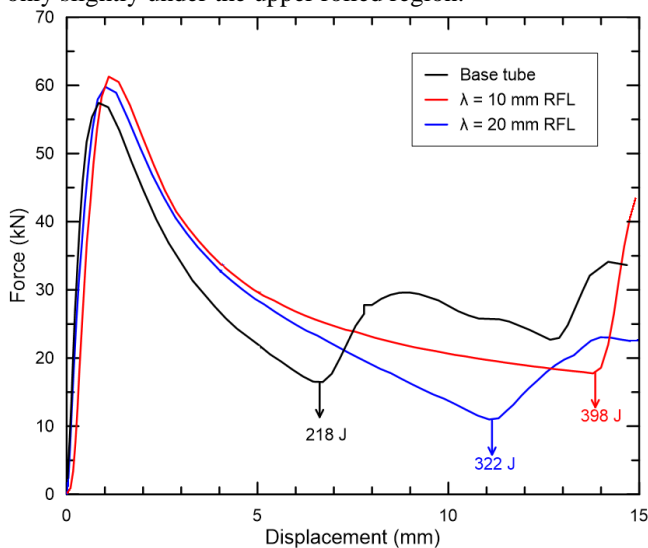
3. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, the experimental results of the base and radially wall crushed tube specimens have been examined. The hardness of the tube wall changes due to pre-deformation related to the RWC process. As given in Figure 4, the hardness values of the aluminum and steel base tubes are 78 HV and 135 HV and they increase to 85 HV and 163 HV respectively on the crushed region. The increase in hardness causes an increase in the strength of this region, it also causes a decrease in the ductility (plastic deformation ability) of the tube.

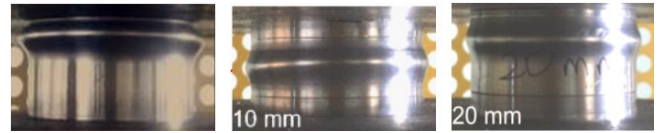


**Figure 4.** Variation of tube wall hardness after the RWC process

To see the effect of the RWC process on the deformation behavior of the tube, the process was first applied to the short tubes with free folding lengths ( $\lambda$ ) of 10 mm and 20 mm. The force-displacement curves and deformation behaviors of these specimens are given in Figure 5 and Figure 6. It is seen from the figure that the RWC process increases the first peak force compared to the base tube. Besides, the lower force values, corresponding to the completion of the first fold, shifted to the right (Figure 5). It is understood that the highest absorbed energy was obtained at the end of the first folding of the specimen with  $\lambda$  of 10 mm. It is seen from Figure 6 that the deformation began close to the upper end in the base tube while it was between the rolled regions by the RWC process. In the tube with  $\lambda$  of 10 mm, deformation started in the middle of the wall crushed regions and continued in this way. In the  $\lambda$  of 20 mm specimen, the fold again occurred only slightly under the upper rolled region.

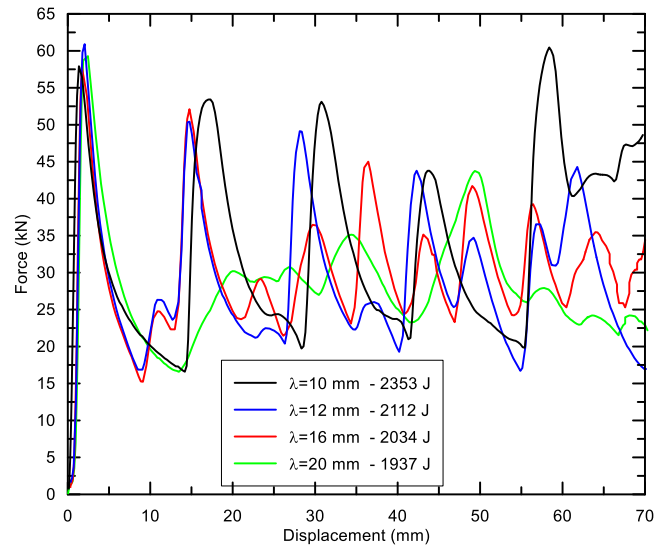


**Figure 5.** The force-displacement curves of the base and the RWC applied tubes



**Figure 6.** The deformation in the base and the RWC applied tubes

For long tubes different  $\lambda$  values are used as variable parameters in RWC. In this context, the force-displacement curves of the tubes with the  $\lambda$  of 10 mm, 12 mm, 16 mm, and 20 mm are given in Figure 7. From the figure, it is seen that the upper force values approach the first peak force with decreasing of the  $\lambda$  values.  $\lambda=12$  mm and  $\lambda=16$  mm curves lie between 10 mm and 20 mm curves as expected. When the graphic is examined, it is seen that the RWC process changes the characteristic of the force curve, and thus the energy value is increased. This situation occurs as a result of i) restriction of the length of folding by the RWC process, ii) inclusion of rolled regions with higher strength into the folding process. The absorbed energy values increased with decreasing  $\lambda$  values and the highest energy was obtained in the specimen with  $\lambda$  of 10 mm as 2353 J which is 23% higher than the base tube. This is the most efficient value for the RWC process.

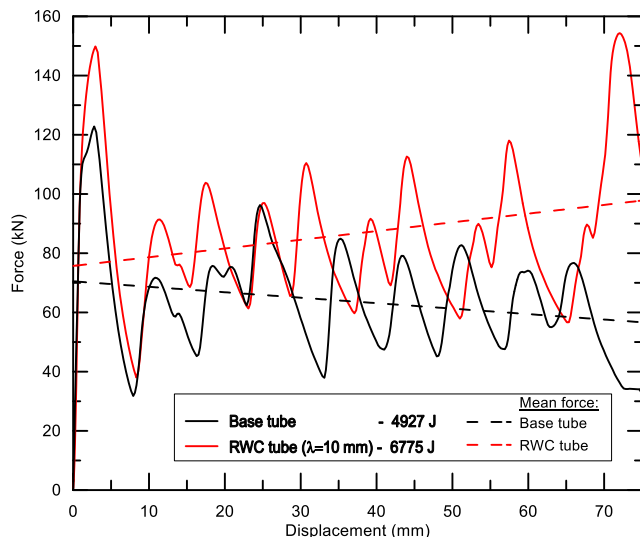


**Figure 7.** Force-displacement curves of aluminum tubes with different  $\lambda$  values

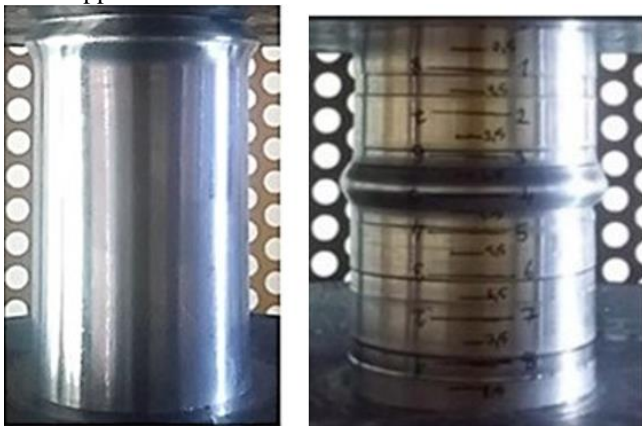
Some other processes such as grooving the tubes were studied in the literature [16]–[18] to change the tube wall stability efficiently. In these studies, tube wall stability was changed locally by cutting wide grooves from the outer surface of the metallic tubes. However, these cutting operations caused locally decreased regions on the tube wall. In contrast to these studies, locally strengthening was obtained by the RWC process in this study. In addition, it was reported by Daneshi and Hosseini-pour [19] that the deformation beginning and the characteristic of the force-displacement curve could be control by the grooving process. It was concluded as an important point from these studies that there was not an increase in absorbed energy compared

to non-grooved tubes. Another study on axially compressed grooved square tubes by Lee [20] was showed similar results. In contrast to these studies on grooving, to be able to change the folding start and sequence of the tube and to increase the absorbed energy without machining show the importance of this study.

The axial crushing results of the steel tubes are given in Figure 8. It is seen that after the RWC process, the first peak force increased by almost 25% compared to the base tube. Also, the absorbed energy was obtained as 6775 J which is 37% higher than the steel base tube. These results are important to show that the RWC process becomes more effective if it is applied to materials with higher strain hardening ability. The RWC process also increases the average force value, which can be defined as the ramp effect. Also, the process allows the folding initiates far from the ends of the tube for the RWC applied tube (Figure 9). This situation has critical importance in the aspect of being able to redirect the deformation beginning.



**Figure 8.** Force-displacement curves of the steel base and RWC applied tubes



**Figure 9.** The difference of deformation beginning of base and RWC applied tubes

As a result of the RWC process, the absorbed energy of aluminum and steel tubes increased by 23% and 33%

compared to the non-reinforced tube, respectively. This improvement in absorbed energy is also reflected in the SEA at the same ratio because there is not any increase in the weight of the tubes in the RWC process. Even some studies [7]–[15] reported an enhancement in the SEA of the tubular structures in the literature, it is concluded that reinforcement materials such as foams, fibers, etc were used in these studies. Providing an increase in both absorbed energy and the SEA without using any reinforcing element (without any increase in the weight of the tubular structure) also reveals the importance of RWC. Considering that improving the SEA is the most important achievement according to the crashworthiness of the energy-absorbing structures, it is possible to say that the RWC process is useful. It is also important that there is no milling or machining process in the RWC compare to similar studies [17]–[19] which could be caused decreasing in the tube wall stability. Finally, by using samples produced from materials with good hardening ability the RWC process will be contributed to the absorbed energy and the SEA at a higher rate.

**Author contributions:** Concept – Y.K.; Data Collection &/or Processing – Y.K.; Literature Search – Y.K.; Writing – Y.K.

**Conflict of Interest:** No conflict of interest was declared by the author.

**Financial Disclosure:** The authors declared that this study has received no financial support.


## REFERENCES (IEEE STYLE)


- [1] J. M. Alexander, "An approximate analysis of collapse of thin-walled cylindrical shells under axial loading," *Q. J. Mech. Applied Math.*, vol. 13, pp. 10–15, 1960.
- [2] D. Al Galib and A. Limam, "Experimental and numerical investigation of static and dynamic axial crushing of circular aluminum tubes," *Thin Walled Struct.*, vol. 42, pp. 1103–1137, 2004.
- [3] R. Baleh and A. Abdul-Latif, "Quasi-static biaxial plastic buckling of tubular structures used as an energy absorber," *Transactions of the ASME*, vol. 74, pp. 628–635, 2007.
- [4] Z. Tang, S. Liu, and Z. Zhang, "Analysis of energy absorption characteristics of cylindrical multi-cell columns," *Thin Walled Struct.*, vol. 62, pp. 75–84, 2013.
- [5] M. M. Yalçın, O. H. Mete, and K. Genel, "Axial crushing behavior of circular aluminum tubes," *Materials Testing*, vol. 61, no. 8, pp. 749–754, Aug. 2019.
- [6] A. Baroutaji, M. D. Gilchrist, D. Smyth, and A. G. Olabi, "Crush analysis and multi-objective optimization design for circular tube under quasi-static lateral loading," *Thin Walled Struct.*, vol. 86, pp. 121–131, 2015.
- [7] S. R. Guillow, G. Lu, and R. H. Grzebieta, "Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 43, pp. 2103–2123, 2001.
- [8] M. Langseth, O. S. Hopperstad, and A. G. Hanssen, "Crash behaviour of thin-walled aluminium members," *Thin Walled Struct.*, vol. 32, pp. 127–150, 1998.

- [9] M. M. Yalçın and K. Genel, "On the axial deformation characteristic of PVC foam-filled circular aluminium tube: Effect of radially-graded foam filling," *Thin Walled Struc.*, vol. 144, 2019.
- [10] M. R. Bambach and M. Elchalakani, "Plastic mechanism analysis of steel SHS strengthened with CFRP under large axial deformation," *Thin Walled Struc.*, vol. 45, pp. 159–170, 2007.
- [11] G. D. Hatzigeorgiou and D. E. Beskos, "Minimum cost design of fibre-reinforced concrete-filled steel tubular columns," *J Constructional Steel Res.*, vol. 61, pp. 167–182, 2005.
- [12] A. Henningsgaard and C. Yanchar, "Carbon fiber reinforced steel spaceframe techniques," *SAE Tech. Paper Series*, no. 724, pp. 1–10, 1998.
- [13] H. C. Kim, D. K. Shin, J. J. Lee, and J. B. Kwon, "Crashworthiness of aluminum / CFRP square hollow section beam under axial impact loading for crash box application," *Comp. Struc.*, vol. 112, pp. 1–10, 2014.
- [14] M. M. Yalçın and K. Genel, "On the axial crush performance of PVC foam-filled aluminum/CFRP hybrid circular tube," *Sakarya University J. Sci.*, vol. 23, no. 6, pp. 1154–1162, 2019.
- [15] T. Y. Reddy, R. J. Wall, M. Engineering, P. O. Box, and M. M. Iqd, "Axial compression of foam-filled thin-walled circular tubes," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 151–166, 1988.
- [16] S. Salehghaffari, M. Tajdari, M. Panahi, and F. Mokhtarnezhad, "Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading," *Thin Walled Struc.*, vol. 48, no. 6, pp. 379–390, 2010.
- [17] F. Mokhtarnezhad, S. Salehghaffari, M. Tajdari, "Improving the crashworthiness characteristics of cylindrical tubes subjected to axial compression by cutting wide grooves from their outer surface," *Int. J. Crashworthiness*, vol. 14, no. 6, pp. 601–611, 2009.
- [18] A. Darvizeh, M. Darvizeh, R. Ansari, A. Meshkinzar, "Effect of low density, low strength polyurethane foam on the energy absorption characteristics of circumferentially grooved thick-walled circular tubes," *Thin Walled Struc.*, vol. 71, pp. 81–90, 2013.
- [19] G. H. Daneshi, S. J. Hosseinipour, "Elastic-plastic theory for initial buckling load of thin-walled grooved tubes under axial compression". *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 125, pp. 826–832, 2002.
- [20] S. Lee, C. Hahn, M. Rhee, J. E. Oh, "Effect of triggering on the energy absorption capacity of axially compressed aluminum tubes," *Mater. Des.*, vol. 20, no. 1, pp. 31–40, 1999.

## ECU Oriented Simplified Diesel Engine Model

\*<sup>1</sup>Şenol Gülgönül, <sup>2</sup>Nedim Sözbir

<sup>1</sup>BMC Power Motor ve Kontrol Sistemleri, İstanbul, senol.gulgonul@bmcpower.com.tr 

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, Sakarya University, Sakarya, sozbir@sakarya.edu.tr 

Research Paper

Arrival Date: 29.04.2020

Accepted Date: 17.01.2021

### Abstract

In this study, a four-cylinder simplified diesel engine model has been developed with a model-based design approach. In the modeling of the diesel engine, the signals coming from and going to the ECU are taken as basis. The injection time coming from the ECU and the duty cycle of the high pressure fuel pump are the main inputs. The outputs of the diesel engine model to the ECU are the rail pressure, crank and cam signals generated according to engine speed. Measurement-based simplifications were used in creating the model. The model was created in the Simulink environment. It has been observed that the outputs obtained by simulation of the model created are similar to the results obtained in real engines and other experimental studies.

**Keywords:** Diesel engine model, model based design, idle speed control, common rail model, rail pressure control

### 1. INTRODUCTION

In the development of engine control units in the automotive sector, model-based design has replaced classical code-based development due to the advantages it brings [1]. It is widely used for modeling of diesel engines, engine development, calibration and Engine Control Unit (ECU) development activities. While detailed models that best represent the real engine are needed for engine and calibration development, more simplified control-oriented models are sufficient for ECU development.

Interfaces between ECU and the engine consist of sensors and actuators. Injectors and high-pressure fuel pump control valve are the two most important actuators. The injection time together with the rail pressure determines the fuel quantity injected into the cylinder. High-pressure fuel pump controls the fuel flow to the rail and ensures the rail pressure to be at the desired level. On the sensors side, the most important sensors are speed sensors that give the crank angle and engine speed, and the rail pressure sensor. Other temperature and pressure sensors are used to make corrections for optimization and to detect fault conditions.

Although many parameters such as in-cylinder pressures, fuel pump fluctuations depending on crank angle are modeled in detailed engine models, these parameters do not have a direct input to the ECU [2]. In the studies on common rail modeling, very detailed injector and fuel pump models are based on [3]. Control oriented models have been simplified [4]. At the datasheet of fuel pumps It can be seen easily that the fuel pump flow rate is linearly proportional to the engine speed [5]. Again, many detailed studies have been carried out on injector simulation. A simple relationship is observed in the small number of models based on measurement where the fuel

quantity discharged from the injector is proportional to the injection duration and the rail pressure [6].

Detailed engine models for ECU development are commercially available [7]. The Hardware-in-Loop (HIL) systems on which the engine model is running can be used as an ECU development environment [8]. Model-based commercial ECU development kits are also available on the market [9-10]. Commercial HIL systems are not widely used for educational purposes or by students due to their high cost.

In this study, an engine model with sufficient input output for idle speed control, rail pressure control and engine speed limitation, which are the basic functions of ECU, has been developed. ECU controls the duty cycle of the fuel pump with the proportional integral derivative (PID) output for the control of the rail pressure. Rail pressure sensor is sufficient as ECU input. Idle speed control and engine speed limiter controls are realized by controlling the torque demand with again PID. The translation of engine torque request from the ECU is performed using injection duration. The input that ECU needs for idle speed and engine speed limiter controllers is the engine speed. Crank-Cam signals and injection signals are also generated in accordance with the model.

### 2. MODEL DEVELOPMENT

ECU model and engine are modeled as separate blocks. Figure 1 shows overall view of the model. The engine model takes the injection time and fuel pump duty cycle inputs calculated by the ECU. The engine produces torque according to the amount of fuel quantity taken and rotates the crankshaft. The high fuel pump in the engine model is also controlled by duty cycle input. The only input from the user to the ECU is the accelerator pedal.

\*Corresponding Author: Electronic Control Department, BMC Power Motor ve Kontrol Sistemleri, İstanbul, 34906, Turkey, senol.gulgonul@bmcpower.com.tr, Tel:+90 0534 895 7449

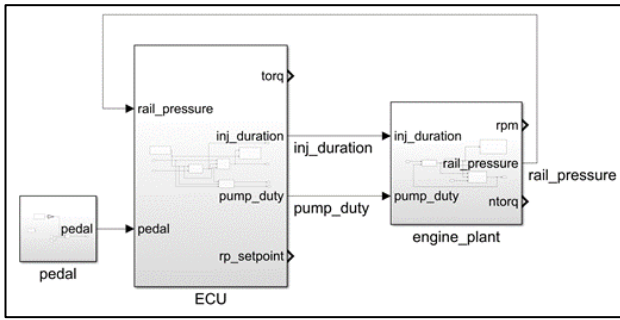


Figure 1. Overall view of the model

2.1. Engine Model

In this study, a 4-cylinder diesel engine is modeled. In the engine model, a torque proportional to the injection quantity is produced [11]. Engine speed is realized depending on engine inertia with the produced torque. Crank and cam signals are generated by a written s-function according to engine speed. In the common rail model, it is modeled to give the rail pressure output. Engine model is shown in Figure 2.

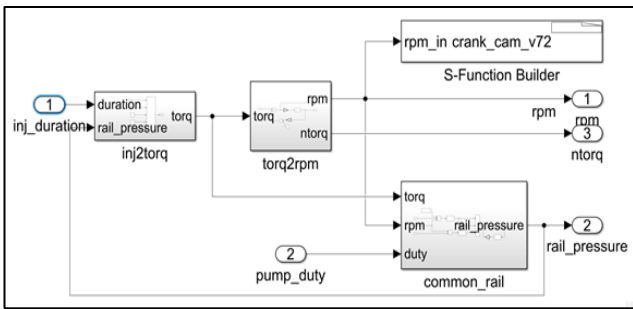


Figure 2. Engine model

In diesel engines, the brake specific fuel consumption (BSFC) value usually varies between 200-260 g/kWh depending on the engine speed. BSFC is defined as the amount of fuel consumed per power. BSFC can be formulated by writing the product of torque and engine speed instead of power and transforming radian to rpm. If the BSFC value is known, the fuel consumption can be calculated.

The brake specific fuel consumption (BSFC) value can be calculated by Eq. 1.

$$BSFC = \frac{Q_i}{T_e \times N_e} \times \frac{2 \times \pi}{60 \times 60000} \quad (\text{g/kWh}) \quad (1)$$

where,  $Q_i$  is amount of fuel consumed per minute,  $T_e$  is engine torque and  $N_e$  is engine speed.

The fuel consumed per minute ( $Q_i$ ) can be calculated by Eq. 2.

$$Q_i = \frac{2 \times \pi \times BSFC}{60 \times 60000} \times T_e \times N_e \quad (\text{g/min}) \quad (2)$$

The relationship between fuel consumed per engine cycle ( $Q_c$ ) and fuel consumed per minute ( $Q_i$ ) depends on engine speed. Here the ratio between torque and fuel injected per cycle can be reached. Since the BSFC value changes within a narrow range, it can be assumed constant. In this case, it will be obtained that the engine torque ( $T_e$ ) is proportional to the amount of fuel quantity consumed per cycle ( $Q_c$ ). The amount of fuel quantity consumed per cycle ( $Q_c$ ) is calculated by Eq.3.

$$Q_c = \frac{1000 \times Q_i}{2 \times N_e} = \frac{BSFC \times T_e \times \pi}{60 \times 60} \quad \left( \frac{mg}{cycle} \right) \quad (3)$$

The engine torque ( $T_e$ ) is calculated by Eq.4.

$$T_e = \frac{3600}{\pi \times BSFC} \times Q_c = K_q \times Q_c \quad (Nm) \quad (4)$$

The amount of fuel consumed per cycle  $Q_c$  is proportional to the rail pressure ( $P_r$ ) and injection duration ( $t_i$ ) [6, 11]. Number of cylinders ( $C_y$ ) has to be multiplied, too. The  $K_i$  coefficient depends on the fuel injection capacity of the injector used and is provided by the manufacturer. The amount of fuel consumed per cycle  $Q_c$  can be calculated by Eq. 5.

$$Q_c = C_y \times K_i \times P_r \times t_i \quad (mg/cycle) \quad (5)$$

In this way, engine torque ( $T_e$ ) can be calculated based on rail pressure and injection time (Eq. 6).

$$T_e = K_q \times C_y \times K_i \times P_r \times t_i \quad (Nm) \quad (6)$$

Injection duration to torque conversion is shown in Fig. 3.

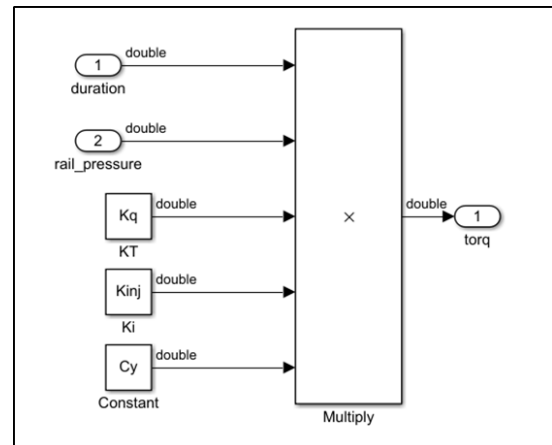


Figure 3. Injection duration to torque conversion

In this study, it is assumed that engine has a fixed geometry turbocharger and the turbocharger is not controlled. Since the engine cannot get enough air at low rpm, it will not be able to return all the calculated injection quantity to torque. For this reason, the injection duration before 1200 rpm was reduced by the ECU in proportion to rpm. In this way, the rpm torque curve obtained as a result of the simulation reflects a real engine better. Torque vs engine speed curve of the simulated engine is shown in Fig 4.

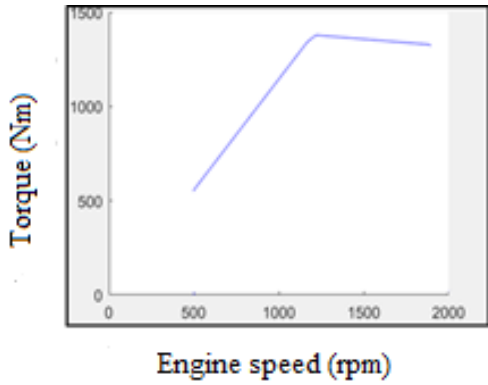


Figure 4. Torque vs engine speed curve

The engine speed  $N_e$  can be calculated by integrating the angular velocity obtained by dividing the torque generated by the engine inertia  $I_e$ . Radian rpm conversion should be done. The friction force  $F_e$  that increases in proportion to the speed of the engine is subtracted from the torque generated by combustion [12].

$$N_e = \frac{60}{2\pi} \times \int \frac{T_e - F_e}{I_e} dt \quad (rpm) \quad (7)$$

$$F_e = F_o + K_e \times N_e \quad (Nm) \quad (8)$$

Torque to engine speed conversion is shown in Fig. 5.

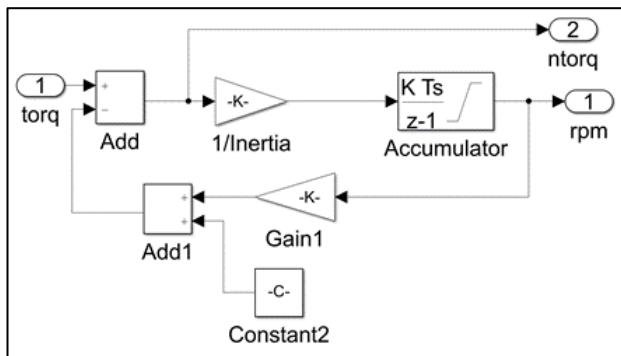


Figure 5. Torque to engine speed conversion

## 2.2. Common Rail Model

Rail pressure  $P_r$  is proportional to the integral of the fuel pumped from the high pressure pump  $Q_p$  minus the fuel discharged at the injector  $Q_i$  and the fuel leaking  $Q_l$  [4]. The amount of fuel provided by the pump must be higher than the maximum value of the fuel injected by the injectors. Fuel leaking back from the injector system can be taken as  $K_l$  percentage (typically 10%) of the fuel supplied from the pump. The amount of fuel coming out of the pump is controlled by changing the duty cycle  $D_u$  of the fuel metering valve. The bulk modulus  $K_f$  value of diesel fuel is expressed depending on the rail pressure [4]. Rail volume  $V_r$  is constant in  $cm^3$ .  $K_u$  is the coefficient required to convert fuel flows from  $g/min$  to  $m^3/s$ .

$$P_r = K_u \times \frac{K_f}{V_r} \times \int (Q_p - Q_i - Q_l) dt \quad (bar) \quad (9)$$

$$K_f = 12000 \times (1 + 12 \times P_r) \quad (bar) \quad (10)$$

$$Q_i = \frac{2 \times \pi \times BSFC}{60 \times 60000} \times T_e \times N_e \quad (g/min) \quad (11)$$

$$Q_p = D_u \times \frac{2 \times \pi \times BSFC}{60 \times 60000} \times T_{emax} \times N_e \quad (g/min) \quad (12)$$

$$Q_l = K_l \times Q_i \quad (g/min) \quad (13)$$

Common rail model is shown in Fig.6.

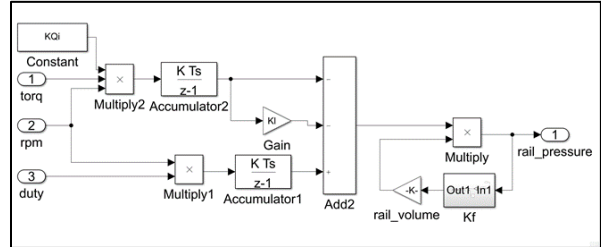


Figure 6. Common rail model

## 2.6 Simulation Results

In the developed model, a diesel engine with 1300 Nm torque is simulated. Engine inertia is assumed to be  $2.5 \text{ kg/m}^2$ . The BSFC value has been assumed constant as  $240 \text{ g/kWh}$ .

Diesel engine control can be basically divided into three regions as idle speed control, torque control and engine speed limiter. As soon as the engine starts, the idle speed control is activated and keeps the engine at the specified idle speed if the accelerator pedal is not pressed. In this area, the PID idle speed controller sets the torque demand. By pressing the accelerator pedal, the idle speed control is released and the torque control zone is reached. In the torque control zone, the torque demand is entirely dependent on the accelerator pedal. Engine speed should not exceed the determined upper limit. This limitation is provided by the PID controller. Figure 7 shows engine control regions.

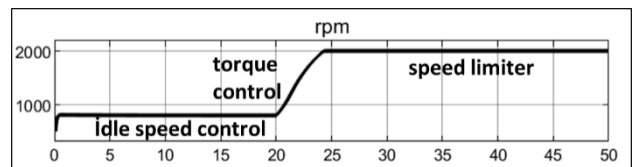


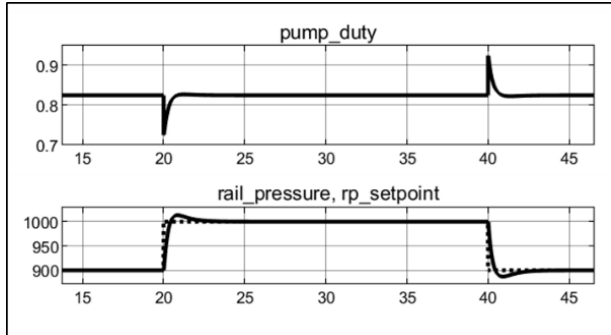
Figure 7. Engine control regions

In the developed model, the engine starts to operate at 500 rpm. It is determined as the idle speed zone between 0-1200 rpm. Idle speed set point is determined as 800 rpm. The engine maximum speed is selected as 2000 rpm. When the engine exceeds 1900 rpm, the PID controller is activated and keeps the engine at 2000 rpm.

Rail pressure control is very important for a stable injection. Rail pressure can be followed by PID controller to set points determined with a map. Two configurations tested in a similar study were simulated [13]. In the first configuration, when the engine is in the idle speed control zone, it has been shown that the set points are successfully followed at the end of the step

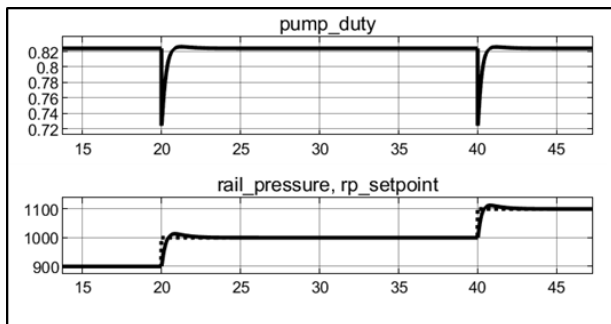


test simulation, which turns from 900 bar to 1000 bar and again to 900 bar. The variation of the pump's duty cycle has the same pattern as in the comparison study. [13]. Figure 8 shows step change simulation at 800 rpm (rail pressure (straight) and set points (dotted) at idle speed).



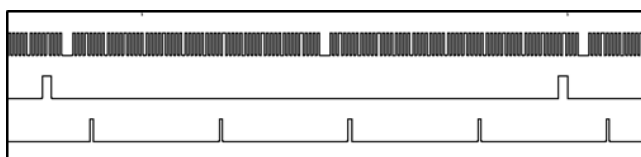
**Figure 8.** Step change simulation at 800 rpm (rail pressure (straight) and set points (dotted) at idle speed)

In the second configuration included in the study of Hong et al. is the rail pressure change due to the increased pressure demand. In this configuration the engine is at 800 rpm in idle speed mode. Pressure set points are changed to 900, 1000 and 1100 bar. It is seen that the rail pressure control algorithm can follow the demand by changing the duty cycle according to the demand. Fig. 9 shows step follower simulation at 800 rpm (rail pressure (straight) and set points (dotted)).



**Figure 9.** Step follower simulation at 800 rpm (rail pressure (straight) and set points (dotted)).

Crank and cam signals are generated according to the rpm value formed in the engine model. Authors had similar study for cam and crank signal generation [14]. Injection signals are also created according to the injection duration value calculated in the model (see Fig. 10).



**Figure 10.** Crank (top), cam (middle) and injection (bottom) signals

### 3. CONCLUSIONS

In this study, a diesel engine model has been developed that can provide the necessary inputs and outputs for the basic functions of the ECU. The developed model is sufficient to develop and test the ECU's idle speed control, rail pressure control and engine speed limiter algorithms. There is essentially no need for a very detailed engine model in developing engine control software and testing algorithms. However, the model must be able to simulate real engine behavior. It has been observed that the outputs obtained by the simulation of the developed model are similar to the results obtained in real engines and other empirical model studies.

### REFERENCES


- [1]. T. Erkkinen, and K. Zwaanenburg,, "A Seamless Implementation of Model-Based Design Applied to a New Fuel Control Feature for an Existing Engine ECU," SAE Technical Paper 2006-01-0612, 2006.
- [2]. Schulze, T., Wiedemeier, M., and Schuette, H., "Crank Angle-Based Diesel Engine Modeling for Hardware-in-the-Loop Applications with In-Cylinder Pressure Sensors," SAE Technical Paper 2007-01-1303, 2007, <https://doi.org/10.4271/2007-01-1303>.
- [3]. Zeng, Jiyuan,"Modelling and Simulation of the Diesel Engine Injection Systems", M.S. Thesis, 2019.
- [4]. Lino, Paolo & Maione, Bruno & Rizzo, Alessandro. "A control-oriented model of a Common Rail injection system for diesel engines". IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA. 1. 7 pp. - 563. 10.1109/ETFA.2005.1612572. (2005).
- [5]. URL: [http://www.goapr.co.uk/products/hpfp\\_20t\\_ea888\\_gen3.html](http://www.goapr.co.uk/products/hpfp_20t_ea888_gen3.html) (Accessed: 18-Dec-2020).
- [6]. Tsai, Wen-Chang & Zhan, Tung-Sheng. (2018). An Experimental Characterization for Injection Quantity of a High-pressure Injector in GDI Engines, Journal of Low Power Electronics and Applications, 8. 36. 10.3390/jlpea8040036.
- [7]. URL:[https://www.dspace.com/en/inc/home/products/sw/a\\_utomotive\\_simulation\\_models/produkte\\_asm/asm\\_engine\\_models.cfm](https://www.dspace.com/en/inc/home/products/sw/a_utomotive_simulation_models/produkte_asm/asm_engine_models.cfm) (Accessed: 18-Dec-2020).
- [8]. URL: <https://www.etas.com/en/products/es4000-es5000-hil-hardware.php> (Accessed: 18-Dec-2020)
- [9]. URL: <https://www.woodward.com/> (Accessed: 30-Nov-2020)
- [10]. URL: <https://www.pi-innovo.com/> (Accessed: 30-Nov-2020)
- [11]. Samuel, Jensen & Muthyala, Paul Pramod & Ramesh, A. & Thomas, Anand & Prasad, N. & Kumarasamy, A. "Development of a Fuel Quantity based Engine Control Unit Software Architecture", Defence Science Journal, 69. 203-207. 10.14429/dsj.69.14420. (2019).
- [12]. Knauder, Christoph & Allmaier, Hannes & Sander, David & Sams, Theodor. "Investigations of the Friction Losses of Different Engine Concepts, Part 1: A Combined Approach for Applying Subassembly-Resolved Friction Loss Analysis on a Modern Passenger-Car Diesel Engine" Lubricants, 7. 39. 10.3390/lubricants7050039. (2019).
- [13]. Hong, Seungwoo & Shin, Jaewook & Sunwoo,

MyoungHo, “Common rail pressure controller for diesel engines using an empirical model” 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2012. 887-892. 10.1109/VPPC.2012.6422700. (2012).

[14]. Gulgonul, Senol & Sözbir, Nedim “Crank Cam Signal Generator Using NXP Model Based Design Toolbox”. Academic Perspective Procedia, 2, 687-695. 10.33793/acperpro.02.03.75. (2019).

## Düzlem Çelik Çerçeve Perde Tipinin ve Perde Elemanının Performansa Olan Etkilerinin Monotonik Yüklemeyle İncelenmesi

\*<sup>1</sup>Mustafa Berker Alicioğlu

<sup>1</sup>Manisa Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, İnşaat Yüksek Mühendisi, berker.alicioglu@gmail.com, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 27.07.2020

Kabul Tarihi: 06.01.2021

### Öz

Günümüzde çelik yapılar, geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu nedenle, dikkatli bir şekilde tasarlanmaları gerekmektedir. Bu çalışma ile yapı tasarımında hangi çelik perde tipinin ve elemanının kullanılması gerektiği yönünde önerilerde bulunulmuştur. Ele alınan yapı, düzlem çelik çerçeveden oluşmaktadır. Tüm çerçeveler, AISC 360-10 standardındaki ASD yaklaşımına göre tasarlanmıştır. Düzlem çelik çerçeve, üç açıklıklı ve dört katlıdır. Dört çelik perde tipi ve üç perde elemanı kullanılmıştır. Çelik perdeler, orta açıklıktadır. Monotonik yük şablonu olarak doğrusal dinamik analiz ile elde edilen mod şekilleri kullanılmıştır. Doğrusal olmayan statik analiz yöntemi kullanılarak çerçeve performans eğrileri monotonik yükleme ile çizilmiştir. Perde tiplerinin ve perde elemanlarının çerçeve performansına olan etkileri araştırılmıştır. Performans eğrileri ve literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırma yapılmıştır. Çalışma sonucunda, perde tipi olarak K ve X çapraz perde tiplerinin perde elemanı olarak boru ve kutu kesitlerin kullanılması önerilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Çelik perde, Doğrusal olmayan statik analiz, Çelik perde elemanı, Performans eğrisi.

## Investigation of the Effects of Shear Wall Type and Shear Wall Member on Performance in Plane Steel Frame with Monotonic Loading

\*<sup>1</sup>Mustafa Berker Alicioğlu

<sup>1</sup>Manisa Provincial Directorate of Environment and Urbanization, Civil Engineer MSC, berker.alicioglu@gmail.com

### Abstract

Nowadays steel structures have a wide range of applications. Therefore, they need to be carefully designed. With this study, suggestions were made as to which steel shear wall types and their members should be used in structure design. The structure under consideration consists of a plane steel frame. All frames are designed according to ASD approach in AISC 360-10 standard. The plane steel frame has three spans and four stories. Four steel shear wall types and three shear wall members are used. Steel shear walls are in the middle span. As monotonic load template, mode shapes obtained by linear dynamic analysis are used. Using the nonlinear static analysis method, structure performance curves are drawn with monotonic loads. The effects of shear wall types and shear wall members on frame performance were investigated. Comparison was made with performance curves and similar studies in the literature. As a result of study, it is recommended to use as shear wall types of K and X also as shear wall members of pipe and box sections.

**Keywords:** Steel shear wall, Nonlinear static analysis, Steel shear wall member, Performance curve.

### 1. GİRİŞ

Çelik yapılar, günümüzde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bina, endüstri, köprü, üst geçit, hava alanı, kule, trafik sinyalizasyonu, depo, spor tesisi, hangar, gökdelen gibi yapı tiplerinde kullanılırlar. Yapısal çelik malzemesi, belirli standartlar kapsamında fabrikalarda üretilir. Homojen ve denetimi kolay bir yapı malzemesidir. Yerinde dökme betonarme ve ön üretilmiş betonarme yapılara oranla

çok hafiftirler ve imalat süreçleri daha kısa olmaktadır. Ancak yangına karşı dayanımları azdır ve özel tedbirler alınması gerekmektedir [1]. Çelik yapıdaki taşıyıcı elemanlar, hafif ve narin oldukları için dinamik yükler altında titreşim hareketi yaparlar. Stabilite bağlantıları ve perdeler kullanılmazsa bu titreşim hareketleri kontrol edilemez. Yapıya stabilite bağlantılarının ve perdelerin eklenmesiyle titreşimleri kontrol altına almak mümkündür. Genel olarak yapı tasarımında yapının dinamik yükler etkisi

\*Sorumlu Yazar: Manisa Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, berker.alicioglu@gmail.com / Manisa Provincial Directorate of Environment and Urbanization, berker.alicioglu@gmail.com

altındaki davranışının ne olacağını tahmin etmek önem arz etmektedir. Doğru yapılan tahmin ile olası bir deprem esnasında yapıda can ve mal kaybının önüne geçilebilir. Çelik yapıların dinamik yükler altındaki davranışlarının anlaşılması ve doğrusal olmayan statik analiz yöntemine ilişkin araştırmacılar tarafından pek çok çalışma yapılmıştır.

[2]' de sismik yük altındaki moment aktaran çelik çerçevelerin deformasyon taleplerinin tahmin edilmesine yönelik doğrusal olmayan statik işlemlerin güvenilirliği araştırılmıştır. Araştırmada hem düzenli hem de düzensiz çelik çerçeveler ele alınmıştır. Doğrusal olmayan statik işlemlerdeki yaklaşımlar, çerçevelerin farklı ivme kayıtları altındaki çözümlenmeleri ile doğrulanmıştır.

[3-5] ile düzenli ve düzensiz yapıdaki düzlem çelik çerçevelerin performans analizleri yapılmıştır. Performans analizi, plastik mafsallı varsayımı yapılarak ikinci mertebeye etkileri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007)' de değinilen merkezi çelik çaprazlı perde tipleri ele alınmıştır. Performans analizleriyle perde elemanı kesitine ve perde tiplerine ilişkin araştırma yapılmış ve önerilerde bulunulmuştur.

[7] ile üç, altı ve dokuz katlı düzlem X çaprazlı çelik çerçeveler üzerinde kolon mesnet sınır şartlarının sismik yük azaltma katsayısına olan etkileri incelenmiştir. Mesnet şartlarının çerçeve periyodunu önemli derecede etkilemediği tespit edilmiş ancak mesnet şartlarının doğrudan yapı davranışını etkilediği belirlenmiştir.

[8] ile literatürde yapıların sismik yükler altındaki davranışlarının doğrusal olmayan statik yöntemler ile tahmin edilebileceğinin yer aldığı belirtilerek monotonik yükler ile performans analizi yapıldığı bildirilmiştir. Ancak sismik yüklerin tekrarlı etkiye sahip olduğu ve performans analizinin döngüsel yükler ile yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Uzun ya da orta süreli depremlerde döngüsel performans analizinin yapısal davranışı doğru tahmin etmede kullanılabileceği bildirilmiştir.

[9]' de katlar arası müsaade edilen öteleme limitlerine göre tasarlanmış X çapraz çelik çerçeveli yapıların performans analizleri yapılmıştır. X çaprazlar, farklı aks aralıklarına konularak konfigüre edilmiştir. Konfigürasyonla elde edilen farklı yapıların performansları kıyaslanmış ve en fazla taban kesme kuvveti karşılayan konfigürasyonlar belirlenmiştir.

[10] ile dış merkez çaprazlı çelik çerçeve yapılarıdaki çapraz elemanların dönme kapasitelerinin, yapısal kapasiteyi belirlediği bildirilmiştir. Standartlar bu dönme kapasitelerini, basitleştirilmiş el hesaplamalarından gelişmiş doğrusal olmayan analizlere kadar tahmin yolu sunmaktadır. Son çalışmalar, Yeni Zelanda Çelik Endüstrisi tarafından önerilen elastik analiz yaklaşımıyla tahmin edilen yapısal davranışın konservatif olduğunu göstermektedir. Doğrusal olmayan statik analiz ile çelik

endüstrisinin yaklaşımları karşılaştırılarak dış merkez çaprazlı çelik çerçeve tasarımıdaki dönme kapasitelerinin hesap yönteminin değiştirilmesi önerilmiştir.

[11] ile çelik yapıların rüzgâr ve deprem gibi yanal yük etkilerine maruz kaldıkları belirtilerek söz konusu yüklere karşı yapıların yanal rijitliklerinin büyük öneme sahip olduğu bildirilmiştir. Çalışmada çeşitli çelik çapraz tipleri ve yapılar üzerinde elastik rijitlik faktörüne (K) ilişkin karşılaştırma yapılmıştır. Plastik mafsallı tanımlı ile statik itme analizi kullanılmıştır. Sonuç olarak kat sayısındaki artışın K değerini azalttığı, açıklık mesafesindeki artışın K değerini arttırdığı belirlenmiştir. Bunun dışında, çelik çapraz kullanımının K değerini önemli ölçüde arttırdığı bildirilmiştir.

[12] ile statik yükler altındaki çelik çerçeveli yapıların plastik mafsallı modeline ilişkin genel bilgiler verilmiştir. Hem rijit plastik hem de elastoplastik mafsallar ele alınmış avantajları ve dezavantajları belirlenmiştir. Ayrıca üç boyutlu plastik mafsallı nasıl modellenmesi gerektiği üzerinde durulmuştur.

[13] ile dışmerkez diyagonal çelik çaprazlar, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar (ÇYTHYE-2018) yönetmeliğine uygun şekilde teşkil edilmiştir. Ayrıca, dışmerkez diyagonal çaprazların deprem etkisi altındaki yapısal davranışları Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) esaslarına göre eşdeğer deprem yükü çözüm yöntemi kullanılarak irdelenmiştir. Tasarım örneği olarak; X yönünde altı, Y yönünde üç açıklığa sahip beş katlı çapraz eklenmemiş bir çelik yapı ve dışmerkez diyagonal çelik çaprazlar eklenmiş bir çelik yapı olmak üzere iki yapı modeli karşılaştırılmıştır.

[16] ile İstanbul'da rastgele seçilen bir koordinatta yer alan beş katlı simetrik çelik bir binanın ülkemizde yürürlükte olan (ÇYTHYE-2018) ve (TBDY-2018) nezdinde çaprazlı ve çaprazsız tasarımı ve boyutlandırılması yapılarak deprem etkisi altındaki performansı incelenmiştir. Bina ağırlığı ve kat ötelemeleri yönünden kıyaslama yapılarak çapraz kullanımının önemi vurgulanmıştır.

[17] ile beş katlı, moment aktaran çelik çerçevelerden oluşan bir bina ile dışmerkez "V" çaprazlı çelik çerçevelerden oluşan bir binanın düşey yük ve deprem etkileri altında tasarımı yapılarak yapısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

[18] ile dışmerkez diyagonal çelik çaprazların deprem etkisi altında performansları (TBDY-2018) esaslarına göre Eşdeğer Deprem Yükü çözüm yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, çalışmada beş katlı X yönünde altı Y yönünde üç açıklıklı çapraz eklenmemiş çelik bir bina ve dışmerkez diyagonal çelik çaprazlar eklenmiş çelik bir bina olmak üzere iki adet farklı model oluşturulmuştur. Bu iki yapı modelinin taşıyıcı sistemleri, oluşan yer değiştirmeler, periyotlar ve yapı ağırlıkları bakımından birbirleri ile kıyaslanmıştır.

[19] ile beş katlı, moment aktaran çelik çerçevelerden oluşan bir bina ile dışmerkez “V” çaprazlı çelik çerçevelerden oluşan bir binanın düşey yük ve deprem etkileri altında tasarımı yapılarak yapısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, dışmerkez “V” çaprazlı binanın deprem etkisi altında en üst kat ötelenmesinin daha az olduğu ve buna bağlı olarak yapıyı oluşturan kesitlerin küçüldüğü görülmüştür.

Bu çalışma ile de tek bir düzlem çelik çerçevede dört farklı perde tipi ve üç farklı perde elemanı ele alınmıştır. Perdeler orta açıklıkta olup perde tipleri için (TBDY-2018)’ den yararlanılmıştır. Çerçevelerin mod şekilleri belirlenmiş ve birinci mod şekli yatay yük şablonu olarak kullanılmıştır. Doğrusal olmayan statik analiz yöntemi ile performans eğrileri üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Çerçeveler, göçme öncesine kadar yüklenmiştir.

## 2. DOĞRUSAL OLMAYAN STATİK ANALİZ

Doğrusal olmayan statik analiz, malzeme davranışının ve geometrik şekil değiştirmelerin doğrusal olmadığı yapı sistemleri için çeşitli amaçlar kapsamında kullanılır.

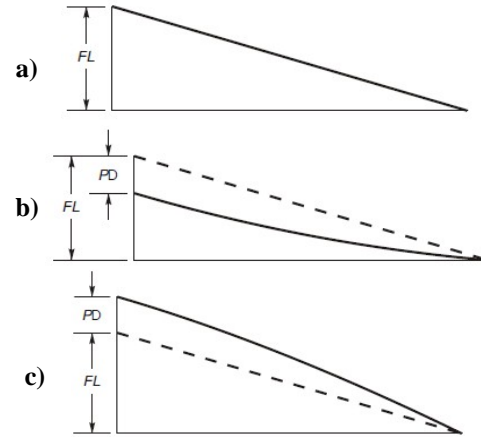
İkinci mertebeli etkilerinin önem taşıdığı yapı sistemlerindeki doğrusal analizlerin süperpoze edilmesinde, inşaat aşamalarında zaman içerisinde sünme, büzülme etkilerinin önemli olduğu yapı sistemlerinin tasarımında, sadece çekme bölgesinde çalışan yapısal elemanlarının bulunduğu yapı sistemlerinde doğrusal olmayan statik analizden yararlanılır [20].

Ayrıca kablolu yapı sistemlerinde, yapı sistemleri için statik itme ve geçmeli burkulma analizinin yapılmasında, doğrusal olmayan doğrudan integrasyon zaman tanım alanı analizlerinin ilk koşullarının tahmin edilmesinde, malzemenin ve geometrik şekil değişimlerinin doğrusal olmaması durumunun statik analizde göz önüne alınmasında doğrusal olmayan statik analiz kullanılır [20].

Yapı malzemesinin doğrusal olmayan davranışı, yapı sistemlerini oluşturan elemanların statik, yarı statik ve dinamik yükler etkisi altındaki davranışlarını doğrudan etkiler. Bağlantı ve mesnet elemanlarındaki çeşitli doğrusal olmayan davranış, yapı sistemini oluşturan tek boyutlu çubuk elemanların çekme ve/veya basınç kuvveti limitleri ve çubuk elemanlardaki plastik mafsallık davranışı doğrudan yapı malzemesinin doğrusal olmayan davranışıyla ilgilidir. Geometrik şekil değiştirmelerin doğrusal olmayan davranışı, ikinci mertebeli ve büyük yer değiştirme etkilerinin yapı sisteminin sistem rijitlik matrisine yansıtılmasıyla dikkate alınır [21].

Çekme kuvveti altında geometrik şekil değiştirmeler, eğilme momentinde ikincil bir azalışa neden olurken basınç kuvveti ikincil bir artışa neden olur. Yapılardaki çekme ve basınç kuvvetleri, geometrik şekil değiştirmelere neden olmaktadır. Şekil 1 ile konsol bir giriş üzerinde P-delta etkisi olarak da adlandırılan ikinci mertebeli etkilerinin

moment diyagramına olan etkileri gösterilmiştir. Çalışma kapsamında çelik perde tipinin ve perde elemanının yapı performansına olan etkisi incelenmiştir. Doğrusal olmayan analiz yöntemiyle çerçevelerin statik itme analizi yapılarak yapı performans eğrileri çizilmiştir. Analizde yapı elemanları için [22]’ deki Tablo 5-6 ile verilen plastik mafsallık tanımlamalarından yararlanılmıştır.



Şekil 1. a) P-delta etkisi olmayan moment eğrisi, b) Çekme kuvveti ile P-delta etkili moment eğrisi, c) Basınç kuvveti ile P-delta etkili moment eğrisi [20]

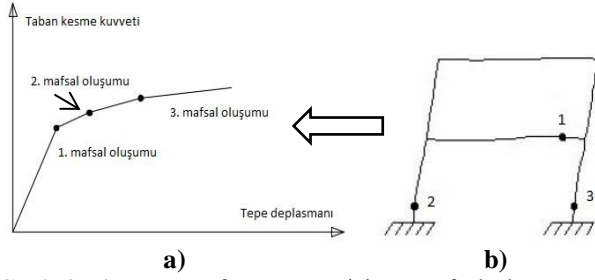
### Statik İtme Analizi

Statik itme analizi, yapı sistemlerinin sismik yüklere karşı performans tabanlı tasarım yöntemlerinden biri olarak tanımlanabilir [20]. Analizin amacı, yapı sisteminin dayanım ve deformasyon kapasitesini tahmin ederek tasarım depremindeki performansını belirlemektir [23].

Analizin yapılabilmesi için yapı sistemindeki plastik mafsallık oluşum noktalarının tayin edilmesi ve bu noktalara plastik mafsallık tanımlanması gerekmektedir. Plastik mafsalları tanımlanmış yapı sistemi için doğrusal olmayan statik analiz yük durumları tanımlanır.

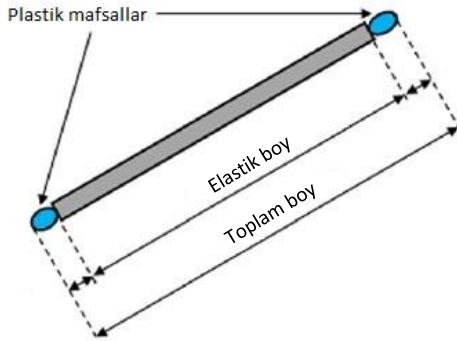
Analize önce düşey yükleme ile başlanır. Yapı sistemini oluşturan elemanların düşey yükler altında dayanımlarını kaybetmemeleri gerekmektedir. Düşey yükleme altında yapılan çözümleme ile elemanlardaki gerilme sıfırdan farklı olacaktır. Bir sonraki adım, yatay yük altında çözümlemesidir. Yapı sistemindeki elemanlar, belirli bir yatay yük seviyesine kadar doğrusal davranış sergilerler. Artan yatay yük altında yapıyı oluşturan elemanlardan birinde ya da bir kaçında elastik yük taşıma kapasitesi aşılır. Elastik yük taşıma kapasitesi aşılacak elemanda ya da elemanlarda plastik mafsallık oluştuğu kabul edilir. Yapı sisteminin dayanımını kaybettiği seviyeye kadar yapıya artan yatay yük uygulanır. Artan yatay yüklerin yapı sistemindeki toplam taban kesme kuvveti ile bu kuvvete karşılık gelen tepe deplasman çiftlerinden oluşan eğri çizilir. Çizilen bu eğriye yapı performans eğrisi ya da statik itme eğrisi denir. Böylelikle artan yatay yükler altında yapı

sistemindeki elemanların dayanım seviyeleri ve dayanımlarını kaybetme sıraları tahmin edilebilir.



**Şekil 2.** a) Yapı performans eğrisi ve mafsall oluşum sırası, b) artan yatay yükler altında deforme olmuş çerçeve ve mafsall oluşum sırası

Şekil 2 ile düzlem çerçeve bir yapının artan yatay yükler altındaki mafsall oluşum sıralamasının gösterimi yapılmıştır. Birinci mafsall oluşmasıyla yapı, doğrusal olmayan davranış göstermektedir. Her mafsall oluşumunda yapı performans eğrisi bükülmektedir. Çelik yapılarda plastik mafsallar, eleman bazında düşünüldüğünde çok büyük olmayan bölgesel noktalarda meydana gelirler. Bu nedenle mafsallaşmanın elemanın belirli bir kesitinde oluşacağı varsayımı yapılabilir.



**Şekil 3.** Plastik mafsall varsayımı [12]

Plastik mafsall varsayımı, elemanın belirli noktalarının mafsallaşacağı, mafsallaşmayan diğer bölgelerinin elastik davranacağı varsayımına dayanmaktadır. Yapı malzemesinin doğrusal olmayan davranışı, plastik mafsall varsayımıyla statik itme analizine ilave edilmiş olur. Analizde ikinci mertebe etkilerinin denge denklemlerine ilave edilmesiyle de geometrik şekil değişimleri dikkate alınır.

Ancak tasarımı yapılacak yapı sistemi için plastik mafsall oluşma potansiyeli olan noktaların doğru tayin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Aksi durumda sismik yükler altındaki yapı davranışı, yanlış tahmin edilebilir.

## 2.2. Modal Analiz

Modal analiz, doğrusal bir analiz yöntemi olmakla birlikte yapıların titreşim modlarının belirlenmesinde kullanılır. Bu modlar, yapı davranışının anlaşılmasını sağlar. Ayrıca mod birleştirme ve modal zaman tanım alanı yük durumları için

modal süperpozisyonun temelini oluştururlar. Analizin modal yük durumuna göre iki tipi vardır. Bunlardan birincisi öz vektör analizi ikincisi ise ritz vektör analizidir [24].

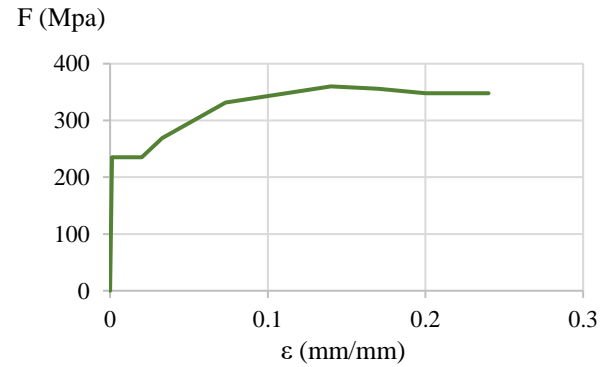
Ritz vektör analizi, belirli bir yükleme tarafından uyarılan modları bulmaya çalışır. Öz vektör analizi, yapının sönümsüz serbest titreşim mod şekillerini ve frekanslarını belirler. Genel öz değer problemi, denklem (1)' de yer almaktadır.

$$[K - \Omega^2 M] \phi = 0 \quad (1)$$

Denklem (1) ile gösterimi yapılan eşitlikte K rijitlik matrisini,  $\Omega^2$  öz vektör diyagonal matrisini, M diyagonal kütle matrisini ve  $\phi$  mod şekillerini temsil etmektedir [20].

## 3. NÜMERİK ÇALIŞMA

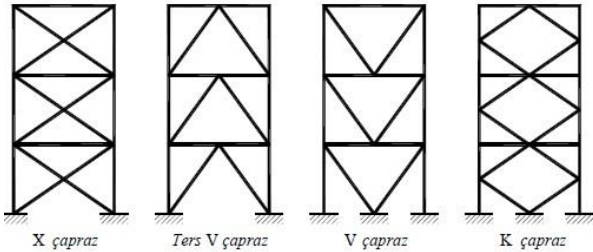
Çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanan yapısal analiz ve tasarım yapabilen Sap 2000 bilgisayar programı kullanılmıştır [25]. Yapı, düzlem çelik çerçeveden oluşmaktadır. Çerçeve, üç açıklıklı ve dört katlıdır. Kolonlar arası mesafe 5 metre, kat yüksekliği 3 metredir. Çerçevenin gösterimi, Şekil 6 ile yapılmıştır. Perdeler orta açıklıklıdır. Yapının zemine ankastre bağlandığı varsayılmıştır. Çerçeveler, eleman ve sistem bazında kusursuzdur. Malzeme olarak S235 yapısal çelik malzemesi kullanılmış olup Şekil 4 ile basınç ve çekme bölgelerindeki gerilme (F) - şekil değiştirme ( $\epsilon$ ) grafiğine yer verilmiştir. Grafiğin çizilmesinde Yun ve diğ. (2017) de yer alan bağlantılardan faydalanılmıştır [26].



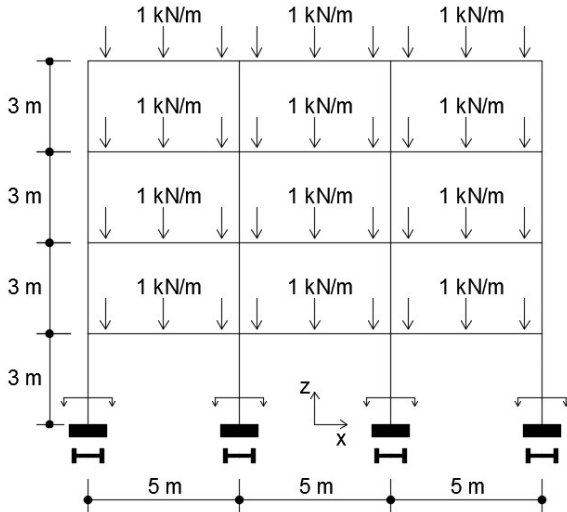
**Şekil 4.** S235 yapısal çeliğin gerilme - şekil değiştirme grafiği

Çalışmada dört farklı çelik perde tipi ele alınmıştır. Perde tipleri, (TBDY-2018)'in 9. Bölümünde yer alan X çapraz, Ters V çapraz, V çapraz ve K çapraz merkezi çaprazlı çelik çerçevelerdir [15]. Tüm çerçeveler, AISC 360-10 standardındaki ASD yaklaşımına göre tasarlanmıştır [27]. Tasarımda sadece Şekil 6 ile gösterimi yapılan düşey yükleme durumu kullanılmıştır. Analiz sonucunda kolonlar IPE 300, kirişler IPE 240, perde elemanlar IPE100, 60x60x5 kutu ve 108x3.6 boru kesit olarak tasarlanmıştır.

Perde elemanlarının tasarlanmasında kesit alanlarının birbirine yakın olması gözetilmiştir. Kesit alanları birbirine yakın olan perdelerin malzeme maliyetinin de yakın olacağı düşünülmüştür. Ayrıca tasarlanan perde elemanlarının temini, piyasa şartlarında oldukça kolaydır. Bu yönüyle de çalışmanın uygulama alanında yer bulacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 5. Perde tipleri [15]



Şekil 6. Düzlem çelik çerçeve ve düşey yükleme durumu

Analizde malzemenin doğrusal olmayan özelliği dikkate alınarak kolon, kiriş ve perde elemanları için plastik mafsalları tanımlamaları yapılmıştır. Mafsallaşmanın elemanların uç noktalarında oluşacağı öngörülerek mafsallar arasında kalan bölgenin elastik davranacağı kabul edilmiştir. Kiriş elemanları üzerinde (-Z) yönünde 1,0 kN/m çizgisel yük bulunmaktadır. Yapı performans eğrileri, (X) yönü için çizdirilmiştir. Analizlerde tüm perde elemanlarının kuvvetli eksenindeki kesit özelliklerinden yararlanılmış olup kutu ve boru kesitli perde elemanlarının kesit özellikleri her iki ekseninde (kuvvetli- zayıf) de aynıdır. Perde elemanları için kuvvetli eksen etrafındaki kesit özellikleri Tablo 1 ile gösterilmiştir.

Tablo 1' in birinci sütunu perde elemanı kesit isimlerini, ikinci sütunu mm<sup>2</sup> cinsinden kesit alanını, üçüncü sütunu mm<sup>3</sup> cinsinden kesitin plastik modülünü ve dördüncü

sütunu mm cinsinden kesitin atalet yarıçapını göstermektedir.

Tablo 1. Perde elemanlarının kesit özellikleri

Profil	Kesit alanı (mm <sup>2</sup> )	Plastik modül (mm <sup>3</sup> )	Atalet yarıçapı (mm)
IPE100	1.030	39.400	40,7455
60x60x5	1.100	22.750	22,5469
108x3.6	1.181	39.250	36,9337

Modal analizde kullanılan kütle, kirişler üzerindeki düşey yükleme ile hesaba katılmış olup mod şekilleri, öz vektör analizine göre elde edilmiştir. Yapı performans eğrileri, monotonik yükler altında çizilmiştir. Monotonik yük katsayıları, modal analiz sonrası elde edilen (X) hâkim yönündeki 1. mod şekilleridir. Mod şekilleri, Şekil 7' de gösterilmiştir. Monotonik yükler, kat seviyelerine etkilmiştir. Yatay yükler, monotonik yük katsayılarının katı şeklinde artmaktadır.

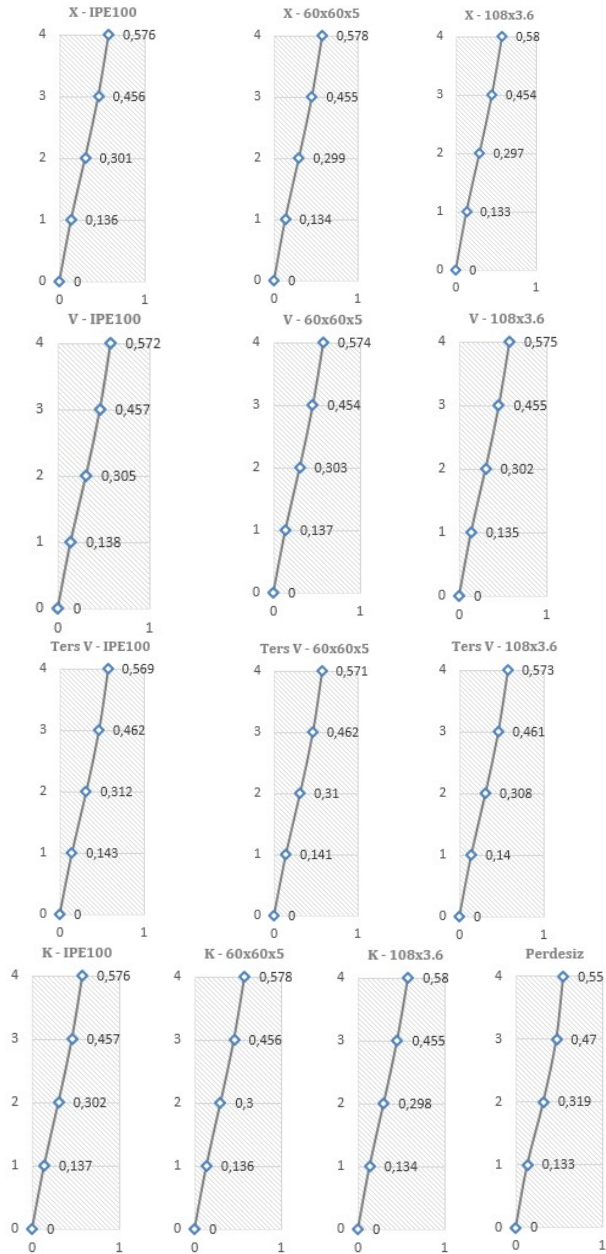
Tablo 2 ile analizlerde kullanılan yükleme durumları gösterilmiştir. Tablo 2' deki birinci sütun yük isimlerini, ikinci sütun yük tiplerini, üçüncü sütun analiz tiplerini ve dördüncü sütun yük miktarını göstermektedir. Düşey yüklerin gösterimi, Şekil 6 ile yapılmıştır. Aynı zamanda bu yükler, modal analiz için kullanılan kütle de oluşturmaktadır.

Tablo 2. Yükleme durumları

Yük ismi	Yük tipi	Analiz tipi	Yük
Modal	Dinamik	Doğrusal	(-Z) 1,0 kN/m
Düşey	Statik	Doğrusal olmayan	(-Z) 1,0 kN/m
Yatay	Statik	Doğrusal olmayan	1. mod şekli

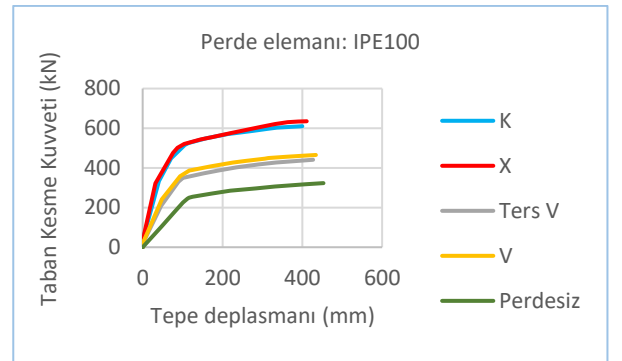
Statik itme analizinin hem düşey hem de yatay yüklemesinde Hinge Unloading Method olarak Unload Entire Structure yöntemi kullanılmıştır.

Bu yöntemde yapıda bir mafsallı oluştuğunda mafsallı oluşan noktadaki kesit tesiri mafsallı kapasitesinden daha fazla olmamaktadır. Mafsallı oluşan noktadaki kesit tesiri kapasiteye eşit olurken yapıdaki tüm yük boşaltılıp tekrar yapıya önceki mafsallı oluşturan yükten daha fazla bir yük uygulanır [20]. Bu döngü ile yapıdaki mafsallı sayısı artırılarak yapının yatay yükler altındaki kapasitesine ulaşması sağlanır. Şekil 2 ile gösterildiği gibi plastik mafsallı oluşması durumunda taban kesme kuvveti – tepe deplasman değer çiftlerinin oluşturduğu performans eğrisi doğrusal olmaktan uzaklaşır. Şekil 7 ile gösterimi yapılan mod şekli kat sayıları, zemin kat seviyesinde sıfırdır. Birinci kat seviyesinde 0,13 – 0,14 mertebelerinde, ikinci kat seviyesinde 0,29 – 0,31 mertebelerinde, üçüncü kat seviyesinde 0,45 – 0,47 mertebelerinde ve dördüncü kat seviyesinde 0,55 – 0,58 mertebelerindedir.



Şekil 7. Mod şekilleri

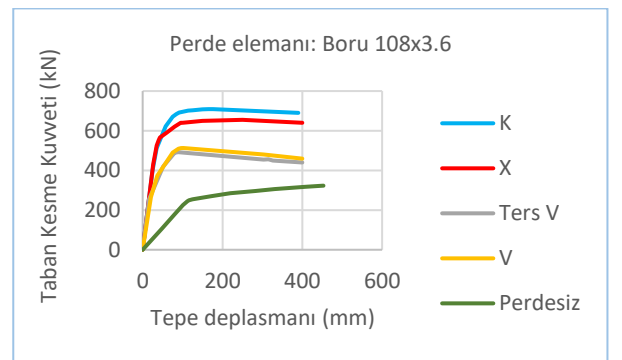
Çerçeve performansının hesaplanmasında ilk aşama modal analizdir. Modal analizle yatay yük şablonu elde edilir. Sonrasında düşey yük analizi yapılır. Çerçevelerin düşey yükler altında mafsallaşmaması gerekmektedir. Bu aşamada mafsallaşma olursa yatay yük analizine geçiş olmaz. Düşey analizle çerçeve elemanlarındaki gerilme durumu artık sifıra eşit değildir. Düşey analizle elde edilen kesit tesirlerinin üzerine yatay analiz sonuçları eklenir ve mafsallaşma durumu her bir eleman için kontrol edilir. Yapılan varsayımlar ve analizler neticesinde çelik perde tipleri ve perde elemanları için yapı performans eğrileri çizilmiştir. Şekil 8-9-10 ile perde tipleri karşılaştırılmıştır. Şekil 11-12-13-14 ile perde elemanları karşılaştırılmıştır.



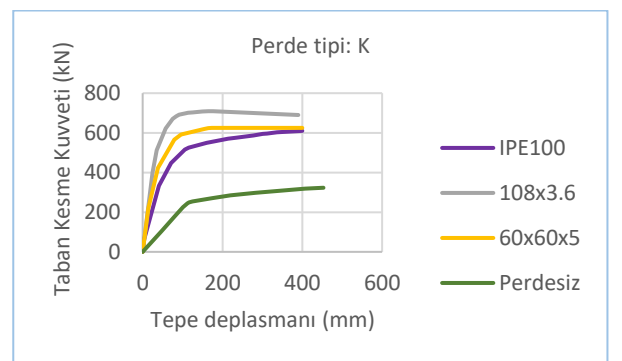
Şekil 8. Perde elemanı IPE100 için yapı performans eğrileri



Şekil 9. Perde elemanı 60x60x5 için yapı performans eğrileri

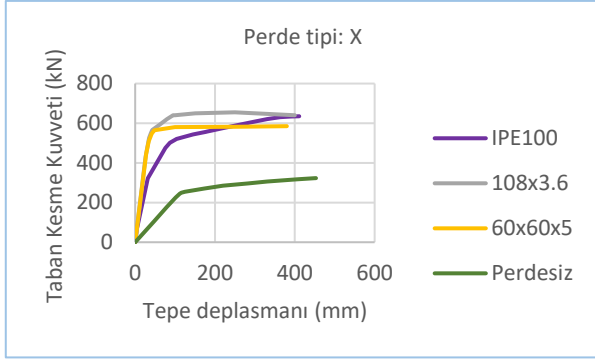


Şekil 10. Perde elemanı 108x3.6 için yapı performans eğrileri

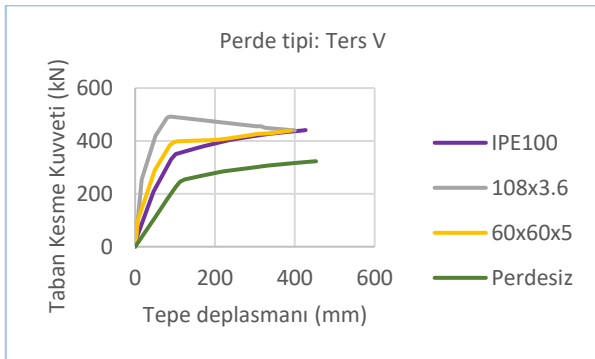


Şekil 11. Perde tipi K için yapı performans eğrileri

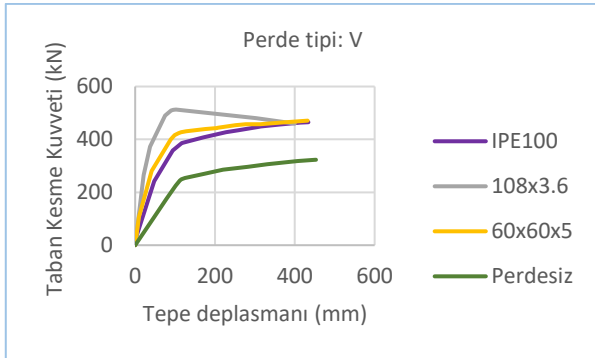




Şekil 12. Perde tipi X için yapı performans eğrileri



Şekil 13. Perde tipi Ters V için yapı performans eğrileri



Şekil 14. Perde tipi V için yapı performans eğrileri

Yapı performans eğrileri, çerçevelerin taşıyabileceği maksimum yatay yük seviyesine kadar başka bir deyişle göçme durumu öncesine kadar itilerek elde edilmiştir.

Yapı performans eğrilerinin elde edilmesiyle çerçevelerin maksimum taban kesme kuvveti ve maksimum tepe deplasman değerleri belirlenmiştir. Tepe deplasmanından kasıt, çerçevenin en üst katından okunan deplasman değeridir.

Tablo 3 ile çerçevelerdeki perde elemanı ve perde tipine göre taban kesme kuvveti değerleri ile tepe deplasman değerlerinden oluşan veriler gösterilmiştir.

Tablo 3'ün birinci sütunu maksimum taban kesme kuvvetini kN cinsinden, ikinci sütunu maksimum tepe deplasmanının mm cinsinden üçüncü sütunu perde tipini ve dördüncü sütunu perde elemanını göstermektedir.

**Tablo 3.** Maksimum taban kesme kuvveti ve maksimum tepe deplasmanı değerleri.

Maks. Taban kesme kuvveti (kN)	Maks. Tepe Deplasman (mm)	Perde tipi	Perde elemanı
323	453	Perdesiz	---
610	400	K	IPE100
635	411	X	IPE100
441	427	Ters V	IPE100
465	434	V	IPE100
625	400	K	60x60x5
585	380	X	60x60x5
439	390	Ters V	60x60x5
471	432	V	60x60x5
690	390	K	108x3.6
640	400	X	108x3.6
440	400	Ters V	108x3.6
460	400	V	108x3.6

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada ele alınan yapı, dört farklı çelik perde tipine ve üç farklı perde elemanına sahip olup düzlem çelik çerçeveden oluşmaktadır. Düzlem çelik çerçeve, üç açıklıklı ve dört katlıdır. Kolonlar arası mesafe 5 metre, kat yüksekliği 3 metredir. Kolon elemanları IPE300, giriş elemanları IPE240, perde elemanları IPE100, 60x60x5 kutu ve 108x3.6 boru kesitten oluşmaktadır. Statik itme analizi yapılarak çerçevelerin performans eğrileri çizilmiş ve maksimum taban kesme kuvvetleri ile maksimum tepe deplasmanları bulunmuştur.

X çaprazlı perde tipinde IPE100 kesiti kullanılırsa çerçevenin karşılayacağı taban kesme kuvvetinin %88 oranında, K çaprazlı perde tipinde 60x60x5 kutu kesit kullanılırsa çerçevenin karşılayacağı taban kesme kuvvetinin %93 oranında ve K çaprazlı perde tipinde 108x3.6 boru kesit kullanılırsa çerçevenin karşılayacağı taban kesme kuvvetinin %113 oranında artacağı hesaplanmıştır.

Çerçeveye çalışma kapsamındaki herhangi bir perde tipinin eklenmesi durumunda yatay yükler altındaki performansının önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. Alıcıoğlu (2011) (DBYBHY-2007)' de yer alan merkezi çelik çaprazlı çerçevelerin çaprazsız çerçevelere oranla elastik ve plastik limit yük taşıma kapasitelerinin daha fazla olduğunu belirlemiştir [3].

K ile X çapraz perde tiplerinin çerçeve performansına etkilerinin benzer olduğu ve Ters V ile V çapraz perde tiplerinin çerçeve performansına etkilerinin benzer olduğu görülmüştür. K ve X çapraz perde tiplerinin Ters V ve V çapraz perde tiplerine oranla daha fazla maksimum taban kesme kuvveti karşıladığı, buna karşın tepe deplasman değerleri arasında önemli bir fark olmadığı

gözlemlenmiştir. Buradan hareketle çerçeve performansı açısından K ve X çapraz perde tiplerinin kullanımı önerilmektedir. Putra ve diğ. (2019) altı katlı çelik bir binaya X çapraz perdeler ekleyerek yapı performansının perdesiz duruma oranla önemli derecede arttığını belirlemişlerdir [9].

Sarhan ve diğ. (2020) dört, yedi ve on katlı çelik binalar üzerinde çaprazsız, Z ve X çaprazlı perde tiplerinde elastik rijitlik faktörlerine yönelik yaptıkları çalışmada X çaprazlı binanın çaprazsız ve Z çaprazlı binalara oranla daha rijit olduğunu belirlemişlerdir [11].

IPE100 kesitinin atalet yarıçapının ve plastik modülünün diğer profillerden daha büyük olmasına karşın dört farklı perde tipinde de çerçeve performansına en fazla katkısı olan perde elemanı 108x3.6 boru kesit olurken ikinci olarak 60x60x5 kutu kesit olmuştur. Buradan hareketle perde elemanı olarak boru ve kutu kesit kullanımı önerilmektedir.

Alicioğlu ve diğ. (2012) düzensiz geometriye sahip çelik çerçevelerde boru kesitli perde kullanılması durumunda çerçeve performansının arttığını [4], Ağcakoca ve diğ. (2012) simetrik geometriye sahip çelik çerçevelerde boru kesitli perde kullanılması durumunda çerçeve performansının arttığını tespit etmişlerdir [5].

Çalışma ile literatürde bulunan benzer veriler karşılaştırıldığında sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

## TEŞEKKÜR

Çalışmanın gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen Manisa Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğünde görevli mesai arkadaşlarım İnşaat Mühendisi Halil AĞ' a ve İnşaat Mühendisi Aydın GÖÇMEN' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## KAYNAKÇA

- [1]. E. Kantar, R.T. Erdem, E. Gücüyen ve M.B. Alicioğlu, "Kusurlu çelik birleşimlerin darbe etkisi altında incelenmesi", Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi, Proje No: 2018-019, (2019).
- [2]. M. Ferraioli, A.M. Avossa, A. Lavino, and A. Mandara, "Accuracy of advanced methods for nonlinear static analysis of steel moment-resisting frames", The Open Construction and Building Technology Journal, Vol. 8, pp. 310-323, 2014.
- [3]. Mustafa Berker Alicioğlu, "Merkezi çelik çaprazlı yapılarda uygun çapraz kesiti geometrisinin ve çapraz türünün belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2011.
- [4]. B. Alicioğlu, M. Aktaş, M. Elmas ve Z. Yaman, "Düzensiz geometriye sahip çerçevelerde dairesel kesite sahip merkezi çelik çaprazların performans analizi", III. International Science, Technology And Engineering

- Conference ISTEC 2012, (December 13-15, Dubai, United Arab Emirates, 2012), 405- 412, (2012).
- [5]. E. Ağcakoca, B. Alicioğlu, M. Aktaş, ve Z. Yaman, "Simetrik geometriye sahip çerçevelerde dairesel kesite sahip merkezi çelik çaprazların performans analizi", III. International Science, Technology And Engineering Conference ISTEC 2012, (December 13-15, Dubai, United Arab Emirates, 2012), 1090- 1095, (2012).
- [6]. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Ankara, 2007.
- [7]. W.A. Attia and M.M.M. Irheem, "Boundary condition effect on response modification factor of X-braced steel frames," Housing and Building National Research Centre, vol.14, no 1, pp.104 -121, 2018.
- [8]. F. Barbagallo, M. Bosco, A. Ghersi, E.M. Marino, and P.P. Rossi, " Seismic assessment of steel MRFs by cyclic pushover analysis," The Open Construction and Building Technology Journal, vol. 13, pp. 12- 26, 2019.
- [9]. Z. Putra, and J. Tarigan, " Performance analysis of steel portal structures with braces designed on allowable interstory drift limits," Simetrikal Journal of Engineering and Technology, vol. 2, no 1, pp.87- 102, 2019.
- [10]. F. Yu, R. Huang, and T.J. Sullivan, "Estimating deformation demands on steel EBF systems", New Zealand Society For Earthquake Engineering, Annual Conference 2020, paper 115, (2020).
- [11]. O. Sarhan, and M. Raslan, "Study of the elastic stiffness factor of steel structures with different lateral load resisting systems," International Journal of Advanced Engineering, Sciences and Applications, vol. 1, no 2, pp. 6- 11, 2020.
- [12]. V.L. Hoang, H.N. Dang, J.P. Jaspert, and J.F. Demonceau, "An overview of the plastic-hinge analysis of 3D steel frames," Asian Pasific Journal on Computational Engineering, 2:4, 2015.
- [13]. B. Bayram, S. Sancioğlu ve S. Çarbaş, "Çelik bir yapıda dışmerkez diyagonal çaprazların etkisi," KMÜ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi, 1(1), 128-145, 2019.
- [14]. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar, Ankara, 2018.
- [15]. İç İşleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ankara, 2018.
- [16]. S. Sancioğlu, S. Arıbaş, B. Bayram, M. Şimşek ve S. Çarbaş, "Çelik bir binada kullanılan çapraz tiplerinin deprem etkisi altında analizi ", 8. Uluslararası Çelik Yapılar Sempozyumu, KTO Karatay Üniversitesi, Konya, 422-430, (2019).
- [17]. S. Arıbaş, S. Sancioğlu ve S. Çarbaş, "Dışmerkez V çaprazların çelik bir yapı üzerinde incelenmesi, ", KMÜ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi, 1(1), 79-97, 2019.
- [18]. B. Bayram, S. Sancioğlu ve S. Çarbaş, " Dışmerkez diyagonal çaprazların sismik yükler altında çelik yapılara etkisi", 1. Ulusal Mühendislik ve Teknoloji Kongresi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Karaman, 8-8, (2019).
- [19]. S. Arıbaş, S. Sancioğlu ve S. Çarbaş, "Moment aktaran çelik çerçeveli yapılarda dışmerkez çaprazların

TBDY-2018'e göre incelenmesi", 1. Ulusal Mühendislik ve Teknoloji Kongresi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Karaman, 10-10, (2019).

[20]. CSI Analysis Reference Manual, For SAP2000®, Etabs®, and Safe® Berkeley, California, USA, 2009.

[21]. A. Çakıroğlu ve E. Özer, Malzeme Ve Geometri Bakımından Lineer Olmayan Sistemler, Cilt 1, Matbaa Teknisyenleri Basım Evi, İstanbul, 1980.

[22]. FEMA, Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings, Prepared by the American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency, (Report No. FEMA-356), Washington, D.C., (2000).

[23]. H. Krawinkler, and G.D.P.K. Seneviratna, "Pushover analysis of seismic performance evaluation," Engineering Structures, vol. 20, nos 4-6, pp. 452- 464, 1998.


[24]. J. He, and Z.F. Fu, Modal Analysis, Butterworth-Heinemann publications, 2001.

[25]. Sap 2000 V.12, Education Version, Berkeley, California, USA, 2008.

[26]. X. Yun, and L. Garner, "Stress-strain curves for hot-rolled steels, ", Journal of Constructional Steel Research, 133, pp. 36-46, 2017.

[27]. American Institute Of Steel Construction, Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-10, Chicago, Illinois, USA, 2010.

## A Methodology for Explicit Representation of the Stochastic Demand due to Electric Vehicles in Generation Expansion Planning Problems

\*<sup>1</sup>Hatice Tekiner Mogulkoc<sup>1</sup>Marmara University, Industrial Engineering, hatice.tekiner@marmara.edu.tr, 

Research Paper

Arrival Date: 05.11.2020

Accepted Date: 10.04.2021

### Abstract

Generation expansion planning (GEP) problems are solved to find the optimum investment decisions to satisfy the increasing electricity demand. Integration of electric vehicles (EVs) with the capability of charging from the grid will also increase the electricity demand of the grid. Depending on the charging/driving characteristics of users, demand curves for EVs will be shaped and it will be different on each day. Therefore, it is very crucial to represent this stochastic nature of EVs demand in the associated GEP problems. This paper is proposing a methodology to represent EVs demand realistically on GEP models. The proposed methodology starts with generating random demand patterns to demonstrate possibilities for the EVs demand patterns via Monte Carlo Simulation, then using an optimization-based model to select a representative set. Two stage stochastic programming model is proposed for GEP problems and solved to minimize the expected cost over the entire set, the representative set and the average EVs demand. The results show that GEP models with selected demand curves produce more realistic decisions (closer to the solutions obtained by using the entire demand patterns) than the decisions obtained by the models with average EVs demand. In most cases, the models using average EVs demand fail to capture the new peaks generated by EVs, therefore, they suggest less capacity expansion than the required amount. This results in more unmet demand in the system.

**Keywords:** Generation Expansion Planning, Electric Vehicles, Demand Stochasticity, Monte-Carlo Simulation

4

### INTRODUCTION

Generation Expansion Planning (GEP) problems are solved for optimally determining when, where and what type of generation technologies to construct in the grid to satisfy the growing electricity demand. The growth of the global electricity demand is estimated as 2.1% per year in [1]. Moreover, there is an increasing awareness for the environment and for the risk of depletion of fuels for the conventional vehicles. This leads a tendency towards increasing the proportion of the electric vehicles in the transportation sector. Introducing electric vehicles (EV) with capability of charging from the grid will contribute the electricity demand. To keep the grid reliable and sustainable, it is very crucial to incorporate the demand changes realistically in solving GEP problems to satisfy the new demand. The paper aims to provide a methodology to incorporate EVs demand in GEP and keep the GEP problem tractable.

The pattern for EVs demand is shaped based on many factors grouped as charging characteristics, driving characteristics and penetration levels. Charging characteristics includes types of chargers, battery sizes used in the vehicles and state-of-charge (capacity left in the battery) at the charging time.

Driving characteristics involve the behavior of the vehicle owners such as daily driven distances, arrival and departure times to possible charging points (home, work, charge station, mall), preferences for charging places. Penetration level determine the number of the EVs. Since vehicle owners do not behave the same in each day, total demand of EV will differ from day to day as well as the distribution of the demand of EVs in each hour. Therefore, demand of EVs has a stochastic nature. Since GEP problems are long-term problems, it is very important to reflect this uncertainties in GEP problems explicitly. Another important objective of this study is to provide an approach to make it possible to realistically represent the stochastic nature of EVs demand in GEP problems.

There is vast amount of study on GEP problems. Koltsaklis and Dagoumas [2] present a review on the articles considering different perspectives of the GEP problems. They also provide a detailed survey on the GEP including the renewable energy sources in [3]. There are some studies focusing on how EVs will affect the demand curve [4-9]. There are also few studies considering the EVs together with GEP problems [10-17]. Ramirez et al. [18] solved the GEP problem where the average additional load due to the EVs is calculated for each hours and the current demand is updated to incorporate the EVs with GEP. Hajimiragha et al. [19] solves least cost GEP problem with EVs by incorporating the

\*Corresponding Author: Marmara University, Industrial Engineering, hatice.tekiner@marmara.edu.tr

EVs via the estimated additional yearly demand. Ahmadi et al. [20] uses the EVs effects on the peak and base load when solving GEP problems. Moon et al. [21] estimates a probability density function for the EVs demand and includes the estimated EVs demand into GEP problem. Ramirez et al. [22] also proposes a model for GEP where constraints to schedule the demand of EVs are included. de Quevedo [23] uses the total demand due to the EVs in s GEP together with renewable energy sources. Manríquez et al. [24] solves long term generation and transmission expansion planning problem under different charging schemes for EVs. Mehrjerdi [25] solves capacity expansion planning problems where EVs at charging stations thought as flexible generation units. Heuberger et al. [26] investigates the effect of EVs deployment on the capacity requirements.

The studies for GEP with EVs lack from reflecting the stochastic nature of the demand caused by EVs. The common approach is to include the estimated average EV demand for each hour. This leads to unrealistic plans since it does not consider the days with different level of EVs demands and different distribution of demand over the days. This paper provides a methodology to represent days with different demand profiles and their corresponding distribution among the year in GEP model while keeping GEP problem tractable. GEP problems are modeled as two stage stochastic programming models. By means of the methodology presented in this study, it would be possible to consider the days with new peaks (even if the probability is very low) in GEP model so that the solution suggested by the model will be more applicable to satisfy the reliability of the system.

This paper propose an approach which start with generating many numbers of random demand patterns by means of Monte Carlo simulation and then selecting a representative sets from the generated patterns to use in GEP problems. GEP problems are solved for different cases to show the effectiveness of the approach.

This paper is organized as follows: the simulation model to generate different EVs demand patterns, the mathematical model to select an appropriate subset of these patterns, and the two stage stochastic programming model for GEP to represent the demand patterns are given in Section 2. The numerical analysis and the corresponding results are given in Section 3. In Section 4, final remarks are given.

## 1. METHODOLOGY TO INCLUDE EVS DEMAND IN GEP

An algorithm is proposed to generate and select the representative load curves/demand patterns and use them in the mathematical model for GEP explicitly. The proposed algorithm is given in Algorithm 1.

### Algorithm 1

Step 1: Generate  $N$  demand patterns which reflect any random days by using Monte Carlo Simulation.

Step 2: Use proposed optimization-based model to select the representative demand patterns ( $R$ ) and to determine their corresponding probabilities.

Step 3: Minimize the expected cost by solving proposed GEP problem

### 1.1. Generation of EVs Demand Patterns

One could use any methods presented in the literature to generate random demand patterns. In this paper, the Monte Carlo simulation presented in [27] is used to generate the EVs demand patterns. In this simulation, all the impact factors are considered. At each iteration of the simulation,  $k$  vehicle owners for the given penetration level of EVs are generated where each owner has different driving and charging characteristics at the point of charging. The battery size, daily driving distance, departure and arrival times to the charging points, charging place decisions are assigned based on the distribution of the corresponding parameters and the policy applied. Based on these characteristics, a random demand pattern showing the amount of electricity drawn from the grid at each hour is obtained for each EV owner. By summing the demands from all the vehicle owners, the total demand for each hour is obtained. The result of one iteration is called a random demand pattern, which represents a possible day of the year.

### 1.2. Optimization-Based Approach for Selecting a Representative EVs Demand Patterns

In the previous step, we generated  $N$  patterns. Including all these demand patterns in GEP problems is preferable to be more realistic, but it is not computationally efficient. Therefore, a mathematical model is proposed to select a subset of the generated load curves while minimizing the deviation from the average demand for each hour.

The objective function of the models is to minimize sum of positive and negative deviations from the average demand for each hour  $i$ .

$$\min \sum_{h=1}^{24} (pd_h + nd_h) \quad (1)$$

The positive and negative deviations are calculated in the constraint (2).

$$\sum_{j=1}^N \varphi_j d_{hj} - pd_h + nd_h = \mu_h \quad \forall h = 1 \dots 24 \quad (2)$$

Here,  $d_{hj}$  represents the EVs demand for hour  $h$  in iteration  $j$ .  $\mu_h$  is the average EVs demand for hour  $h$  considering all the demand patterns in  $N$ .  $\varphi_j$  is the decision variable for probability assigned to the demand patterns  $j$ . In this constraint, a positive probability is assigned to the demand pattern  $j$  such that the average demand is calculated by using only the patterns with positive probabilities plus the deviations are equal to the average EVs demand of hour  $h$ . The third constraint guarantees that the sum of probabilities are equal to 1 and represented as follows.

$$\sum_{j=1}^N \varphi_j = 1 \tag{3}$$

The non-negativity constraints are given in (4) and (5).

$$\varphi_j \geq 0, \forall j \in N \tag{4}$$

$$pd_h, nd_h \geq 0, \forall h =, \dots, 24 \tag{5}$$

### 1.3. Mathematical Model for GEP problems

The objective of this paper is to provide a methodology to explicitly represent the stochasticity associated with the EVs demand in GEP problems. The proposed model accomplishes it by representing the EVs demand not only by the average for each hour, but a set of EVs demand patterns for each hour with the associated probabilities. Then, the model becomes a two-stage stochastic model where the first stage variables, investment decisions, are decided with respect to the distribution of the uncertainty; and the second stage decision variables, dispatching decisions, are decided with respect to the observation of the uncertainty. The demand of the current system also differs for each day. The common approach is to select set of days to represent the different electricity demand curves in the year. We will assume that  $G$  is the set of such days and  $m_g$  is the number of days represented by the day  $g$ .

In our approach, we assume that EVs demand could be any one of the patterns in  $R$  for each day in  $G$ . Therefore, by multiplying the probabilities of EVs demand patterns by the number of days represented by  $g$ , we can obtain the number of days where the current electricity demand is as in day  $g$  and EVs demand is as in pattern  $j$  of  $R$ . The obtained parameter is called the weight,  $w_{gj}$ , and it is calculated as in Equation (9).

$$w_{gj} = \varphi_j \times m_g \tag{9}$$

The objective function of the model is to minimize the expected cost. The cost has two part, investment cost and expected dispatching cost.

$$\begin{aligned} & \sum_y \sum_{k \in Q} c_{yk} s_{yk} \\ & + \sum_y \left( \sum_{k \in Q} \sum_{g \in G} \sum_{j \in R} \sum_{h=1}^{24} w_{gj} \alpha_{yk} x_{ykgjh} \right. \\ & + \sum_{l \in L} \sum_{g \in G} \sum_{j \in R} \sum_{h=1}^{24} w_{gj} \beta_{yl} z_{ylgjh} \\ & \left. + \sum_{g \in G} \sum_{j \in R} \sum_{h=1}^{24} w_{gj} \gamma_y u_{ygh} \right) \end{aligned} \tag{10}$$

$c_{yk}$  is the cost of investing generation unit type  $k$  from the possible investment options  $Q$  in year  $y$  and  $s_{yk}$  is the investment decision taking the value of 1 if the investment is done and zero if not.  $x_{ykgjh}$  is the amount of electricity produced (MWh) from the new generation unit  $k$  in year  $y$ , day  $g$ , in hour  $h$  and EVs demand follows the pattern  $j$ .  $\alpha_{yk}$  is

the cost of producing 1MWh of energy from the unit  $k$  of  $Q$  in year  $y$ . Similarly,  $z_{ylgjh}$  is the amount of electricity produced (MWh) from the existing generation unit  $l$  of the set  $L$  in year  $y$ , day  $g$ , in hour  $h$  and EVs demand follows the pattern  $j$ .  $\beta_{yl}$  is the cost of producing 1 MWh of energy from the unit  $l$  of  $L$  in year  $y$ .  $\gamma_y$  is the cost of unmet demand and  $u_{ygh}$  is the amount of energy not satisfied in year  $y$ , in day  $g$ , in hour  $h$ , and EVs demand follows the pattern  $j$ .

The first set of constraints are the demand constraints. Demand in the model represents the demand including the electricity request of EVs and it is calculated by summing the regular electricity demand plus the EVs demand as in Eq. (11).

$$D_{ygh} = D_{ygh} + d_{hj} \tag{11}$$

$D_{ygh}$  is the electricity demand without the EVs contribution in year  $y$ , in day  $g$ , in hour  $h$ .  $d_{hj}$  is the demand in hour  $h$  in EVs demand pattern  $j$ .

The demand constraints (12) are to guarantee that the total electricity generated from the existing and new units plus the unsatisfied demand is equal to the demand for each year, day, hour and EVs pattern.

$$\begin{aligned} \sum_{k \in Q} x_{ykgjh} + \sum_{l \in L} z_{ylgjh} + u_{ygh} \\ = D_{ygh} \quad \forall y, g, h, j \end{aligned} \tag{12}$$

$D_{ygh}$  is the demand including EVs demand in year  $y$ , in day  $g$ , in EVs demand pattern  $j$  and in hour  $h$ .

The second set of constraints (13) is the capacity constraint for the existing units. Total generation from each unit cannot be more than the available capacity.

$$z_{ylgjh} \leq \theta_l \quad \forall y, k, g, h, j \tag{13}$$

$\theta_k$  is the available capacity of unit  $l$ . It is calculated by multiplying the existing capacity with the availability factor. Availability factor could simply defined as the percentage of the time the unit available for the production.

The third set of constraints (14) is the capacity constraint for the new units. Total generation from each unit should be less than the available capacity if the investment is done before or in year  $y$  and less than zero if the investment is not done.

$$x_{ykgjh} \leq \theta_k \sum_{t=1}^y s_{yk} \quad \forall y, k, g, h, j \tag{14}$$

With the constraints in (15), we guarantee that each unit type investment occurs only once.

$$\sum_y s_{yk} = 1 \quad \forall y, k \tag{15}$$

The rest of the constraints (16-17) are binary variable constraints and non-negativity constraints for the generation amount and unmet demands.

$$s_{yk} \in \{0,1\} \quad \forall y, k \quad (16)$$

$$x_{ykgjh} \geq 0 \quad \forall y, k, g, j, h \quad (17)$$

$$z_{ylgjh} \geq 0 \quad \forall y, l, g, j, h \quad (18)$$

$$u_{ygyh} \geq 0 \quad \forall y, g, j, h \quad (19)$$

## 2. NUMERICAL STUDY

We consider the electricity grid of Istanbul as a case study. The GEP problem to satisfy the increasing demand of Istanbul is solved. We assumed that wind farms are the choices for new generation units. For the current demand of the network, we pick two days from 2019 (08.01.2019 for Winter/Fall and 31.07.2019 for Spring/Summer) [28]. The selected days are the ones with the highest hourly peak demand. Selected current network demands are given in Table 1. Since the consumption of Istanbul is 16% of Turkey, we adjust the total demand to find the demand for Istanbul. We also assumed that 16% of the current installed capacity for Turkey could be used for Istanbul. The data for installed capacity and new generation units are given in Table 2.

**Table 1.** Selected Current Demand

Hours						
Days	1	2	3	4	5	6
1	5208	4937	4748	4630	4578	4663
2	6127	5838	5598	5466	5366	5272
Hours						
Days	7	8	9	10	11	12
1	4857	5318	6055	6616	6784	6934
2	5146	5435	6237	6692	6790	6960
Hours						
Days	13	14	15	16	17	18
1	6753	6772	6832	6781	6760	6755
2	6793	6973	7188	7205	7182	7105
Hours						
Days	19	20	21	22	23	24
1	6682	6452	6203	6036	5867	5550
2	6887	6820	6977	6922	6736	6486

**Table 2:** Available Capacity for Istanbul

Energy Source	Installed Capacity (MW)	Variable Cost (\$/MWh)	Avail. Factor	Energy Loss	Available Capacity (MW)
Hydro	3,270	0.002	50%	8%	1504
Geothermal	172	0.011	75%	8%	119
Natural Gas	4,299	3.602	85%	8%	3362
Coal	3,187	4.474	85%	8%	2492
Stream	1,243	0.001	50%	8%	572

### 2.1. EVs Patterns Generation for the Case Study

To generate the extra demand from the electric vehicles, we used the impact factors presented in [27] and generate 10000 patterns. We assumed uncontrolled charging at home and public station. In this policy, people who prefer to charge at home can charge their cars at any time after arriving to home. We also assume that people using public stations can charge their cars at any time during the day. We used the distribution representing the preference of people for charging locations as presented in Table 3.

### 2.2. Selecting Patterns for Case Study

We used the LP model presented above to select the subset of EVs demand patterns and associated probabilities. For Case 2, 16 demand patterns are selected with the associated probabilities. 19 demand patterns are selected for Case 13. For the rest of the cases, 25 demand patterns are selected.

**Table 3:** Charging Location Preference Distribution

Cases	Home	Work	Public Station
1	0%	0%	100%
2	0%	100%	0%
3	10%	10%	80%
4	10%	80%	10%
5	20%	30%	50%
6	30%	20%	50%
7	30%	40%	30%
8	30%	50%	20%
9	40%	30%	30%
10	40%	40%	20%
11	50%	30%	20%
12	80%	10%	10%
13	100%	0%	0%

### 2.3. Results of GEP model for Case Study

The objective of this paper is to demonstrate the impact of the explicit representation of the different demand curves in the GEP model. To be able to solve the GEP problem by using the entire demand patterns, we construct a GEP model to satisfy the demand of one year in the future where 10% of vehicles in Istanbul are electrical. The daily demands selected (Table 1) are increased by 15% to reflect the future demand where 10% of vehicles in Istanbul are electric vehicles. As the investment option, we consider the wind farm. Each farm consist of 25 wind turbines each has the capacity of 2MW. The availability factor for the wind turbines are assumed to be 30% and the electricity loss is also assumed to be 8%. After applying the losses and availability factor, we computed the available wind power generation capacity from each farm as 13.8MW. We assumed 20 years for lifetime for the wind turbines to find the installation cost per year. Average cost of one wind turbine with 2MW capacity is around \$3,500,000. By dividing this value to its lifetime and multiplying with 25, we found the installation

cost for each farm per year \$4,375,000. The unmet demand cost is assumed to be \$10000 per MWh.

The GEP problem is first solved by using all the patterns ( $M$ ) generated by Monte Carlo Simulation. Then the same problem is solved by only using the selected patterns ( $R$ ) obtained by the optimization based model proposed before. Finally, the problem is solved by defining only one EVs pattern consists of the average demand ( $\mu_n$ ) of 10000 patterns for each hour and updated  $D_{ygh}$  by using the average demand produced by EVs.

For different cases, all three problems are solved and solutions are presented in Table 4 and 5. Table 4 represents optimum objective function value if all the demand patterns are integrated to GEP and the deviations of the objective function value obtained by considering the selected demand patterns and average demand from the objective function value obtained by considering all 10000 demand patterns.

For all of the instances, using the average extra demand generated by EVs to represent the demand of EVs in GEP problem underestimate the effect of the EVs on demand. As seen in Table 4, using the selected demand patterns to integrate EVs to GEP problems produces better results for all the cases.

**Table 4.** Objective function value of GEPs solved

Cases	Cost (\$)	Deviation	
	All	Selected	Average
1	2.77E+08	0.67%	-1.73%
2	3.6E+08	-2.57%	-4.20%
3	2.77E+08	0.09%	-2.03%
4	3.19E+08	-0.69%	-3.89%
5	2.82E+08	0.04%	-2.07%
6	2.78E+08	0.36%	-1.74%
7	2.85E+08	0.15%	-1.85%
8	2.91E+08	0.21%	-2.50%
9	2.8E+08	1.01%	-1.65%
10	2.85E+08	0.42%	-1.85%
11	2.8E+08	-0.02%	-1.45%
12	2.71E+08	0.43%	-2.41%
13	2.73E+08	-0.29%	-1.86%

To represent the results more clearly, we present the optimum investment level and total unmet demand per year. Investment represents the optimum number of wind farms invested to satisfy the demand. “All” in Table 5 represents the solution obtained by considering all of the 10000 patterns generated. “Avg” in Table 5 represents the solution obtained by considering the average of the 10000 demand patterns to reflect the extra demand of EVs. “Slc” in Table 5 represents the solution obtained by considering the selected demand patterns to integrate the EVs in GEP problems. Total unmet demand in Table 5 represents what would be the unmet

demand for a year if the investment level is the one suggested by each problem and the demand might follow any one of the 10000 demand patterns generated.

The results show that the number of investments suggested by using the selected demand patterns are the same as using all the generated demand patterns in most of the instances. Using the average of the 10000 demand patterns in GEP problems causes not capturing the days where EVs increases the demand of some hours in a day drastically. Therefore, the solutions suggested by these problems suggest investing less investments, therefore, more unmet demand. Using the average is worse in the instances where new peaks might be generated as in Case 2 and 8. In those cases, more of the people charge their cars at work where the current demand of the grid is high. The highest investments are also suggested for these cases. In only two cases, using selected demand patterns suggest more investments than the problem with all demand patterns. In those cases, the unmet demand is very high for the second problem. It shows that there is a slight overestimation for the GEP with selected demand patterns.

**Table 5.** Optimum Investment Decisions and Total Unmet Demand for GEPs solved

Cases	Investment			Total Unmet Demand (MWh)		
	All	Slc	Avg	All	Slc	Avg
1	27	27	26	93.99	93.99	811.28
2	48	46	45	355.60	1626.12	2624.95
3	27	27	26	177.32	177.32	1056.24
4	38	37	35	85.38	474.39	2583.31
5	28	28	27	197.96	197.96	1014.64
6	27	27	26	267.29	267.29	1220.10
7	29	29	28	141.07	141.07	822.97
8	30	31	29	342.99	4.31	1493.39
9	28	28	27	79.03	79.03	722.49
10	29	29	28	140.96	140.96	962.21
11	28	28	27	19.86	19.86	521.00
12	25	26	24	267.90	0.00	1066.02
13	26	26	25	122.38	122.38	752.38

The largest number of patterns selected ( $R$ ) is 25 for the cases we considered. It means that the number of demand constraints and the capacity constraints are reduced by at least ( $25/1000=0.0025$ ). In addition to the reduction in the number of constraints, the number of decision variables for electricity generated by the existing units and new units, and the variables for unmet demand is also reduced by the same ratio. The solution times for the GEP model using the selected demand patterns is around one-third of the ones for the GEP model using all patterns. The same results are obtained in much shorter times with the representative sets.



It shows that we obtain GEP models which are realistic and tractable.

### 3. CONCLUSION

The integration of EVs into the system will increase the total demand of the grid where new investments need to be done. In order to decide the investments, GEP problems are solved. It is very important to represent the real impact of EVs in GEP problems to find solutions that are more realistic. In this paper, we propose a methodology to represent the impact of EVs on demand more realistically in the GEP problems while keeping the problems more tractable.

In this paper, we propose two stage stochastic programming models for GEP to integrate different demand patterns due to the EVs. The methodology starts with generating random days by simulation which consider the all the impact factors affecting the EVs demand. Each random days represents a possibility for a day. GEP problems with all these random days would be more realistic however; they will not be computationally efficient. Therefore, we suggested an optimization based method to select the representative set. In this optimization-based model, the deviation from the average of the generated random days is minimized. The optimization-based model suggest a subset of randomly generated demand patterns with associated probabilities.

We define cases and solve the GEP problem by using all the demand patterns generated, by the selected patterns and by the average of these demand patterns. The results show that using selected patterns suggest solution very close to the one with all the demand patterns. It is shown that our methodology provide an efficient way of integrating EVs to GEP problems while keeping the stochastic nature of the demand very close to the reality.

The electricity networks involves many stochastic parameters. The deployment of EVs into the system will increase the demand uncertainty. We provide a tool for the decision makers to help them to make proper decisions. The results shows that the methodology proposed in this study make it possible to take the days with new peaks into the account. Therefore, the capacity expansion decisions suggested are more realistic. The system operators could benefit from our study to determine best plans to design reliable power grid.

In this study, we assumed uncontrolled charging at homes and public stations. It means that drivers can charge their cars at any time depending on the arrival/departure times to these locations. However, there are incentives to influence the charging time selection of the drivers. Since with the methodology proposed here reduces the problem size, as a future study, GEP models could be developed where these incentives defined as decision variables and EVs demand patterns generated under such incentives are represented explicitly. Another improvement on the GEP models could be introducing the penetration levels for EVs as decision


variables and solve GEP models to find the most suitable penetration level for the grid considered.

### REFERENCES

- [1] IEA, World Energy Outlook, 2019. (Visited on December, 25 2019).
- [2] N.E. Koltsaklis and A.S. Dagoumas, "State-of-the-art generation expansion planning: A review", *Applied Energy*, vol. 230, pp. 563–589, 2018.
- [3] A.S. Dagoumas and N.E. Koltsaklis, "Review of models for integrating renewable energy in the generation expansion planning", *Applied Energy*, vol. 242, pp. 1573–1587, 2019.
- [4] J.C. Kelly, J.S. MacDonald and G.A. Keoleian, "Time-dependent plug-in hybrid electric vehicle charging based on national driving patterns and demographics", *Applied Energy*, vol. 94, pp. 395-405, 2012.
- [5] S. Shafiee, M. Fotuhi-Firuzabad and M. Rastegar, "Investigating the impacts of plug-in hybrid electric vehicles on power distribution systems", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no 3, pp. 1351-1360, 2013.
- [6] J. Jung, Y. Cho, D. Cheng, A. Onen, R. Arghandeh, M. Dilek and R.P. Broadwater, "Monte Carlo analysis of plug-in hybrid vehicles and distributed energy resource growth with residential energy storage in Michigan", *Applied Energy*, vol. 108, pp. 218-235, 2013.
- [7] B. Yagcitekin, M. Uzunoglu, A. Karakas and O. Erdinc, "Assessment of electrically-driven vehicles in terms of emission impacts and energy requirements: a case study for Istanbul, Turkey", *Journal of Cleaner Production*, vol. 96, pp. 486-492, 2015.
- [8] R. Godina, E.M.G. Rodrigues, N.G. Paterakis, O. Erdinc and J.P.S. Catalão, "Innovative impact assessment of electric vehicles charging loads on distribution transformers using real data", *Energy Conversion and Management*, vol. 120, pp. 206-216, 2016.
- [9] J. Su, T.T. Lie and R. Zamora, "Modelling of large-scale electric vehicles charging demand: A New Zealand case study", *Electric Power Systems Research*, vol. 167, pp. 171-182, 2019.
- [10] X. Yu, "Impacts assessment of PHEV charge profiles on generation expansion using national energy modeling system", *Power and Energy Society General Meeting- Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, IEEE, pp. 1-5, (2008).
- [11] M.D. Galus, M. Zima and G. Andersson, "On integration of plug-in hybrid electric vehicles into existing power system structures", *Energy Policy*, vol. 38, no 11, pp. 6736-6745, 2010.
- [12] A.H. Hajimiragha, C.A. Cañizares, W. Michael, M.W. Fowler, S. Moazeni and A. Elkamel, "A Robust Optimization Approach for Planning the Transition to Plug-in Hybrid Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no 4, pp. 2264 – 2274, 2011.
- [13] P. Vithayasrichareon, G. Mills and I.F. MacGill, "Impact of Electric Vehicles and Solar PV on Future Generation Portfolio Investment", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no 3, pp. 899-908, 2015.

- [14] S.W. Hadley and A.A. Tsvetkova, "Potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on regional power generation", *The Electricity Journal*, vol. 22, no 10, pp. 56-68, 2009.
- [15] P. Prebeg, G. Gasparovic, G.Krajacic and N. Duic, "Long-term energy planning of Croatian power system using multi-objective optimization with focus on renewable energy and integration of electric vehicles", *Applied Energy*, vol. 184, pp. 1493–1507, 2016.
- [16] A. Hajebrahimi, I. Kaçwa and M. Huneault, "A novel approach for plug-in electric vehicle planning and electricity load management in presence of a clean disruptive technology", *Energy*, vol. 158, pp. 975-985, 2018.
- [17] Y. Yua, P. Lib, B.G. Shand, G.H. Huangb and L.P. Xu, "A scenario-based interval-stochastic basic-possibilistic programming method for planning sustainable energy system under uncertainty: A case study of Beijing, China", *Journal of Cleaner Production*, vol. 197, pp. 1454-1471, 2018.
- [18] P.J. Ramírez, D. Papadaskalopoulos and G. Strbac, "Co-Optimization of Generation Expansion Planning and Electric Vehicles Flexibility", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no 3, pp. 1609-1619, 2016.
- [19] A. Hajimiragha, C.A. Canizares, M.W. Fowler and A. Elkamel, "Optimal transition to plug-in hybrid electric vehicles in Ontario, Canada, considering the electricity-grid limitations", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no 2, pp. 690-701, 2010.
- [20] L. Ahmadi, A. Elkamel, S.A. Abdul-Wahab, M. Pan, E. Croiset, P.L. Douglas and E. Entchev, "Multi-Period Optimization Model for Electricity Generation Planning Considering Plug-in Hybrid Electric Vehicle Penetration", *Energies*, vol. 8, no. 5, pp. 3978-4002, 2015.
- [21] G.H. Moon, S.B. Kong, S.K. Joo, H.S. Ryu, and T.H. Kim, "Stochastic integrated generation and transmission planning incorporating electric vehicle deployment", *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 8, no 1, pp. 1-10, 2013.
- [22] P. Ramírez, D. Papadaskalopoulos and G. Strbac, "Impact of Electric Vehicles Flexibility on Generation Expansion Planning." 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), October 6-9, Copenhagen, pp. 1-5, (2013).
- [23] P.M. de Quevedo, G. Muñoz-Delgado and J. Contreras, "Impact of Electric Vehicles on the Expansion Planning of Distribution Systems Considering Renewable Energy, Storage, and Charging Stations", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no 1, pp. 794–804, 2019.
- [24] F. Manríquez, E. Saum, J. Aguado, S. de la Torre, and J. Contreras, "The impact of electric vehicle charging schemes in power system expansion planning", *Applied Energy*, vol. 262, 2020
- [25] H. Mehrjerdi, "Dynamic and multi-stage capacity expansion planning in microgrid integrated with electric vehicle charging station", *Journal of Energy Storage*, vol. 29, 2020
- [26] C. F. Heuberger, P. K. Bains, and N. M. Dowell, "The EV-olution of the power system: A spatio-temporal optimisation model to investigate the impact of electric vehicle deployment", *Applied Energy*, vol. 257, 2020
- [27] Seda Ediz, "Evaluation of the impacts of plug-in hybrid electric vehicles on electricity load curve for İstanbul", Master's thesis, Istanbul Sehir University, Turkey, 2017.
- [28] [www.teias.gov.tr](http://www.teias.gov.tr), (Visited on February, 1 2020)

## Electrical and Thermal Performance Analysis of a Linear Fresnel Reflector-Photovoltaic/Thermal System

\*<sup>1</sup>Coşkun Fırat, <sup>2</sup>Keziban Çalık<sup>1</sup>Istanbul Technical University, Energy Institute, [coskun.firat@itu.edu.tr](mailto:coskun.firat@itu.edu.tr), <sup>2</sup>Istanbul Technical University, Energy Institute, [keziban.calik@gmail.com](mailto:keziban.calik@gmail.com), 

Research Paper

Arrival Date: 10.08.2020

Accepted Date: 17.01.2021

### Abstract

A photovoltaic system integrated with linear Fresnel reflectors constitutes a very attractive energy generation system when combined with a cooling thermal system. In this study, a photovoltaic system using high efficiency and extremely durable monocrystalline solar cells is theoretically discussed. Although cheap but relatively less effective solar cells have been proposed, it has been shown that a very good cost-effective photovoltaic system can be produced by concentrating sunlight with a linear Fresnel reflector system and obtaining additional heat energy by cooling the photovoltaic panel. The electrical and thermal performance of the proposed system is theoretically analyzed under relatively low solar radiation conditions. Under the given climatic conditions and the average instantaneous solar radiation of 559 W/m<sup>2</sup> at the location, it is concluded that when a cooling mechanism is implemented, an average of 228.8 kWh of electricity and 1229.8 kWh of thermal energy can be obtained per month from the system.

**Keywords:** Solar radiation, concentrated solar photovoltaics, linear Fresnel reflector, PV cooling, CPV/T systems

### 1. INTRODUCTION

Photovoltaic (PV) cells convert sunlight directly into electricity. Therefore, photovoltaic power generation is a direct way of obtaining electricity from the Sun. However, due to the relatively low conversion efficiency and high costs, the PV systems are far from the traditional power generation systems in terms of wide usage. When compared to the levelized cost of energy (LCOE) on residential scale, PV power costs 204 €/kWh<sub>e</sub>, coal-based power including tax, transmission and distribution costs 186 €/kWh<sub>e</sub> and nuclear power costs 152 €/kWh<sub>e</sub> [1]. High investment costs, or total system costs of PV systems are still relatively high, although they start to decrease rapidly as a result of technology improvements and economies of volume and scale. Total system costs are composed of the sum of module costs and the expenses for the “balance-of system”, including mounting structures, inverters, cabling and power management devices. While the costs of the module types with different technologies vary on a per watt basis, these differences are less significant at the system level, which also considers the efficiency and land-use needs of the technology [2].

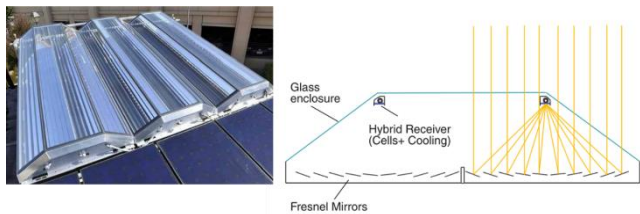
On the other hand, concentrating the sunlight allows the use of less PV material. Systems operating under concentrated sunlight are called concentration photovoltaics (CPV). The crucial idea behind CPV is replacing the PV material, which is currently the most expensive part of the system, with

cheaper optical elements. Sunlight can be concentrated by refraction, reflection, wavelength conversion, diffraction and laser action. Refraction is accomplished by lenses and reflection by mirrors (collectors) [3]. “The combination of photovoltaic (PV) technology, solar thermal technology and reflective or refractive solar concentrators has been a highly appealing option for developers and researchers since the late 1970s and early 1980s. The result is what is known as a concentrated photovoltaic thermal (CPVT) system which is a hybrid combination of concentration and photovoltaic/thermal (PV/T) systems. Several CPVT systems have been designed, studied, and demonstrated both theoretically and experimentally in literature. The results of these studies and demonstrations show that CPVT systems hold very high potential for market penetration in the energy sector due to their unique features” [4].

Concentrating solar collector usually has concave reflecting surfaces to intercept and focus the Sun’s beam radiation to a smaller receiving area. The high temperature concentrating solar thermal systems, like parabolic trough and linear Fresnel, requires large open area and the system engineering is very complex. The Linear Fresnel Collector is a line focusing concentrating collector suitable for solar thermal power generation and production of process heat [5]. LFRs had a late development compared to the other technologies [6]. LFR arrays present some relevant advantages in the domain of concentrating solar power because of their simplicity, robustness and low capital cost [7].

\*Corresponding Author: Istanbul Technical University, Energy Institute, [coskun.firat@itu.edu.tr](mailto:coskun.firat@itu.edu.tr)

The first modern PV concentrator called SANDIA-II array was made at Sandia National Laboratories in 1977. It consists of 5 cm diameter Si PV cells combined with acrylic Fresnel lens with 32 suns [8]. Integrating PV and concentrating collectors is such an attractive and old idea [9] because the CPVTs are highly efficient system compared to PV and concentrated solar collector systems. To reflect the incoming sun rays onto PV surface with lesser loss obviously makes such system more efficient. Therefore, in CPV systems mostly parabolic trough collectors are used [10-20]. The idea of using LFRs in a CPV system is very rare with new design of LFR-like systems and there is no any study regarding the coupling of traditional LFR systems and PVs in the literature. Vivar et al. developed a CPVT system based on LFR idea. They built an enclosed system by putting a micro LFR collector and a very small hybrid PV/T system inside an envelope which is not a traditional way of using LFRs as it is given in Figure 1. [21].



**Figure 1.** Micro-concentrator system on Santa Clara University Solar Decathlon House, 2010 [21].

Yang et al. designed an LFR-like CPVT system and analyzed it experimentally [22]. Although they used flat mirrors as it is in a traditional LFR system, but they made a parabolic trough collector indeed as it is showing in Figure 2.



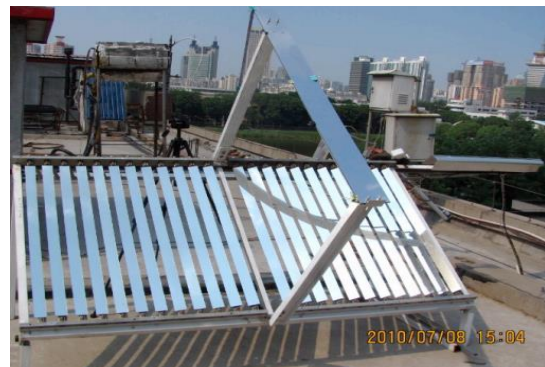
**Figure 2.** One unit of CPVT prototype [22].

Du et al. developed a CPV test device using flat mirrors as it is in a traditional LFR systems, but it was a parabolic trough collector rather than a traditional LFR as it is shown in Figure 3 [23].



**Figure 3.** Experimental set-up of water-cooled CPV module [23].

Zhang et al. designed a linear flat mirror concentrator (LFMC) aimed at low cost linear concentrating photovoltaic systems for economic green power [24]. Although they used a traditional LFR system, since they used a PV panel immersed in liquid. Therefore, their system was not a CPV/T system which is showing in Fig.4.



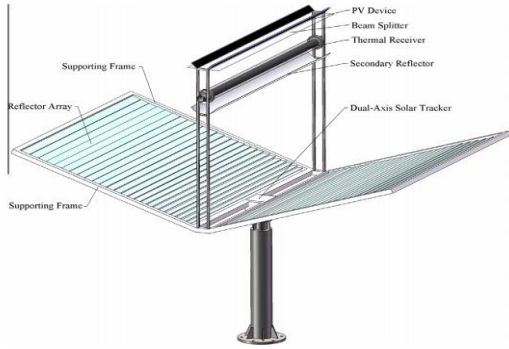
**Figure 4.** The mini-scale LFMC [24].

Rosell et al. studied on a similar system without analyzing it detailly. They have focused on to determine the output water temperature experimentally [25]. Their system is given in Fig.5.



**Figure 5.** PV/T system at the University of Lleida terrace [25].

Liu et al. considered an LFR-like system to build a CPV/T system [26]. However, they kept PV and thermal part separately by using a beam splitter for the incoming solar radiation. Therefore, their system cannot be accepted as a CPV/T system. The details of their system are showing in the Fig.6.



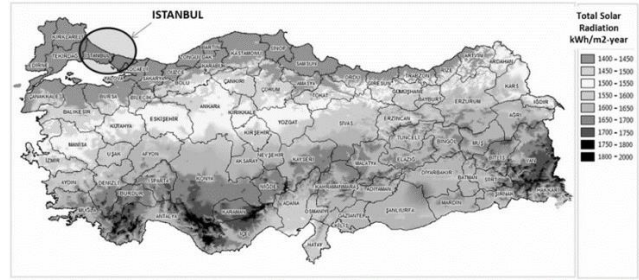
**Figure 6.** The mini-scale LFMC [26].

Photovoltaic cell production technology has been greatly improved and the PV efficiencies consequently increased. Si-based solar cells with back point contact [27] reached an efficiency record of 27.6%, and some manufacturers used this type of solar cells under more than 400 X-concentrations [28]. Commercial PV panels convert 10-27 % of the incident sunlight into electricity [29], depending on the solar cells that are used in panels. The remaining solar radiation is converted into heat, which significantly increases the temperature of the PV module and reduces the PV efficiency. This heat can be removed naturally or there may be a need of a cooling system which converts PV system into a PV-thermal (PV/T) system.

In this paper, a photovoltaic system with traditional linear Fresnel reflectors (LFR) integrated with a cooling mechanism is studied. Concentration of solar radiation onto a PV panel by using an LFR system is a new application in the literature. It is shown that a highly effective CPV/T system can be produced by combining a linear Fresnel reflector system with a PV panel as the receiver and a cooling system. The proposed system is considered together with low solar radiation conditions. Under the given weather conditions, it is concluded that it is possible to obtain on average 224.8 kWh of monthly electrical and 78.1 kWh of monthly thermal energy when a cooling system is integrated into PV system.

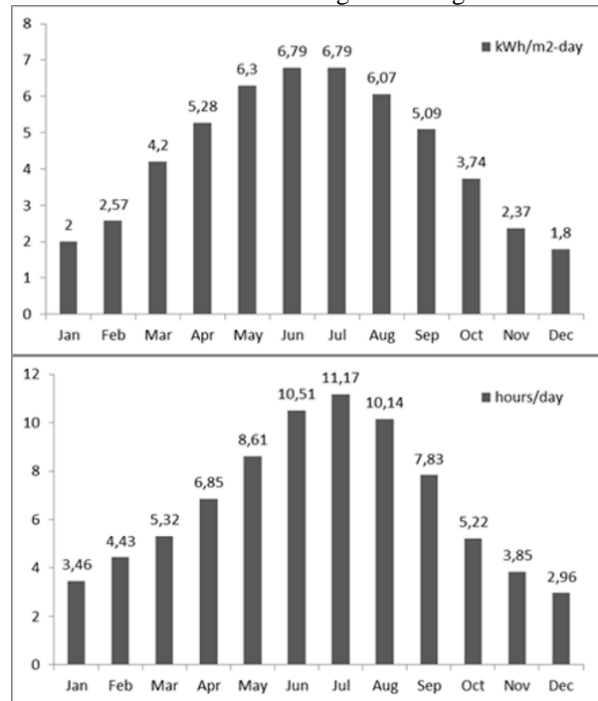
**2. SOLAR ENERGY POTENTIAL IN ISTANBUL, TURKEY**

The system is discussed for the city of Istanbul in Turkey. Therefore, here in this section, solar energy potential in Istanbul are given in details. Turkey has 7.5 hours/day of insolation duration and 4.18 kWh/m<sup>2</sup>-day of solar radiation annually. Turkey’s total global solar radiation is given in Fig.7 [30].



**Figure 7.** Total solar radiation on Turkey [30].

Istanbul is located between latitude 41.0082°N and the longitude 28.9784°E by having comparatively low solar radiation and insolation hours given in Fig.8.

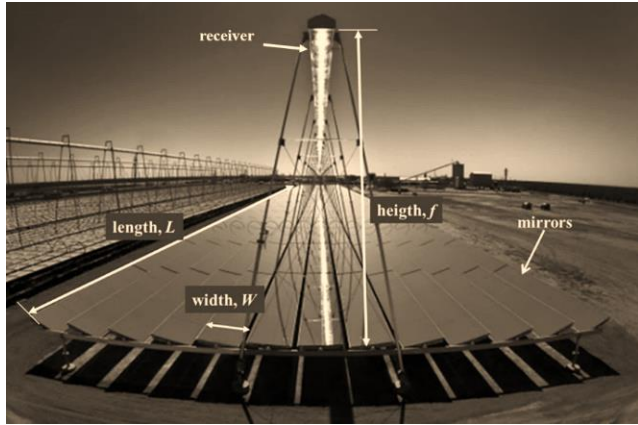


**Figure 8.** The monthly and average daily global solar insolation and average daily insolation hours in Istanbul [30].

It can easily be said that the solar radiation for Istanbul is relatively low. The reason for deciding to study on such low-level data in the paper is to give an idea to those who want to apply this system to the locations with higher solar energy values.

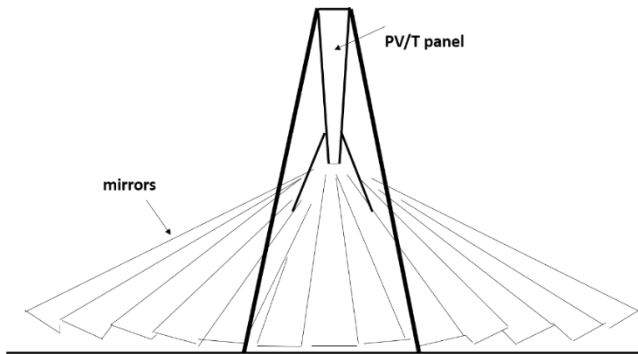
**3. A PV/T SYSTEM INTEGRATED WITH LINEAR FRESNEL REFLECTORS**

A conventional Linear Fresnel Power system consists of planar mirrors arranged one after the other. The Sun’s rays fallen on the mirrors are focused on a receiver which is at a certain height (Figure 9). Thus, the fluid in the receiver is heated for the usage of later on. It is possible to reach high temperatures of 400 °C with this system [31].



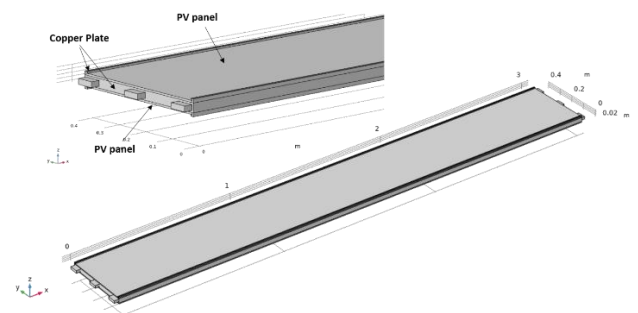
**Figure 9.** Reliance Areva Power's concentrated solar power [32].

In this study, for the sake of obtaining a CPV/T system, the thermal receiver of a traditional LFR system is replaced by a PV/T panel, as it is shown in Figure 10.



**Figure 10.** A CPV/T system using LFRs with PV/T receiver.

A representative view of the PV/T panel is introduced in Figure 11.



**Figure 11.** A representative view of the receiver of an LFR-CPV/T system.

The considered LFR-CPV/T system consists of 10 mirrors in total, as 5 mirrors on each side of the collector area. Although in an LFR system, tracking does not supply a perfect reflection [33], in this study, all the calculations are done by considering the mirrors as tracking the hourly position of the Sun on the representative day of the given month. Hence, rather than dealing with the values of each specific day in a given month, it is assumed that each and every day of a given

month has the same solar energy values like direct normal radiation and sunshine duration by considering the solar radiation in every day is same as the representative day of the months.

The technical specifications of the considered LFR system are given in Table 1.

**Table 1.** Technical properties of the LFR system

Property	Value
#of Mirrors, $N$	10
Mirror Length, $L$	3 m
Mirror Width, $W$	0.3 m
Gap between the adjoint mirrors	0.2 m
Receiver Height, $f$	3.31 m
Reflectivity of mirrors in full spectrum, $\rho$	98%

It is assumed a highly reflective aluminum lighting sheet is used in the mirrors [34]. To avoid the shading and blocking losses in the mirror area, the gap between the adjoint mirrors is selected as 0.2 m.

Although, it is offered to use multi-junction solar cells for concentrated solar light, multi- or mono-crystal silicon (p-Sci, m-Si) solar cells can also be used for relatively low concentrated solar light. Therefore, here in this study, a highly efficient PV panel with 21.7% efficiency made of Monocrystalline-Si is considered as the part of the receiver of the system [35,36]. Under standard test conditions (STC) of AM1.5, 1000 W/m<sup>2</sup> at ambient temperature of 25°C, the specifications of the PV panel are given in Table 2.

**Table 2.** Technical properties of the PV panel.

Property	Value
Length	3 m
Width	0.4 m
PV area, $A_{pv}$	1.2 m <sup>2</sup>
Efficiency, $\eta_{nom}$	21.7%
Emissivity of PV panel, $\epsilon$	0.91
Rated voltage, $V_{mpp}$	77.6 V
Rated current density, $J_{sc}$	2.803 A/m <sup>2</sup>
Power @ max. power point, $P_M^{STC}$	261 W
Power temperature coefficient, $\beta$	-0.29 %/°C

To avoid the end-loss in the receiver, its width is selected as 0.4 m after optical optimization calculations which they are not given in this paper.

In the calculations, only the direct solar radiation is taken into account, since the mirrors are facing opposite to the ground and so the contribution from diffuse radiation can easily be neglected.

When sunlight is concentrated onto a PV panel, the instant PV temperature,  $T_{pv}$ , rises which can be calculated by the following equation [37];

$$(1 - \eta_{nom})E_{pv} = h_w(T_{pv} - T_a) + \epsilon\sigma(T_{pv}^4 - T_a^4) \quad (1)$$

where  $\eta_{nom}$  is the nominal efficiency of PV panel,  $E_{pv}$  is the concentrated power density reflected by LFR onto the PV panel in  $W/m^2$ ,  $h_w$  is the convective heat transfer coefficient  $\approx 11.4 + 5.7v$   $W/m^2K$  for the air,  $v$  is the average wind speed,  $T_{pv}$  is the temperature of PV panel at  $E_{pv}$ ,  $T_a$  is the

ambient temperature in K,  $\epsilon$  is the emissivity of PV panel and  $\sigma$  is Stefan-Boltzmann constant which is equal to  $5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$ .

The average of daily solar energy for Istanbul is obtained as in Table 3 for each month.

**Table 3.** Monthly average daily solar energy and weather data for Istanbul [38]

Month	Number of the days	Representative day of the month	Av. wind speed (m/s)	Av. instant Solar radiation ( $W/m^2$ )	Sunshine duration (hours)	Average ambient temp. ( $^{\circ}C$ )	Mains water temp. $T_{in}$ , ( $^{\circ}C$ )
January	31	17	4.81	491.33	3.46	6.00	10.2
February	28	16	4.81	493.12	4.43	6.10	9
March	31	16	4.36	671.05	5.32	7.70	9.5
April	30	15	4.03	655.18	6.85	12.00	11.8
May	31	15	3.97	621.95	8.61	16.70	15.4
June	30	11	4.28	549.14	10.51	21.40	19.2
July	31	17	4.78	516.70	11.17	23.80	21.9
August	31	16	4.78	508.83	10.14	23.80	22.9
September	30	15	4.92	552.55	7.83	20.10	22.4
October	31	15	4.36	609.00	5.22	15.70	19.8
November	30	14	4.25	523.25	3.85	11.70	16.9
December	31	10	4.83	516.89	2.96	8.20	13.2

The power output of the PV panel at maximum point for a given power density  $E_{pv}$  and temperature  $T_{pv}$  is [37] calculated through following equation as,

$$P_{out} = P_M^{STC} \frac{E_{pv}}{1000} [1 + \beta(T_{pv} - 25)] \quad (2)$$

Such a high energy,  $E_{pv}$ , certainly rises the PV temperature and the elevated PV temperature clearly reduces the power output. Thus, the efficiency of PV can be obtained by following expression;

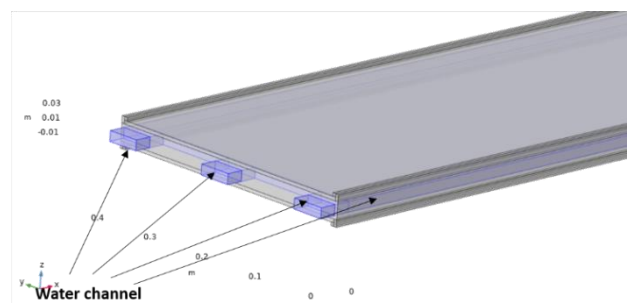
$$\eta_{pv} = \frac{P_{out}}{E_{pv} \cdot A_{pv}} \quad (3)$$

Reflected concentrated solar energy  $E_{pv}$  received by the bottom PV panel, the bottom PV temperature at  $E_{pv}$  calculated by Eq. (1),  $T_{pv}$  are given in the Table 4.

**Table 4.** Elevated temperature of bottom PV panel due to  $E_{pv}$ .

Month	$E_{pv}$ ( $W/m^2$ )	$T_{pv}$ ( $^{\circ}C$ )
January	3521.25	67.3
February	3534.08	67.6
March	4809.26	94.4
April	4695.52	99.8
May	4457.37	100.4
June	3935.56	92.6
July	3703.07	86.8
August	3646.67	85.9
September	3960.00	86.5
October	4364.55	94.0
November	3750.01	80.9
December	3704.43	72.2
<b>Average</b>	<b>4006.81</b>	<b>85.7</b>

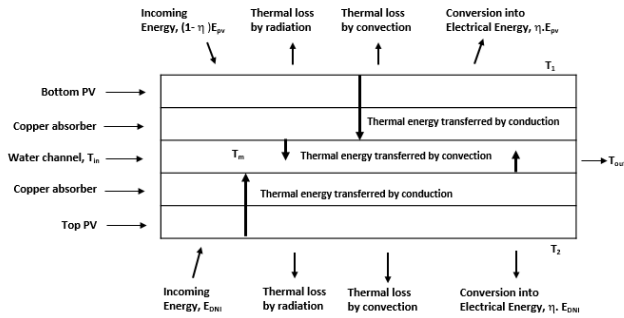
To avoid reduction in output electrical power and efficiency, obviously it is necessary to cool the PV panel down. Cooling by convection and radiation heat transfer is not enough as it is in a stand-alone PV panel. Therefore, using a cooling system is inevitable. In literature, various types of cooling mechanisms for a concentrated PV system has been studied [39-54]. Selection of the working fluid in the cooling system depends on the intended use of the thermal energy obtained. In this study, since the PV surface area to be cooled is small, it is assumed that water, which is considered as a coolant, flows through a single channel in an absorber metal panel sandwiched between the top and bottom PV panels as it is shown in the Fig. 12. To distribute the inlet water homogeneous in the plate, the inlets considered as manifolded.



**Figure 12.** PV and thermal configuration of the receiver.

The portion of the incoming energy converted into electrical energy is about  $\eta_{nom}E_{pv}$  for the bottom PV panel. The

$(1 - \eta_{nom})E_{pv}$  segment of the incoming energy is converted into thermal energy and the heat transfer mechanisms in the domain is shown in the Fig. 13.



**Figure 13.** Heat transfer mechanisms in PV/T receiver

The detailed mathematical descriptions of the heat mechanisms given in the Fig. 10 are as follows for the bottom (concentrated) and top direct PV respectively;

$$(1 - \eta_{nom})E_{pv} = h_w(T_1 - T_a) + \epsilon\sigma(T_1^4 - T_a^4) + \frac{1}{R}(T_1 - T_m) \tag{4}$$

$$(1 - \eta_{nom})E_{DNI} = h_w(T_2 - T_a) + \epsilon\sigma(T_2^4 - T_a^4) + \frac{1}{R}(T_2 - T_m) \tag{5}$$

where  $T_1$  and  $T_2$  is the both sides surface temperature of the receiver,  $R$  is the thermal resistance along the receiver and  $T_m$  is the mean water temperature which is given as follows theoretically;

$$T_m = \frac{T_{out} + T_{in}}{2} \tag{6}$$

In this study despite  $T_m$  can be calculated iteratively, after doing some preliminary study, it was seen that it is 5 °C above the water inlet temperature,  $T_{in}$ . Therefore, in the calculations,  $T_m$  is obtained according to this assumption by considering  $T_{in}$  given in Table-3. The Eqs. (4) and (5) gives the thermal energy balance. In these equations, the thermal portion of the incoming energy onto the receiver’s both sides respectively are given by;

$$(1 - \eta_{nom})E_{pv} \tag{7}$$

$$(1 - \eta_{nom})E_{DNI} \tag{8}$$

The heat lost by radiation is expressed as;

$$\epsilon\sigma(T_i^4 - T_a^4), i = 1,2 \tag{9}$$

The heat lost by convection is given by;

$$h_w(T_i - T_a), i = 1,2 \tag{10}$$

And finally, the heat transferred into the coolant is given by the term of;

$$\frac{1}{R}(T_i - T_m), i = 1,2 \tag{11}$$

Where the thermal resistance  $R$  is given as follows;

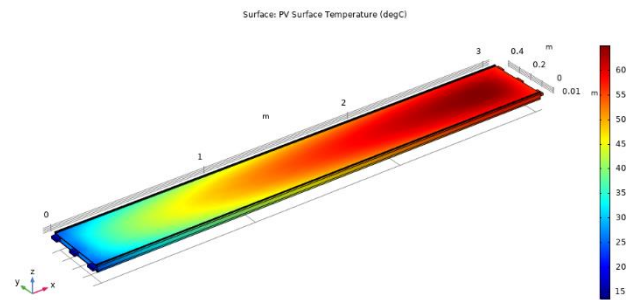
$$R = \frac{L_{pv}}{k_{pv}} + \frac{L_{abs}}{k_{abs}} + \frac{1}{h_w} \tag{12}$$

The parameters given in the Eq. (12) are expressed in the Table 5.

**Table 5.** Thermal and mechanical properties of the receiver [55].

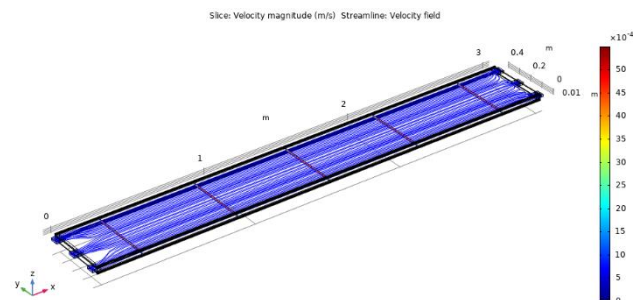
Property	Thickness, $L$ , (m)	Heat transfer coefficient, $k, h$
Photovoltaic, (pv)	$225 \cdot 10^{-6}$	148 W/m.K
Copper absorber, (abs)	$10^{-2}$	400 W/m.K
Water, (w)	-	450 W/m <sup>2</sup> .K

Heat transfer processes in the system is also carried out numerically by using finite element method. As an example, temperature distribution on the bottom-PV surface for the month April is obtained as in the Fig.14.



**Figure 14.** Temperature distribution on the bottom-PV surface of the receiver.

For this example, the velocity streamline of the flow is obtained as in the Fig.15.



**Figure 15.** Velocity streamline of the flow.

After applying the heat transfer mechanisms to decrease the temperature of the PV receiver, the obtained simulation results of the PV/T system for 12 months are given in Table 6.



**Table 6.** The electrical and thermal performance of the system

Month	Bottom PV temperature after cooling (°C)	Top PV temp. (°C)	Total Instant Pout (W)	Daily Electrical Energy (kWh/d)	Output temperature of water (°C)	Daily Thermal Energy (kWh/d)
1	37.6	29.4	1012.1	3.5	38.9	13.9
2	37.8	29.6	1015.2	4.5	39.1	17.9
3	49.2	38.1	1335.7	7.1	52.3	33.2
4	51.1	40.1	1296.3	8.9	55.0	45.9
5	51.5	41.1	1228.8	10.6	55.9	59.0
6	49.2	40.2	1092.2	11.5	53.8	68.2
7	47.8	39.3	1032.0	11.5	52.0	69.2
8	47.4	39.0	1017.4	10.3	51.5	62.0
9	47.7	38.6	1104.1	8.6	51.4	47.8
10	49.6	39.5	1210.2	6.3	53.4	33.6
11	43.1	34.4	1060.3	4.1	45.9	19.9
12	40.1	31.5	1057.0	3.1	41.5	13.1

By comparing the bottom PV temperature given in Table-6 to Table-4, the significant amount of decrease, hence increase in power output, can be seen clearly. Besides, it is also noticeable that by increasing the electrical output of the system, a considerable amount of thermal energy is obtained from the system. Thermal energy, thermal efficiency and overall system efficiency are given as follows respectively;

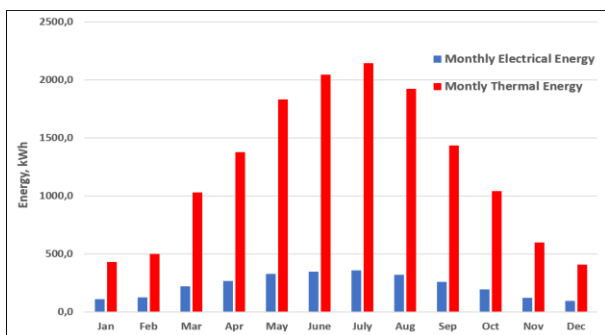
$$Q_{th} = \frac{\dot{m} \cdot c_p}{A_{pv}} \cdot (T_{out} - T_{in}) \tag{13}$$

$$\eta_{th} = \frac{Q_{th}}{E_{pv}} \tag{14}$$

$$\eta_s = \eta_{pv} + \eta_{th} \tag{15}$$

Where  $\eta_{pv}$  is the total electrical energy efficiency of the LFR-CPV/T system. The mass flow rate,  $\dot{m}$ , for water is selected as 0.02 kg/s and the specific heat is  $c_p = 4186$  Ws/kgK.

Electrical, thermal and overall efficiencies of the system are given in Table 7.



**Figure 16.** The daily averaged monthly total produced electrical and thermal energy.

**Table 7.** The electrical, thermal and overall system efficiency

Month	Electrical Energy Efficiency (%), $\eta_{pv}$	Thermal Energy Efficiency (%), $\eta_{th}$	Overall system efficiency (%), $\eta_s$
1	21.2	47.4	68.6
2	21.2	47.6	68.8
3	20.6	54.1	74.7
4	20.5	59.4	79.9
5	20.4	64.0	84.4
6	20.5	68.8	89.3
7	20.6	69.7	90.3
8	20.6	69.8	90.4
9	20.6	64.1	84.7
10	20.5	61.4	81.9
11	20.9	57.5	78.4
12	21.1	49.9	71.0

The daily averaged monthly total produced electrical and thermal energy are given in the Fig. 16.

Under concentrated solar radiation, the average instant LFR-PV power output is obtained as 1121.8 W. This would be 292 W under only DNI. Therefore, to produce the same amount of power under DNI, a PV panel with 4.6 m<sup>2</sup> surface area should be used. This means that by the presented configuration in this study, the electrical performance of the PV panel of 1.2 m<sup>2</sup> is increased by 383% and achieves up to 90% overall system efficiency. To give a clear clue about the results obtained in the present study, the study done by Amanlou et al. on a concentrated PV/T system by using a LFR-like system together with PV panel with 10% efficiency [56] is considered. They used a single-crystalline silicone PV panel of 0.80 m<sup>2</sup>. The panel was cooled by air flow. Their system is showing in Fig.17.



**Figure 17.** The PV/T collector and Fresnel reflector [56].

With such a system, they have increased the electrical performance of the system by 36%. Another study for comparison is done by Yang et al [22]. They have designed a quasi-parabolic trough collector by using flat mirrors in the system to build a low concentrating photovoltaic/thermal system (Fig.2). They achieved a 59% overall system efficiency as the summation of electrical and thermal efficiencies.

#### 4. CONCLUSION

In this study, a PV/T system with a conventional linear Fresnel reflector is introduced as a new application of a concentrated solar energy system and its performance is obtained under solar conditions of the city of Istanbul in Turkey. Under the given solar radiation conditions which is instantaneously  $559 \text{ W/m}^2$  at the location, the system yields 228.8 kWh of average monthly electrical and 1229.8 kWh thermal energy. These results can competitively be compared with the results obtained in the studies given in the literature. When these results are considered that the daily electrical consumption is about 2 kWh and thermal energy usage (for heating) is about 4 kWh per capita in Turkey, for such a small system this amount of energy would be enough for domestic and even for small-size commercial usages with a few modules of the presented system. Without a cooling system, PV temperature in proposed concentrating system reaches up to  $100^\circ\text{C}$  which is much higher than the optimal working temperature of a PV panel. As it is very well known that the efficiency of PV panels drops drastically parallel to the elevated PV temperatures. Hence, considering an LFR-PV system with a cooling system does not only increase the PV power generation, but also increases the overall system efficiency up to 90% due to an additional thermal energy system for the intention of cooling the PV receiver. When compared with a photovoltaic system under direct sunlight with 292 W of generated power, the power generated by proposed LFR-PV system is about 4 times higher, which is 1121.8 W on average in the case study. The result would be much more remarkable when the system is sized-up. Therefore, since this type of system is more affordable than a conventional photovoltaic system, it can be considered as an alternative power supply in convenient areas. It is also expected to realize this purposed configuration of the CPV/T by an R&D company named SUNOVA Project Consultancy

and Construction Company and verify the performance results in this study.



#### REFERENCES

- [1] M. Ram, M.Child, A.Aghahosseini, D.Bogdanov, A.Poleva, "Comparing electricity production costs of renewables to fossil and nuclear power plants in G20 countries", Technical Report, Lappeenranta University of Technology (LUT), Greenpeace, July 2017.
- [2] "Technology Roadmaps Solar photovoltaic energy", URL: [https://www.iea.org/publications/freepublications/publications/pv\\_roadmap.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publications/pv_roadmap.pdf), (accessed 16/03/2020).
- [3] H. S. Rauschenbach, "Solar Cell Array Design Handbook", Litton Educational Publishing, Inc., NY, 1980.
- [4] O. Z. Sharaf, M. F. Orhan, "Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems:Part I – Fundamentals, design considerations and current technologies", *Ren. and Sust. Ener. Rev.*, 50, 1500–1565, 2015.
- [5] A. Heimsath, F. Cuevas, A. Hofer, P. Nitz, W. J. Platzer, "Linear Fresnel Collector Receiver: Heat Loss and Temperatures", *Energy Procedia*, 49, 386-397, 2014.
- [6] R. Abbas, J. Muñoz-Antón, M. Valdés, J.M. Martínez-Val, "High concentration linear Fresnel reflectors", *Energy Conv. and Man.*, 72, 60-68, 2013.
- [7] M.J. Montes, C. Rubbia, R. Abbas, J.M. Martínez-Val, "A comparative analysis of configurations of linear Fresnel collectors for concentrating solar power", *Energy*, 73, 192-203, 2014.
- [8] L.A. Luque, V.M. Andreev, "Concentrator photovoltaics", Berlin: Springer; 2007.
- [9] R. Otterbein, W.A. Facinelli, D.L. Evans "Combined photovoltaic/thermal system studies", NASA STI; 1978.
- [10] L. Zhang, D. Jing, L. Zhao, J. Wei, and L. Guo, "Concentrating PV/T Hybrid System for Simultaneous Electricity and Usable Heat Generation: A Review", *Int. J. of Photoenergy*, Special Issue, 8 pages, 2012.
- [11] R. Daneshzarian, E. Cuce, P. M. Cuce, F. Sher, "Concentrating photovoltaic thermal (CPVT) collectors and systems: Theory, performance assessment and applications", *Ren. and Sust. Energy Rev.*, 81, 473–492, 2018.
- [12] N. Gakkhar, M. K. Soni, S. Jakhar, "Experimental and theoretical analysis of hybrid concentrated photovoltaic/thermal system using parabolic trough collector", *App. Thermal Eng.*, 171, 115069, 2020.
- [13] M. George, A.K. Pandey, N. A. Rahim, V.V. Tyagi, S. Shahabuddin, R. Saidur, "Concentrated photovoltaic thermal systems: A component-by-component view on the developments in the design, heat transfer medium and applications", *Ene. Conv. and Man.*, 186, 15–41, 2019.
- [14] M. Valizadeh, F. Sarhaddi, M. M. Adeli, "Exergy performance assessment of a linear parabolic trough photovoltaic thermal collector", *Ren. Energy*, 138, 1028-1041, 2019.
- [15] A. Kasaeian, S. Tabasi, J. Ghaderian, H. Yousefi, "A review on parabolic trough/Fresnel based photovoltaic

- thermal systems”, *Ren. and Sust. Energy Rev.*, 91, 193–204, 2018.
- [16] D. Del Col, M. Bortolato, A. Padovan, M. Quaggia, “Experimental and numerical study of a parabolic trough linear CPVT system”, *Energy Procedia*, 57, 255 – 264, 2014.
- [17] C. Renno, F. Petito, “Modelling of a linear focus concentrating photovoltaic and thermal system for different load scenarios of a residential user”, *Ene. Conv. and Man.*, 188, 214–229, 2019.
- [18] R. Tripathia, G.N.Tiwari, T.S.Bhattia, V.K.Dwivedi, “2-E (Energy-Exergy) for partially covered concentrated photovoltaic thermal (PVT) collector”, *Energy Procedia*, 142, 616-623, 2017.
- [19] A. Muthu Manokar, D. P. Winston, M. Vimala, “Performance Analysis of Parabolic trough Concentrating Photovoltaic Thermal System”, *Procedia Tech.*, 24, 485 – 491, 2014.
- [20] B. K. Widyolar, M. Abdelhamid, L. Jiang, R. Winston, E. Yablonoitch, G. Scranton, D. Cygan, H. Abbasi, A. Kozlov, “Design, simulation and experimental characterization of a novel parabolic trough hybrid solar photovoltaic/thermal (PV/T) collector”, *Ren. Energy*, 101, 1379-1389, 2017.
- [21] M. Vivar, V. Everett, M. Fuentes, A. Blakers, A. Tanner, P. Le Lievre and M. Greaves, “Initial field performance of a hybrid CPV-T microconcentrator system”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 21, 1659 – 1671, 2013.
- [22] F. Yang, H. Wang, X. Zhang, W. Tian, Y. Hua, T. Dong, “Design and experimental study of a cost-effective low concentrating photovoltaic/thermal system”, *Solar Energy* 160, 289–296, 2018.
- [23] B. Du, E. Hu, M. Kolhe, “Performance analysis of water cooled concentrated photovoltaic (CPV) system”, *Ren. and Sust. Energy Rev.*, 16, 6732–6736, 2012.
- [24] H. Zhang, L. Zhu, Y. Wang, Y. Sun, “Design and Simulation of a Linear Flat Mirror Concentrator”, *Solar2010*, the 48th AuSES Annual Conference, Canberra, ACT, Australia, 1-3 December 2010.
- [25] J.I. Rosell, X. Vallverdu, M.A. Lechon, M. Ibanez, “Design and simulation of a low concentrating photovoltaic / thermal system”, *Ene. Conv. and Man.*, 46, 3034–3046, 2005.
- [26] Y. Liu, P. Hu, Q. Zhang, Z. Chen, “Thermodynamic and optical analysis for a CPV/T hybrid system with beam splitter and fully tracked linear Fresnel reflector concentrator utilizing sloped panels”, *Solar Energy*, 103, 191–199, 2014.
- [27] R.M. Swanson, S. Beckwith, R. Crane, “Point-contact silicon solar cells”, *IEEE Transactions on Electron Devices* 31, pp.661, 1984.
- [28] V. Salas, “National Survey Report of PV Power Applications in Spain 2008, IEA Co-operative Programme on Photovoltaic Power Systems”, *Universidad Carlos III de Madrid*, 2009.
- [29] M. A. Green, Y. Hishikawa, E.D. Dunlop, “Solar cell efficiency tables (Version 53)”, *Prog Photovolt Res Appl.*, 27: 3– 12, 2019.
- [30] “Solar Energy Potential Atlas in Turkey”. URL: <http://www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx>, (accessed 16/03/2020).
- [31] Editors: I. Dincer, C. O. Colpan, O. Kizilkan, “Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions”, 1st Edition, Academic Press, London, UK, 2018.
- [32] “Areva Power's concentrated solar power”, URL: <http://helioscsp.com/reliance-powers-concentrated-solar-power-csp-plant-to-be-commissioned-on-october/>, (accessed 16/03/2020).
- [33] S.S. Mathur, T.C. Kandpal, B.S. Negi, “Optical Design and Concentration Characteristics of Linear Fresnel Reflector Solar Concentrators-II. Mirror Elements of Equal Width”, *Energy Convers. Mgmt.*, 31:3, 221-232, 1991.
- [34] “Anolux-MIRO-SILVER”, URL: <http://anomet.com/reflective-aluminum>, (accessed 16/03/2020)
- [35] “Sunpower X-Series Solar Panels”, URL: <https://us.sunpower.com/sites/default/files/sunpower-x-series-commercial-solar-panels-x21-470-com-datasheet-524935-revb.pdf> (accessed 16/03/2020).
- [36] W.P. Mulligan, D.H. Rose, M.J. Cudzynovic, D.M. De Ceuster, K.R. McIntosh, D.D. Smith, and R.M. Swanson, “Manufacture of Solar Cells with 21% Efficiency”, URL: <https://taylorede.com/reference/Electronics/Photonics/HighEfficiencySolarCells.pdf>, (accessed 16/03/2020).
- [37] C. Firat, A. Beyene, “Comparison of direct and indirect PV power output using filters, lens, and fiber transport”, *Energy*, 41:1, 271-77, 2012.
- [38] “NOAA Solar Calculator”, URL: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>, (accessed 16/03/2020).
- [39] S.Fakouriyani, Y.Saboohi, A.Fathi, “Experimental analysis of a cooling system effect on photovoltaic panels' efficiency and its preheating water production”, *Ren. Energy*, 134, 1362-1368, 2019.
- [40] S. Karellas, T. C. Roumpedakis, N. Tzouganatos, K.Braimakis, “Solar Cooling Technologies”, CRC Press, Sound Parkway NW, 2019.
- [41] O. Z. Sharaf, M. F. Orhan, “Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems:Part I – Fundamentals, design considerations and current technologies”, *Ren. and Sust. Ener. Rev.*, 50, 1500–1565, 2015.
- [42] O. Z. Sharaf, M. F. Orhan, “Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part II Implemented systems, performance assessment, and future directions”, *Ren. and Sust. Ener. Rev.*, 50, 1566–1633, 2015.
- [43] A. Hasan, J. Sarwar, A. H. Shah, “Concentrated photovoltaic: A review of thermal aspects, challenges and opportunities”, *Ren. and Sust. Ener. Rev.*, 94, 835–852, 2018.
- [44] A. Aldossary, S. Mahmoud, R. AL-Dadah, “Technical feasibility study of passive and active cooling for concentrator PV in harsh environment”, *App. Thermal Eng.*, 100, 490–500, 2016.
- [45] Z. Xu, C. Kleinstreuer, “Concentration photovoltaic–thermal energy co-generation system using nanofluids for cooling and heating”, *Ener. Conv. and Mng.*, 87, 504–512, 2014.

- [46] B. Du, E. Hu, M. Kolhe, "Performance analysis of water cooled concentrated photovoltaic (CPV) system", *Ren. and Sust. Ener. Rev.*, 16, 6732–6736, 2012.
- [47] M. Sabry, "Temperature optimization of high concentrated active cooled solar cells", *NRIAG J. of Astronomy and Geophysics*, 5, 23–29, 2016.
- [48] L. Idoko, O. Anaya-Lara McDonald, "Enhancing PV modules efficiency and power output using multi-concept cooling technique", *Energy Reports*, 4, 357–369, 2018.
- [49] Z. Peng, M.R. Herfatmanesh, Y. Liu, "Cooled solar PV panels for output energy efficiency optimisation", *Ener. Conv. and Mng.*, 150, 949–955, 2017.
- [50] J. Siecker, K. Kusakana, B. P. Numbi, "A review of solar photovoltaic systems cooling technologies", *Ren. and Sust. Ener. Rev.*, 79, 192–203, 2017.
- [51] H. G. Teo, P. S. Lee, M. N. A. Hawlader, "An active cooling system for photovoltaic modules", *Applied Energy*, 90, 309–315, 2012.
- [52] H. M. S. Bahaidarah, A. A. B. Baloch, P. Gandhidasan, "Uniform cooling of photovoltaic panels: A review", *Ren. and Sust. Ener. Rev.*, 57, 1520–1544, 2016.
- [53] I. Ceylan, A.E. Gürel, H. Demircan, B. Aksu, "Cooling of a photovoltaic module with temperature controlled solar collector", *Energy and Buildings*, 72, 96–101, 2014.
- [54] N. Gilmore, V. Timchenko, C. Menictas, "Microchannel cooling of concentrator photovoltaics: A review", *Ren. and Sust. Ener. Rev.*, 90, 1041–1059, 2018.
- [55] S. Armstrong, W.G. Hurley, "A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions", *App. Thermal Eng.*, 30, 1488–1495, 2010.
- [56] Y. Amanlou, T. T. Hashjin, B. Ghobadian, G. Najafi, "Air cooling low concentrated photovoltaic/thermal (LCPV/T) solar collector to approach uniform temperature distribution on the PV plate", *App. Thermal Eng.*, 141, 413–421, 2018.

## Immobilization and Characterization of Trypsin on TiO<sub>2</sub> Nanoparticles Activated with Crosslinkers

\*<sup>1</sup>Selmihan Sahin, <sup>2</sup>Ismail Ozmen<sup>1</sup>Suleyman Demirel University, Arts and Sciences Faculty, Department of Chemistry, Cunur, Isparta, 32260, Turkey.  
selmihansahin@sdu.edu.tr, <sup>2</sup>Suleyman Demirel University, Arts and Sciences Faculty, Department of Chemistry, Cunur, Isparta, 32260, Turkey.  
ismailozmen@sdu.edu.tr, 

Research Paper

Arrival Date: 20.08.2020

Accepted Date: 20.01.2021

### Abstract

The immobilization of trypsin (TRP) on the amine-functionalized silica coated TiO<sub>2</sub> nanoparticles (ASTiNPs) with/without different crosslinkers (1,4-phenylene diisothiocyanate (PDC), 1,3-phenylene diisothiocyanate (MDC), glutaraldehyde (GA)) has been studied. The ASTiNPs and modified ASTiNPs with the crosslinkers were characterized by FTIR and TEM. When considered the specific activity of immobilized TRP on ASTiNPs, GA-bound TRP showed the higher specific activity. Loading capacity was higher when PDC used as crosslinker. Optimum concentration of the crosslinkers for the TRP immobilization was determined as 20.8 μM of PDC, 5.2 μM of MDC and 1.5 v/v of GA. The direct-bound TRP showed 5% of its initial activity after the four cycles while the GA-bound TRP sustained 7% of its initial activity after the seven cycles and MDC and PDC-bound TRP sustained 7% and 11% of its initial activity after the ten cycles, respectively. The digestion of the Cyt C with immobilized TRP was evaluated by LC-MS/MS analysis. The immobilized TRP on ASTiNPs with crosslinkers showed the higher digestion efficiency of Cyt C when compared to the immobilized TRP on ASTiNPs without crosslinker. Consequently, the PDC-bound TRP on the ASTiNPs gave the better result of digestion efficiency, loading capacity, catalytic activity and reusability than the others.

**Keywords:** Trypsin, immobilization, crosslinker, amine functionalization, silica coating, TiO<sub>2</sub>

### 1. INTRODUCTION

Immobilization of enzymes offers a number of advantages such as easily recovery from the reaction medium and reusability in continuous processes. However, there are some parameters to be considered for proper immobilization of the enzymes [1]. The one of the important parameters during immobilization is the characteristic properties of the support such as shape, size, chemistry and so on [2].

TiNPs has antimicrobial properties, high mechanical strength, and high corrosion resistance which make them suitable support for enzyme immobilization [3]. However, the loading capacity of biomolecules on these particles is low due to their inorganic characteristic and the presence of insufficient functional groups on their surfaces. Surface modification can be effective to improve their biocompatibility and loading capacity [4]. Surface of TiNPs has been modified with inorganic and organic silane sources to change surface charge, to decrease nanoparticles aggregation, to improve its mechanical and photocatalytic properties and dispersion stability in organic and aqueous media. All of these properties make them more suitable for enzyme immobilization [5]. Previously, Wu et al. [5] have

modified the surface of mesoporous TiO<sub>2</sub> with ε-Poly-L-lysine to immobilize negatively charged enzymes and thus, improved their stability and reusability properties. TiNPs were also functionalized with –COOH group using 3-(3,4-dihydroxyphenyl) propionic acid to peroxidase immobilization [6]. 3-APTES has been commonly used in covalent immobilization [7]. It has primary amino group which provides easily modification of the surface of the supports with functional groups as aldehydes, carboxylic acid, isothiocyanate and epoxy groups [8]. The surface of mesoporous TiO<sub>2</sub> has been chemically modified with 3-aminopropyltriethoxysilane (3-APTES) to immobilize γ-glutamyltranspeptidase and its loading capacity has been increased [9]. However, examples of the silica coating with tetraethyl orthosilicate and then amine functionalization with 3-APTES of the TiNPs (used in the present study) for enzyme immobilization are scarce in the literature. This kind of modifications has been applied on the magnetic nanoparticles [10, 11] and silicon wafers [12].

Crosslinkers can be used for modification of support for efficient immobilization of enzymes. The using of crosslinkers can provide the efficient conversion of the high molecular weight substrate, the changing polarity of the surface causing denaturation, the minimizing undesirable

\*Corresponding Author: Suleyman Demirel University, Arts and Sciences Faculty, Department of Chemistry, Cunur, Isparta, 32260, Turkey, selmihansahin@sdu.edu.tr, +902462114340

conformational effects and steric hindrance by offering more flexibility which increases catalytic activity of enzymes [3]. The most common crosslinkers used in the literature are dialdehydes or diisothiocyanate which are able to form covalent bonds between enzyme and surface of the supports [13]. Previously, TRP has been immobilized on support with different crosslinkers or directly. These methods have been compared in terms of hydrolytic and synthetic activity [3]. It has been found that immobilized TRP with diaminoalkane, aminoalkanoic acid and biotin crosslinkers have showed higher hydrolytic and synthetic activity compared to the direct-bound TRP. Different from all these studies, the preparation and characterization of the ASTiNPs was described and then TRP was immobilized on them with crosslinkers (GA, PDC, MDC and without crosslinker) to determine the effect of geometry, functional groups (aldehyde and isothiocyanate) and aliphatic and aromatic structure of crosslinkers on the TRP immobilization in this study. The effect of concentration of the crosslinkers on the immobilized TRP activity was examined and compared to a direct-binding method (without crosslinker). Furthermore, the effect of crosslinkers on the catalytic activity and the reusability was investigated and compared with the others. Also, the Cyt C digestion efficiency of the immobilized TRP via GA, PDC, MDC and without crosslinker was investigated by a LC-MS/MS analysis.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Materials

Benzoyl-L-arginine ethyl ester (BAEE), Cyt C, benzamidine HCL, GA (25%), 3- APTES (98%), and acetonitrile were obtained from Merck. TRP from bovine pancreas was purchased from Amresco Corporation. PDC (98%) and TEOS were purchased from Alfa Aesear. MDC (97%) was purchased from Sigma-Aldrich. Other chemicals and reagents were analytical grade unless otherwise stated.

### 2.2. Support preparation

#### 2.2.1. Silica coating of TiO<sub>2</sub> surface with TEOS

Preparation of TiNPs was reported in previous article [6]. For silica coating, the sol was first prepared by adding TEOS, 20% ethanol and NH<sub>3</sub> in the glass container and then stirred for 30 min at room temperature. After that, the prepared TiNPs were added to this mixture. It was stirred at 40°C for 12 hours at 80 rpm. The silica-coated TiNPs (STiNPs) were collected by centrifugation at 8000 rpm for 10 min. They were washed with methanol for three times and dried at room temperature for further modifications [10].

The obtained STiNPs were dispersed in ethanol and 3-APTES was added to the suspension to its final concentration 20% w/v, followed by sonication for 30 min. After that, the suspension was incubated at 60 °C for 12 h under reflux with stirring to provide amine group the surface of the STiNPs. The particles were obtained with centrifugation and then

washed with methanol. Finally, they were dried at 50 °C for 18 h and named as ASTiNPs [10].

### 2.2.2. Modification of the ASTiNPs with crosslinkers

Modification of ASTiNPs for TRP immobilization was performed with GA, MDC and PDC. The modification was performed according to the procedures with some minor modifications reported by Aissaoui and coworkers [14] for each crosslinker.

- 1) **ASTiNPs:** Amine-functionalized STiNPs were used as a support without any modification.
- 2) **GA:** ASTiNPs were modified with GA by suspending them in GA solution (in water) and incubated at 25 °C for 2 h. The modified ASTiNPs were washed with distilled water and buffer for three times and dried.
- 3) **MDC:** ASTiNPs were modified with MDC solution (in pyridine/DMF, 10%/90%, v/v) at 25 °C for 2 h. The modified samples were washed with acetonitrile for three times and dried.
- 4) **PDC:** ASTiNPs were modified with PDC solution (in pyridine/DMF, 10%/90%, v/v) at 25 °C for 2 h and kept away from light. The modified samples were washed with acetonitrile for three times and dried.

### 2.3. Enzyme immobilization

Firstly, 2 mg/mL of TRP solution containing 0.25 mg/mL benzamidine used as a starting enzyme solution and then, 10 mg of the support was mixed with this solution and incubated for 3 h at 110 rpm and 25°C. Then, the immobilized TRP on the support was washed with KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> buffer 25 mM, pH 6.0. The activity of the immobilized TRP was subsequently determined.

Bradford method was used to determine the amount of immobilized protein by measuring protein concentration of the solutions. The loading capacity (X) was calculated as follow:

$$X = 100x(P_0 - P_1 - P_2) / W$$

Where P<sub>0</sub> is the protein amount of the initial enzyme solution; P<sub>1</sub> and P<sub>2</sub> are protein amount of the final enzyme solution and the washing solutions, respectively. W is weight of initially added support.

### 2.4. Activity assay of free and immobilized TRP

Bergmeyer method [15] was used to measure the activity of free and immobilized TRP with slight modifications as follow: 0.25 mM of BAEE in 67 mM KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> buffer was used as substrate (pH 6.0). The free TRP solution (0.2 mL) was added to 3.0 mL of the substrate solution and the increasing in absorbance of the mixture at 253 nm was measured during 1 min at 25 °C.

The immobilized TRP activity was measured by using 10 mg of TRP immobilized ASTiNPs instead of the enzyme solution. After that, it was incubated at 25°C for 1 min with gentle shaking and then the immobilized enzyme was

removed by centrifugation. The absorbance of the supernatant was spectrophotometrically measured at 253 nm. One unit of TRP activity was defined as the amount of TRP required for the releasing of 1  $\mu\text{mol}$  N $\alpha$ -benzoyl-L-arginine from BAEE per minute under the assay conditions [15].

## 2.5. Characterization

FTIR analyses were measured with a Perkin Elmer Frontier Fourier Transformation Infrared Spectrometer (spectral range between 4000 and 400  $\text{cm}^{-1}$ ). The characterization of surface morphology of TiNPs, STiNPs and ASTiNPs were performed with the Transmission Electron Microscopy.

## 2.6. Digestion of Cyt C

Cyt C was used as model protein. To obtain 1 mg/mL of Cyt C solution was prepared in 25 mM  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (pH 6.0) without any previous treatment [16]. 10 mg of immobilized TRP was added into each tube containing 50  $\mu\text{g}$  of Cyt C for digestion. After incubation at 37  $^\circ\text{C}$ , 110 rpm for 15 min, the immobilized TRP was removed from reaction medium, and the supernatant was further analyzed by using LC-MS/MS. For free TRP digestion, free TRP was added into Cyt C solution (1:50 w/w ratio of TRP to protein) and then incubated at 37 $^\circ\text{C}$ , 110 rpm for 24 h. After incubation, the mixture was further analyzed by using LC-MS/MS [17].

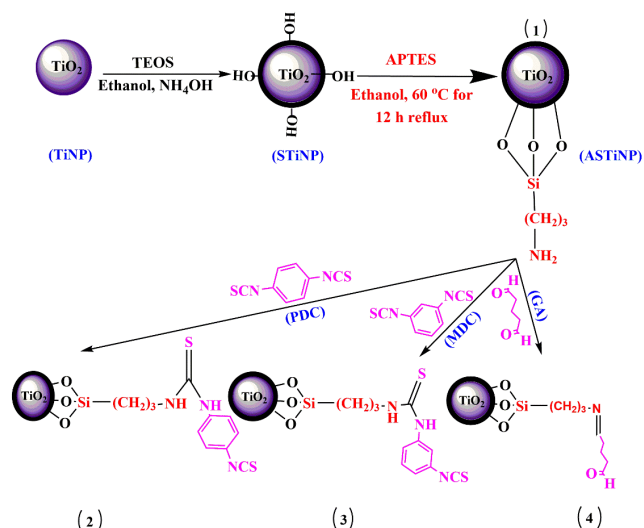
## 2.7. LC-MS/MS Analysis

The peptides released from the digestion of Cyt C by free TRP and the immobilized TRP with different ways were analyzed LC-MS/MS. Buffer containing 0.1% formic acid, 4 mM ammonium formate and 5% methanol in water was used as mobile phase. MS were obtained in the linear positive mode. The instrument parameters were as follows: positive spray voltage, 3500 V, Sheath gas, 10 Arb, Aux gas, 2 and Sweep gas, 300 and flow rate, 50  $\mu\text{L}/\text{min}$ .

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. Synthesis and characterization of the supports

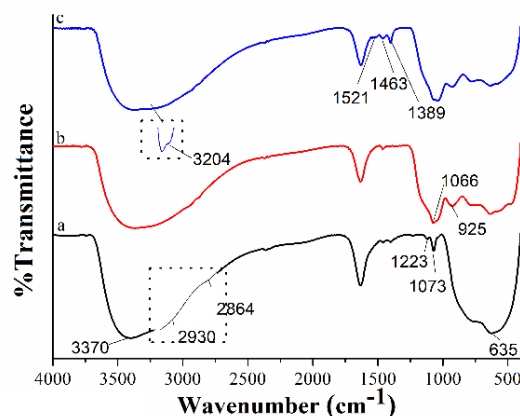
The immobilization of TRP on TiNPs coated with  $\text{SiO}_2$  by TEOS and after amine-grafted with APTES (ASTiNPs) was achieved with four different ways by using crosslinkers, GA, PDC, MDC and without crosslinker. Crosslinkers have different properties such as functional groups (-NCS, -CHO), the connecting chain (aliphatic vs aromatic), and geometrical constraints (meta- vs para- disubstituted aromatics). The schematic representation of the prepared supports by chemical modifications are shown in Figure 1. To confirm the chemical modifications on the surface of TiNPs and the immobilization of TRP, FTIR analysis were performed. FTIR spectra of the TiNPs, STiNPs and ASTiNPs are presented in Figure 2.



**Figure 1.** Schematic representation of the chemical modification in the surface of the TiNP and different post modification to obtain support for TRP immobilization.

The spectra of Figure 2a, 2b and 2c display a broad band around 635  $\text{cm}^{-1}$  which is due to the vibration of Ti-O-Ti bond. In the spectrum of bare  $\text{TiO}_2$  (a), the peak at 3370  $\text{cm}^{-1}$  corresponded to -OH groups of weakly chemisorbed and physisorbed water [18]. Also, the absorption bands at 1073, 1223, 2864, 2930  $\text{cm}^{-1}$  could be related with C-C-O-stretching vibration and symmetric and asymmetric - $\text{CH}_2$  stretching vibration of ethylene glycol which was used in the preparation of the  $\text{TiO}_2$ .

In the spectrum of STiNPs (Figure 2b), two peaks appeared at 925  $\text{cm}^{-1}$  and 1066  $\text{cm}^{-1}$  could be relevant to the symmetric and un-symmetric linear stretching vibrations of Si-O-Si bonding [13]. These results indicated that the silica was successfully coated on TiNPs.

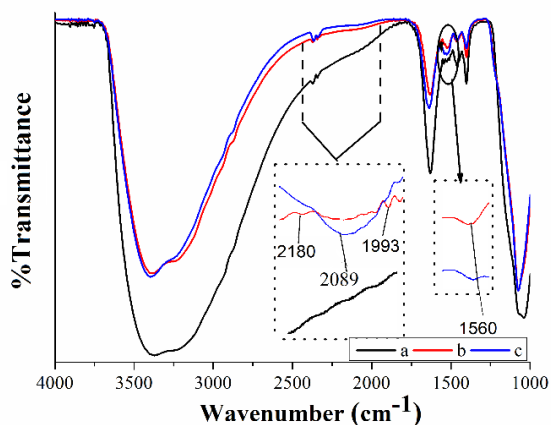


**Figure 2.** FTIR spectra of the TiNPs (a), STiNPs (b) and ASTiNPs (c).

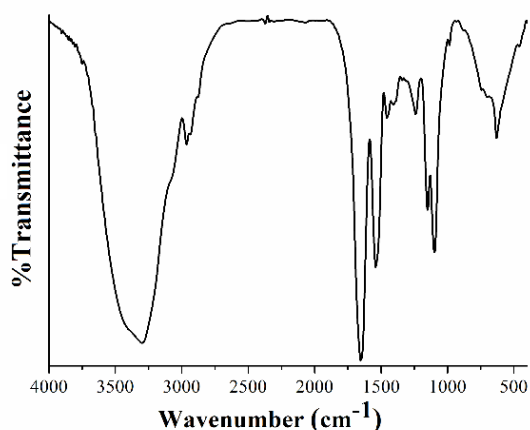
The introduction of 3-APTES to the surface of STiNPs (ASTiNPs) was confirmed by the deformation vibration adsorption peak of the amine groups appeared at 1463  $\text{cm}^{-1}$  and 1521  $\text{cm}^{-1}$  [10]. A new peak around 3204  $\text{cm}^{-1}$  could be

related to the symmetric stretching modes of  $\text{NH}_2$  (Figure 2c). Also, the peak around  $1389\text{ cm}^{-1}$  could be assigned to the deformation mode of the  $\text{Si-CH}_2$  [19].

The FTIR spectra of the ASTiNPs modified with PDC and its TRP immobilized form (Figure 3). In the spectrum of Figure 3b, the peaks around  $1993$  and  $2180\text{ cm}^{-1}$  could be related with isothiocyanate group [20]. The subsequent immobilization of TRP resulted in the disappearance of these peaks, while a new broad peak appeared at  $2089\text{ cm}^{-1}$  (Figure 3c). This peak could be attributed to the characteristic peaks of TRP (Figure 4) and so it suggested that the TRP was successfully immobilized on the ASTiNPs-PDC. Also, the peak around  $1560\text{ cm}^{-1}$  in the spectrum of ASTiNPs-PDC (Figure 3b) and ASTiNPs-PDC-E (Figure 3c) assigned to the isothiocyanate group ( $-\text{N}=\text{C}=\text{S}$ ).



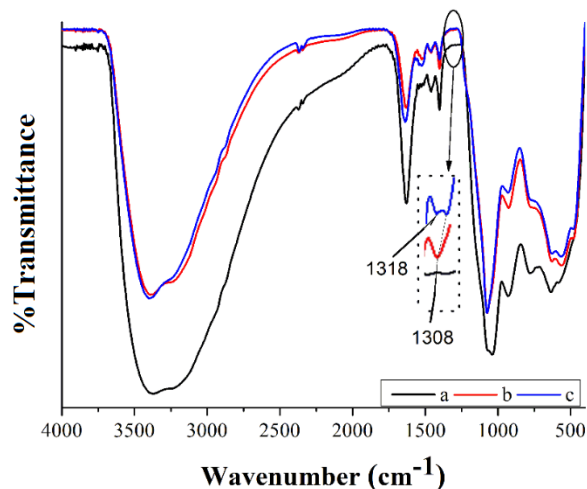
**Figure 3.** FTIR spectra of the ASTiNPs (a), ASTiNPs-PDC (b) and ASTiNPs-PDC-E (c).



**Figure 4.** FTIR spectrum of the TRP.

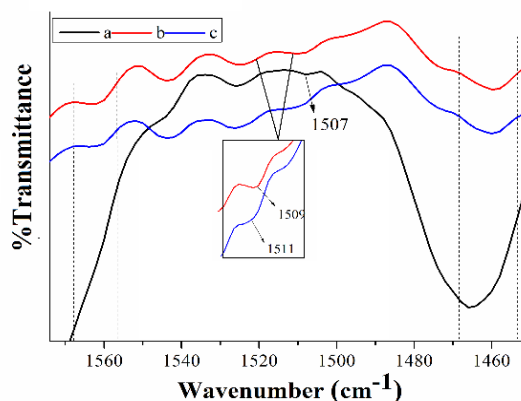
Furthermore, the successful functionalization of the ASTiNPs with MDC was confirmed by the presence of characteristic absorption peak around  $2093\text{ cm}^{-1}$  related with isothiocyanate group in the FTIR spectra of the ASTiNPs-MDC (Figure 5b) and ASTiNPs-MDC-E (Figure 5c) [21]. It was found that the  $-\text{C-N}$  band at  $1308\text{ cm}^{-1}$  in the spectra of ASTiNPs-MDC (Figure 5b) and ASTiNPs-MDC-E

(Figure 5c) and also a new peak at  $1318\text{ cm}^{-1}$  appeared after immobilization of TRP on the ASTiNPs-MDC, indicating the enzyme immobilization (Figure 5c).



**Figure 5.** FTIR spectra of the ASTiNPs (a), ASTiNPs-MDC (b) and ASTiNPs-MDC-E (c).

FTIR analysis of ASTiNPs-GA and ASTiNPs-GA-E presented weak new peaks related to N-H bending at  $1474\text{ cm}^{-1}$  and  $1561\text{ cm}^{-1}$  [22] (Figure 6). Furthermore, the decrease in absorption peak at  $1463\text{ cm}^{-1}$  related with amine groups (Fig 6a) was observed after binding of GA, indicating the imine bond between the surface amine groups of ASTiNPs aldehyde group in GA [23]. A small shift from  $1509\text{ cm}^{-1}$  to  $1511\text{ cm}^{-1}$  (Figure 6, inset) could be related with N-H bending (amide II band) [22]. This could confirm that TRP was immobilized onto ASTiNPs-GA successfully.



**Figure 6.** FTIR spectra of the ASTiNPs (a), ASTiNPs-GA (b) and ASTiNPs-GA-E (c).

The morphological features of the prepared TiNPs, STiNPs and ASTiNPs were characterized by using TEM (Figure 7). TEM image of the TiNPs in Figure 7a showed that they were dispersed and there was no aggregation with the average size measured in the range of  $65\text{--}300\text{ nm}$ . After coating the surface of TiNPs with the silica, the average size of the obtained STiNPs increased about  $30\text{ nm}$  (Figure 7b). After amino modification, the ASTiNPs still had almost the same



spherical structures and sizes (Figure 7c). These results were consistent with previous study[24].

### 3.2. TRP immobilization on the ASTiNPs with different crosslinkers

Table 1 summarizes the specific activities of the immobilized enzyme on ASTiNPs without crosslinker (directly) and with PDC, MDC and GA. The immobilized TRP on ASTiNPs, with GA showed the higher specific activity ( $968 \pm 6$  U/mg) than PDC ( $746 \pm 65$  U/mg), MDC ( $598 \pm 24$  U/mg) and without crosslinker ( $344 \pm 43$  U/mg). The conformational effect and steric hindrances could be reduced by attachment of a crosslinker on the support surface. Especially, the using of flexible spacers is assumed to increase the catalytic activity of the enzyme providing free movement [25].

The loading capacity of TRP was the highest ( $3686 \pm 84$  mg/g) with PDC used as a crosslinker whereas that was  $3266 \pm 194$  mg/g and  $1223 \pm 127$  mg/g when used MDC and GA as a crosslinkers, respectively (Table 2). It was decreased to  $775 \pm 106$  mg/g when TRP was directly immobilized on the ASTiNPs. This could be attributed to the hydrophobicity of the surface. LogP values of the PDC, MDC and GA were calculated (<https://molinspiration.com/>) as 4.67, 4.65 and 1.00, respectively. PDC has the highest hydrophobicity and it also gave the highest loading capacity results. Previously, it has shown that TRP adsorption on the hydrophobic surface is more favorable than the hydrophilic surface, which is consistent with this study [26]. MDC has the almost same LogP value with PDC, however the loading capacity was slightly lower when compared with PDC. It mentioned that MDC caused a degradation on the silanized surface and thus, decreased the amount of immobilized enzyme on the surface [12]. But, in this study the decrease in the loading capacity could be also related with meta- position of the crosslinker [14]. The loading capacity of the ASTiNPs without a crosslinker was as low as in the case of GA used as a crosslinker. This could be attributed to the hydrophilicity of these surfaces [27].

Moreover, when compared ASTiNPs-modified by using different crosslinkers with the supports have been reported in the literature (Table 2), it can be said that ASTiNPs has very high loading capacity even  $\text{TiO}_2$  based materials and APTES-modified surfaces. This could be attributed that the silica coating and then amine functionalization the surface of the TiNPs provide more efficient reactive sites with homogeneous distribution to the surface of the TiNPs, thus leading to higher enzyme loading capacity [26]. Also, using crosslinker can provide longer reactive group to the surface of the support, thereby the accessibility of the reactive groups to the more enzyme molecules can be provided in the solution [28]. All tested crosslinkers were short crosslinkers

and in the form of X-Spacer-X (X: functional group)[14]. However, among the tested crosslinkers, GA has linear structure (Spacer) which provides more flexibility to the enzyme than PDC and MDC (cyclic spacer). This could explain the highest specific activity of TRP when GA was used as a crosslinker. Although the PDC-bound TRP showed the higher catalytic activity, the higher protein loading capacity of PDC-modified ASTiNPs caused to obtain lower specific activity result.

**Table 1.** Immobilization of TRP on ASTiNPs

Crosslinkers	Specific activity (U/mg)
Without crosslinker	$344 \pm 43$
GA	$968 \pm 6$
PDC	$746 \pm 65$
MDC	$598 \pm 24$

The influence of crosslinkers concentration on the activity of the immobilized TRP was investigated (Figure 8). All crosslinkers increased the relative activity of the TRP when compared with direct-immobilized TRP on the ASTiNPs (without crosslinker). When PDC was used as a crosslinker, the relative activity of TRP increased and reached the highest value at  $20.8 \mu\text{M}$  and then, decreased (Figure 8a). Otherwise, the relative activity increased significantly with increasing concentration of MDC up to  $5.2 \mu\text{M}$ , in which the maximum value was obtained. With the increased concentration, the relative activity of the immobilized TRP decreased (Figure 8b). As shown in Figure 8c, the relative activity increased obviously when the GA concentration increased from 0 to 1.5 v/v and then decreased and kept almost the same level with a further increase.

The modification of ASTiNPs surface with PDC, MDC and GA were performed to obtain bifunctional supports. The relative activity of the PDC, MDC and GA- bound TRP increased with higher amount of reactive groups on the support with increased concentration of the crosslinkers (PDC, MDC and GA). However, the relative activity values of the immobilized enzymes started to decrease after reached to optimum values. These results showed that the immobilization of TRP on the support surface was increased with modification with crosslinkers and then it was decreased because of the decreasing of the reactive groups on the support with enzyme immobilization [29]. Furthermore, the reactive groups could increase and the length of crosslinker could exceed to certain length with the increased amount of crosslinkers. These might be reasons of decrease in the relative activity above certain concentration of crosslinkers [10, 28]. Another important factor could be the steric hindrance because of the geometry of the crosslinkers (PDC and MDC). Meta- position of the reactive groups on the MDC might lead to decrease in the relative activity of immobilized TRP at lower concentrations according to the PDC [12].

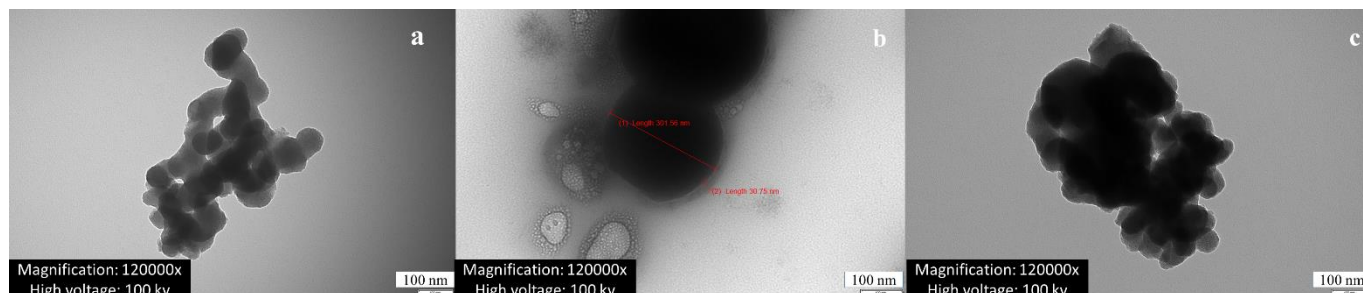


Figure 7. TEM images of the TiNPs (a), STiNPs(b) and ASTiNPs(c)

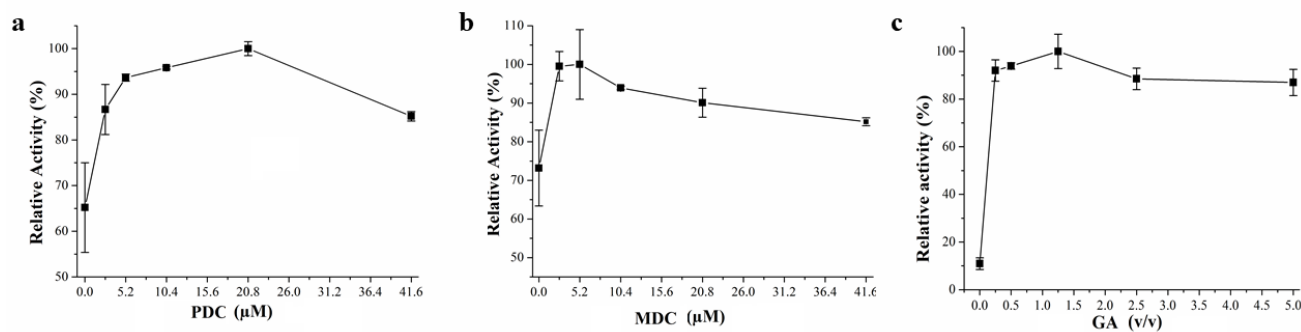


Figure 8. The effect of the concentration of PDC (a), MDC (b) and GA (c) on the relative activity of the immobilized TRP on the ASTiNPs.

Table 2. Protein loading capacity of the different supports reported in the literature.

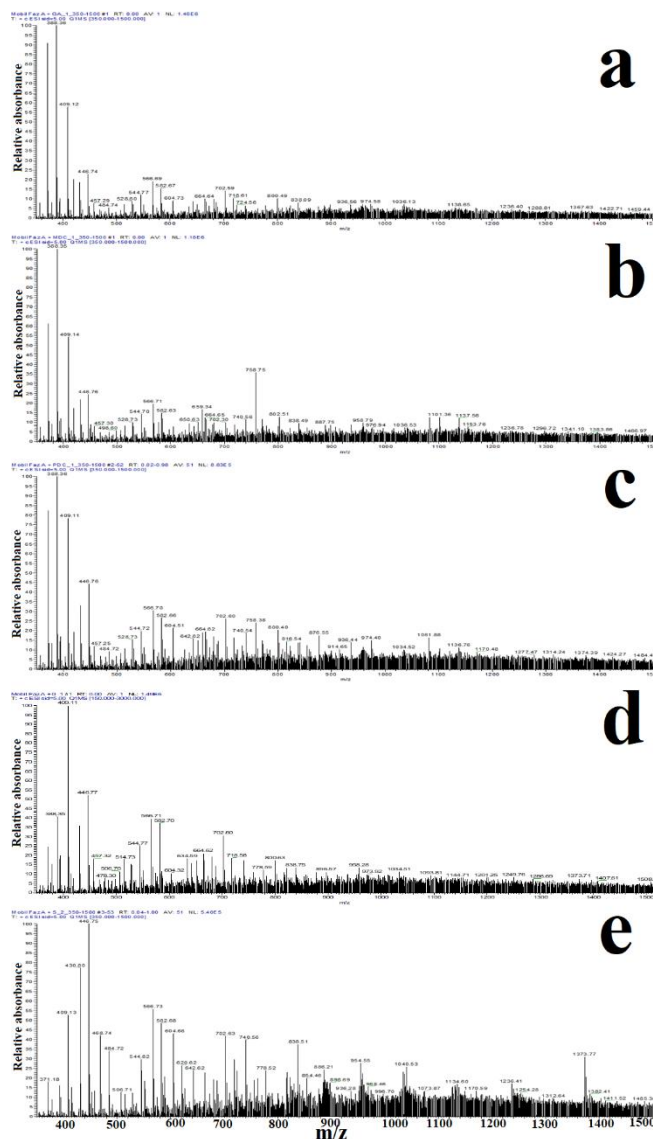
Enzyme	Support	Crosslinker	Loading capacity (mg/g)	Reference
Laccase	TiO <sub>2</sub>	Direct	7.4	[30]
Lysozyme	Mesoporous silica NP	Tannic acid	77.1	[31]
Bovine hemoglobine			396.5	
Bovine serum albumin			130	
Mitochondrial malate dehydrogenase			421	
Laccase	TiO <sub>2</sub> -montmorillonite	Direct	35.8	[32]
Cellulase	APTES-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	GA	176	[33]
Catalase	Reduced graphene oxide-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Direct	312.5	[34]
Catalase	Titanate nanotubes coated by poly(dopamine)	Direct	312	[26]
	Titanate nanotubes coated by poly(norepinephrine)		246	
TRP	Magnetic particles	No spacer	0.8 - 59	[3]
		12-aminododecanoic acid	54	
		BSA	13.9	
		Biotin-PEG12	1.2	
TRP	ASTiNPs	Direct	775±106	In this study
		GA	1223±127	
		PDC	3686±84	
		MDC	3266±194	

### 3.3. LC-MS/MS analysis

To estimate the digestion efficiency of the immobilized TRP with different crosslinkers, a standard protein, namely Cyt C were chosen as substrate and compared with the same sample digested by the classical in solution protocol (24 h digestion, 37 °C). Cyt C can be good indicator for the efficiency of digestion because of its small size and solubility in water (molecular weight of 12 kDa). It is a heme containing protein and has wide applications in biological and biomedical research [35].

Figure 9 shows the LC-MS/MS chromatograms of Cyt C digested by the immobilized TRP with GA, MDC, PDC, without crosslinker on the ASTiNPs and free TRP. The obtained peaks below 400 m/z in all chromatograms were related with the mobile phase and the detection range of peptide fragments were bigger than 500 m/z. Thus, it is needed to consider that the peptide fragments which have m/z value above 500 is important.

From a quantitative point of view, the peptide fragments obtained with the immobilized TRP with GA, MDC, PDC without crosslinker were different. Based on this, the direct-immobilized TRP on the ASTiNPs (without crosslinker, Fig 9d) gave the lowest digestion efficiency while the immobilized TRP with PDC gave the best result than the other crosslinkers even its lower specific activity than GA-bound TRP (Table 1). As aforementioned above, the PDC-bound TRP with had higher catalytic activity provided more efficient digestion of Cyt C. This situation has been explained by Nicoli [36], who has mentioned that the crosslinker increases the mobility of the immobilized enzyme on the surface of the support and thus, the interaction between active sites and target protein can be easily performed. Also, the differences between the results of the crosslinkers could be related with the amount of immobilized enzyme and accessibility of active sites for the substrate [37]. So, it could be said the immobilized TRP with PDC had better accessibility to the cleavage sites of Cyt C as a substrate. The peptide fragments obtained from Cyt C digestion with TRP-bound PDC, MDC and GA were comparable with free TRP in terms of molecular weight and numbers of the fragment. The peak intensity in the chromatogram of the free TRP was higher than the others, but the digestion with free enzyme was performed in 24 h instead of 15 min. This could be attributed to the steric limitations as a result of immobilization [38]. These results demonstrated that the presence of a crosslinkers increased the digestion efficiency when compared to without crosslinker condition and the PDC-bound TRP with gave the better results than the others.

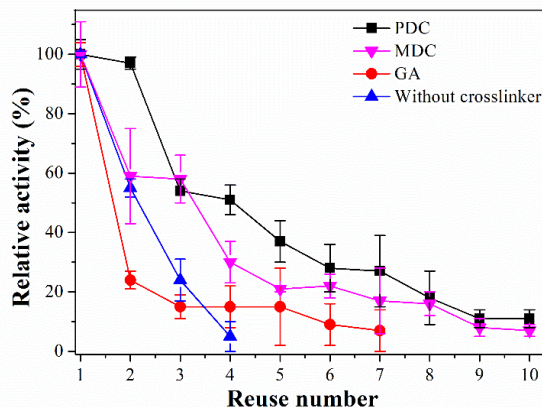


**Figure 9.** The LC–MS/MS chromatograms of digested Cyt C by immobilized TRP with GA (a), MDC (b), PDC (c), without crosslinker (d) and free TRP (e). Conditions: sample: products of digestion of 1 mg/mL Cyt C, mobil phase 0.1% formic acid, 4 mM ammonium formate and 5% methanol in water MS conditions: spray voltage, 3500 V; sheath gas, 10 Arb; Aux gas, 2 and Sweep gas, 300 and flow rate, 50  $\mu$ L/min.

### 3.4. Reusability

One of the important parameters of immobilized enzyme for industrial applications is its reusability in multiple catalytic cycles [39, 40]. Repeated usage of immobilized TRP on ASTiNPs without crosslinker (directly) and with PDC,

MDC and GA were evaluated in batch operation system (Figure 10). The immobilized enzyme was removed from reaction medium by centrifugation and washed with buffer and then used for another fresh reaction medium.



**Figure 10.** The reusability of the immobilized TRP on ASTiNPs without crosslinker (directly) and with PDC, MDC and GA.

The activity of direct-bound TRP (without crosslinker) remained at 5% after the first four cycles. The rapid loss of activity after four cycles can be explained with enzyme leakage because of physical adsorption of TRP onto the ASTiNPs (without crosslinker) [41, 42]. The reuse number and the percentage of residual activity of the immobilized TRP increased with all tested crosslinkers in comparison with without crosslinker condition. This could be attributed that the immobilization of the protein molecules with crosslinkers such as GA, PDC and MDC might enhance their stability against denaturation by stabilizing their quaternary structure [12, 43].

Using GA as spacer, a sharp decrease to 24% of in initial activity obtained with first cycle, after that the activity remained stable and sustained 7% of its initial activity after the seven cycles. The decrease in the relative activity after the first cycle could be related to the accumulation of final reaction products on the surface of the immobilized TRP [44]. Similar decrease was also obtained when MDC used as crosslinker. When using PDC as crosslinker, the relative activity was higher (11%) after ten reuse cycles in comparison to the using MDC (7%) and GA (7%) as crosslinker. Also, Calvo et al., [7] obtained similar results when used PDC showed higher stability than GA and MDC. Distinctly, the obtained decreasing in the relative activity after seventh cycles could be ascribed to geometry of the crosslinkers. As a result of immobilization via GA, enzyme lost its all-initial activity after seven cycles. This might be related with the hydrophilic character of the GA [45]. Furthermore, geometry of the crosslinkers has an important effect on the activity of enzyme [12]. The other reason of the lower reuse number may be related with that GA has linear structure which provides more flexibility to the protein on the support which may increase denaturation of enzyme [46].

#### 4. CONCLUSION

In present work, the ASTiNPs were prepared and modified with different crosslinkers such as GA, PDC, MDC for immobilization of TRP. The immobilized TRP with these crosslinkers on the ASTiNPs was investigated and compared with direct-bound TRP. The modification of the ASTiNPs with crosslinkers increased the loading capacity of the support and the specific activity of the TRP. The high value of the loading capacity and specific activity was achieved for immobilized TRP on the ASTiNPs modified with PDC. When these result of PDC-bound TRP compared to the others, there was a slight difference with MDC-bound TRP and it was higher than GA-bound TRP. The prepared and modified support has quite high protein loading capacity when compared with the literature (Table 2). Optimum concentration of the crosslinkers for the TRP immobilization was determined as 20.8  $\mu$ M of PDC, 5.2  $\mu$ M of MDC and 1.5 v/v of GA. The direct-bound TRP showed 5% of its initial activity after the four cycles while the GA, MDC and PDC-bound TRP sustained 11% of its initial activity after the seven cycles, 7% and 7% of its initial activity after the ten cycles, respectively. The digestion of the Cyt C was evaluated by LC-MS/MS analysis. The presence of a crosslinker increased the digestion efficiency when compared with direct-bound TRP and the immobilized TRP with PDC gave the better digestion efficiency than the others. As a result, the polarity of the crosslinkers has the important effect on the immobilization of TRP on the ASTiNPs while the geometry of the crosslinkers from para to meta- in PDC and MDC leads to slight difference in the protein loading and the specific activity of the TRP.

#### REFERENCES

- [1] L. Li, H. Li, B. Yan, S. Yu, "Preparation of a reversible soluble-insoluble beta-d-Glucosidase with perfect stability and activity." *J Biotechnol*, 291, pp. 46-51, 2019.
- [2] C. geor malar, M. Seenuvasan, K. S. Kumar, A. Kumar, R. Parthiban, "Review on surface modification of nanocarriers to overcome diffusion limitations: An enzyme immobilization aspect." *Biochemical Engineering Journal*, 158, pp. 107574, 2020.
- [3] J. Andre, D. Saleh, C. Syldatk, R. Hausmann, "Effect of spacer modification on enzymatic synthetic and hydrolytic activities of immobilized trypsin." *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 125, pp. 88-96, 2016.
- [4] M. G. Miljkovic, V. Lazic, K. Banjanac, S. Z. Davidovic, D. I. Bezbradica, A. D. Marinkovic, D. Sredojevic, J. M. Nedeljkovic, S. I. Dimitrijevic Brankovic, "Immobilization of dextransucrase on functionalized TiO<sub>2</sub> supports." *Int J Biol Macromol*, 114, pp. 1216-1223, 2018.
- [5] L. Wu, S. Wu, Z. Xu, Y. Qiu, S. Li, H. Xu, "Modified nanoporous titanium dioxide as a novel carrier for enzyme immobilization." *Biosensors and Bioelectronic*, 80, pp. 59-66, 2016.
- [6] S. Şahin, "Optimization of the Immobilization Conditions of Horseradish Peroxidase on TiO<sub>2</sub>COOH nanoparticles by Box-Behnken Design." *Süleyman Demirel*


- Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10.19113/sdufenbed.557021, pp. 904-916, 2019.
- [7] J. N.-M. Calvo, M. Elices, G. V. Guinea, J. Pérez-Rigueiro, M. Arroyo-Hernández, "Stability and activity of lactate dehydrogenase on biofunctional layers deposited by activated vapor silanization (AVS) and immersion silanization (IS)." *Applied Surface Science*, 416, pp. 965-970, 2017.
- [8] C. Victor Dos Santos Junior, M. S. Sader, G. C. Goncalves, G. Weissmuller, R. A. Simao, "Effect of pH on the adsorption and interactions of Bovine Serum Albumin with functionalized silicon nitride surface." *Colloids Surf B Biointerfaces*, 167, pp. 441-447, 2018.
- [9] H. Q. Wang, Z. Yao, Y. Sun, Z. Zhou, Q. Xiong, Z. X. Zhong, "Immobilization of  $\gamma$ -glutamyltranspeptidase on silylated mesoporous TiO<sub>2</sub> whiskers." *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 19, pp. 304-310, 2014.
- [10] A. H. A. Al-Dhrub, S. Sahin, I. Ozmen, E. Tunca, M. Bulbul, "Immobilization and characterization of human carbonic anhydrase I on amine functionalized magnetic nanoparticles." *Process Biochemistry*, 57, pp. 95-104, 2017.
- [11] E. Aslani, A. Abri, M. Pazhang, "Immobilization of trypsin onto Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub>-NH<sub>2</sub> and study of its activity and stability." *Colloids Surf B Biointerfaces*, 170, pp. 553-562, 2018.
- [12] N. Aissaoui, L. Bergaoui, S. Boujday, J. F. Lambert, C. Methivier, J. Landoulsi, "Enzyme immobilization on silane-modified surface through short linkers: fate of interfacial phases and impact on catalytic activity." *Langmuir*, 30, pp. 4066-4077, 2014.
- [13] O. Makrygenni, D. Brouri, A. Proust, F. Launay, R. Villanneau, "Immobilization of polyoxometalate hybrid catalysts onto mesoporous silica supports using phenylene diisothiocyanate as a cross-linking agent." *Microporous and Mesoporous Materials*, 278, pp. 314-321, 2019.
- [14] N. Aissaoui, J. Landoulsi, L. Bergaoui, S. Boujday, J. F. Lambert, "Catalytic activity and thermostability of enzymes immobilized on silanized surface: influence of the crosslinking agent." *Enzyme Microb Technol*, 52, pp. 336-343, 2013.
- [15] Bergmeyer H.U., Gawehn K., Grassi M. (1974) *Methods of enzymatic analysis.*, 2nd ed., New York.
- [16] Y. Cao, L. Wen, F. Svec, T. Tan, Y. Lv, "Magnetic AuNP@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles as reusable carriers for reversible enzyme immobilization." *Chemical Engineering Journal*, 286, pp. 272-281, 2016.
- [17] C. Xia, H. Wang, F. Jiao, F. Gao, Q. Wu, Y. Shen, Y. Zhang, X. Qian, "Rational synthesis of MoS<sub>2</sub>-based immobilized trypsin for rapid and effective protein digestion." *Talanta*, 179, pp. 393-400, 2018.
- [18] P. M. Kumar, S. Badrinarayanan, M. Sastry, "Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> studied by optical, FTIR and X-ray photoelectron spectroscopy: correlation to presence of surface states." *Thin Solid Films* 358, pp. 122-130, 2000.
- [19] N. Majoul, S. Aouida, B. Bessaïs, "Progress of porous silicon APTES-functionalization by FTIR investigations." *Applied Surface Science*, 331, pp. 388-391, 2015.
- [20] Lex A., Pacher P., Werzer O., Track A., Shen Q., Schennach R., Koller G., Hlawacek G., Zojer E., Resel R., Ramsey M., Teichert C., Kern W., Trimmel G., "Synthesis of a Photosensitive Thiocyanate-Functionalized Trialkoxysilane and Its Application in Patterned Surface Modifications." *Chemistry of Materials*, 20, pp. 2009-2015, 2008.
- [21] G. Martinez-Edo, M. C. Llinas, S. Borros, D. Sanchez-Garcia, "Isothiocyanate-Functionalized Mesoporous Silica Nanoparticles as Building Blocks for the Design of Nanovehicles with Optimized Drug Release Profile." *Nanomaterials (Basel)*, 9, pp., 2019.
- [22] M. Z. Anwar, D. J. Kim, A. Kumar, S. K. S. Patel, S. Otari, P. Mardina, J. H. Jeong, J. H. Sohn, J. H. Kim, J. T. Park, J. K. Lee, "SnO<sub>2</sub> hollow nanotubes: a novel and efficient support matrix for enzyme immobilization." *Sci Rep*, 7, pp. 15333, 2017.
- [23] P. Saengdee, W. Chairiratanakul, W. Bunjongpru, W. Sripumkhai, A. Srisuwan, W. Jeamsaksiri, C. Hruanun, A. Poyai, C. Promptmas, "Surface modification of silicon dioxide, silicon nitride and titanium oxynitride for lactate dehydrogenase immobilization." *Biosens Bioelectron*, 67, pp. 134-138, 2015.
- [24] D. Liu, A. M. Pourrahimi, L. K. H. Pallon, R. L. Andersson, M. S. Hedenqvist, U. W. Gedde, R. T. Olsson, "Morphology and properties of silica-based coatings with different functionalities for Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, ZnO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles." *RSC Advances*, 5, pp. 48094-48103, 2015.
- [25] C. Daglioglu, F. Zihnioglu, "Covalent immobilization of trypsin on glutaraldehyde-activated silica for protein fragmentation." *Artif Cells Blood Substit Immobil Biotechnol*, 40, pp. 378-384, 2012.
- [26] D. Yang, X. Wang, Q. Ai, J. Shi, Z. Jiang, "Performance comparison of immobilized enzyme on the titanate nanotube surfaces modified by poly(dopamine) and poly(norepinephrine)." *RSC Advances*, 5, pp. 42461-42467, 2015.
- [27] B. Niu, B. Li, H. Wang, R. Guo, H. Liang, M. Qiao, W. Li, "Preparing bioactive surface of polystyrene with hydrophobin for trypsin immobilization." *Materials Research Express*, 3, pp. 055402, 2016.
- [28] S. Sahin, I. Ozmen, "Determination of optimum conditions for glucose-6-phosphate dehydrogenase immobilization on chitosan-coated magnetic nanoparticles and its characterization." *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 133, pp. S25-S33, 2016.
- [29] B. Tural, T. Tarhan, S. Tural, "Covalent immobilization of benzoylformate decarboxylase from *Pseudomonas putida* on magnetic epoxy support and its carboligation reactivity." *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 102, pp. 188-194, 2014.
- [30] C. Ji, L. N. Nguyen, J. Hou, F. I. Hai, V. Chen, "Direct immobilization of laccase on titania nanoparticles from crude enzyme extracts of *P. ostreatus* culture for micro-pollutant degradation.", 178, pp. 215-223, 2017.
- [31] Z. Gao, I. Zharov, "Large Pore Mesoporous Silica Nanoparticles by Templating with a Nonsurfactant Molecule, Tannic Acid." *Chemistry of Materials*, 26, pp. 2030-2037, 2014.

- [32] Q. Wang, L. Peng, G. Li, P. Zhang, D. Li, F. Huang, Q. Wei, "Activity of laccase immobilized on TiO<sub>2</sub>-montmorillonite complexes." *Int J Mol Sci*, 14, pp. 12520-12532, 2013.
- [33] J. Jia, W. Zhang, Z. Yang, X. Yang, N. Wang, X. Yu, "Novel Magnetic Cross-Linked Cellulase Aggregates with a Potential Application in Lignocellulosic Biomass Bioconversion." *Molecules*, 22, pp., 2017.
- [34] D. Yang, X. Wang, J. Shi, X. Wang, S. Zhang, P. Han, Z. Jiang, "In situ synthesized rGO-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocomposites as enzyme immobilization support for achieving high activity recovery and easy recycling." *Biochemical Engineering Journal*, 105, pp. 273-280, 2016.
- [35] K. Atacan, A. N. Kursunlu, M. Ozmen, "Preparation of pillar[5]arene immobilized trypsin and its application in microwave-assisted digestion of Cytochrome c." *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 94, pp. 886-893, 2019.
- [36] R. Nicoli, N. Gaud, C. Stella, S. Rudaz, J. L. Veuthey, "Trypsin immobilization on three monolithic disks for on-line protein digestion." *J Pharm Biomed Anal*, 48, pp. 398-407, 2008.
- [37] C. Temporini, E. Perani, F. Mancini, M. Bartolini, E. Calleri, D. Lubda, G. Felix, V. Andrisano, G. Massolini, "Optimization of a trypsin-bioreactor coupled with high-performance liquid chromatography-electrospray ionization tandem mass spectrometry for quality control of biotechnological drugs." *J Chromatogr A*, 1120, pp. 121-131, 2006.
- [38] C. Rocha, M. P. Gonçalves, J. A. Teixeira, "Immobilization of trypsin on spent grains for whey protein hydrolysis." *Process Biochemistry*, 46, pp. 505-511, 2011.
- [39] P. Zucca, E. Sanjust, "Inorganic materials as supports for covalent enzyme immobilization: methods and mechanisms." *Molecules*, 19, pp. 14139-14194, 2014.
- [40] A. B. Jarzębski, K. Szymańska, J. Bryjak, J. Mrowiec-Białoń, "Covalent immobilization of trypsin on to siliceous mesostructured cellular foams to obtain effective biocatalysts." *Catalysis Today*, 124, pp. 2-10, 2007.
- [41] R. Abdulla, S. A. Sanny, E. Derman, "Stability studies of immobilized lipase on rice husk and eggshell membrane." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 206, pp. 012032, 2017.
- [42] S. Zhang, Q. Deng, Y. Li, M. Zheng, C. Wan, C. Zheng, H. Tang, F. Huang, J. Shi, "Novel amphiphilic polyvinylpyrrolidone functionalized silicone particles as carrier for low-cost lipase immobilization." *R Soc Open Sci*, 5, pp. 172368, 2018.
- [43] Y. A. Duman, N. Tekin, "Kinetic and thermodynamic properties of purified alkaline protease from *Bacillus pumilus* Y7 and non-covalent immobilization to poly(vinylimidazole)/clay hydrogel." *Engineering in Life Sciences*, 20, pp. 36-49, 2019.
- [44] J. A. Torres, M. C. Silva, J. H. Lopes, A. E. Nogueira, F. G. E. Nogueira, A. D. Correa, "Development of a reusable and sustainable biocatalyst by immobilization of soybean peroxidase onto magnetic adsorbent." *Int J Biol Macromol*, 114, pp. 1279-1287, 2018.
- [45] L. J. Li, W. J. Xia, G. P. Ma, Y. L. Chen, Y. Y. Ma, "A study on the enzymatic properties and reuse of cellulase immobilized with carbon nanotubes and sodium alginate." *AMB Express*, 9, pp. 112, 2019.
- [46] C. Bonzom, L. Schild, H. Gustafsson, L. Olsson, "Feruloyl esterase immobilization in mesoporous silica particles and characterization in hydrolysis and transesterification." *BMC Biochem*, 19, pp. 1, 2018.


## Microstructural Evaluation and Influence of Welding Parameters on Electrode Plunge Depth in Resistance Spot Welded Dissimilar DP800HF/1200M Steel Joints

<sup>1,4</sup>Melih Kekik, <sup>2</sup>Fatih Özen, <sup>3</sup>Erdoğan İlhan, <sup>4</sup>Salim Aslanlar


<sup>1</sup>Ak-Pres A.Ş., 2. Organized Industrial Zone, Road No 2, No:20, Sakarya,

melih.kekik@akpres.com 


<sup>2</sup>Batman University, Faculty of Technology, Mechanical and Manufacturing Engineering Department, Batman,

fatih.ozen@batman.edu.tr 

<sup>3</sup> Sakarya University of Applied Sciences, Adapazarı Vocational School, Department of Machinery and Metal Technologies,

Sakarya, eilhan@subu.edu.tr 

<sup>4</sup>Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Metallurgical and Materials Engineering, Sakarya,

aslanlar@subu.edu.tr 

Research Paper

Arrival Date: 12.01.2021

Accepted Date: 28.03.2021

### Abstract

Advanced high strength steels (AHSS) are newly developed steels that has versatile mechanical properties. These steels enables to design low weight cars with high safety standards. Also, weight reduction in vehicles plays a significant role for saving fossil fuels which is limited and causes carbon emissions. Dual phase (DP) and Martensitic steels are prominent in AHSS family because they are inexpensive and has vast application areas. DP steels are used for general purpose applications and Martensitic steels are used for reinforcement parts in vehicles. In this study, high formable grade Dual phase steel with 800 MPa tensile strength and Martensitic steel with 1200 MPa tensile strength were welded with resistance spot welding technique which is the most widely practiced joining method in the industry. Electrode indentation depths, its effect on tensile-shear loads and microstructural characterizations were investigated. According to the results, the lowest tensile shear loads were acquired between both between 0-0.2 mm and between 0.85-1mm electrode plunge depths. Medial electrode plunge depths showed high tensile shear loads. Some welding defects were encountered including secondary phase formations, shrinkage voids, intergranular shrinkage gaps and vertical cracks in the weld nugget. It is find out that the weld defects were formed due to cooling gradient while solidifying, electrode force, and improper weld parameters.

**Keywords:** AHSS, Resistance spot welding, DP steels, Martensitic steels, Microstructure.

### 1. INTRODUCTION

Today, global warming, CO<sub>2</sub> emissions, the limit of fossil fuels and high oil prices are among the main factors affecting the whole world [1, 2]. Due to these difficulties, various weight reduction efforts have been initiated in the automotive industry without loss of safety [3]. The key role of weight reduction is developing new steels with high strength that ensures low weight designs for steel components. To achieve this goal, firstly, high strength low alloy (HSLA) steels have been developed. HSLA steels have moderate tensile strength with high ductility [4]. With further developments, advanced high strength steels have been developed. Based on design features, different steel grades of AHSS have been developed with a wide range of mechanical properties containing different microstructures [5]. Among AHSS steels, Dual Phase (DP) and Martensitic Steels (MS) steels have drawn attention in the automotive industry thanks to their unique mechanical properties and prices [6].

DP steels have high tensile strength up to 1000 MPa with good formability capabilities. They have martensite phase in ferrite matrix [7]. They are relatively cheap compared to other AHSS families thanks to both low cost processing operations and low cost constituents. They have different formability grades with high tensile strength. DP steels generally used for automotive chassis components. These steels have found large usage area in automotive industry [8].

Martensitic steels has similar microstructure with DP steels. They have also martensite phase in ferrite matrix. However, MS contains a high amount of martensite phase in ferrite matrix [9]. Thus, increasing tensile strength up to 1.7 GPa have been possible with low elongations [10, 11]. MS have been utilized for reinforcement and anti-intrusion parts that highly increases the safety [12, 13].

Resistance spot welding (RSW) is the most utilized welding method in manufacturing of automobiles especially for sheet components [14, 15]. An average automobile generally

\*Corresponding Author: Batman University, Faculty of Technology, Mechanical and Manufacturing Engineering Department, Batman, e mail: fatih.ozen@batman.edu.tr, Telephone: +90 (488) 217 35 00

contains 3000-5000 spot welds [16]. The number of resistance spot welds on the automobile increases the health and importance of the joints.

Resistance spot welding is based on the compression of the metal sheets under a compression force with copper electrodes from both sides and then, the metal is melted with joule effect [17]. Electrode pressure and heat with a welding time forms the weld nugget. The weld nugget is formed between steel sheets where the highest electrical resistivity is constituted. Weld nugget diameter is also an indicator of weld reliability. Weld nugget diameter generally controls mechanical performance of RSW applied joints [18]. However, there is not a linear relationship between weld welding parameters, weld nugget diameter and mechanical performance of welding joint.

Another different aspect is electrode plunge depth. Electrode plunge depths with high amounts reduces aesthetic appearance and impedes it usage for visually remarkable parts [19]. In low electrode plunge depths, acquired with various current, welding time and electrode force, can causes low tensile-shear loads highly affecting mechanical performance of RSW applied joints [20].

In this work, effect of welding time and welding currents on electrode indentation depths of RSW applied dissimilar Martensitic/DP steel joints have been studied. Metallographic examinations were executed. MS grades having 1200 MPa tensile strength and DP steel having 1000 MPa tensile strength with high formability grade were used in experiments.

**2. MATERIAL and METHOD**

DP steel that belongs to high formability grade (DP1000HF) with 1.1-mm thickness and Martensitic steel (MS1200) with 1.2-mm thickness were acquired from local dealer. Their mechanical properties and chemical composition described by manufacturers are presented in Table 1 and Table 2, respectively.

**Table 1.** Chemical composition of DP800HF and MS1200 (wt.-%)

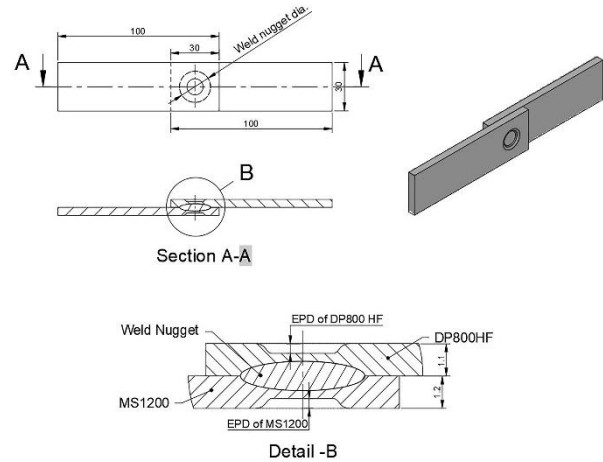
	C	Si	Mn	Al	Cr	Mo	Co
DP800HF	0.16	0.5	2.2	0.7	0.45	-	-
MS1200	0.07	0.20	1.6	0.03	0.01	0.03	0.013

**Table 2.** Mechanical properties of DP800HF and MS1200

	Yield strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Tensile strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Elongation [%]
DP800HF	532.9	920.7	16.7
MS1200	950	1282	3

Tensile-shear tests were carried out on the SHIMADZU AG-XD 50kN universal test device. Tensile speed was adjusted to 10-mm/min. The technical drawing of the tensile-shear test specimen is presented in Figure 1. Electrode plunge

depth (EPD) of both steels that measured for experiments is also presented in the figure. EPD of the RSW joints were measured with Nikon SMZ stereo microscope. The EPD measurements were performed prior to metallographic examinations.



**Figure 1.** The technical drawing of resistance spot welded tensile-shear test specimen and details of EPD.

Before the experiment, all welding surfaces chemically and ultrasonically were cleaned to avoid dirt and oxides that could affect welding quality. Resistance spot welding machine having 120 kVA maximum capacity with pneumatically controlled jaws was used for experiments. The welding parameters were adjusted with HMI interface. Resistance spot welds were executed under 5 kN electrode force. Currents and welding times were constantly measured with Dengeshia (Japan) welding amperemeter. 6-mm tip diameter Cu-Cr electrodes with EN ISO5182 standard were used for experiments. The electrodes were cooled down with constant 6 L/min water flow. The holding times before and after welding operation were adjusted to 25 cycle (1 Cycle=0.02 s). Various welding durations and welding current combinations were utilized in experiments to see their effects separately. Welding currents and welding times used in experiments is presented in Table 3 with experiment sequence.

**Table 3.** Welding parameters and welding currents used in experiments with sequence.

		Welding durations (Cycle)					
		5	10	15	20	25	30
Welding currents (kA)	8.44	-	6	12	17	22	26
	9.6	1	7	13	18	23	27
	11.8	2	8	14	19	24	28
	13.5	3	9	15	20	25	-
	14.5	4	10	16	21	-	-
	15.5	5	11	-	-	-	-



For SEM examinations, RSW applied joints were cut from centerline of the weld nugget. Conventional procedures were adopted for microstructural examinations. The weld joint was etched with %5 Nital solution for 5 s. JEOL JSM-5600 Scanning Electron Microscope (SEM) with Energy Dispersive x-ray Spectroscopy (EDS) was used for microstructural examination. The heat input that used in explanations is obtained from following equation;

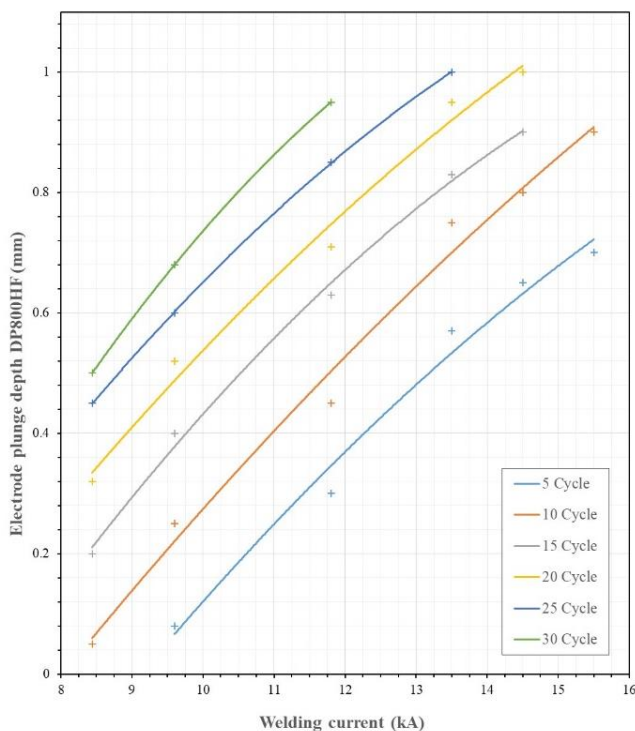
$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \tag{1}$$

Where, Q is Heat input (Joule), I is Ampere (A), R is total electrical resistance ( $\Omega$ ) and t is welding time (s).

### 3. RESULTS and DISCUSSION

#### 3.1. Electrode Plunge Depth Behaviors

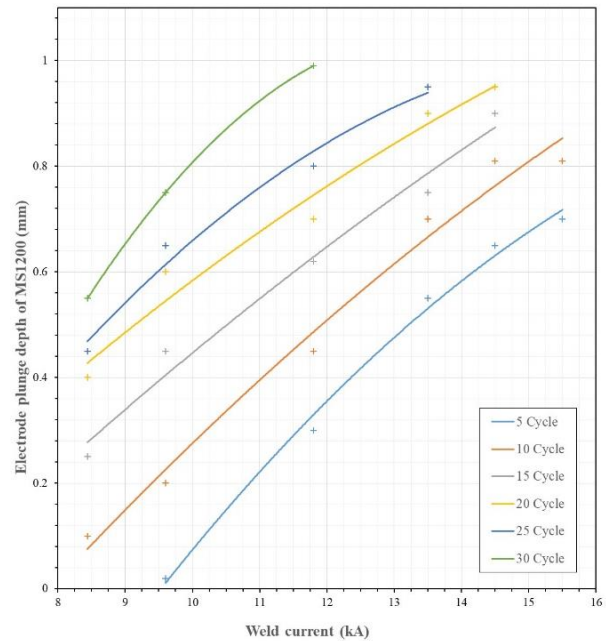
Effect of welding time and welding currents on EPD of DP800HF steel side of the RSW applied joint is presented in Figure 2. According to the figure, there is a linear relation between EPD and heat input. As the weld time increases, the ratio of EPD to weld current remains approximately constant. Namely, heat input increases the severity of EPD with the same trend. EPD of DP steel side shows the maximum plunge depths in 20 and 25 cycle welding times in 13.5 kA and 14.5 kA welding currents as 1-mm, respectively.



**Figure 2.** Electrode indentation depths of DP800HF steel side with respect to welding parameters.

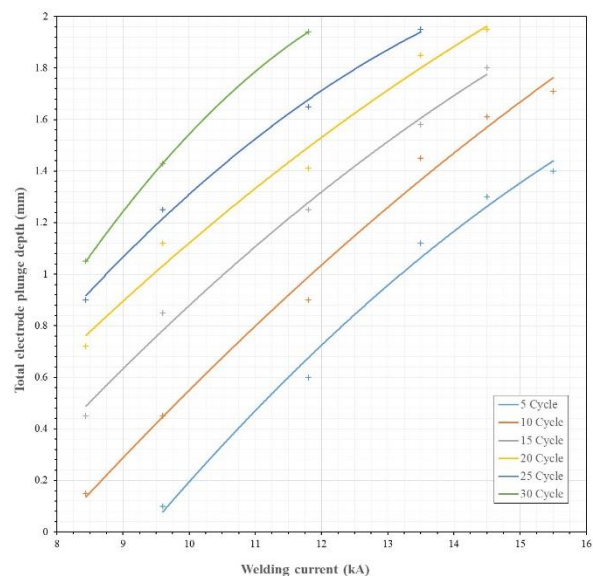
EPD behavior of MS1200 steel against welding parameters is presented in Figure 3. EPD has similar characterizations with DP800HF steel. However, the maximum EPD for MS

was acquired in 30 cycle welding time and 11.75 kA welding current.



**Figure 3.** Electrode indentation depths of Martensitic steel side with respect to welding parameters.

When compared to DP800HF, EPD of MS1200 have a little bit lower but have similar characterization except for 20, 25 and 30 cycle welding times. In 20 and 25 cycle welding times, the maximum electrode plunge depths were obtained in DP800HF side. In 30 cycles welding time, there is a small deviation from each other that is acceptable for physical experiments. The main reason for lower EPD of MS1200 is attributed to the presence of high martensite ratio that has high much higher hardness than DP800HF.



**Figure 4.** Electrode plunge depths of both sides with respect to welding parameters.

Total EPD was acquired with combination of both MS1200 and DP800HF is presented in Figure 4. The maximum electrode plunge depth for both steel was 1.96 mm. This climax point was achieved the highest currents of the 20, 25 and 30 cycle welding times. High EPD's of both sides at high heat inputs is an expected situation in the RSW method.

Effect of EPD for MS side and DP steel side on tensile-shear load is presented in Figure 5 and 6, respectively. According to results, the maximum tensile-shear load was acquired at 0.64 mm EPD of for MS side while 0.6 mm for DP steel side as 17960 N. MS showed similar characteristics with DP steel side on tensile shear load capacity with minimal deviations. The maximum deviation of EPD in both steels was below 0.1 mm. The lowest tensile-shear loads were achieved both between 0-0.2 mm and between 0.85-1mm. The low heat inputs were induced lower tensile-shear loads between 0-0.2 mm EPD while the high heat input presented in another low tensile-shear loads were between 0.85-1 mm EPD.

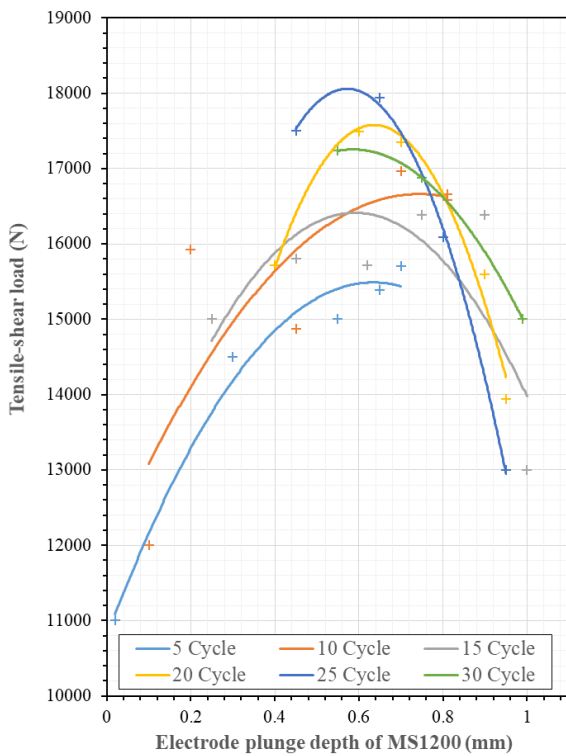


Figure 5. Tensile-shear load against electrode plunge depth of MS1200.

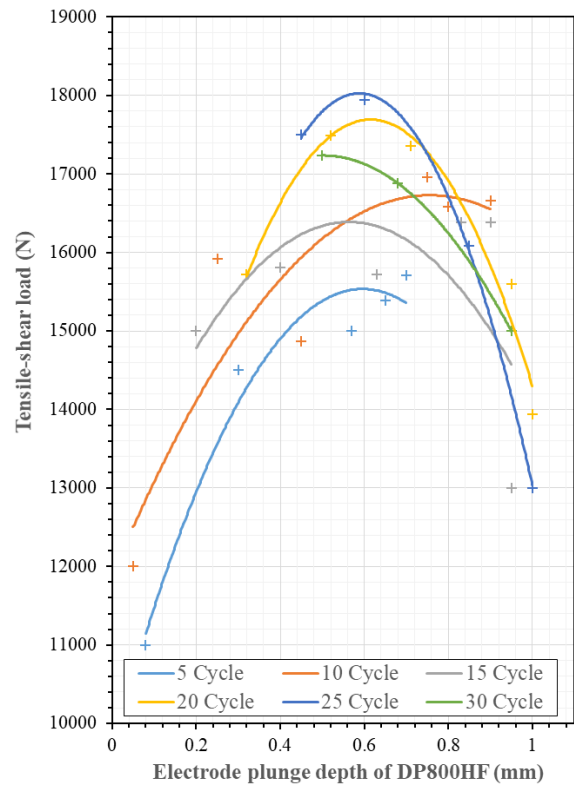
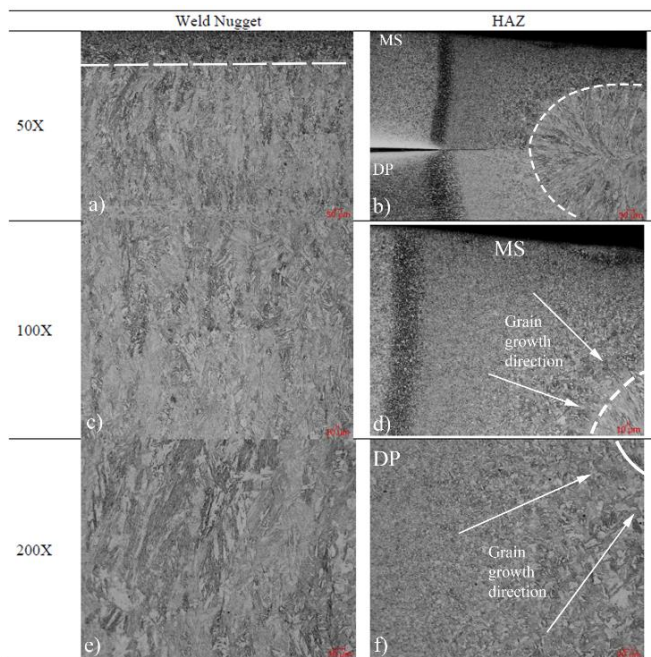


Figure 6. Tensile-shear load against electrode plunge depth of DP800HF.

### 3.2. Microstructural Characterizations

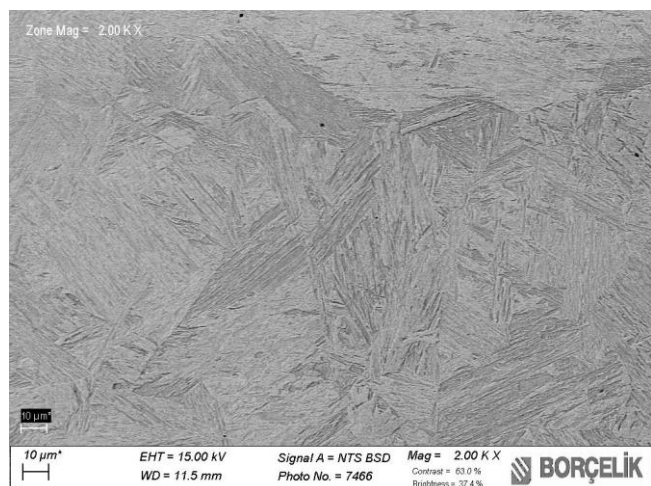
Microstructural graphs from weld nugget and heat affected zone (HAZ) of DP800HF/MS1200 RSW applied joint is presented in Figure 7 with different magnifications. According to figures, weld nugget zone has exact boundary from HAZ. Transition from HAZ to base materials (BM) illustrated with a black band that shows the end of the thermal transition. This transition between HAZ and BM has thicker characteristic in DP800HF steel side. The reason for this thickness is existence of higher amount ferrite that allowed much wider phase transition area due to its higher heat conductivity [21].

The weld nugget is mainly consists of lath martensite generated with thermal cooling gradient (Figure 7.d and 7.f). Weld nugget boundary shows fully melted and cooled region as shown in Figure 7.b. In this case, the thermal cooling gradient is start from weld nugget/HAZ frontier to the last solidifying region, namely, weld nugget center. During solidifying, heat is transferred from weld nugget to electrode that cooled with constant water flow. Therefore, the thermal cooling gradient was played an important role to form martensite that gradually coarsed towards weld nugget, but with preserving its natural orientation.



**Figure 7.** Microstructure of RSW applied DP800HF - MS1200 with different magnifications

Figure 8 shows SEM image from the focal point of thermal gradients in the weld nugget zone of spot welded DP800HF/MS1200 steel joint. According to micrograph, weld center was composed of lath martensite with small fractions of ferrite. The size of martensite is approximately between 40 and 60 μm while the size of the martensite in both steels from BM was between of 3-6 μm.



**Figure 8.** Weld nugget of the RSW applied DP800HF - MS1200.

Figure 9.a and 9.b shows a detailed graph from HAZ region of MS1200 and DP800HF steel, respectively. According to figures, coarsening of martensite laths toward weld nugget can easily be seen. However, the amount of ferrite zones that marked with white has different characterizations. In MS, the amount of martensite is far more than that of DP800HF. As for ferrite, a vice versa situation was occurred. The maximum amount of ferrite were formed in DP800HF. High

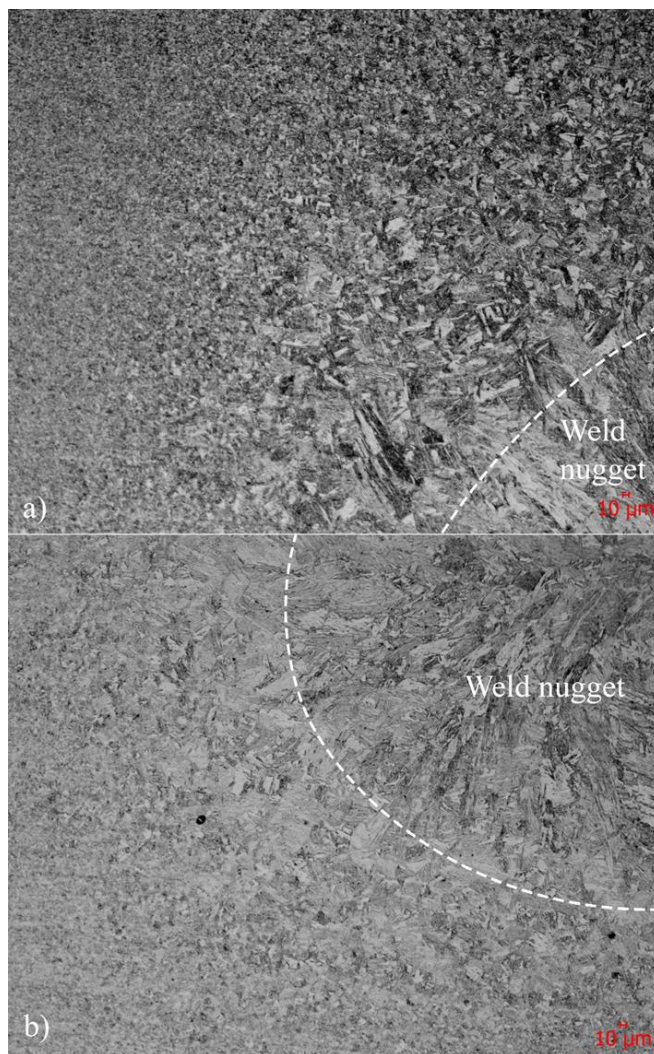
ferrite formation can be attributed to martensite fractions in steels before welding.

Similar microstructure characterizations were also coincided in the literature;

Pourvani et al. [22] studied the weldability of resistance spot welded 1200MS joint. They find out that heat affected zone were consisted of tempered coarsed martensite and ferrite. A single phase with lath martensite was formed in the weld nugget.

Di et al. [23] Investigated laser weldability of similar and dissimilar DP780 and DP980 steel joints. It is revealed that the weld nugget zone was formed with lath martensite for all DP joints. It is also described that the alloying elements was equally distributed in the weld nugget zone.

Bandyopadhyay et al. [24] studied microstructure and failure behavior of laser welded DP980 steels. Tempered martensite was formed at the heat affected zone and induced a soft region. This oft region reduced the formability of the welded blanks.



**Figure 9.** HAZ of a) MS1200 and b) DP800HF.

While welding of dissimilar MS1200/DP800HF steels, some defects were detected in microstructure. Figure 10 a-d shows encountered defects in welding of MS1200/DP800HF steels. According to micrographs, the defects were mainly formed in weld nugget zone. Cracks, secondary phase formations, shrinkage gaps were formed in weld nugget zone. The other defect that run into is Cu penetration in electrode contact surface.

Figure 10.a shows a shrinkage gap and secondary phase formation. This defect is situated at the center of the weld nugget zone. As soon as the weld nugget cools from the molten state, it commenced to solidify from the outer shell to inner regions. During the solidification, shrinkage is also taken place due to thermal contraction. The last place that solidifies is the focal point of the cooling gradients, namely, the horizontal centerline of the weld nugget.

Secondary phases that formed at the centerline of the weld nugget is a hint to low melting alloys. Normally, this low melting secondary phases is formed at the outer boundary of grains. However, gradual cool down of the grains caused accumulation of the secondary low melting phases at the center of the weld nugget because of the low solidification temperature.

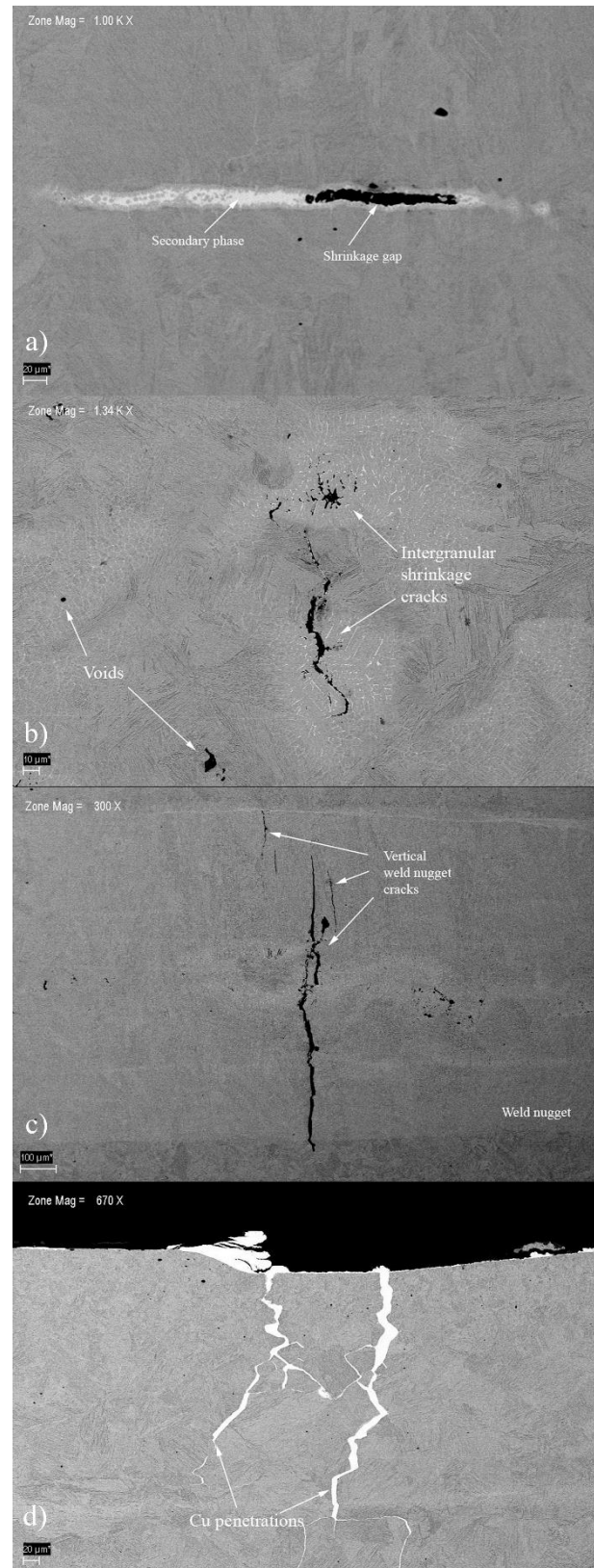
The shrinkage in low severity caused intergranular voids and cracks at the center of the weld nugget. Figure 10.b shows intergranular gaps that resulted from insufficient volume due to thermal shrinkage. These gaps were formed both with partially vertical direction and with equiaxed direction.

In case of high electrode force, melted weld nugget was forced out of the separation surfaces of the sheets. Successive solidification and shrinkage has led to vertical cooling cracks as shown in Figure 10.c. These cracks were occurred between the grains, effectuating the weakest regions during cooling. Formation of the cracks, porosities and secondary alloys in welding of new generation steels were also reported in the literature;

Schmidová et al. [25] studied effect of Nb on the failure of dual-phase steel in dissimilar welds. Formation of porosities, cracks, and low melting secondary alloys in weld nugget was reported.

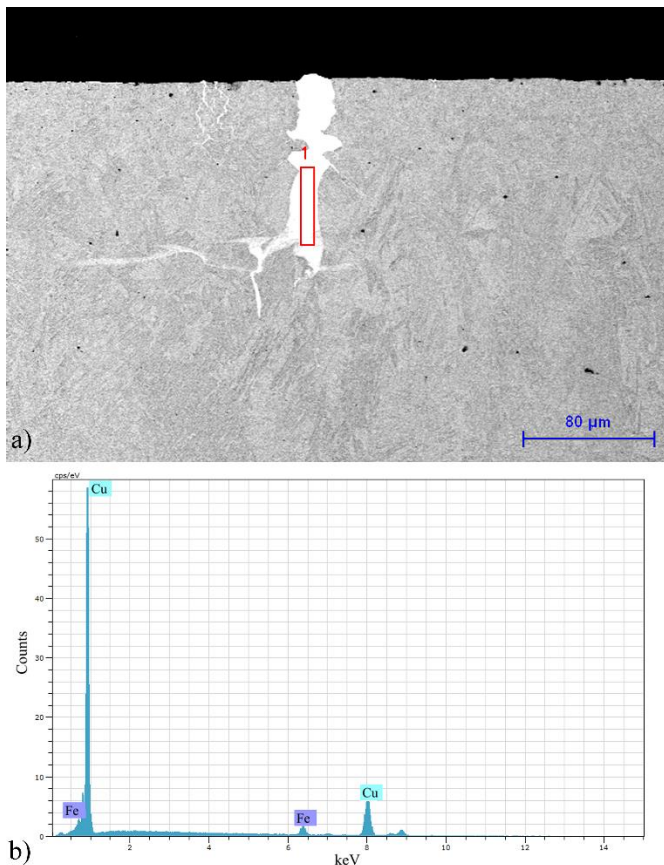
Wang et al. [26] studied resistance spot weldability of Q&P980 steels. They find out cracks and porosities in the weld nugget.

Another defect is penetration of electrode material into contact surface. Figure 10.d shows penetration of Cu from electrode/sheet contact surface. The detailed SEM image and EDS analysis were executed from penetrated metal is illustrated in Figure 11.a and 11.b, respectively. EDS analysis showed there is high amount of Cu with low amount of Fe (Table 4). This elemental measurement proves that the copper acquired from the electrode.



**Figure 10.** SEM micrographs of weld defects a) Shrinkage gap and secondary phase formation, b) Intergranular shrinkage cracks, c) Vertical weld nugget cracks and, d) Penetration of Cu from electrodes.

The penetration of Cu into intergranular gaps that formed during welding is somehow related to electrode softening and evaporation of surface material by high welding heat input induced by high welding current and welding. If there was a standard melting on electrode surface, there would be spills and residues on the contact surface of steel within a maximum of 30 cycle (0.6 seconds). However, the penetration from the surface of the material towards the inner regions can only be achieved with a pressure. It is an indication that the electrode material achieved to vapour phase locally by the applied heat in electrode tip. This evaporated Cu penetrated through intergranular gaps that is one of the easiest way to decrease vapour pressure and then Cu penetration between intergranular gaps is formed. It should be noted that the maximum resistance is achieved on the electrode surface of steels, but the second maximum resistances are achieved on electrode/steel contact surfaces.



**Figure 11.** a) SEM micrograph of Cu penetration from electrodes, and b) its EDS results.

**Table 4.** EDS measurement result from penetration area.

Element	Wt.-%	Atomic (%)	Error (%)
Iron	6.80	7.83	0.3
Copper	91.03	92.17	3.0
<b>Total</b>	<b>97.83</b>	<b>100.00</b>	

**4. CONCLUSIONS**

A 800 MPa dual phase steel with high formability grade and 1200 MPa martensitic steel was welded successfully with

RSW technique. Electrode plunge depths and microstructural characterizations were examined. It is find out that the maximum tensile shear loads were achieved in moderate electrode plunge depths. Poor tensile shear loads were attained due to either insufficient or excess heat input that mirrors electrode plunge depths.

In microstructural investigations, heat induced defects such as shrinkage gaps or cracks and secondary phase formations were coincided in weld nugget. The main reason for secondary phases are gradual cooling down from outer shell to inner regions of weld nugget. Then the last solidifying low melting alloys were formed. Vertical cracks were also formed in the weld nugget due to softening and electrode application force while solidifying. Cu penetrations also formed on the contact surface due to excessive heat input. Cooling of electrodes was also played an important role in Cu penetrations. It is also determined that cooling of electrodes is of high importance while applying RSW technique.

**Acknowledgements:** The researchers are grateful to Borçelik steel company for providing access to the SEM device.

**Author contributions:** Concept – M.K., S. A.; Experiments and data collections &/or Processing – M.K., F. Ö. S.A.; Literature research – F.Ö, E.İ.; Writing and Review – F.Ö, M.K, S.A.

**Conflict of Interest:** No conflict of interest was declared by the authors.

**Financial Disclosure:** The authors declared that this study has received no financial support.

**REFERENCES**

[1] V. Behm et al., “Investigations on laser beam welding dissimilar material combinations of austenitic high manganese (FeMn) and ferrite steels” *Phys. Procedia*, vol. 56, no. C, pp. 610–619, 2014, doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.049.

[2] S. Populoh, M. H. Aguirre, O. C. Brunko, K. Galazka, Y. Lu, and A. Weidenkaff, “High figure of merit in (Ti,Zr,Hf)NiSn half-Heusler alloys,” *Scr. Mater.*, vol. 66, no. 12, pp. 1073–1076, 2012, doi: 10.1016/j.scriptamat.2012.03.002.

[3] U. Öz Saraç, V. Onar, F. Özen, Y. S. Aslanlar, and N. Akkaş, “Effect of welding time on tensile-shear load in resistance spot welded TRIP 800 and microalloyed steels,” *Indian J. Chem. Technol.*, vol. 26, no. 4, pp. 355–357, 2019.


[4] N. Baluch, “Advanced High Strength Steel in Auto Industry : an Overview,” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 4, no. 4, p. 686, 2014.


[5] T. Depover, F. Vercruysse, A. Elmahdy, P. Verleysen, and K. Verbeken, “International Journal of Impact Engineering Evaluation of the hydrogen embrittlement susceptibility in DP steel under static and dynamic tensile conditions,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 123, no. March 2018, pp. 118–125, 2019, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2018.10.002.


- [6] J. Liao, J. A. Sousa, A. B. Lopes, X. Xue, F. Barlat, and A. B. Pereira, "Mechanical, microstructural behaviour and modelling of dual phase steels under complex deformation paths," *Int. J. Plast.*, vol. 93, pp. 269–290, 2017, doi: 10.1016/j.ijplas.2016.03.010.
- [7] C. Landron, E. Maire, J. Adrien, H. Suhonen, P. Cloetens, and O. Bouaziz, "Non-destructive 3-D reconstruction of the martensitic phase in a dual-phase steel using synchrotron holotomography," *Scr. Mater.*, vol. 66, no. 12, pp. 1077–1080, 2012, doi: 10.1016/j.scriptamat.2012.03.003.
- [8] S. Pandre, V. Mhatre, N. Kotkunde, and S. Kumar, "Materials Today : Proceedings Strain hardening behavior of DP 590 steel using dislocation density based Kock-Mecking model," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.810.
- [9] V. H. L. Cortéz, F. A. R. Valdés, and L. T. Treviño, "Weldability of martensitic steel by resistance spot welding a neural network optimization in the automotive industry," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 24, no. 12, pp. 1412–1417, 2009, doi: 10.1080/10426910903343916.
- [10] J. Venezuela, Q. Zhou, Q. Liu, M. Zhang, and A. Atrens, "Influence of hydrogen on the mechanical and fracture properties of some martensitic advanced high strength steels in simulated service conditions," *Corros. Sci.*, vol. 111, pp. 602–624, 2016, doi: 10.1016/j.corsci.2016.05.040.
- [11] J. Venezuela et al., "Further study of the hydrogen embrittlement of martensitic advanced high-strength steel in simulated auto service conditions," *Corros. Sci.*, vol. 135, no. January 2017, pp. 120–135, 2018, doi: 10.1016/j.corsci.2018.02.037.
- [12] S. Eva, C. Bohumil, and H. Petr, "Dynamic Fracture Behavior of the Martensitic High Strength Steel after Spot Welding," *Mater. Today Proc.*, vol. 3, no. 4, pp. 1156–1160, 2016, doi: 10.1016/j.matpr.2016.03.014.
- [13] M. Pouranvari and S. M. Mousavizadeh, "Failure mode of M130 Martensitic Resistance Spot Welds," *Mater. Tehnol.*, vol. 47, no. 6, pp. 771–776, 2013.
- [14] M. Huang, Q. Zhang, L. Qi, L. Deng, and Y. Li, "Effect of external magnetic field on resistance spot welding of aluminum alloy AA6061-T6," *J. Manuf. Process.*, vol. 50, no. January, pp. 456–466, 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.01.005.
- [15] K. Zhou and P. Yao, "Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 124, pp. 170–198, 2019, doi: 10.1016/j.ymsp.2019.01.041.
- [16] F. Hayat, "Effect of aging treatment on the microstructure and mechanical properties of the similar and dissimilar 6061-T6/7075-T651 RSW joints," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 556, pp. 834–843, 2012, doi: 10.1016/j.msea.2012.07.077.
- [17] X. Liu, S. Lan, and J. Ni, "Experimental study of Electro-Plastic Effect on Advanced High Strength Steels," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 582, pp. 211–218, 2013, doi: 10.1016/j.msea.2013.03.092.
- [18] F. Badkoobeh, A. Nouri, H. Hassannejad, and H. Mostaan, "Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded dual-phase steels with various silicon contents," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 790, no. June, p. 139703, 2020, doi: 10.1016/j.msea.2020.139703.
- [19] D. Bračun, I. Polajnar, and J. Diaci, "Indentation shape parameters as Indicators of spot weld quality," *Int. J. Mater. Prod. Technol.*, vol. 27, no. 3–4, pp. 247–257, 2006, doi: 10.1504/IJMPT.2006.011275.
- [20] T. Khuenkaew and K. Kanlayasiri, "Selection of electrode tips for the resistance spot welding of dissimilar stainless steels," *MATEC Web Conf.*, vol. 192, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201819201007.
- [21] J. Wilzer, F. Lüdtkke, S. Weber, and W. Theisen, "The influence of heat treatment and resulting microstructures on the thermophysical properties of martensitic steels," *J. Mater. Sci.*, vol. 48, no. 24, pp. 8483–8492, 2013, doi: 10.1007/s10853-013-7665-2.
- [22] M. Pouranvari, S. Sobhani, and F. Goodarzi, "Resistance spot welding of MS1200 martensitic advanced high strength steel: Microstructure-properties relationship," *J. Manuf. Process.*, vol. 31, pp. 867–874, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.01.009.
- [23] H. Di, Q. Sun, X. Wang, and J. Li, "Microstructure and properties in dissimilar/similar weld joints between DP780 and DP980 steels processed by fiber laser welding," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 33, no. 12, pp. 1561–1571, 2017, doi: 10.1016/j.jmst.2017.09.001.
- [24] K. Bandyopadhyay, S. K. Panda, P. Saha, V. H. Baltazar-Hernandez, and Y. N. Zhou, "Microstructures and failure analyses of DP980 laser welded blanks in formability context," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 652, pp. 250–263, 2016, doi: 10.1016/j.msea.2015.11.091.
- [25] E. Schmidová, M. R. Sunil Kumar, M. Schmid, and F. Bozkurt, "Role of Nb in the failure of dual-phase steel in heterogeneous welds," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 116, no. July, 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104708.
- [26] B. Wang et al., "Investigation on fatigue fracture behaviors of spot welded Q&P980 steel," *Int. J. Fatigue*, vol. 66, pp. 20–28, 2014, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2014.03.004.


## Nickel ( $\text{Ni}^{+2}$ ) Adsorption on Borax Production Waste from Industrial Wastewater

\*<sup>1</sup>Fatma Tuğçe Şenberber Dumanlı, <sup>2</sup>Esma Burcu Rona, <sup>3</sup>Meral Yıldırım Özen, <sup>4</sup>Emek Möröydor Derun

<sup>1</sup>Nisantasi University, Civil Engineering, Istanbul, Turkey, fatma.senberber@nisantasi.edu.tr, 

<sup>2</sup>Istanbul Water and Sewerage Administration (ISKI), Istanbul, Turkey, esmaburcurona@hotmail.com, 

<sup>3</sup>Yildiz Technical University, Chemical Engineering, Istanbul, Turkey, meralyildirim21@hotmail.com, 

<sup>4</sup>Yildiz Technical University, Chemical Engineering, Istanbul, Turkey, moroydor@yildiz.edu.tr, 

Research Paper

Arrival Date: 18.11.2020

Accepted Date: 10.03.2021

### Abstract

Borax sludge was selected as the adsorbent due to its dolomite content to purify the industrial wastewater.  $\text{Ni}^{+2}$  concentration in the industrial wastewater was decreased with the adsorption on the borax production waste. To clarify the adsorption mechanism, various pH values, initial concentrations, and contact times were applied. The adsorption percentage increased with the increasing pH value because of the precipitation of metal ion. In the isothermal analyses, the best-fitted isotherms were in the order of Temkin > Freundlich > Langmuir > Harkins-Jura isotherms. The adsorption heat ( $B_T$ ) was determined as 277 kJ/mole in Temkin isotherm and n value of Freundlich was estimated as 1.3. In the kinetic analyses of  $\text{Ni}^{+2}$  adsorption, the pseudo-second-order was the best fitted kinetic method. The adsorbed amount value of  $\text{Ni}^{+2}$  per unit mass ( $q_e$ ) varied between 8.3682 and 40 mg/g. The estimated isothermal and kinetic results indicated that the sludge of borax production waste can be preferred as an alternative for the preparation of low-cost adsorbents.

**Keywords:** Adsorption kinetics, Borax waste, Nickel, Isotherms, wastewater, water treatment

### 1. INTRODUCTION

Waste formation is one of the world's major problems. The concentration and composition of wastes in water resources have increased over the last years with the expansion of population and industrial activities. Industrial wastewater includes heavy metals at various types and concentrations. Metal pollution in water supplies exhibits harmful effects on both the environment and human health [1 – 3]. As a heavy metal, nickel and its components are commonly seen in nickel refining, welding and electroplating. In the exposure of nickel, the target organs are the lung and the skin. The significant health effects because of occupational exposure to nickel can be listed as lung cancer, skin allergies and lung fibrosis [4].

As a separation method, adsorption is a process for the heavy metals removal from contaminated water that receives attention due to its advantages of high efficiency, being easy and economic. To obtain an effective adsorption process, the adsorption mechanism should be clarified by using the isothermal and kinetic analyses. With this purpose, different adsorbents have been studied for heavy metal removal. Farmaki et al., experimented the adsorption of  $\text{Ni}^{+2}$  and  $\text{Pb}^{+2}$  on tailings of limestone and dolomite as a mine waste [5]. Dada et al., investigated the isothermal analyses of  $\text{Zn}^{+2}$  on the modified risk husk, as an agricultural adsorbent [6]. Meng et al., synthesized the zeolite A and used as an

adsorbent for the removal of heavy metals from the industrial wastewater [7].

The borax production waste is also known as borax sludge, generally contains the clay and borax and/or tinalconite. Annually, more than 120.000 tonnes of borax waste are produced in Turkey. Generally, they can be preferred as an extender in the wail tile or briquette production [8]. Due to its clay component, it can be used as an alternative to the low-cost adsorbents.

In this study, the borax production waste was selected to purified nickel content of the industrial wastewater. The  $\text{Ni}^{+2}$  adsorption on borax production waste was studied and the adsorption mechanism was clarified by using the isothermal and kinetic methods. The effects of the pH, initial concentration and contact time on to the adsorption were determined.

### 2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

#### 2.1. Materials

The borax sludge was supplied from Bandırma Boron and Acid Factory Operations of Eti Mine Works in Balıkesir, Turkey. The sludge was dried at 105°C in Ecocell oven for 2 hours to decrease its moisture content. The dried waste was powdered and sieved to decrease particle size lower than 90

\*Corresponding Author: Nisantasi University, Neotech Campus, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering, Tasyoncası Street No.1V-1Y, Maslak- Sariyer, Istanbul, Turkey, fatma.senberber@nisantasi.edu.tr, +90-212 210 1010

µm. for sieving process, the vibrating screen of Fritsch was used. The dried adsorbent was identified as the mixture of tinalconite (pdf. no: 00-008-0049; Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·5H<sub>2</sub>O) and dolomite (Ca-Mg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>; pdf. no: 00-005-0622) phases. The BET surface area of borax sludge was 5.54 m<sup>2</sup>/g [9].

The industrial wastewater was provided from the inlet water line of a wastewater treatment facility in the region of the Ikitelli Organized Industrial Zone where wastewater from metal coating industries' was collected. Initial pH of wastewater was 3. For the pH adjustment, NaOH was purchased from Merck Chemicals. The wastewater mainly included the heavy metals of Ni, Cu, Cr, Zn, Al and Fe. From these heavy metals, Ni was selected due to its high concentration. The initial Ni concentration of the sample was 133.67 ppm.

**2.2. Adsorption Experiments**

The 0.2 g of dried adsorbent was added 100 ml of wastewater and stirred at 200 rpm. For the batch adsorption study, the experimental conditions were summarized in Table 1. The adsorption experiments were applied at optimum conditions of each parameter. The solution 10 M NaOH was used to adjust the pH of the adsorption medium.

**Table 1.** The parameters of the batch adsorption experiments

Parameter	Values
pH	3, 5, 7, 9
Dilution ratio	0.25, 0.33, 0.5, 1
Contact time (min)	15, 30, 45, 60, 90,120

The samples were filtered after the batch adsorption and a Perkin Elmer Optima DV 2100 model of Inductively coupled plasma - optical emission spectrometer (ICP-OES) was performed to analyse the filtrates.

**2.3. Isothermal and Kinetic Analyses**

The obtained batch adsorption data were applied to different isotherm models: Langmuir, Freundlich, Temkin and Harkins-Jura. The Langmuir and Freundlich isotherms explained the adsorption process in the monomolecular and multimolecular layer states, respectively. The Langmuir and Freundlich isotherm models were expressed in the Equations of (1) and (2).

$$q_e = \frac{q_{max} \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e} \times V \tag{1}$$

$$q_e = K_F \cdot C_e^{1/n} \tag{2}$$

where q<sub>e</sub> was the adsorbed Ni<sup>+2</sup> amount for per unit mass in mg/g, q<sub>max</sub> was the maximum adsorption capacity in mg/g, C<sub>e</sub> was the Ni<sup>+2</sup> concentration of solution at equilibrium state in mg/L, V was volume in L, K<sub>L</sub> and K<sub>F</sub> were the coefficients

of Langmuir and Freundlich related to the affinity of the binding sites. The separation factor of R<sub>L</sub> is preferred to indicate the required properties of the Langmuir isotherm. When R<sub>L</sub> is between 0 and 1, it indicates that adsorption is favourable Equation (3).

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L \cdot C_e} \tag{3}$$

The Temkin isotherm (Equation (4) and (5)) assumed that the adsorption energy would decrease with the filling of the active pores on the adsorbent surface. B<sub>T</sub> was the ratio of RT/b<sub>T</sub>. A<sub>T</sub>, was the equilibrium binding constant of Temkin isotherm, B<sub>T</sub> was the adsorption heat and b<sub>T</sub> was the coefficient of the adsorption heat.

$$q_e = B_T \cdot \ln A_T + B_T \cdot \ln C_e \tag{4}$$

$$B_T = R \cdot T / b_T \tag{5}$$

The Harkins-Jura isotherm model expresses the possibility of multi-layer adsorption due to the existence of heterogeneous pore distribution. The Harkins-Jura isotherm model can be expressed by Equation (6). A<sub>H</sub> and B<sub>H</sub> were the Harkins-Jura isotherm model constants.

$$q_e = \sqrt{\frac{A_H}{\log C_e + B_H}} \tag{6}$$

The kinetic parameters of the adsorption process were estimated by using the adsorption kinetic models of Lagergren pseudo-first-order, pseudo-second-order, and intraparticle diffusion. The related equations of Lagergren pseudo and second-order were given in (7) and (8), respectively. The terms of k<sub>I</sub> and k<sub>II</sub> were rate coefficients for pseudo-first-order and second-order, respectively.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_I (q_e - q_t) \tag{7}$$

$$\frac{dq_t}{dt} = k_{II} (q_e - q_t)^2 \tag{8}$$

The function of the intraparticle diffusion kinetic model was seen in equation (9). The value of k<sub>III</sub> was the rate coefficient of the related kinetic model.

$$dq_t = k_{III} t^{0.5} + A \tag{9}$$

**3. RESULTS AND DISCUSSION**

**3.1. Adsorption Results**

The percentage of absorbed Ni<sup>+2</sup> from the wastewater was presented in Figure 1 at different pH values. The initial pH value of wastewater was 3. The alkalinity of the solution was a major factor for the Ni<sup>+2</sup> adsorption from the wastewater. The higher adsorption percentages can be explained with the



precipitation of metal ions in alkali mediums [10]. According to the Figure 1, the acidic conditions would decrease the precipitation rate of nickel precipitates. The removal rate was low due to the insufficient precipitation. The optimum pH value was selected as 7 in the experimental setup to obtain treated wastewater in an environmentally friendly way.

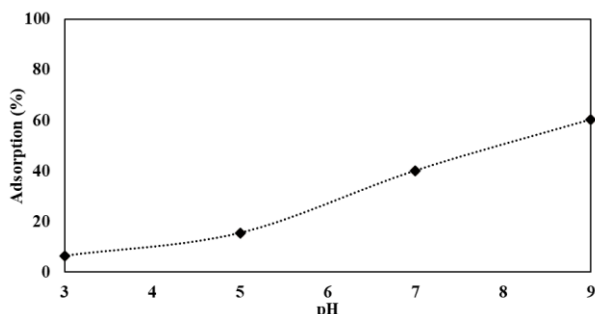


Figure 1. pH effect on Ni<sup>2+</sup> adsorption

The wastewater was diluted at the ratios of 0.25, 0.33, 0.5 and 1 to obtain different initial concentrations. The Ni<sup>2+</sup> adsorption at different contact times for each dilution ratio was presented in Figure 2. Ni<sup>2+</sup> adsorption rapidly increased in the first 30 minutes. The minor changes were seen after the 30 minutes.

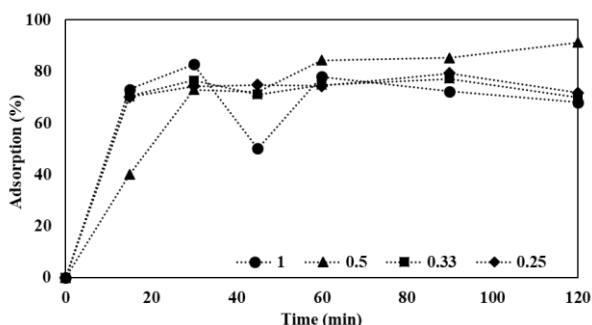


Figure 2. Ni<sup>2+</sup> adsorption at different contact times

The probable adsorption mechanism for Ni<sup>2+</sup> by the borax sludge may be explained in three steps:

- (i) the dissolution of tinalconite and dolomite phases in borax sludge, and the formation of Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, and Mg<sup>2+</sup> cations;
- (ii) the precipitation of Ni(OH)<sub>2</sub>;
- (iii) the exchange of cations on the adsorbent (Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, and Mg<sup>2+</sup>) with Ni<sup>2+</sup>.

The adsorption results indicate the successful progress of the waste dissolution, Ni(OH)<sub>2</sub> precipitation and/or cation exchange with increasing the pH values. This proved that the adsorption mechanism proceeds well in alkaline environments.

### 3.2. Results of Isothermal Analyses

Isotherm parameters of the Ni<sup>2+</sup> adsorption on borax waste were given in Table 2. According to the correlation constants in isothermal analysis results, the best-fitted isotherms were in the following order: Temkin> Freundlich> Langmuir>

Harkins-Jura. The highest correlation constant of Temkin isotherm model signified that the adsorption heat in the layer decreases in a linear way as a result of the increase in surface coverage. The n value of Freundlich isotherm can be interpreted with the increase in chemical concentration would decrease the relative adsorption.

Table 2. Isotherm parameters of the Ni<sup>2+</sup> adsorption on borax waste

Isotherms	Plot	Parameter	Result
Langmuir	1/q <sub>e</sub> vs 1/C <sub>e</sub>	q <sub>max</sub>	49.7512
		K <sub>L</sub>	0.0185
		R <sub>L</sub>	0.4187
		R <sup>2</sup>	0.9905
Freundlich	log(q <sub>e</sub> ) vs log(C <sub>e</sub> )	K <sub>F</sub>	1.1637
		n	1.3
		R <sup>2</sup>	0.9918
Temkin	q <sub>e</sub> vs ln(C <sub>e</sub> )	A <sub>T</sub>	0.2282
		B <sub>T</sub>	8.9329
		b <sub>T</sub>	277.3536
		R <sup>2</sup>	0.9983
Harkins-Jura	1/q <sub>e</sub> <sup>2</sup> vs log(C <sub>e</sub> )	A <sub>H</sub>	-38.9105
		B <sub>H</sub>	-1.5486
		R <sup>2</sup>	0.9568

The adsorption capacities (q<sub>max</sub>) of various adsorbents were compared in Table 3. According to the given table, adsorption capacity was affected from the coupling of adsorbent – heavy metal. The results indicated the suitability of borax production waste for the Ni adsorption than the Cr. Also, borax sludge can be an alternative adsorbent in stead of modified ores or some types of plant peels.

Table 3. Comparison of the adsorption capacity (q<sub>max</sub>) of different adsorbents

Adsorbent	Heavy metal	q <sub>max</sub>	Ref.
Borax production waste	Ni	49.7512	This study
Borax production waste	Cr(III)	24.096	[9]
Wheat straw-rice husk	Ni	0.427	[10]

Table 3(cont.). Comparison of the adsorption capacity (q<sub>max</sub>) of different adsorbents

Chitosan-Vermiculite Composite	Pb	0.154	[11]
Modified sepiolite	As(III)	46.7	[12]
Brassica Napus straw	Cu	9.37	[13]
Modified orange peel	Ni	80.0	[14]

### 3.3. Results of Kinetic Analyses

Kinetic parameters of the Ni<sup>2+</sup> adsorption on borax waste were given in Table 4. Due to the highest correlation

constants (between 0.8436 and 0.9939), the pseudo-second-order kinetic method was determined as the best-fitted model. For this kinetic model, the  $q_e$  values were in the range of 8.3682 – 40 mg/g. the adsorption rate coefficients were varied between  $3.2 \times 10^{-5}$  and 0.0363.

**Table 4.** Kinetic parameters of the  $Ni^{+2}$  adsorption on borax waste

Kinetic Method	Concentration	%25	%33	%50	%100
Lagergren Pseudo first order	$q_e$	0.3950	0.2496	25.650	42.934
	K	-0.0175	-0.0269	0.0090	0.0387
	$R^2$	0.7601	0.4367	0.8613	0.9159
Pseudo second order	$q_e$	8.3682	9.3023	98.039	40.00
	K	0.0363	0.0279	$3.2 \times 10^{-5}$	0.0015
	$R^2$	0.9939	0.9403	0.8436	0.8991
Intraparticle diffusion	$K_{ID}$	-0.3195	-0.2197	2.9278	1.3312
	A	9.6961	10.188	-8.3721	19.558
	$R^2$	0.6923	0.1398	0.8726	0.3327

#### 4. CONCLUSION

The heavy metal adsorption from the industrial wastewater was achieved by using industrial waste. The pH of the adsorption medium was a notable factor to provide the metal ions precipitation as hydroxides. The adsorption mechanism was studied by various isothermal and kinetic models at different initial concentrations and contact times. The best-fitted model function was determined as Temkin isotherm and Pseudo-second-order kinetic method. The adsorption results promoted the possible use of borax sludge, which is readily available in Turkey, as a low-cost adsorbent for the  $Ni^{+2}$  removal from industrial wastewater.

**Author Contributions:** Experimental design and interpretation – E.M.D., F.T.Ş.D.; Literature review and experiments – M.Y.O, E.B.R.

**Conflict of Interest:** This study is produced from M.Sc thesis of “Removal of heavy metals in industrial wastewater by using various adsorbents” from Esmâ Burcu RONA in 2019.

**Financial Disclosure:** The authors declared that this study received no financial support.

#### REFERENCES

[1] Z. Bian, X. Miao, S. Lei, S. Chen, W. Wang, and S. Struthers, “The Challenges of Reusing Mining and Mineral-Processing Wastes”, *Science*, vol. 337, no. 6095, pp. 702–703, 2012.

[2] I. Capasso, S. Lirer, A. Flora, C. Ferone, R. Cioffi, D. Caputo, and B. Liguori, “Reuse of mining waste as aggregates in fly ash-based geopolymers”, *J. Clean. Prod.*, vol. 220, pp. 65-73, 2019.

[3] E. Pehlivan, A.M. Ozkan, S. Dinc, and S. Parlayici, “Adsorption of  $Cu^{2+}$  and  $Pb^{2+}$  ion on dolomite powder”, *J. Hazard. Mater.*, vol. 167, pp. 1044–1049, 2009.

[4] J. Zhao, X. Shi, V. Castranova, and M. Ding, “Occupational Toxicology of Nickel and Nickel Compounds”, *Journal of Environmental Pathology, Toxicology and Oncology*, vol. 28, no. 3, pp. 177-208, 2009.

[5] S. Farmaki, O. Karakasi, and A. Moutsatsou, “ $Pb^{2+}$  and  $Ni^{2+}$  Adsorption on Limestone and Dolomite Tailings”, *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, vol. 15, no. 2, pp. 199-204, 2014.

[6] A.O. Dada, A.P. Olalekan, A.M. Olatunya, and O. Dada, “Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich Isotherms Studies of Equilibrium Sorption of  $Zn^{2+}$  Unto Phosphoric Acid Modified Rice Husk”, *J. Appl. Chem.*, vol. 3, no. 1, pp. 38-45, 2012.

[7] Q. Meng, H. Chen, J. Lin, Z. Lin, and J. Sun, “Zeolite A synthesized from alkaline assisted pre-activated halloysite for efficient heavy metal removal in polluted river water and industrial wastewater”, *J. Environ. Sci.*, vol. 56, pp. 254–262, 2017.

[8] O. Celik Sola, and B. Sayin, “Characterization of ground slag and borax waste and their effects on the compressive strength of briquettes”, *Constr Build Mater.*, vol. 123, pp. 727–733, 2016.

[9] F. T. Senberber, M. Yildirim, N. Karamahmut Mermer, and E. Moroydor Derun, “Adsorption of Cr(III) from aqueous solution using borax sludge”, *Acta Chim. Slov.*, vol. 64, pp. 654-660, 2017.

[10] Z. Shen, Y. Zhang, O. McMillan, F. Jin, and A. Al-Tabaa, “Characteristics and mechanisms of nickel adsorption on biochars produced from wheat straw pellets and rice husk”, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 24, pp. 12809–12819, 2017.

[11] Z. Şenol, "Kitosan-Vermikülit Kompoziti Kullanılarak Sulu Çözümlerden Etkin Kurşun Giderimi: Denge, Kinetik ve Termodinamik Çalışmalar", *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, vol. 8, no. 1, pp. 15-21, 2020, doi:10.21541/apjes.531737

[12] A. Ateş and G. Yaşar, "Doğal ve Modifiye Edilmiş Sepiyolit ile Sulu Çözümlerden Arsenik ve Manganın Adsorpsiyonu ile Ayrımı", *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, vol. 7, no. 1, pp. 127-139, 2019, doi:10.21541/apjes.413488

[13] Y. E. Simsek, “Sulu Çözümlerden Bakır (II) Adsorpsiyon Sürecinin Optimizasyonunda Yüzey Yanıt Metodolojisinin Uygulanması”, *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, vol. 6, no. 3, pp. 182-191, 2018.

[14] M. Ajmal, R.A.K. Kao, R. Ahmad, J. Ahmad, “Adsorption studies on Citrus reticulata fruit peel of orange: removal and recovery of Ni II from electroplating wastewater”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. B79, pp. 117–131, 2000.

## Nükleer Kabuk Modeli ile Ne İzotoplarının Nükleer Yapısının İncelenmesi

\*<sup>1</sup>Serkan Akkoyun, <sup>2</sup>Tuncay Bayram

<sup>1</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Sivas, Türkiye, sakkoyun@cumhuriyet.edu.tr, 

<sup>2</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Trabzon, Türkiye, t.bayram@ymail.com, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 12.04.2020

Kabul Tarihi: 28.08.2020

### Öz

Atom çekirdeklerinin nükleer yapılarını araştırma amacıyla kullanılan yaygın yöntemlerden birisi de nükleer kabuk modelidir. Atom elektronlarının yörüngelere yerleşmesine benzer şekilde, nükleer kabuk modelinde de proton ve nötronların, Pauli dışarlama ilkesine uyararak çekirdek içerisinde yörüngelere yerleştiği düşünülmektedir. Bu yörüngeler, kendi aralarında gruplanarak kabukları meydana getirmektedir ki, bir kabuktaki tüm mümkün seviyelerin dolu olması durumunda, kabuğun kapalı olduğu söylenir. Kapalı kabuğa sahip atom çekirdekleri oldukça kararlıdır ve nükleer kabuk modeli hesaplamalarında bu çekirdeklerden fazla olan değerlik nükleonları hesaplamalara katılır. Bu çalışmada, <sup>16</sup>O çekirdeği kapalı kabuk çekirdeği olarak ele alınarak, çift-çift Ne çekirdeklerinin nükleer yapılarını araştırmak için nükleer kabuk modeli kullanılmıştır. Tek parçacık yörüngeleri olarak  $d_{5/2}$ ,  $s_{1/2}$  ve  $d_{3/2}$  ele alınarak, değerlik nükleonları arasındaki iki cisim etkileşimleri için farklı parametre setleri kullanılmıştır. Sonuçlar birbirleriyle ve mevcut literatür değerleriyle karşılaştırılmıştır. Deneysel değerlere en yakın sonuçların, *usdb* ve *sdnn* parametre setleri ile elde edildiği görülmüştür. Sihirli nötron sayılı <sup>18</sup>Ne izotopunda, ilk uyarılmış seviye enerjisinin beklendiği gibi fazla olduğu görülmüştür. Ardından <sup>20</sup>Ne ve <sup>22</sup>Ne çekirdekleri için bu uyarılma enerjisi düşmekte ve sonra yörüngelerin tam dolu hale gelmesi ile tekrar yükselmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Nükleer kabuk modeli, nükleer yapı, neon çekirdekleri

## Investigation of Nuclear Structures of Ne Isotopes by Nuclear Shell Model

\*<sup>1</sup>Serkan Akkoyun, <sup>2</sup>Tuncay Bayram

<sup>1</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Sivas, Türkiye, sakkoyun@cumhuriyet.edu.tr,

<sup>2</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Trabzon, Türkiye, t.bayram@ymail.com,

### Abstract

One of the common methods used to investigate the nuclear structures of atomic nuclei is the nuclear shell model. Similar to the placement of atomic electrons into orbits, in the nuclear shell model, protons and neutrons are thought to fill the orbits within the nucleus, following the principle of Pauli's exclusion. These orbits are grouped to form shells, which are said to be closed if all possible places in a shell are full. Atomic nuclei with closed shells are very stable and valence nucleons that are more than these nuclei are included in the nuclear shell model calculations. In this study, the nuclear shell model was used to investigate the nuclear structure of even-even Ne nuclei by considering the <sup>16</sup>O core as a closed-shell nucleus. Single-particle orbits  $d_{5/2}$ ,  $s_{1/2}$  and  $d_{3/2}$  are taken into account and different parameter sets are used for two-body interactions between valence nucleons. The results were compared with each other and with current literature values. It was seen that the closest results to the experimental values were obtained with parameter sets of *usdb* and *sdnn*. In the <sup>18</sup>Ne isotope with magic neutron number, it was seen that the first excited level energy was found to be large as expected. Then, this excitation energy decreases for the <sup>20</sup>Ne and <sup>22</sup>Ne nuclei and rises again when the orbits become full.

**Keywords:** Nuclear shell model, nuclear structure, neon nuclei

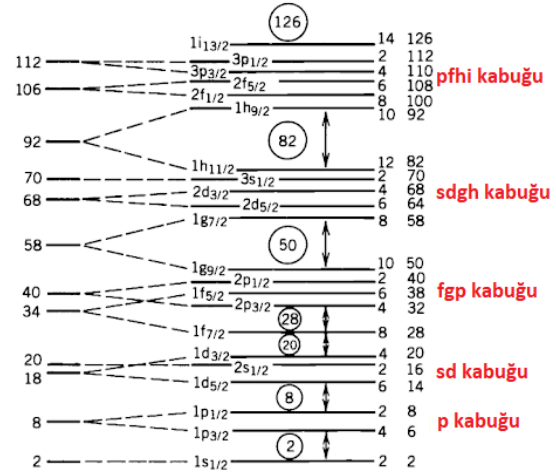
### 1. GİRİŞ

Atom çekirdeğinin etrafında var olduğu düşünülen atomun yörünge modelinde, elektronların bu yörüngelerde buldukları düşünülmektedir. Elektronların bu yerleşimi, Pauli dışarlama ilkesine göre olur ve aynı kuantum sayısına

sahip iki elektron aynı yörüngede asla bulunamaz. Her yörünge, kuantum sayıları ile ilişkili olarak alabileceği azami elektron sayısı vardır. Bu şekilde yörüngelerin elektronlarla dolması sonucunda, belirli bazı elektron sayısına sahip atomların, diğerlerine göre daha kararlı olduğu bilinmektedir. Bu atomlar, iyi bilindiği üzere soy

gazlar olarak adlandırılmaktadır. Bu modele benzer bir modelin, atom çekirdeğinin içinde yer alan ve ortak adları nükleon olan proton ve nötronlara da uygulanabileceği görülmüştür. Nükleer kabuk modeli [1-5] olarak adlandırılan bu modelde nükleonlar, çekirdek içerisindeki yörüngelere Pauli ilkesine göre ayrı ayrı yerleşirler. Soy gazlara benzer olarak, bazı nükleon sayılı çekirdeklerin, diğerlerine göre daha kararlı oldukları gözlemlenmiştir ki bu sayılar nükleer fizikte sihirli sayılar (2, 8, 20, 28, 50, 82 ve 128) olarak adlandırılır [6, 7]. Hem nötron hem de protonu sihirli sayıda olan çift sihirli çekirdekler, küresel yapıda olup oldukça kararlıdır. Sihirli sayıya sahip tek parçacık yörüngelerinin, ardından gelen yörüngeler arasında fazla mesafe olması, yörüngelerin gruplanmış olarak bulunmalarına yol açar. Bu gruplara kabuk adı verilmekte olup, nükleer kabuk modeli ismi buradan gelmektedir. Şekil 1'de görülebilen bu kabuklar, içerdikleri yörüngelere göre isimlendirilirler. Son zamanlarda yapılan teorik ve deneysel çalışmalar, bazı kabuklar için mevcut sihirli sayılardan farklı yeni sihirli sayıların olabileceğine veya mevcutların sihirli olamayabileceğine işaret etmektedir [8].

Nükleer kabuk modeli hesaplamalarında, çift sihirli sayılı çekirdekler, öz (kor) çekirdek olarak ele alınarak, bundan fazla olan değerlik nükleonları hesaplamalara katılır. Öz çekirdekte  $J=0$  toplam açısal momentumu veren nükleonların hareket etmediği varsayılmaktadır. Buna göre bu nükleonların, özden çıkarak değerlik nükleonlarının içine dahil olmaları mümkün değildir. Değerlik nükleonlarının, özün hemen üzerindeki kabukta dağılmış olabileceği farz edilerek bu kabuk, model uzayı olarak ele alınır. Model uzayındaki nükleonlar, her bir yörüngede tüm kombinasyonlarda yerleşebilirler. Farklı yerleşimler, çekirdeğin farklı enerji seviyelerinin oluşmasına neden olur. Model uzayındaki yörüngelerin, yörünge kapasitelerinin artması ve değerlik nükleon sayısının artması, yapılacak olan hesaplamaları oldukça zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada,  $^{16}\text{O}$  özü kullanılarak, *sd* kabuğunda yer alan çift-çift (hem proton hem nötron sayısı çift sayı) Ne çekirdeklerinin nükleer özellikleri araştırılmıştır. Deneysel verilerinin literatürde mevcut olması ve nötron bakımından iki tane sihirli sayılı izotopa sahip olması bakımından, bu izotopların teorik olarak incelenmesi ile, kullanılan modellerin test edilmesi mümkündür. İncelenen Ne izotopları, öz dışında kalan 2 protona ve 0 ile 12 arasındaki çift sayıda nötrona sahiptir. Proton ve nötronlar, ayrı ayrı olmak üzere, *sd* model uzayında her kombinasyonda dağılmıştır. Ne izotoplarının  $2^+$ ,  $4^+$  ve  $6^+$  uyarılmış seviye enerjileri,  $4^+$  enerjisinin  $2^+$  enerjisine oranları, taban durumdan  $2^+$  seviyesine olan indirgenmiş kvadrupol geçiş olasılıkları ve deformasyon parametreleri hesaplanmıştır. Farklı parametre setleri ile yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlardan görüldüğü üzere, nükleonlar arasındaki etkileşimi tanımlayan *usdb* ve *sdm* iki cisim matris elemanları setlerinin, deneysel değerlere daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Hesaplamalar için, Kshell kabuk modeli bilgisayar kodu kullanılmıştır [9].



Şekil 1. Nükleer kabuk modeli yörüngeleri [10]

## 2. KABUK MODELİ HESAPLAMALARI

Nükleer kabuk modeli, atom çekirdeğinin düşük enerjili yapısını tanımlamak için en uygun araçtır [11]. Bu modelde nükleonların (proton ve nötronların), bağımsız bir merkezi potansiyel kuyusunda hareket ettiği varsayılmaktadır. Güçlü spin-yörünge etkileşiminin önemli bir bileşen olduğunun ortaya çıkmasının ardından, tek parçacık yörünge dizilimleri ve sihirli sayılar (2, 8, 20, 28, 50, 82 ve 126), spin-yörünge etkileşiminin de dahil edilmesiyle Şekil 1'deki son şeklini almıştır [12, 13]. Bilindiği gibi, hem proton hem de nötron bakımında sihirli sayıya sahip olan çekirdekler, diğerlerine göre daha kararlı yapıda ve küresel şekildedir. Çekirdeğin kabuk modeli, atomun kabuk modeline benzetmekle birlikte, pek çok zorlukları da içermektedir. Bu zorluklardan ilki, atomun boyutlarının  $10^{-10}$  m, çekirdeğinkinin ise  $10^{-15}$  m mertebesinde olması nedeniyle, çalışma alanının darlaşmasıdır. Diğer bir zorluk ise, çekirdekte, atomdaki gibi tek tip parçacık olan elektronlar yerine, iki farklı parçacık türünün (protonlar ve nötronlar) beraber bulunmasıdır. Atomun kabuk modelinde elektronlar, atomun yörüngelerinde merkezi bir potansiyel kuyusunda bağımsız olarak hareket eder. Merkezi potansiyel, çekirdeğin pozitif yükünden ve elektronların ortalama itici etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Oysa çekirdeğin kabuk modelinde böyle bir merkezi potansiyel söz konusu değildir. Ayrıca bu modelde, elektronların kendi aralarında ya da çekirdek ile etkileşmelerinin Coulomb etkileşmesi ile tanımlandığı gibi açık bir tanımlama, nükleonlar arasında mevcut değildir.

Nükleer enerji seviyelerinin hesaplanması oldukça zor bir işidir. Zorluğun ana nedeni, serbest protonlar ve nötronlar arasındaki etkileşimin, bir başka ifade ile güçlü nükleer etkileşimin, doğasının yeterince iyi bilinmemesidir. Kapalı kabukların dışında birkaç değerlik nükleonun olduğu bir çekirdeği düşünürsek, seviyelerin enerjileri üç kısma ayrılabilir. Birincisi, kapalı kabukların (bu çalışmada  $^{16}\text{O}$ ) bağlanma enerjisi, ikincisi; değerlik nükleonlarının kinetik enerjileri ve öz çekirdeğin ( $^{16}\text{O}$ ) nükleonlarıyla etkileşimlerini içeren tek nükleon enerjilerinin toplamıdır.

Üçüncüsü ise, değerlik nükleonlarının birbirleriyle karşılıklı etkileşimidir. Bunların arasında kapalı kabukların bağlanma enerjilerini hesaplamak en zor olanıdır. Hesaplanması en kolay olanı ise, değerlik nükleonları arasındaki etkileşimdir. Eğer bu değerlik nükleonları tek bir yörüngedelerse, sadece bu yörüngedeki nükleonlar arasındaki etkin etkileşimin matris elemanlarını bilmek yeterlidir. Değerlik nükleonları birkaç yörüngeye dağılmışsa, tek nükleon enerjileri arasındaki farklılıklara (tek parçacık enerjisi) da ihtiyaç vardır ki bunlar genellikle deneysel verilerden alınabilir. Kabuk modeli hesaplamalarındaki en önemli noktalardan birisi de, değerlik nükleonları arasında kullanılacak etkin etkileşimin seçilmesidir [14].

Nükleonlar arasında bireysel etkileşmelerin bilinmemesinden kaynaklanan zorluktan ötürü, bu etkileşmeler yerine, diğer nükleonların oluşturduğu ortalama bir potansiyel (ortalama alan yaklaşımı) için içine katılır. Böylelikle nükleer kabuk modeli kapsamında ele alınan problem, çekirdekdeki tüm nükleonları hesaba katan çok-cisim problemi, sadece değerlik nükleonlarını hesaba katan birkaç-cisim problemine indirgenmiş olur.

A tane nükleona sahip çekirdek için Hamiltonyen, Denklem 1'deki gibi yazılabilir.

$$H = \sum_{i=1}^A T_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^A V_{ij} \quad (1)$$

Burada  $T_i$ , her bir nükleonun kinetik enerjisi,  $V_{ij}$  ise, nükleonlar arasındaki etkileşme potansiyelidir. Fakat nükleonlar arasındaki etkileşme açıkça tanımlı olmadığından dolayı, her bir nükleonun, diğerlerinin oluşturduğu ortalama bir potansiyelde hareket ettiğini varsayarak, Hamiltonyen Denklem 2'de verildiği gibi düzenlenebilir.

$$H = \sum_{i=1}^A [T_i + U_i] + \left(\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^A V_{ij} - \sum_{i=1}^A U_i\right) \quad (2)$$

$$H = H_0 + H_{artuk} \quad (3)$$

Burada  $H_0$ , her bir nükleonun, ortalama bir potansiyel altındaki tek parçacık enerjisidir. Harmonik salıncı, Wood-Saxon ya da Yukawa tipindeki gibi bir merkezi potansiyelin seçimi ile tek parçacık enerjileri belirlenebilir. Artık etkileşmeye ( $H_{artuk}$ ) ait iki-cisim matris elemanları ise, nükleonların karşılıklı etkileşmelerini temsil eder. Literatürde farklı yöntemlerle elde edilmiş matris eleman setleri mevcuttur. Bu matris eleman setleri, bir veya iki kabuğu kapsayacak şekildedir. İkinci kuantum uzayında yaratma ve yok etme işlemcileri cinsinden Hamiltonyen, Denklem 4'deki halini alır.

$$H = \sum_{ij}^A \epsilon_i a_i^+ a_j + \frac{1}{4} \sum_{ijkl}^A \langle ij|V|kl \rangle a_i^+ a_j^+ a_k a_l \quad (4)$$

Burada  $\epsilon_i$  değerleri, nükleonların öz çekirdekle etkileşmeleri olan tek parçacık enerjileridir.  $j$  yörüngesinde yok edilen parçacık,  $i$  yörüngesinde yaratılır. İki cisim etkileşme terimi ise,  $k$  ve  $l$  yörüngelerinde yok edilen parçacıkların  $i$  ve  $j$  yörüngelerinde yaratıldığını söyler. Nükleonlar için Slater

determinantları ile tanımlanan çok-parçacık dalga fonksiyonu ( $\Psi$ ) kullanarak Hamiltonyen denklemi (Denklem 5) çözülerek, çekirdeğin enerji seviyeleri hesaplanabilir.

$$\hat{H}\Psi = E\Psi \quad (5)$$

Çok parçacıklı sistemler için matris formalizminde gerçekleştirilen bu işlemlerde, model uzayının boyutu ve nükleon sayısı artıkça, Hamiltonyen matrisinin boyutları oldukça yüksek mertebelere ( $10^{10}$ ) kadar çıkmaktadır. Özdeğerleri elde etmek için matrisler, Lanczos gibi uygun algoritmalar kullanılarak köşegenleştirilir ve çözüme ulaşılır. Bu amaçla, literatürde nükleer kabuk modeli hesaplamalarını yapmak için geliştirilmiş birçok bilgisayar kodu mevcuttur. Bunlara örnek olarak, Oxbash [15], Antoine [16], Nushell [17], Bigstick [18], Redstick [19] ve Kshell [9] verilebilir. Bu çalışmada gerçekleştirilen hesaplamalarda, Kshell kodu kullanılmıştır. Linux işletim sisteminde çalışan bu kod, Lanczos yöntemi kullanılarak M-şeması gösterimi ile nükleer kabuk modeli hesaplamaları gerçekleştirmeyi sağlar. Çekirdeklerin enerji seviyeleri, spin ve izospinleri, manyetik ve kvadrupol momentleri, seviyeler arasındaki  $B(E2)$  ve  $B(M1)$  geçiş olasılıkları ve tek parçacık spektroskopik faktörleri kod ile  $10^{10}$  boyutuna kadar hesaplanabilir. Çekirdeklerin deformasyonunu gösteren kvadrupol deformasyon parametresi ( $\beta_2$ ) parametresi ise, Denklem 6 yardımı ile hesaplanabilir [20].

$$\beta_2 = \frac{4\pi}{3ZR_0^2} [B(E2)/e^2]^{1/2} \quad (6)$$

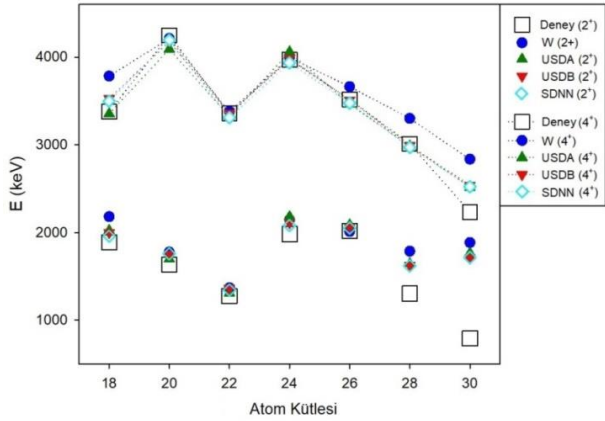
Burada,  $Z$ , çekirdeğin proton sayısı,  $R_0^2 = 0,0144A^{2/3}$  barn olup,  $A$  ise çekirdeğin atom kütesidir.

### 3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Çalışmamızda, model uzayı olarak  $sd$  uzayını ele aldık. Bu uzay,  $^{16}\text{O}$  öz çekirdeğinin üzerinde yer alan,  $d_{5/2}$ ,  $s_{1/2}$  ve  $d_{3/2}$  yörüngelerinden oluşmaktadır. Öz çekirdeğin 8 protonu ve 8 nötronu vardır. İncelenecek olan Ne çekirdeğinin proton sayısı 10 olduğundan, model uzayındaki değerlik proton sayısı 2'dir. Ayrıca, atom kütesi 18 ile 30 arasındaki Ne çekirdekleri incelendiğinden, model uzayındaki değerlik nötronları 0 ile 12 arasındadır. Literatürde  $sd$  model uzayından kullanılmak üzere mevcut olan,  $cw$ ,  $cwh$  [21],  $hbumsd$ ,  $hbusd$  [22],  $kuosd$ ,  $kuosdh$ ,  $pw$  [23],  $sdba$ ,  $sdbn$  [24],  $w$  [25],  $usda$  [26] ve  $usdb$  [27] iki cisim etkileşme matris eleman setlerini ayrı ayrı kullanarak, nötron sayısı 8 ile 12 arasındaki çift-çift Ne çekirdeklerinin nükleer özellikleri elde edilmiştir. Ne çekirdekleri içerisinde 20 ve 22 atom kütleli olanlar, kararlı olan çekirdeklerdir. Diğer çekirdeklerin yarı ömürleri ise en fazla saniyeler mertebesinde. Öncelikle, bu çekirdeklerin ilk  $2^+$  ve  $4^+$  seviyelerinin enerjilerini kabuk modeli hesaplamaları ile elde ederek, bu enerjilerin birbirlerine oranları incelenmiştir. Şekil 2'de, Ne çekirdeklerinin ilk  $2^+$  ve  $4^+$  enerji seviyeleri, deneysel değerlere [28] en yakın sonuç veren 4 matris eleman seti için verilmiştir. Bu matris elemanları,  $usd$  tipi matris elemanları olup,  $w$  matris eleman setinin yeni deneysel verilerle geliştirilmesi ile elde edilmiştir. Bu matris elemanları, 3 tek parçacık enerjisi ve 63 iki-cisim etkileşme matris elemanlarını içermektedir.  $usdb$  matris elemanları,

A=16-40 aralığındaki 77 sd kabuğu çekirdeğine ait taban durum ve düşük uyarılmış durum enerjilerinden oluşan 608 deneysel enerji değerinin ele alınarak fit edilmesinden elde edilmiştir. *Sdnn* seti ise, en yenileri olan *usdb* setinin, yapay zeka ile bir miktar iyileştirilmesi ile türetilmiştir. *Usdb* matris elemanları, gizli katman nöron sayısı 8 olan yapay sinir ağlarına girdi olarak verilmiş ve *sdnn*, ağız çıktıları olarak elde edilerek üretilmiştir [24]. Görüldüğü gibi, deneysel değerlere en yakın değerler, *usdb* ve *sdnn* kullanılarak elde edilmiştir.

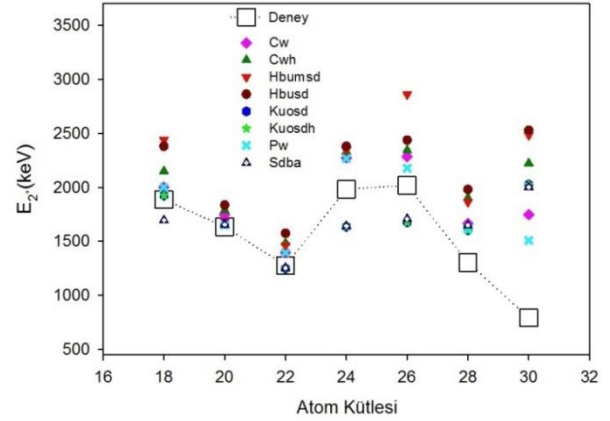
Buna göre, deneysel enerji değerlerinden sapmaların ortalama mutlak değerleri *usdb*, *sdnn*, *usda* ve *w* matris eleman setleri için sırasıyla, 161,56; 161,63; 192,67 ve 270,47 keV olarak elde edilmiştir.  $^{18}\text{Ne}$ 'den  $^{28}\text{Ne}$ 'ye kadar teorik hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar birbirine oldukça yakın iken,  $^{28}\text{Ne}$  ve  $^{30}\text{Ne}$  izotopları için teorik sonuçların deneyselden biraz uzaklaştığı görülmektedir. Bu ayrışma, özellikle  $2^+$  seviyesinde daha fazladır. Ek olarak, literatürde mevcut olan deneysel verilerden birkaçı, tam kesinlikle belirlenememiştir. Bunlar,  $^{26}\text{Ne}$  ve  $^{28}\text{Ne}$  için  $4^+$  seviyeleri ile  $^{30}\text{Ne}$  için hem  $2^+$  hem  $4^+$  seviyeleridir. Bu çalışmada, tüm matris eleman setleri ile yapılan hesaplamaların yakın sonuçlar vermesi nedeniyle,  $^{26}\text{Ne}$  ve  $^{28}\text{Ne}$  için literatürde mevcut olan kesin olmayan sonuçlar desteklenmiştir.  $^{30}\text{Ne}$  için  $4^+$  seviyesi literatürdeki deneysel değerine yakın olarak hesaplanmasına karşın, bu izotopun  $2^+$  seviyesi için elde edilen tüm sonuçlar deneysel değerden oldukça uzaktır [30]. Bu çekirdek, standart olmayan özellikler gösteren ve nötron damlama çizgisine oldukça yakın yerleşmiş inversiyon adası olarak adlandırılan bölgede yer alan bir çekirdektir [31].



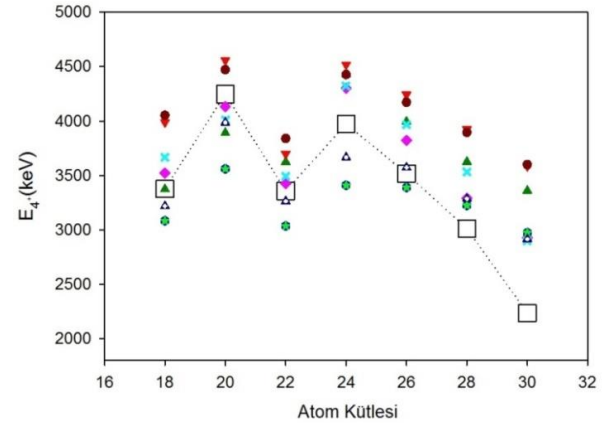
**Şekil 2.** Çift-çift Ne izotopları için *usd* tipi matris elemanları kullanılarak SM hesaplamalarından elde edilen ve deneysel  $2^+$  ve  $4^+$  enerji seviyeleri

Şekil 3 ve 4'de, Ne çekirdeklerinin ilk  $2^+$  ve  $4^+$  enerji seviyeleri, diğer matris eleman setleri için deneysel değerlerle birlikte gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, bu setler kullanılarak elde edilen enerji değerleri, *usd* tipli setlere göre deneysel değerlerden daha uzaktır. Buna göre, deneysel enerji değerlerinden sapmaların ortalama mutlak değerleri *cw*, *cwh*, *hbmsd*, *hbusd*, *kuosd*, *kuosdh*, *pw* ve *sdba* matris eleman setleri için sırasıyla, 292,67; 516,00;

618,40; 628,60; 376,00; 415,67; 316,07 ve 299,07 keV olarak elde edilmiştir. Bu sapmalar içinde *usd* tipli setlerin sapmalarına ve deneysel değerlere en yakın olanı, *sdba* seti olup en büyük sapma vereni ise, *hbusd* setidir. Yine  $^{30}\text{Ne}$  izotopu için teorik sonuçların deneyselden oldukça uzak olduğu görülmektedir.



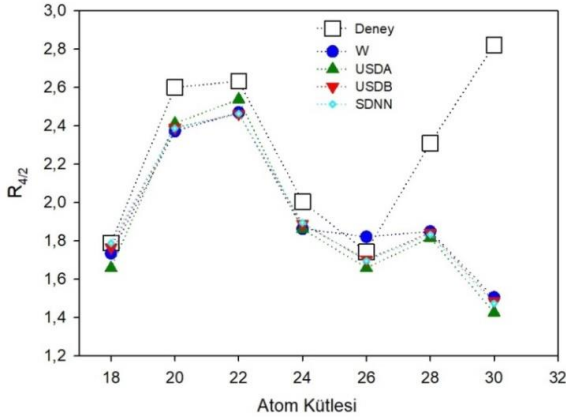
**Şekil 3.** Çift-çift Ne izotopları için diğer matris elemanları kullanılarak SM hesaplamalarından elde edilen ve deneysel  $2^+$  enerji seviyeleri



**Şekil 4.** Çift-çift Ne izotopları için diğer matris elemanları kullanılarak SM hesaplamalarından elde edilen ve deneysel  $4^+$  enerji seviyeleri

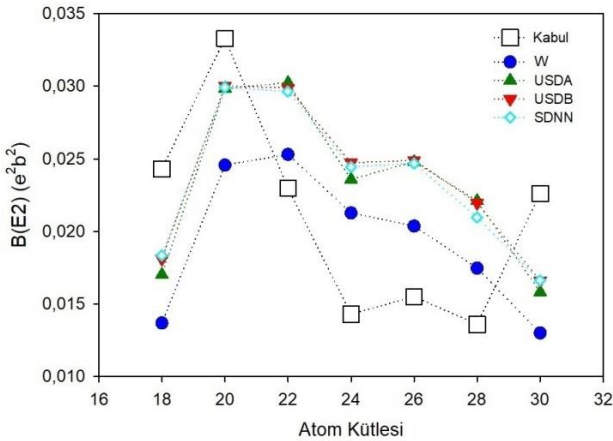
$2^+$  ve  $4^+$  enerji seviye değerlerinin birbirlerine oranları ( $R_{4/2}$ ), çekirdeğin deformasyonu hakkında bilgi veren bir değerdir. Buna göre,  $R_{4/2}$  oranının 2,00'dan küçük olması çekirdeğin kolektif yapıda olmadığına, 2,00 civarında olması küresel titreşici olduğuna, 2,50 civarında olması geçişken olduğuna ve 3,33 civarında olması da katı-rotor olduğuna işaret eder. Şekil 5'den görüldüğü gibi,  $^{18}\text{Ne}$  ve  $^{26}\text{Ne}$ 'nin kolektif yapıda olmadığı görülmektedir.  $^{20}\text{Ne}$  ve  $^{22}\text{Ne}$  geçişken ve  $^{24}\text{Ne}$  küresel titreşici olup, deneysel değerler ile teori birbiriyle uyum içerisinde.  $^{28}\text{Ne}$  ve  $^{30}\text{Ne}$  için ise, elde edilen teorik sonuçların, deneysel değerlerden uzak olduğu görülmektedir. Deneysel değerlere göre bu izotoplar geçişken karakterli izotoplardır. Oysa *usd* tipli matris eleman setleri ile yapılan teorik hesaplamalar sonucunda bunların küresel titreşici oldukları ya da kolektif yapıda olmadıkları görülmüştür. Diğer matris eleman setlerinden *kuosd*, 2,26

değeri ile,  $^{28}\text{Ne}$  izotopu için deneysel olan 2,31 değerine en yakın sonucu vermiştir.  $^{30}\text{Ne}$  izotopu için ise, 2,82 olan deneysel değere en yakın sonucu, 1,92 ile *pw* seti vermiştir.



Şekil 5. Çift-çift Ne izotopları için ilk  $2^+$  ve  $4^+$  enerji seviye değerlerinin birbirine oranları

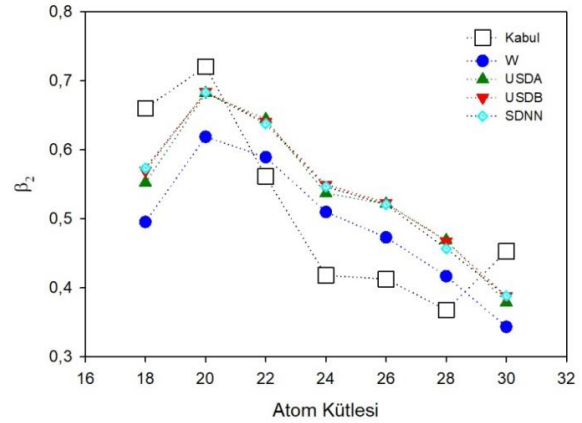
Taban durumdan ilk uyarılmış  $2^+$  durumuna geçiş olasılığı, indirgenmiş geçiş olasılığı parametresi ( $B(E2)$ ) hesaplanarak verilmiştir. Literatürde teorik ve deneysel sonuçlardan elde edilen pek çok değer kullanılmasıyla elde edilen kabul edilmiş değerler alınarak, kabuk modeli hesaplamalarıyla karşılaştırılmıştır. Bu değer, çekirdeklerin kolektif davranışlarını görmeye önemli bir niceliktir ve nükleer yapı hakkında bilgi verir. Şekil 6'da görüldüğü gibi,  $^{20}\text{Ne}$  izotopu için  $B(E2)$  değerinin yüksek olması, diğerlerine kıyasla biraz daha fazla kolektif davranış gösterdiğine işaret etmektedir [20, 29].



Şekil 6. Çift-çift Ne izotopları için  $B(E2)$  değerleri

$B(E2)$  değerlerinden elde edilen kuadrupol deformasyon parametresi ( $\beta_2$ ) ise, çekirdek deformasyonunun bir göstergesidir. Bu değer pozitif olması, çekirdeğin şeklinin kutuplardan çekilmiş gibi olduğuna, negatif olması ise kutuplardan basılmış gibi olduğuna işaret eder.  $\beta_2$  değeri ne kadar büyük ise, bu çekilme ya da basılma da o kadar fazladır. Bu fazlalık ise, çekirdeğin deformasyonunun derecesini gösterir. Şekil 7'den görülebileceği gibi tüm çift-çift Ne izotoplarının  $\beta_2$  değerlerinin pozitif olması, kutuplardan çekilmiş bir şekilde olduklarına işaret olabilir.

*Usda*, *usdb* ve *sdnn* matris eleman setleri ile yapılan hesaplamaların birbirlerine yakın oldukları ve  $^{18}\text{Ne}$ ,  $^{20}\text{Ne}$  ve  $^{30}\text{Ne}$  çekirdekleri için kabul edilmiş değerlere *w* etkileşme setinden daha yakın olduğu görülmektedir. Diğer Ne çekirdekleri için ise, *w* matris eleman seti ile yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçların kabul edilmiş değerlere [20, 29] daha yakın olduğu görülmektedir. Kabul edilmiş sonuçlara göre, bu izotoplar içinde deformasyonu görece fazla olan  $^{20}\text{Ne}$  izotopu olup, literatürle uyumludur. Deformasyonu en az olanlar ise,  $^{24}\text{Ne}$ ,  $^{26}\text{Ne}$  ve  $^{28}\text{Ne}$  ve  $^{30}\text{Ne}$  izotoplarıdır.



Şekil 7. Çift-çift Ne izotopları için  $\beta_2$  değerleri

Son olarak, bu çalışmada ilk  $6^+$  seviye enerjileri de bazı Ne izotopları için hesaplanabildiği görülmüştür.  $^{22}\text{Ne}$  izotopu için literatürde mevcut olan değerde kesinlik yoktur ve sadece *usdb* ve *sdnn* matris eleman setleri kullanılarak elde edilebilmiştir.  $^{28}\text{Ne}$  için literatürde değer bulunmamasına karşın, *hbumsd* matris eleman seti ile bir değer elde edilebilmiştir. Tablo 1'de, hesaplanabilen ilk  $6^+$  seviye enerjileri, farklı matris eleman setleri için deneysel değerlerle birlikte verilmiştir.

Tablo 1. Deneysel ve farklı matris elemanları ile yapılan hesaplamalardan elde edilen ilk  $6^+$  enerji seviye değerleri

İzotop	İlk uyarılmış $6^+$ enerji (keV)						
	Deneysel[28]	<i>cw</i>	<i>cwh</i>	<i>hbumsd</i>	<i>hbusd</i>	<i>kuosd</i>	<i>kuosdh</i>
$^{20}\text{Ne}$	8778	8546	7668	8560	9241	8188	7803
$^{22}\text{Ne}$	6311	-	-	-	-	-	-
$^{28}\text{Ne}$	-	-	-	6806	-	-	-
	<i>pw</i>	<i>sdba</i>	<i>w</i>	<i>usda</i>	<i>usdb</i>	<i>sdnn</i>	
$^{20}\text{Ne}$	8405	8564	8515	8360	8547	8593	
$^{22}\text{Ne}$	-	-	-	-	6244	6163	
$^{28}\text{Ne}$	-	-	-	-	-	-	

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, *sd* model uzayında  $^{16}\text{O}$  öz çekirdeğinin üzerinde bulunan çift-çift Ne çekirdeklerinin nükleer yapılarının araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, çekirdeklerin ilk uyarılmış seviye enerjileri, bu enerjilerin birbirlerine oranları, seviyeler arasındaki geçiş olasılıkları ve deformasyon parametreleri incelenmiştir. Nötron sayısının sihirli olduğu  $^{18}\text{Ne}$  çekirdeği için, ilk uyarılmış seviye enerjisinin beklendiği gibi fazla olduğu görülmüştür.  $^{20}\text{Ne}$  ve

$^{22}\text{Ne}$  çekirdekleri için bu uyarılma enerjisi düşmekte ve sonra  $^{24}\text{Ne}$  ve  $^{26}\text{Ne}$  çekirdekleri için tekrar yükselmektedir. Bunun sebebi bu çekirdekler için sırasıyla  $d_{5/2}$  ve  $s_{1/2}$  yörüngelerinin tam dolu hale gelmiş olmasıdır.  $^{30}\text{Ne}$  izotopu için ise  $d_{3/2}$  yörüngesi tam dolu hale gelerek, kabuğun kapanmasına neden olacaktır. Bu nedenle, bu çekirdek için de ilk uyarılmış durumun enerjisinin yükselmesi beklenir. Bu çalışmada yaptığımız teorik hesaplamalarda bu yükselmeyi görmemize rağmen, literatürde mevcut ama kesin olarak belirlenmemiş olan deneysel verilere göre, bu artış gözlenmemektedir. Ancak, bu izotopun ilk uyarılmış enerjisinin bu derece düşük olması, küresel şekilde olması yerine oldukça deforme bir çekirdek olduğuna işaret eder. Bu çekirdek, standart olmayan özellikler gösteren ve nötron damlama çizgisine oldukça yakın yerleşmiş inversiyon adası olarak adlandırılan bölgede yer alan bir çekirdektir. Bu nedenle, bu çalışmada yapılan hesapların, standart olmayan bu bölge çekirdekleri açıklanamaması normaldir. Çekirdek deformasyonları incelendiğinde ise,  $^{18}\text{Ne}$  için deformasyonun düşük olması, beklendiği gibi hesaplanmıştır. Yine beklendiği üzere, ardından gelen  $^{20}\text{Ne}$  ve  $^{22}\text{Ne}$  çekirdeklerinde deformasyonun,  $^{18}\text{Ne}$  izotopuna göre yüksek olduğu gözlenmiştir.  $^{24}\text{Ne}$  ve  $^{26}\text{Ne}$  için yine yörüngelerin dolması nedeniyle deformasyonun büyüklüğü azalmıştır. Deformasyon için literatürdeki kabul edilmiş verilerin davranışları incelendiğinde ise, sihirli sayıda nötron sahip olmasına rağmen,  $^{30}\text{Ne}$  izotopu için deformasyonun büyüdüğü görülmektedir.


## KAYNAKÇA


- [1] A. Bohr A., B.R. Mottelson, Nuclear Structure Vol. 1. New York: W.A. Benjamin, 1969.
- [2] I. Talmi, I, "55 years of the shell model: a challenge to nuclear many-body theory", Int. J. Mod. Phys. E, vol. 14, pp. 821-844, 2005.
- [3] E. Caurier, et al., "The shell model as a unified view of nuclear structure", Rev. Mod. Phys., vol. 77, pp. 427-488, 2005.
- [4] B.A. Brown, "The Nuclear Shell Model Towards the Drip Lines", Prog. Part. Nucl. Phys., vol. 47, pp. 517-599, 2001.
- [5] K.L.G. Heyde, The Nuclear Shell Model, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1990.
- [6] M.G. Mayer, "On Closed Shells in Nuclei", Phys. Rev., vol. 74, pp. 235-236, 1948.
- [7] M.G. Mayer, "On Closed Shells in Nuclei. II", Phys. Rev., vol. 75, pp. 1969-1970, 1949.
- [8] D. Steppenbeck, et al., "Evidence for a new nuclear 'magic number' from the level structure of  $^{54}\text{Ca}$ ", Nature, vol. 502, pp. 207, 2013.
- [9] N. Shimizu, "Nuclear shell-model code for massive parallel computation, KSHELL", arXiv:1310.5431 [nucl-th], 2013.
- [10] [http://peiluan-tai.com/physics/shell\\_model.html](http://peiluan-tai.com/physics/shell_model.html) (Erişim zamanı; Nisan, 10, 2020).
- [11] I. Talmi, "Fifty Years of the Shell Model — The Quest for the Effective Interaction", Advances in Nuclear Physics, vol. 27, pp. 1-275, 2003.
- [12] O. Haxel, et al., "On the "Magic Numbers" in Nuclear Structure". Phys. Rev., vol. 75, pp. 1766-1766, 1949.
- [13] M.G. Mayer, "Nuclear Configurations in the Spin-Orbit Coupling Model. I. Empirical Evidence", Phys. Rev., vol. 78, pp. 16-21, 1950.
- [14] D.J. Deana, et al., "Effective interactions and the nuclear shell-model", Progress in Particle and Nuclear Physics vol. 53, pp. 419–500, 2004.
- [15] Oxbash for Windows, B. A. Brown, et al., MSU\_NSCL report number 1289, 2004.
- [16] ANTOINE, [http://www.iphc.cnrs.fr/nutheo/code\\_antoin\\_e/menu.html](http://www.iphc.cnrs.fr/nutheo/code_antoin_e/menu.html) (Erişim zamanı; Nisan, 10, 2020).
- [17] B.A. Brown, W.D.M. Rae, "The Shell-Model Code NuShellX@MSU", Nucl. Data Sheets, vol. 120, pp. 115-118, 2014.
- [18] C.W. Jhonson, et al., "BIGSTICK: A flexible configuration-interaction shell-model code", arXiv:1801.08432v1 [physics.comp-ph], 2018.
- [19] REDSTICK, <http://www.phys.lsu.edu/faculty/cjohnson/redstick.html> (Erişim zamanı; Nisan, 10, 2020).
- [20] S. Raman, et al., "Transition probability from the ground to the first-excited 2+ state of even-even nuclides", Atomic Data and Nuclear Data Tables, vol. 78, pp. 1-128, 2001.
- [21] W. Chung, Ph. D. thesis, Michigan State Univ., 1976.
- [22] B.A. Brown, et al., "Semi-empirical effective interactions for the 1s-Od shell", Ann. Phys. Vol. 182, pp. 191-236, 1988.
- [23] B. M. Preedom and B. H. Wildenthal, "Shell-Model Calculations for  $^{22}\text{Na}$  and  $^{22}\text{Ne}$ ", Phys. Rev. C, vol. 6, pp. 1633-1644, 1972.
- [24] S. Akkoyun, et al., "Improvement Studies of an Effective Interaction for  $N=Z$  sd-shell Nuclei by Neural Networks", arXiv:2001.08561v1 [nucl-th], 2020.
- [25] B.H. Wildenthal, "Empirical strengths of spin operators in nuclei", Progress in Particle and Nuclear Physics, vol. 11, pp. 5-51, 1984.
- [26] B. A. Brown and B. H. Wildenthal, "Status of the Nuclear Shell model", Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. Vol. 38, pp. 29-66, 1988.
- [27] B.A. Brown and W.A. Richter, "New "USD" Hamiltonians for the sd shell", Phys. Rev. C, vol. 74, pp. 034315, 2006.
- [28] Kinsey, R. R., et al., The NUDAT/PCNUDAT Program for Nuclear Data, paper submitted to the 9th International Symposium of Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, Budapest, Hungary, October 1996. Data extracted from the NUDAT database, 2.8 (Nisan, 01, 2020).
- [29] B. Pritychenko, et al., "B(E2) Evaluation for  $0_1^+ \rightarrow 2_1^+$  Transitions in Even-Even Nuclei", Nuclear Data Sheets, vol. 120, pp. 112-114, 2014.
- [30] Y. Yanagisawa, et al., "The first excited state of  $^{30}\text{Ne}$  studied by proton inelastic scattering in reversed kinematics", Physics Letters B, vol. 566, pp. 84–89, 2003.
- [31] E. K. Warburton, et al., "Mass systematics for  $A=29-44$  nuclei: The deformed  $A\sim 32$  region", Phys Rev C, vol. 41, pp. 1147-1166, 1990.




## Improving of Lightweight Concrete Properties Produced with Pumice Aggregate of Nevşehir Region with Fly Ash Substitution


<sup>1</sup>Mehmet Oğuzhan Kale, <sup>2\*</sup>Hakan Çağlar, <sup>3</sup>Arzu Çağlar, <sup>4</sup>Ahmet Celal Apay, <sup>5</sup>Selçuk Çimen

<sup>1</sup>Selefkos Building Inspection ŞTİ, Mersin, Turkey, [moguzhankale@gmail.com](mailto:moguzhankale@gmail.com), 

<sup>2\*</sup>Ahi Evran University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering, Kırşehir, Turkey, [c.hakan@ahievran.edu.tr](mailto:c.hakan@ahievran.edu.tr), 

<sup>3</sup>Ahi Evran University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Architecture, Kırşehir, Turkey, [arzu.caglar@ahievran.edu.tr](mailto:arzu.caglar@ahievran.edu.tr), 

<sup>4</sup>Düzce University, Faculty of Fine Arts, Design And Architecture, Department of Architecture, Düzce, Turkey, [aapay@sakarya.edu.tr](mailto:aapay@sakarya.edu.tr), 

<sup>5</sup>Bayburt University, Institute of Science and Technology, Department of Civil Engineering, Bayburt, Turkey, [selcuk\\_cimen\\_@hotmail.com](mailto:selcuk_cimen_@hotmail.com), 

Research Paper

Arrival Date: 07.05.2020

Accepted Date: 05.01.2021

### Abstract

In this study, it was aimed to determine the effects of industrial waste fly ash substitution on physical and mechanical properties of lightweight concrete. In this respect, lightweight concrete samples were produced by the use of fly ash as a cement replacement material in different proportions (1%, 3% and 5%). In lightweight concrete production, the Nevşehir region acidic pumice has been used as aggregate. The physical and mechanical properties of these lightweight concrete samples were investigated and microstructural analysis was carried out.

To determine the physical differences, dry unit volume weight, capillary water absorption, porosity, compactness and freeze-thaw experiments were conducted. For the determination of mechanical properties, tensile splitting strength and compressive strength tests were applied. SEM images have been interpreted to examine the structural differences occurring within the material.

As a result of the study, it was determined that the physical and mechanical properties of the lightweight concrete were improved with the increase in the amount of fly ash. The best results were obtained from sample with 5% fly ash substitution. The use of industrial waste in a large sector such as construction, which adversely affects the ecological balance, will be an opportunity to dispose of waste.

**Keywords:** Lightweight concrete, fly ash, pumice, SEM, physical and mechanical properties

### 1. INTRODUCTION

Mankind need structures to meet the need for shelter. Material is the most important element for obtaining solid and secure structures [1]. Concrete is the most widely used material in the construction industry [2]. Concrete is a material that requires attention and diligence in all stages from the production process to the use process. It is preferred more than other building materials due to its features such as easy shape, economy and durability [3].

In parallel with the development of technology in the 21st century, developments have also occurred in the concrete industry. In line with these developments, a wide variety of

concrete has been produced according to the purpose of use that can meet different needs. In addition to traditional concrete, as a result of increasing of scientific studies and the development of technology, many types of concrete that meet different needs have been produced [4]. These types of concrete which made their place in the field of concrete technology in a short time, are called special concrete [5]. Heavy concrete, shotcrete, self-compacting concrete are a few of these special concrete [6]. One type of the special concrete is called as lightweight concrete [7]. Lightweight concrete has a wide range of use in the construction industry with their unique properties compared to conventional concrete [8,9]. In recent years, composite has become a more popular construction material due to its low density,

\*<sup>1</sup>Ahi Evran University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering, Kırşehir, Turkey, 0553 653 19 79

reduction of dead load, and low transport costs [10]. Lightweight concrete is a concrete type with low unit weight, and high insulation [11]. It is widely used in building technology since the unit weight is less than normal and will reduce the building weight given its mechanical resistance [12]. The fact that the unit weight being less than the traditional concrete will decrease the own weight of the structure and therefore will decrease the earthquake load that will affect the structure and minimize the damage that may occur due to earthquake [13]. Lightweight concrete application reduces structural loads and structural element production cost. Therefore, it is widely preferred for structures built in seismic zones [14]. Furthermore, in parallel with the reduction of building weight, the reduction of sections of the bearing elements increases the use rate of lightweight concrete in the construction sector [15].

In lightweight concrete; fly ash, expanded clay, expanded perlite, pumice etc. are partially or completely used instead of traditional aggregates [16-18].

Fly ash, the end product of coal produced by thermal power plants in large quantities, has gained popularity in the construction sector. It has become a sustainable option for the variety of concrete applications [19]. Fly ash is one of the inorganic residues resulting from coal burning processes [20]. It is a harmful industrial byproduct that pollutes the environment and negatively affects human health [21,22]. It is known that around 600 million tons of fly ash are produced annually around the world. Annual fly ash production in Turkey is averagely 13 million tons, of which only a small fraction is used [23]. The disposal of these organic and inorganic wastes is of both environmental and financial importance [24]. With the development of technology, the construction industry has opened a gateway for the transportation of these industrial wastes [25]. Many studies have been done on fly ash. Some studies report that the pressure and bending strengths of fly ash are superior to conventional concrete [26,27]. and suggest that its use would be more appropriate instead of fine aggregate [28,29]. Pumice is a natural aggregate formed by volcanic activities [30]. According to TS 3234, pumice is defined as a material with pores, spongy perspective, silicate structure, 1 g/cm<sup>3</sup> unit weight, 6 mohs hardness and glassy texture [31]. Approximately 40% of the 18 billion m<sup>3</sup> world pumice reserves are located in Turkey [32]. This has increased the availability of pumice material in the construction sector. It has been used as mineral additives in cement sector and as aggregates in lightweight concrete production in many countries of the world [33]. Although pumice has many positive advantages such as lightness and insulation, it causes an increase in water absorption of concrete due to its pores [34].

Pumice and fly ash have been reported to be used in lightweight concrete production [35-38].

In this study, it was aimed to investigate the changes in

physical and mechanical properties by the substitution of fly ash to light concrete produced with acidic pumice aggregate found in Nevşehir region.

## 2. MATERIAL AND METHOD

### 2.1. Material

#### 2.1.1. Pumice

In the study, acidic pumice extracted in Nevşehir region and found in 4 different ranges of 4-2 mm, 2-1 mm, 1-0.5 mm and 0.5-0 mm were used as aggregate. The determination of grain density, water absorption rate and humidity of acidic pumice for each granulometry was determined according to TS EN 1097-6 standard, while the determination of loose and craped unit volume mass was determined in accordance with TS 3529 standard. The physical properties of the aggregate used are presented in Table 1 and the chemical properties are presented in Table 2.

**Table 1.** Physical Properties of Nevşehir Acidic Pumice

Physical Property	Aggregate Size (mm)			
	4-2	2-1	1-0.5	<0.5
Specific Mass (g / cm <sup>3</sup> )	1.00	1.08	1.13	1.88
Dry Specific Mass (g/cm <sup>3</sup> )	0.77	0.85	0.91	-
Water Absorption (%)	30.11	26.35	23.59	-
Congested BHK (g/cm <sup>3</sup> )	0.469	0.475	0.485	-
Loose BHK (g/cm <sup>3</sup> )	0.451	0.448	0.422	-
Aggregate Humidity Rate (%)	0.40	0.30	0.30	-

**Table 2.** Physical Properties of Nevşehir Acidic Pumice

Component	%
SiO <sub>2</sub>	73.22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.33
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.13
CaO	0.74
MgO	0.09
Na <sub>2</sub> O	3.64
K <sub>2</sub> O	4.19
MnO	0.04
TiO <sub>2</sub>	0.08
SO <sub>3</sub>	0.02
L.O.I	4.50

#### 2.1.2. Fly Ash

Fly ash used in the study, chemical composition of which is given in Table 3, was obtained from Seyitömer Thermal Power Plant. F-Type fly ash with a mass density of 0.88 g/cm<sup>3</sup>, a specific gravity of 1.58 g/cm<sup>3</sup>, a specific surface area of 0.115 m<sup>2</sup>/g and a pH of 8.3 and a lighter structure than other fly ash was used in the experiments.

**Table 3.** Chemical analysis of Seyitömer fly ash [39]

Component	%
SiO <sub>2</sub>	52.34
CaO	7.47
MgO	5.75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.91
Na <sub>2</sub> O	0.88
K <sub>2</sub> O	2.17
SO <sub>3</sub>	2.25
Na <sub>2</sub> O(eş d)	2.31
Free CaO	0.02

### 2.1.3. Cement

In the experimental study, CEM I 42.5 N type Portland Cement compatible with TS EN 197-1 was used[40]. Cement was obtained from the Medcem cement factory in Mersin. The amount of cement to be used for the whole series of experiments was calculated and obtained at one time in order to make the experiment results healthier. Cement was stored in a place free of moisture and wet. The chemical and some physical properties of the cement used are given in Table 4.

**Table 4.** Chemical and physical values of cement and limit values of TS EN197-1

Analysis Results	CEM I 42,5 N	TS EN 197-1
2 Day Compressive Strength (MPa ))	22.4	≥20.0
7 Day Compressive Strength (MPa ))	39.4	
28 Day Compressive Strength (MPa ))	51.0	62.5 ≤ X ≤ 42.5
SO <sub>3</sub> (%)	2.6	≤ 3.5
MgO (%)	2.1	≤ 5.0
Cl (%)	0.007	≤ 0.1
Loss of Ignition (%)	1.7	≤ 5.0
Thawless Relic (%)	0.3	≤ 5.0
Specific Surface (cm <sup>2</sup> /g)	3749	
Initial Set (minute)	161	≤ 60.0
Final Set (Hour)	04:20	
Constancy of Volume (mm)	0.4	≤ 10.0
Free Lime (%)	0.5	-
Equivalent Alkali (Na <sub>2</sub> O+0,658K <sub>2</sub> O) (%)	-	-
Water Demand (Vicat Water) (%)	29.6	-

### 2.1.4. Sand

The stream sand used in the study and obtained from within Mersin province borders was washed and sifted. The grain diameter of the sand used varies between 0-4 mm.

### 2.1.5. Mixing Water

During the experimental study, Mersin city drinking water was used in the production of the test samples in accordance with TS EN 1008 standard [41]. The mixing water was taken from the mains without any process and participated in the production.

## 2.2. Method

### 2.2.1. Production of Lightweight Concrete Samples

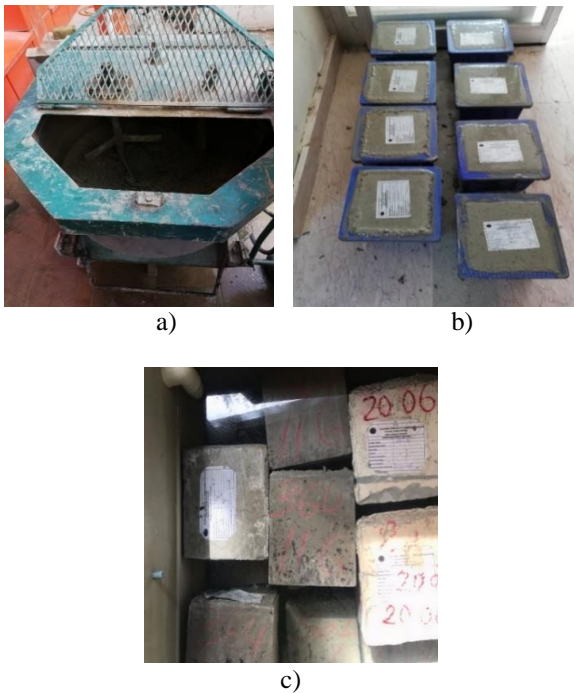
4 different series of lightweight concrete samples (REF; reference sample, 1% FA; 1% fly ash substituted sample, 3% FA; 3% fly ash substituted sample, 5% FA; 5% fly ash substituted sample) were produced in this study. Since the same amount of water is used in all samples in lightweight concrete production, the water / cement ratio has been kept between 0,25-0,35.

In the study, 90% pumice was used in all samples. 10% sand was added to the mixture to increase the strength. The binding mixture was obtained by substituting fly ash at 1%, 3% and 5% of the amount of cement used and these mixtures were used in production (Table 5). The mixtures were prepared according to TS 2511 standard.

**Table 5.** Material ratios used in lightweight concrete production

	Pumice (%)	Sand (%)	Cement (%)	Fly Ash (%)
REF	90	10	100	0
1% FA	90	10	99	1
3% FA	90	10	97	3
5% FA	90	10	95	5

First, the light aggregates were placed in the mixer and the water, amount of which was determined for the pre-satiation process was added to allow the mixed aggregates to absorb the water. Then sand was added and mixed until the mixture becomes homogeneous. The mixing process was continued by adding cement and fly ash in determined ratios to the mixture. Finally, a homogeneous mixture was obtained by adding water determined in the mixture calculation and the mixing process was terminated (Figure 1a). The prepared lightweight concrete mixture was placed in 15x15x15 cm<sup>3</sup> cube moulds (Figure 1b). After 1 day, the lightweight concrete samples were removed from the mould and cured in the curing pool at +20°C temperature for 28 days (Figure 1c). After the curing process was finished, the lightweight concrete samples were subjected to experiments to determine the physical and mechanical properties and SEM images were taken for the examination of their microstructure.



**Figure 1.** a) Preparation of samples, b) Casting of samples, c) Curing of samples

**2.2.2. Experiments Applied to Samples**

To determine the physical differences, dry unit volume weight, capillary water absorption, porosity, compactness and freeze-thaw experiments were conducted. For the determination of mechanical properties, tensile splitting strength and compressive strength tests were applied. SEM images have been interpreted to examine the structural differences occurring within the material.

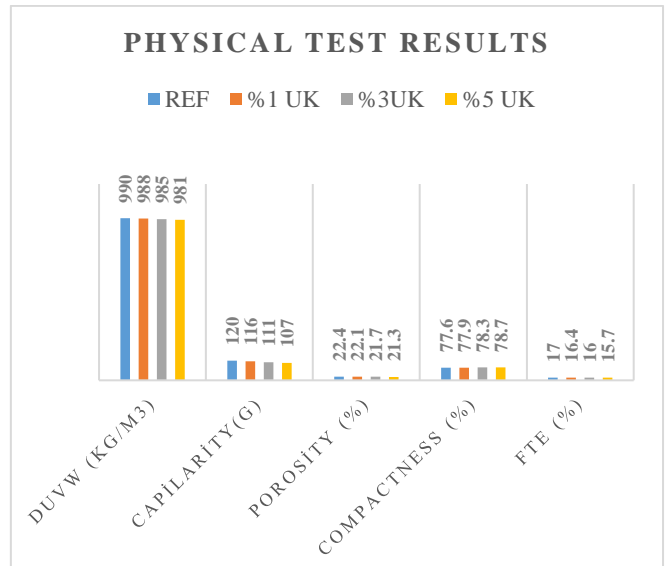
**3. RESULTS**

**3.1. Physical Test Results of Samples**

In Figure 2, dry unit volume weight, capillary water absorption, porosity, compactness and freeze-thaw effect values of lightweight concrete samples are given.

When dry unit volume weight values are examined, it is observed that the reference sample has the highest value with 990 kg/m<sup>3</sup> and 5% FA has the lowest value with 981 kg/m<sup>3</sup>. It has been determined that there is a decrease in DUVW values of the samples produced with the increase of the amount of fly ash. In other words, a lighter concrete material was obtained by using 5% FA.

Capillary water absorption amounts of materials are associated with visible or invisible cavities in their bodies [42]. The more water an object absorbs, the more space it has in its body. When the capillary water absorption values are examined, the reference sample has the highest value with 120 g, while the FA has the lowest value with 107 g of water absorption by 5%. It has been determined that a decrease in capillary water absorption amounts of samples produced with the increase of the amount of fly ash.



\*DUVW: Dry Unit Volume Weight; FTE: Freeze-Thaw Effect

**Figure 2.** Physical test results of lightweight concrete samples

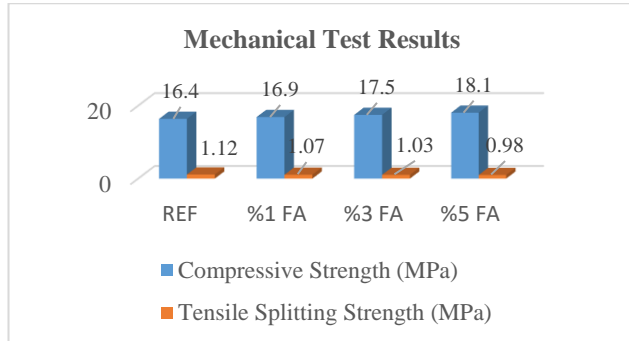
The findings of capillary water absorption are evaluated together with porosity, as is known, the concrete samples with light aggregates have high porosity and high capillary water absorption amounts. Fly ash substitution reduced porosity and capillary water absorption. This reduction means that the lightweight concrete sample receives less water to its body. This will extend the life of lightweight concrete in the long term and will not adversely affect the built-in comfort conditions.

When the porosity values, which mean the amount of space in the inner structure of the material, were examined, it was observed that the reference sample has the highest porosity with 22.4%. The lowest porosity value of 21,3% was obtained from sample produced by FA substitution of 5%. It was determined that there was a decrease in porosity values of the material with the increase of the amount of fly ash.

When the compactness values which are defined as the ratio of the volume of the full part of the material to the entire volume of the material were examined, it was observed that the reference sample has the lowest compactness with 77.6%. The highest compactness value of 77.8% was obtained from sample produced by FA substitution of 5%. It was determined that an increase in the compactness values of the material occurred with the increase in the amount of fly ash. In other words, fly ash filled the gaps in the material structure to produce a material with a high compactness rate. When the freeze-thaw effect values given in the chart were examined, the reference sample has the highest value with 17%, while the FA substitution at 5% has the lowest value with 15.7%. It was determined that the freeze-thaw effect of the samples produced decreased with the increase of the amount of fly ash. When the literature is examined; A decrease on the freeze-thaw effect of fly ash substitution with pumice aggregate lightweight concrete samples was observed [44].

### 3.2. Comparison of Mechanical Test Results of Samples

In Figure 3, compressive strength and tensile splitting strength values of lightweight concrete samples are given.



**Figure 3.** Mechanical test results of lightweight concrete samples

When the Figure 3 was examined, the reference sample has the lowest pressure value with 16.4 MPa, while the lightweight concrete sample produced with 5% FA substitution has the highest compressive strength value with 18.1 MPa. It was determined that the compressive strength of the samples produced was increased with the increase of the amount of fly ash.

The data obtained from the pressure experiment shows that the samples produced using pumice aggregate and 3% and 5% FA have strength values above the determined strength value (17.2 MPa) for structural lightweight concrete in ACI 213R-87. This has shown that lightweight concrete can be produced using the ratios specified in the study.

Although the reference sample and the lightweight concrete sample produced with a FA substitute of 1% cannot be used as a bearing element, it is possible to use as a partial block element.

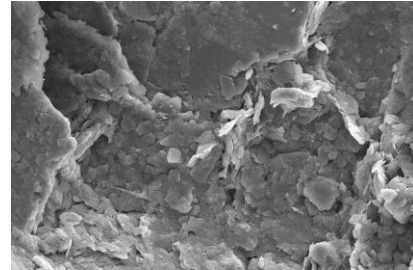
When the tensile splitting strength values were examined, it was seen that the reference sample has the highest value with 1,12 MPa. It was determined in the chart drawn from the data that the lowest value was obtained from lightweight concrete sample produced with a FA substitution of 5%. With the increase in the amount of fly ash, it was observed that there was a decrease in the tensile splitting strength values of the samples.

The results found are consistent with those conducted by [43, 44, 45].

### 3.3. Scanning Electron Microscope (SEM) Images of Samples

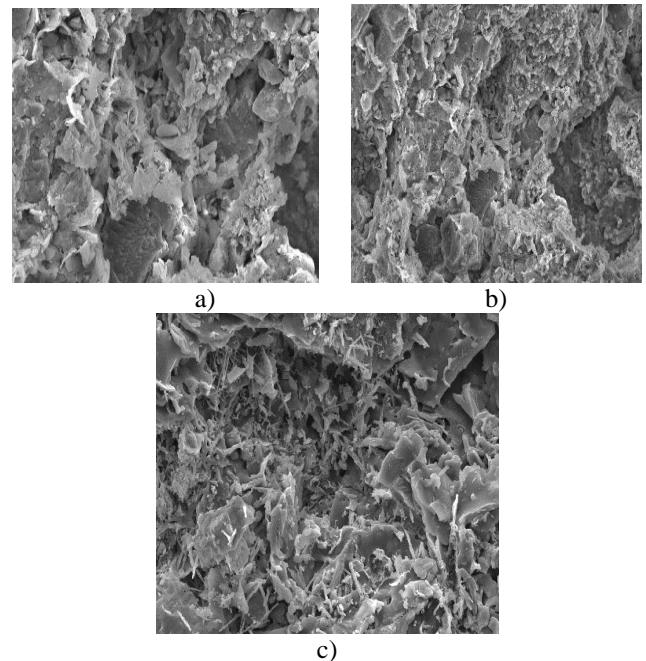
The most important feature desired in the material is that its pored structure is regular and crystalline structure. When the SEM image (It was taken from the cement paste-aggregate interface area) of the reference sample given in Figure 4 is

examined, it is seen that the material has macro pores and an irregular structure. This cellular structure and the resulting irregular macro pored structure cause the compressive strength of the material to be low.



**Figure 4.** SEM image of reference sample

In Figure 5, SEM images of lightweight concrete samples with fly ash substituted are presented. a) 1% fly ash substituted sample, B) 3% fly ash substituted sample, c) 5% fly ash substituted sample.



**Figure 5.** SEM images of lightweight concretes with a) 1% fly ash substitution, b) 3% fly ash substitution, c) 5% fly ash substitution

When the SEM images were examined, it was seen that the lightweight concrete sample with 1% fly ash substitution has smaller and regular pores than the reference sample. It is seen in the 3% fly ash substituted sample that micro pored structure increases and a more regular structure occurs. It is thought that fly ash fills the voids in light concrete, making the structure more regular. In the sample with 5% fly ash substitution, it is observed that the material is a fibrous regular crystal, micro-pored and grain structure. The grains in the crystal structure appear to be in the form of thin layers. At the SEM images, it is observed that as the amount of fly ash increases in lightweight concrete samples, it becomes a

regular and micro-pored structure. This situation provides a positive effect on compressive strength. Furthermore, the material structure has been transformed from macro pore to micro pore by filling the gaps in pumice aggregate with fly ash substitution and by the reactions that took place during production. In addition, the porosity values of the samples were reduced by filling the gaps in the material.

#### 4. CONCLUSION

In the scope of the study, pumice aggregate and fly ash, which is industrial waste, were used as cement substitutes in certain proportions and lightweight concrete samples were produced from the resulting mixture. The experiments and SEM images on the samples are presented below.

- ✓ In the dry unit volume weight experiment, which is one of the physical experiments, a decrease in dry unit volume weight values occurred in parallel with the increased substitution rate with the addition of fly ash.
- ✓ The use of material with low specific gravity such as pumice in the production of lightweight concrete as aggregate will allow the structure's weight to be reduced. This will allow the structure to be subjected to lower levels of earthquake loads.
- ✓ There has been a decrease in the capillary water absorption and porosity values of the lightweight concrete with the increase of fly ash substitution and the best result was obtained from the lightweight concrete sample produced with 5% FA substitution. When the compactness values and looking at the effect on freeze-thaw pressure; It has been observed that these values increase with the increase in the amount of UK.
- ✓ As a result of the experiments performed for the determination of mechanical properties; It was determined that with the increase in the amount of fly ash substitution, compressive strength of lightweight concrete increases, and the tensile splitting strength of it decreases.
- ✓ As a result of the SEM images of the lightweight concrete samples, it was observed that the reference sample has macro pores and an irregular structure irregular structure. With the increase in the amount of fly ash, the internal structure of the material has been transformed into a micro-pored regular crystal structure.
- ✓ 5% of fly ash substituted sample was found to have superior structural character compared to other samples.

According to the findings of the study, it was concluded that fly ash improves the properties of lightweight concrete and there would be no harm in its use if substituted at appropriate rates. The use of fly ash, which is industrial waste, in the production of lightweight concrete, will not only contribute to sustainability but also protect the environment by disposing waste, but also reduce the cost of waste storage.

#### REFERENCES

- [1].M. Gül, "Investigation of the use of waste plastics and pet as a lightweight concrete aggregate", Master's Thesis, Fırat University Institute of Science and Technology, Elazığ, 2018.
- [2].O. Şimşek, Concrete And Concrete Technology, Seçkin Publishing House, Ankara, 230,2007.
- [3].H. Özkul, MA. Taşdemir, M. Tokyay and M. Uyan, Concrete with All Aspects. Turkish Ready Mixed Concrete Association, Istanbul, 2004.
- [4]. B. Baradan and H. Yazıcı, Durability at the reinforced concrete structures and innovations brought by TS EN 206-1 standard, TMH-Engineering News of Turkey, vol. 426, no 4, pp. 62-69, 2003.
- [5]. S. Yazıcıoğlu and N. Bozkurt, "Investigation of mechanical properties of lightweight concrete obtained with the pumice stone". Turkish Pumice Symposium and Exhibition, Denizli, (2005).
- [6].Hakan Yılmaz, "The Effect of Cement Type and Pumice Aggregate on Concrete Characteristics, Master's thesis, Düzce University Institute of Science and Technology, Düzce, 2017.
- [7]. H.Y. Aruntaş, M. Dayı, İ. Tekin, R. Birgül and O. Şimşek, O. "Effect of Waste Marble Powder on Self-Compacting Concrete Properties", 2. Symposium on Chemical Contributions In Structures, Ankara, (2007).
- [8]. K.N. Kumar, D.S. Vijayan, R. Divahar, R. Abirami, C. Nivetha, "An experimental investigation on light-weight concrete blocks using vermiculite". Materials today: Proceedings, vol. 22, no 3, pp. 987-991, 2020.
- [9]. S.P. Sangeetha, R. Divahar, K. Mawlong, B. Lyngkhai, A. Kurkalang, "Mechanical characteristics of pumice stone as light weight aggregate in concrete". International Journal of Sci. and Tech. Res. vol. 9, no 1, pp. 3760-3762, 2020.
- [10]. A. Bala, V.K. Sehgal and B. Saini, "Effect of fly ash and waste rubber on properties of concrete composite", Concrete Research Letters, vol. 5, no 3, pp.842-857, 2014.
- [11]. İ.B. Topçu, Concrete Technology. Uğur Ofset, 570, Ankara, 2006.
- [12]. S.V. Razavi, A.H. Eı-Shafie, P. Mohammadi, Artificial neural networks for mechanical strength prediction of lightweight mortar. Sci. Res. Ess, vol. 6, no 16, pp. 3406–3417, 2011.
- [13]. Ayşe Akkaş, Investigation of The Bearing Properties of Pumice Aggregate Bearing Lightweight Concrete, Ph. D. Thesis, Süleyman Demirel University Institute of Science and Technology, Isparta, 2011.
- [14]. S.N. Karaburc, S.A. Yildizel, G.C. Çalış, "Evaluation of the basalt fiber reinforced pumice lightweight concrete". Maga. of Civ. Eng. vol. 94, no 2, pp. 81–92, 2020.
- [15]. Vural Taşkın, "Investigation of the design and properties of self-compacting lightweight concrete with Bitlis pumice". Master's Thesis, Bitlis Eren University Institute of Science and Technology, Bitlis, 2016.
- [16]. A. Biçer and F. Kar, "The effects of apricot resin addition to the light weight concrete with expanded

- polystyrene". *J. Adh. Sci. Tech.*, vol. 31, no 21, pp. 2335–2348, 2017.
- [17]. A.A. Aliabdo, A.E.M Abd-Elmoaty, H.H. Hassan, "Utilization of crushed clay brick in concrete industry". *Alexandria Eng. J.*, vol. 53, pp. 151-168, 2014.
- [18]. D. Kramar, V. Bindiganavile, "Impact response of lightweight mortars containing expanded perlite". *Cem. Conc. Comp.*, vol. 37, pp. 205-214, 2013.
- [19]. A. Yilmaz and N. Degirmenci, "Possibility of using waste tire rubber and flyash with Portland cement as construction materials", *Waste Manag.*, vol. 29, no 5, pp. 1541-1546, 2009.
- [20]. S. Lee, C.M. Chon, "Glass Content In Coal-Fired Fly Ash For Geopolymer Production". In: *Fly Ash*, Nova Science Publishers, Chapter 4, 2017.
- [21]. Z. Han, "Dissolution Kinetics of Alumina by Leaching Coal Fly Ash with Ammonium Hydrogen Sulfate", Doctoral Thesis, Shenyang: Shenyang University of Technology; 2016.
- [22]. H.S. Arel and F.U.A. Shaikh, "Effects of fly ash fineness, nano silica, and curing types on mechanical and durability properties of fly ash mortars". *Struc. Conc.*, vol. 19, no 2, pp.597–607, 2018.
- [23]. T. Çiçek, Y. Çinçin, "Use of fly ash in production of light-weight building bricks". *Const. and Build. Mat.*, vol. 94, pp. 521-527, 2015.
- [24]. Z. Pavlík, M. Záleská, M. Pavlíková. "Experimental Analysis Of Light-Weight Concrete Incorporating Regranulated Waste Polypropylene", 17 th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, Section Green Buildings Technologies and Materials, (2017).
- [25]. E. Ganjian, M. Khorami and A.A. Maghsoudi, "Scrap-tyre rubber replacement for aggregate and filler in concrete", *Const. and Build. Mate.*, vol. 23, no 5, pp. 1828-1836, 2009.
- [26]. M. Mao, D. Zhang, Q. Yang, and W. Zhang, "Study of durability of concrete with fly ash as fine aggregate under alternative interactions of freeze-thaw and carbonation". *Adv. in Civil Eng.*, vol. 2019, pp. 1-15, 2019.
- [27]. T. Seo, M. Lee, C. Choi and Y. Ohno, "Properties of drying shrinkage cracking of concrete containing fly ash as partial replacement of fine aggregate", *Maga. of Conc. Res.*, vol. 62, no 6, pp. 427-433, 2010.
- [28]. T. Bilir, O. Gencil and I.B. Topcu, "Properties of mortars with fly ash as fine aggregate", *Const. and Build. Mate.*, vol. 93, pp. 782–789, 2015.
- [29]. D. Zhang, P. Han, Q. Yang and M. Mao, "Shrinkage Effects of Using Fly Ash instead of Fine Aggregate in Concrete Mixtures". *Adv. Mat. Sci. and Eng.*, vol. 2020, pp. 11-20, 2020.
- [30]. T. Gönen, S. Yazıcıoğlu, "The Effect of Curing Conditions on Permeation of Self-Compacting Lightweight Concrete with Basaltic Pumice Aggregate". *Arab. J. Sci and Eng.*, vol. 43, no 10, pp. 5157-5164, 2018.
- [31]. TS 3234, Mining, Placing, Curing, Mix Design and Methods of Testing of Pumice Concrete, Turkish Standard Institute, Ankara 1978.
- [32]. N. Bozkurt and V. Taskin, "Design of Self Compacting Lightweight Concrete Using Acidic Pumice with Different Powder Materials". *Acta Phy. Pol. A.* vol. 132, no 2017, pp. 779-782, 2017.
- [33]. T. Kotan and R. Gül, "Effect of atmospheric pressure steam curing to mechanical properties of lightweight concrete produced with Erzurum–Pasinler pumice". *Mach. Technol. Mater. Int. Vir. J.*, vol.4, no 5, pp. 66–69 (2010).
- [34]. Z.F. Türkmenoğlu, A.M. Kılıç, T. Depci, "Determination of mechanical properties of self compacting lightweight concrete manufactured with pumice in Van Region. Çukurova Univ. J. Faculty Eng. Arc., vol. 30, no 105 2015.
- [35]. N. Su, B.A. Miao, "New method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content". *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, no 2, pp. 215–22 (2003)
- [36]. M. Kurt, M.S. Gül, R. Gül, A.C. Aydin, T. Kotan, "The effect of pumice powder on the self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete". *Constr. Build. Mater.*, vol. 103, pp. 36–46, 2016.
- [37]. N.U. Koçkal, T. Özturan, "Durability of lightweight concretes with lightweight fly ash aggregates". *Const. and Build. Mat.*, vol. 25, no 3, pp. 1430-1438, 2011.
- [38]. N.A. Libre, M. Shekarchi, M. Mahoutian, P. Soroushian, "Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice". *Const. and Build. Mat.*, vol. 25, no 5, pp. 2458–2464, 2011.
- [39]. A. Çağlar, H. Çağlar, A. Şahin, S. Çimen, "Comparison of the Physical Properties of Fly Ash Substituted Blend Brick With Standard Brick Properties". *International Symposium on Turkish World Studies, Afyonkarahisar*, 735-745, (2018).
- [40]. TS EN 197-1, (2009). *Cement-Part 1: General Cements-Composition, Properties and Conformity Criteria*. Turkish Standards Institute, Ankara.
- [41]. TS EN 1008, (2003). *Rules for The Determination of The Conformity of Water as Concrete Mixing Water, Including Water Recovered From Concrete Mixing Water, Sampling, Experiments and Processes in The Concrete Industry*, Turkish Standards Institute, Ankara.
- [42]. Aylin Akyıldız, "Investigation of the use of boron wastes as puzzolan material in concrete production". PH. D. Thesis, Namık Kemal University Institute of Science and Technology, Hatay, 2012.
- [43]. S. Yazıcıoğlu, N. Bozkur, "The Investigation Of The Mechanical Properties Of Structural Lightweight Concrete Produced With Pumice And Mineral Admixtures". *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, vol. 21, no 4, pp. 675-680, 2006.
- [44]. H. Temiz, AH. Akçakale, "Investigation of Engineering Properties of Lightweight Aggregate Concrete", *Karaelmas Sci and Eng. J.*, vol. 4, no 2, pp. 7-20, 2014.
- [45]. HY. Aruntaş, "The Potential of Fly Ash Usage in Construction Sector", *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, vol 21, no 1, pp. 193-203, 2006.


## The Effect of Aerophine 3418A Collector Dosage on Niğde (Ulukışla-Madenköy) Complex Pb-Zn Sulphide Ore Flotation

\*<sup>1</sup>Tevfik Agacayak, <sup>2</sup>Nur Benan Yilmaz

<sup>1</sup>Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Mining Engineering, Campus-Konya,

tagacayak@ktun.edu.tr/tevfik@selcuk.edu.tr, 

<sup>2</sup>Gümüştaş Mining and Trade Co., Tepeköy Mineral Processing, Research and Development Laboratory, Ulukışla-Niğde,

nury@gumustasmaden.com.tr, 

Research Paper

Arrival Date: 22.08.2020

Accepted Date: 16.04.2021

### Abstract

In this study, grinding + flotation experiments were performed on the sample of complex Pb-Zn sulphide ore taken from Niğde (Ulukışla-Madenköy) region in Turkey. According to the mineralogical analysis of the ore sample used in experimental studies, it was determined that the ore composition contains calcite, quartz, pyrite, chalcopyrite, hematite, goethite, limonite, gypsum, galena, sphalerite, jarosite, arsenopyrite and marcasite minerals. In addition, Au and Ag grains were found to be inclusions in hematite, goethite and jarosite minerals. The experiments were carried out at a solid ratio of 30%, a flow rate of 10 L/min, a stirring rate of 1250 rpm and pH = 9. In flotation tests, lime is used as the pH regulator, zinc sulphate, sodium silicate as the depressant, sodium isobutyl dithiophosphine as the collector and methyl isobutyl carbinol as the frother. In the flotation studies, the effect of Aerophine 3418A collector dosage on flotation was investigated. As a result, a lead concentrate of 55.13% Pb was obtained and it was found that this concentrate contained 2489 ppm of Ag. The amount of Aerophine 3418A collector was determined as 10 g/t.

**Keywords:** Pb-Zn complex ore, Ulukışla-Madenköy, grinding, flotation, Aerophine 3418A.

### 1. INTRODUCTION

Niğde-Ulukışla zinc-lead deposits are located within a 12 km long and 6 km wide area extending between Horoz Village and Maden Village. The beds are available in three forms as both sulphide and carbonaceous and carstic placer type [1]. Bolkardağ and its region is known to be very important in terms of economics and has been known for many years since gold and silver high-lead-zinc deposits are also known. These mineralizations are generally composed of sulphide minerals (pyrite, pyrrhotite, marcasite, galena, sphalerite, chalcopyrite) and are known to be of hydrothermal origin [2]. Flotation is a physicochemical enrichment method that allows the separation of hydrophobic minerals from hydrophilic grains by utilizing the surface-interface properties of the minerals within the ore [3,4]. Depending on the modified surface properties, the adhesion force between the air bubble and the mineral grain will increase or decrease. As the adhesion strength increases in hydrophobic minerals, adhesion strength will decrease in hydrophilic minerals. Therefore, hydrophobic and hydrophilic properties of minerals are of great importance in order to achieve flotation. Sulphur-containing minerals, oxide-structured minerals and non-metallic minerals are enriched by flotation method. There are three types of flotation process: foam, film and oil

flotation. Foam flotation is the most commonly used method in the mining and metallurgy industry [3-6]. In most of the studies made in the recovery of sulphur minerals, xanthate type collectors, alcohol type foaming agents, as well as various inorganic and organic regulatory reagents are used [3,7-9]. Especially, ZnSO<sub>4</sub> is used for depression of sphalerite in the flotation of Pb-Zn-Cu complex ores. It is known to be used in combination with zinc sulphate cyanide [10,11]. It is used in the suppression of pyrite, sphalerite and galena in the form of sodium sulfide, sodium bi-sulfide, sodium metabisulfite or sulphur dioxide [12-15]. In order to suppress silicates, sodium silicate is usually added. It is known that Aerophine 3418 is P-based sulphurous collector. It was originally developed for flotation of copper minerals and active zinc minerals. As a result, it is stated that flotation of galena and other precious metals (especially silver) is also highly effective [16]. In addition, 3418A collector was used with collector 208 coded collector in jewellery origin slag. It was determined to be effective in gold and silver recovery [17]. In this study, grinding + flotation experiments were performed on the sample of complex Pb-Zn sulphide ore taken from Niğde (Ulukışla-Madenköy) region in Turkey. In the flotation studies, the effect of Aerophine 3418A collector dosage on flotation was investigated. In order to prevent the formation of critical micelle concentration, determining the

\*Corresponding Author: Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Mining Engineering, Campus-Konya, tagacayak@ktun.edu.tr/tevfik@selcuk.edu.tr, 0 332 2232104.



optimum dosage amount of 3418A is the main purpose of the study.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### 2.1. Preparation of ore sample

In this study, sulphur-containing complex ore (SCO) from Niğde (Ulukışla-Madenköy) region was used. The ore sample for use in laboratory scale studies was taken from the stock area in the facility. Firstly, sample ore was passed through jaw crusher and reduced to below 25 mm. Then, in the secondary crushing phase, the ore was crushed by a cone crusher to a size of -6.3 mm. The crushed ore was prepared in 1000 grams packs for use in grinding+flotation studies by homogenizing them by conic- quartering method.

### 2.2. Chemical analysis of ore sample

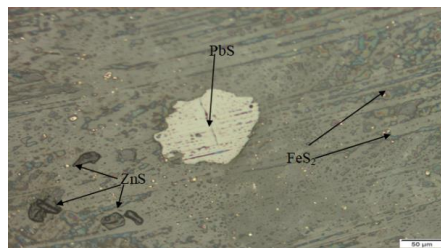
To determine the ore content, representative samples obtained after the conic crusher were milled in the ring grinding at a size of -75 microns. Approximately 2 grams of sample were dissolved in aqua regia (3 volumes of HCl + 1 volume of HNO<sub>3</sub>). Ag, Pb, Zn, Fe, Cu and As elements were analysed by Agilent brand AAS device. Fire-Assay method was applied for Au analysis. Element analysis results were given in Table 1.

**Table 1.** Elemental analysis values of the ore sample.

Element	Content
Au (ppm)	2.58
Ag (ppm)	187
Zn (%)	6.36
Pb (%)	3.20
Fe (%)	14.69
Cu (ppm)	230
As (%)	0.81
S (%)	18.60

### 2.3. Mineralogical analysis of ore sample

According to the mineralogical analysis of this sample, the main minerals are sphalerite (ZnS), galena (PbS), chalcopyrite (CuFeS<sub>2</sub>), arsenopyrite (FeAsS), pyrite (FeS<sub>2</sub>), marcasite (FeS<sub>2</sub>) and iron minerals (hematite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), goethite (FeOOH), limonite (FeO(OH). nH<sub>2</sub>O). The gangues of the ore are composed of gypsum (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), quartz (SiO<sub>2</sub>), calcite (CaCO<sub>3</sub>) and clay type minerals. It has been determined that there are pyrite-marcasite, galena and sphalerite minerals in polished section (Fig. 1). However, the ore sample contains mainly natural gold, natural silver and electrum. Gold and silver are present in the form of inclusions in the iron and clay minerals.



**Figure 1.** Slim and polished section view of the ore sample.

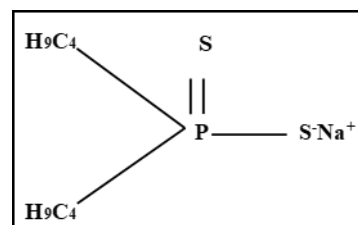
### 2.4. Experimental procedure

The ore was reduced a size of 6.3 mm after two crushing stages. It is packaged with homogeneity for use in grinding and flotation experiments. This ore sample was milled at a mill size Ø180x362 mm with an internal volume of 9 L. It was ground (d<sub>80</sub>=75 µm) and fed to the flotation cell (Fig. 2).



**Figure 2.** The flotation device used in the experiments.

Flotation experiments were carried out using a Denver type flotation device with a constant solid ratio of 30%, a flow rate of 10 L/min, a stirring speed of 1250 rpm and pH = 9. Lime (pH adjuster), zinc sulphate, sodium silicate (quencher), sodium isobutyl dithiophosphine (collector) and methyl isobutyl carbinol (foaming agent) were used in flotation tests. The chemical structure of Aerophine 3418A (sodium isobutyl dithiophosphine) given in Figure 3 is known as the P-based sulphurous mineral collector produced by Cytech [18].



**Figure 3.** Chemical structure of Aerophine 3418A.

It is stated that flotation of galena and other precious metals (especially silver) is highly effective in this collector [16]. It provides a great selectivity against pyrite, arsenopyrite and suppressed sphalerite minerals in complex ores. Because of this feature, it is known that Aerophine 3418A is used instead of xanthates in many plants [19].

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The effect of Aerophine 3418A (sodium isobutyl dithiophosphine) collector dosage was investigated in grinding + flotation studies. Test conditions are summarized in Table 2.

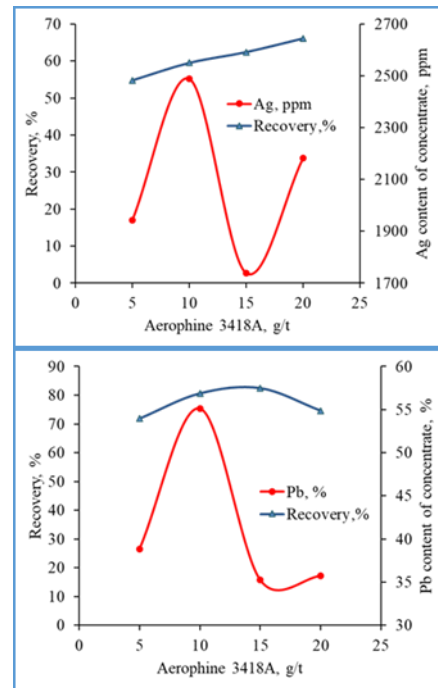
**Table 2.** Experimental conditions and reagents for grinding and flotation conditions.

Stage	Time (min)	Reagent quantities (g/t)			
		ZnSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Aerophine 3418 A	MIBC
Grinding	8	1000	500		
Flotation					
Conditioning 1	3	1000	500	5, 10, 15, 20	
Conditioning 2	2				20
Conditioning 3	1				
Foaming	4				

According to the best results obtained by Yılmaz, 2019 [20] constant conditions were determined. Experiments were carried out using these conditions given in Table 2. The test results were given in Table 3. According to Table 3, the amount of Ag and Pb in the concentrate appears to be very high. Ag and Pb values and recoveries of the concentrate were shown in Fig. 4.

As can be seen from Table 3, it was observed that the contents of Ag and Pb in the concentrate increase. The reason for this is the increased selectivity of both sphalerite and

pyrite [21]. Ceylan and Bulut, (2016) [19] performed flotation experiments on a representative copper sample from Siirt-Madenköy. It was determined that the most suitable collector for the purpose was Aerophine 3418A with the amount of 50 g/t. In a different study, chalcopyrite, galena and sphalerite were selectively recovered in three rougher flotation cells using the Aero 3894 and 3418A collectors [22].



**Figure 4.** Ag and Pb content and recoveries of concentrate depending on the amount of Aerophine 3418A.

**Table 3.** Results of experiments with Aerophine 3418

Amount of collector (g/t)	Products	Amount (%)	Au		Ag		Zn		Pb		Fe		Cu	
			Content (ppm)	Rec. (%)	Content (ppm)	Rec. (%)	Content (%)	Rec. (%)	Content (%)	Rec. (%)	Content (%)	Rec. (%)	Content (ppm)	Rec. (%)
5	Concentrate	6.34	3.78	11.99	<b>1943</b>	<b>54.81</b>	4.97	5.17	<b>38.85</b>	<b>71.87</b>	6.31	3.12	442	9.91
	Tailing	93.66	1.88	88.01	109	45.19	6.18	94.83	1.03	28.13	13.29	96.88	272	90.09
	Feed	100	2.00	100	225	100	6.10	100	3.43	100	12.85	100	283	100
10	Concentrate	5.29	4.79	11.70	<b>2489</b>	<b>59.52</b>	5.29	4.70	<b>55.13</b>	<b>80.63</b>	7.3	3.10	426	8.89
	Tailing	94.71	2.02	88.30	95	40.48	5.99	95.30	0.74	19.37	12.73	96.90	244	91.11
	Feed	100	2.17	100	221	100	5.95	100	3.62	100	12.44	100	254	100
15	Concentrate	8.20	3.56	13.43	<b>1739</b>	<b>62.40</b>	5.23	7.58	<b>35.25</b>	<b>82.46</b>	9.66	6.43	400	12.08
	Tailing	91.80	2.05	86.57	94	37.60	5.70	92.42	0.67	17.54	12.55	93.57	260	87.92
	Feed	100	2.17	100	229	100	5.66	100	3.51	100	12.31	100	271	100
20	Concentrate	7.47	3.29	11.47	<b>2182</b>	<b>66.13</b>	4.62	6.12	<b>35.72</b>	<b>74.63</b>	8.11	5.07	352	9.85
	Tailing	92.53	2.05	88.53	90	33.87	5.72	93.88	0.98	25.37	12.25	94.93	260	90.15
	Feed	100	2.14	100	246	100	5.64	100	3.57	100	11.94	100	267	100

As a result of studies carried out by Zhong et al. (2015) [23], Aerophine 3418A was demonstrated more efficient aggregation ability and better selectivity for copper sulfide

and lead-zinc sulphide ores. As shown in Fig. 4, as a result of single-stage flotation experiments, Ag content of concentrate was obtained as 2489 ppm with a recovery of

60% and Pb content of concentrate was obtained as 55.13% with recovery of 80.63%. According to these results, the amount of Aerophine 3418A collector was determined as 10 g/t. Acarkan et al. (2011) [16] stated in their study that Aerophine 3418A and Aero 208 combination was more effective than oxidized lead minerals in flotation of Au and Ag. Using this combination, they performed 7-stage flotation experiments and obtained a concentrate containing 920 ppm Au, 10100 ppm Ag and 11.38% Pb. In another study using Aerophine 3418A and Aero 208 combination, it was stated that 85.9% Au and 91.6% Ag recoveries were reached and using the same amount of ATP + KAX combination, a concentrate with higher content of Au and Ag was obtained with lower recoveries [24].

The following flow diagram has been proposed for further studies (Fig. 5).

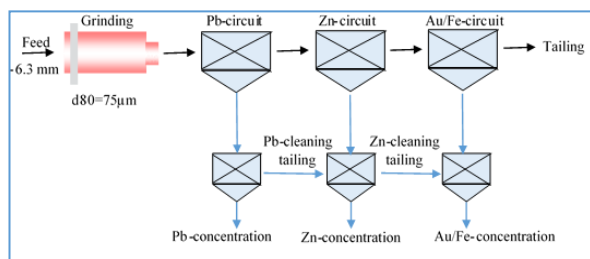


Figure 5. Recommended flow diagram for further stages.

#### 4. CONCLUSIONS

In this study, the samples were obtained from Niğde (Ulukışla-Madenköy) region. As a result of chemical and mineralogical investigations, the ore was found to have Pb-Zn complex form with sulfur content. It was determined that the ore contains calcite, quartz, pyrite, chalcopyrite, hematite, goethite, limonite, gypsum, galena, sphalerite, arsenopyrite, marcasite and clay type minerals. The ore used in the experiments was found as 3.20 % Pb, 6.36% Zn, 14.69 % Fe, 0.81 % As, 16.60 % S, 2.58 ppm Au, 187 ppm Ag and 230 ppm Cu. Grinding and flotation experiments were performed using different reagents for this ore. In flotation studies, the effect of different amounts of Aerophine 3418A on the experimental results was investigated. As a result, a concentrate of 55.13% Pb was obtained and it was found that this concentrate contained 2489 ppm of Ag. The amount of Aerophine 3418A collector was determined as 10 g/t. Zinc, iron, copper minerals and gold remained in the tailing. In particular, the zinc flotation circuit and pyrite flotation cleaning cycle can be used to obtain gold and zinc in the tailing. It may be advisable to use copper sulfate to float the zinc contained in the tailing. In particular, to obtain gold concentrate, xantates, Aerophine 3418A, F2216 and their blends may be preferred as collectors.

#### Acknowledgements

The authors would like to thank Konya Technical University and the reviewers because of their contributions.

#### REFERENCES

- [1] S. Temur, "Bolkardağı yöresi (Ulukışla/Niğde) çinko-kurşun yataklarının jeokimyasal incelemesi". Türkiye Jeoloji Bülteni, Sayı: 35, s: 101–114, 1990.
- [2] N. Şişman, M.H. Şenocak, S. Dilek, M. Yazgaç, "Bolkardağ yöresinin jeolojisi ve maden yatakları", MTA Genel Müdürlüğü, Rapor No: 7202, Ankara, (1981).
- [3] S. Atak, Flotasyon ilkeleri ve uygulaması, İstanbul, 1990.
- [4] A. M. Gaudin, Flotation, McGraw Hill, New York, 1957.
- [5] J. S. Laskowski, Frothing in Flotation II, G&B Science, 1998.
- [6] B.K. Parekh, J. D. Miller, Advances in flotation technology, Soc. for Mining Metallurgy, New York, 1999.
- [7] L. Leja, Surface Chemistry of Froth Flotation. New York, 1982.
- [8] N. Arbuter, SME Mineral Processing Handbook, Volume I, New York, 1985.
- [9] B.A. Wills, Mineral Processing Technology. Fourth Edition, 1988.
- [10] M. Cao, Q. Liu, "Re-examining the functions of zinc sulphate as a selective depressant in differential sulphide flotation the role of coagulation", Journal of Colloid and Interface Science, vol. 301, pp. 523–531, 2006.
- [11] S.M. Bulatovic, Handbook of flotation reagents, chemistry, theory and practice, flotation of sulfide ores, Elsevier, Amsterdam, 2007.
- [12] S.R. Grano, M. Sollaart, W. Skinner, C.A. Prestidge, J. Ralston, "Surface modifications in the chalcopyrite-sulphite ion system. I. collectorless flotation, XPS and dissolution study" International Journal of Mineral Processing, vol. 50(2), pp. 1-26, 1997.
- [13] S.R. Grano, N.W. Johnson, J. Ralston, "Control of the solution interaction of meta bisulphite and ethyl xanthate in the flotation of the Hilton ore of Mount Isa Mines Limited, Australia", Miner. Eng., vol. 10 (1), pp. 17, 1997a.
- [14] S.R. Grano, C.A. Prestidge, J. Ralston, "Solution interaction of ethyl xanthate and sulphite and its effect on galena flotation and xanthate adsorption", Int. J. of Miner. Process. Vol. 52, pp. 161-186, 1997b.
- [15] T.N. Khmeleva, J.K. Chapelet, W.M. Skinner, D.A. Beattie, "Depression mechanisms of sodium bisulphite in the xanthate-induced flotation of copper activated sphalerite", International Journal of Mineral Processing, Vol.79, pp. 61-75, 2006.
- [16] N. Acarkan, G. Bulut, A. Gül, O. Kangal, F. Karakaş, O. Kökkılıç, G. Önal, "The effect of collector's type on gold and silver flotation in a complex ore", Sep. Sci. Technol. Vol. 46, pp. 283–289, 2011.
- [17] C. Durmaz, "Kuyumculuk kökenli curüflardan fiziksel zenginleştirme yöntemleri ile altının geri kazanımı", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2012.
- [18] Cytec Mining Chemical Handbook, 2002.
- [19] A. Ceylan, B. Bulut, "Siirt-Madenköy bakır cevherinin flotasyon yöntemiyle zenginleştirilmesi", Madencilik, sayı. 55 (1), s. 17-26, 2016.
- [20] B. B. Yılmaz, "Niğde (Ulukışla-Madenköy) Bolkardağı sülfürlü kurşun-çinko kompleks cevherinin optimum

flotasyon şartlarının belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 2019.

[21] P. Mingione, “Use of AEROPHINE® 3418A promoter for sulphide minerals flotation” in The 120th Annual Meeting of SME/AIME and 75th Annual Meeting of WAAIME, Feb. 25–28, Denver, Colorado, p.54 1991.

[22] D.M. Veneu, T.F.M. Brasil, G.G. DeOliveira Junior, W. Phillips, R.B. Gomides, C. L. Schneider, M.B. DeMello Monte, “Recovery of sulphides as by products from a gold flotation circuit”, in 67th abm International Congress, pp.


1211-1220, 2012.

[23] H. Zhong, Z. Huang, G. Zhao, S. Wang, G. Liu, Z. Cao, “The collecting performance and interaction mechanism of sodium diisobutyl dithiophosphate in sulfide minerals flotation”, J. Mater. Res. Technol. Vol. 4(2), pp. 151–161, 2015.

[24] Ş. B. Aydın, D. Aydın, A. Gül, “Refrakter Olmayan Sülfürlü Altın–Gümüş Cevherinin Flotasyon Davranışının İncelenmesi” NOHU J. Eng. Sci., Vol. 9(2), pp. 1039-1053, 2020.

## Lorenz Kaotik Sisteminin Doğrusal Geri Beslemeli, Yüksek Kazanç, Yüksek Frekans ve Model Öngörülü Kontrol ile Denetlenmesi


\*<sup>1</sup>Murat Erhan Çimen, <sup>2</sup>Muhammed Ali Pala, <sup>3</sup>Ömer Faruk Boyraz, <sup>4</sup>Zeynep Garip, <sup>5</sup>Akif Akgül, <sup>6</sup>Mustafa Zahid Yıldız, <sup>7</sup>Ali Fuat Boz,

<sup>1\*</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik ve Elekt. Müh. Bölümü, Sakarya, Türkiye, [muratcimen@subu.edu.tr](mailto:muratcimen@subu.edu.tr), 


<sup>2</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik ve Elekt. Müh. Bölümü, Sakarya, Türkiye, [pala@subu.edu.tr](mailto:pala@subu.edu.tr), 

<sup>3</sup>Anadolu Isuzu Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Kocaeli, Türkiye, [omer.boyraz@isuzu.edu.tr](mailto:omer.boyraz@isuzu.edu.tr), 

<sup>4</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Bilgisayar Müh. Bölümü, Sakarya, Türkiye, [zbatik@subu.edu.tr](mailto:zbatik@subu.edu.tr), 

<sup>5</sup>Hitit Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Çorum, Türkiye, [akifakgul@hitit.edu.tr](mailto:akifakgul@hitit.edu.tr), 

<sup>6</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik ve Elekt. Müh. Bölümü, Sakarya, Türkiye, [mustafayildiz@subu.edu.tr](mailto:mustafayildiz@subu.edu.tr), 

<sup>7</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik ve Elekt. Müh. Bölümü, Sakarya, Türkiye, [afboz@subu.edu.tr](mailto:afboz@subu.edu.tr), 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 05.10.2020

Kabul Tarihi: 14.03.2021

### Öz

Günümüze kadar gelişen ve geliştirilmeye devam edilen, doğrusal veya doğrusal olmayan, zamanla değişen veya zamanla değişmeyen sistemler için birçok kontrol yöntemleri bulunmaktadır. Bu çalışmada doğrusal olmayan Lorenz Kaotik sisteminin kontrolünde daha önceden bu sisteme uygulanmamış olan integratör içeren model öngörülü kontrol yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemin yanı sıra aynı sisteme farklı doğrusal olmayan kontrol yöntemleri de uygulanarak Lorenz Kaotik sisteminin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Seçilen kontrol yöntemlerinde geri beslemeli kontrol, yüksek kazanç kontrol, yüksek frekans kontrol ve model öngörülü kontrol teknikleri kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan yöntemler matematiksel olarak elde edilmiş, avantaj ve dezavantajlarını ortaya konulmuştur. Ayrıca literatürde Lorenz sistemi için üretilmiş olan kontrol kuralları kullanılarak performans açısından karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonuçta doğrusal olmayan bu tip kontrol yöntemlerinin Lorenz kaotik sisteminin kontrol edebildiği gösterilmiştir. Ardından avantaj ve dezavantajları sonuçlar bölümünde tartışılmış ve ileriye yönelik çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kaotik sistem, geri beslemeli kontrol, yüksek kazanç kontrolü, yüksek frekans kontrolü, model öngörülü kontrol

## Control of Lorenz Chaotic System with Linear Feedback, High Gain, High Frequency and Model Predictive Control

\*<sup>1</sup>Murat Erhan Çimen, <sup>2</sup>Muhammed Ali Pala, <sup>3</sup>Ömer Faruk Boyraz, <sup>4</sup>Zeynep Garip, <sup>5</sup>Akif Akgül, <sup>6</sup>Mustafa Zahid Yıldız, <sup>7</sup>Ali Fuat Boz,

<sup>1\*</sup>Sakarya University of Applied Sciences, Electrical and Electronic Eng. Dept., Sakarya Turkey, [muratcimen@subu.edu.tr](mailto:muratcimen@subu.edu.tr),

<sup>2</sup>Sakarya University of Applied Sciences, Electrical and Electronic Eng. Dept., Sakarya Turkey, [pala@subu.edu.tr](mailto:pala@subu.edu.tr)

<sup>3</sup>Anadolu Isuzu Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş., R&D Merkezi, Kocaeli, Türkiye, [omer.boyraz@isuzu.edu.tr](mailto:omer.boyraz@isuzu.edu.tr)

<sup>4</sup>Sakarya University of Applied Sciences, Computer Eng. Dept., Sakarya Turkey, [zbatik@subu.edu.tr](mailto:zbatik@subu.edu.tr)

<sup>5</sup>Hitit University, Computer Eng. Dept., Çorum, Turkey, [akifakgul@hitit.edu.tr](mailto:akifakgul@hitit.edu.tr)

<sup>6</sup>Sakarya University of Applied Sciences, Electrical and Electronic Eng. Dept., Sakarya Turkey, [mustafayildiz@subu.edu.tr](mailto:mustafayildiz@subu.edu.tr)

<sup>7</sup>Sakarya University of Applied Sciences, Electrical and Electronic Eng. Dept., Sakarya Turkey, [afboz@subu.edu.tr](mailto:afboz@subu.edu.tr)

### Abstract

There are many control methods for systems that have been developed and continued to be developed, linear or non-linear, time-varying or invariant. In this study, in the control of the nonlinear Lorenz Chaotic system, model predictive control method with integrator action, which has not been applied to this system before, is applied. In addition to this method, different nonlinear

\*Sorumlu Yazar: Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Müh. Bölümü, Sakarya Türkiye, [muratcimen@subu.edu.tr](mailto:muratcimen@subu.edu.tr), +90 264 616 0946

Doi: 10.21541/apjes.805998

control methods were applied to the same system and the control of the Lorenz Chaotic system was realized. Feedback control, high gain control, high frequency control and model predictive control techniques are used in the selected control methods. In addition, the methods used were obtained mathematically and their advantages and disadvantages were revealed. In addition, the control laws produced for the Lorenz system in the literature were used and comparisons were made in terms of performance. As a result, it has been shown that this type of nonlinear control methods can control the Lorenz chaotic system, and then the advantages and disadvantages are discussed in the results section and information about future studies is given.

**Keywords:** Chaotic system, feedback control, high gain control, high frequency control, model predictive control

## 1. GİRİŞ

Kaos doğada birçok yerde karşılaşıldığı için direk olarak birçok mühendislik uygulamasında da görülmektedir. Kaotik bir sistemin temel bir özelliği, başlangıç koşullarına aşırı duyarlılığıdır; yani, başlangıç durumundaki küçük farklılıklar sistem durumunda olağanüstü farklılıklara yol açabilir. Kaotik sistemler; meteoroloji [1, 2], tıp [3, 4] çevre [2, 5], sanat [6, 7], kriptoloji [8, 9, 10], haberleşme [11, 12], görüntü işleme [13], sinyal işleme [14, 15], yapay sinir ağları [15, 16] ve kontrol [17-26] alanlarında birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. Gerçek hayatta ise direk olarak karşılaşılan uygulamalara örnek olarak hava olaylarının tahmini, epilepsi hastalığının teşhisi, kanser hücrelerinin veya dokularının kaotik davranışlarının incelenmesi, müzik notlarının veya senfonilerin üretilmesi, verilerin şifrelenmesi ve tekrar çözülmesi, kaotik karıştırıcı uygulamaları, motorların kaotik hızlarının senkronizasyonlarında, kaotik davranış sergileyen elektrik makinelerinde vb. örnek olarak verilebilir. Kaotik olaylar kullanım alanına göre istenilen çıktılar üretmekte fakat bazı uygulamalarda bu çıktılar istenmemektedir. Kontrol açısından incelendiğinde ise kaotik davranışlar genellikle bastırılmak istenmektedir veya takip edilmek istenmektedir.

Literatürde kaos kontrolü, 1990'lı yılların başından beri geniş bir ilgi alanına sahiptir ve literatürde en popüler vakalardan birisi Lorenz kaotik sisteminin kontrol edilmesidir. Bu amaçla 1990 yılında Ott ve ark. kaotik bir çekicinin, mevcut bir sistem parametresinin sadece küçük zamana bağlı bozulmaları yaparak, çok sayıda olası zaman periyodik hareketinden herhangi birine dönüştürülebileceğini göstermiştir [18]. Vincent ve ark. Lorenz kaotik sistemi için bir strateji olarak doğrusal geri beslemeli kontrolü önermişlerdir. Bu tasarımda kararsız Tasarım geri besleme kontrolörü sistemi kontrolsüz olan Lorenz sisteminin denge noktalarından birine taşınmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [19]. Yeap ve Ahmed, Lorenz sisteminin kontrol etmek için çok katmanlı ileri beslemeli bir sinir ağı kullanarak geri besleme kontrolünü gerçekleştirmişlerdir [22]. Zeng ve Singh, Lorenz sisteminin durum uzayında belirli bir noktaya getirilebilmesi için adaptif kontrol kuralı elde ederek sistemi kontrol etmişlerdir [23]. Yang, Lorenz sisteminin kontrolü için sliding mode kontrolü önermişlerdir [28]. Yine Alzate ve ark. Lorenz sisteminin kontrolünü sliding mode kullanarak gerçekleştirmişlerdir [29]. Yau ve ark. ise Lorenz sisteminin kontrolü için yine doğrusal olmayan bir yöntem olan sliding mode kontrol ile doğrusal olmayan kontrol işareti üretmişler ve lorenz sisteminin denetlenmişlerdir [30]. Chen ve ark.

Lorenz sisteminin denetlenebilmesi için teorik ve numerik olarak backstepping denetleyici tasarlamıştır [31]. Yassen ve ark. ise backstepping yöntemini kullanarak kaotik dinamik sistemlerin kontrol edilebileceğini göstermişlerdir. Ardından bu tekniği, Lorenz, Chen ve Lü kaotik sistemlerinin kontrolünü gerçekleştirmişlerdir [32]. Run-Zi ise kaotik bir sistemin stabilasyonu ve senkronizasyonu için impulsive yöntemini kullanmıştır [33]. Tan ve diğerleri ise kaotik sistemlerin senkronizasyonu için backstepping yöntemini gerçekleştirmişlerdir [34]. Köse ise adaptif kutup yerleştirme ve Sliding mod kullanarak Lorenz sisteminin denetlenmesini karşılaştırmıştır [35]. Pham ve ark. ise 3D Fractional kaotik bir sistemi ele almışlar. Bu sistemin denge noktası olmamasına rağmen aktif kontrol ile kontrolünü gerçekleştirmişler. Ayrıca bu sistemin devre uygulamasını da gerçekleştirmişler [36]. Longge ise ayrıık olan kaotik bir sistemin model öngörülü kontrol senkronizasyonunun gerçekleştirmişlerdir [37]. Park vd yaptığı çalışmada yine ayrıık olan kaotik bir sistemin MPC ile kontrolü için genelleştirilmiş model öngörülü kontrolü kullanmışlardır [38]. Mohammadbagheri vd ise Lorenz tipinde bir kaotik sistemin kontrolü için model öngörülü kontrol yöntemini kullanmışlar [20]. Tabatabaei vd ise kaotik hibrit bir sistemin kontrolünü explicit model öngörülü kontrol ile gerçekleştirmişlerdir [39].

Bu çalışmada literatürde doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde kullanılan 4 farklı yöntem ile Lorenz Kaotik sistemi kontrol edilmiştir. Bu çalışmanın özgünlüğüne bakıldığında Lorenz Kaotik sistemi daha önceden integratör içeren model öngörü kontrol yöntemi kontrol edilmiştir. Ayrıca bu yöntemin yanı sıra Lorenz Kaotik sisteminin [0, 0, 0] denge noktasına gelmesi için geri beslemeli kontrol, yüksek kazanç kontrolü, yüksek frekans kontrolü ve integratör içeren model öngörülü kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan her bir denetleyicinin matematiksel ifadeleri üretilmiş ve Matlab R2018A üzerinde simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Sonuçta ise kullanılan kontrol yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır.

## 2. METOTLAR

### 2.1. Geri Beslemeli Kontrol

Geri beslemeli doğrusallaştırma genel olarak doğrusal olmayan sistemlerin bir denge noktası etrafında doğrusallaştırılması ve ardından da kapalı çevrim kararlılığını sağlayacak kontrol kuralının belirlenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Burada yapılacak sistemin denge

noktasında etrafında doğrusallaştırılmasından ziyade sistemi doğrusal bir sistem haline getirecek olan terimlerin kontrol işaretine ilave edilmesidir. Bu sayede sistem doğrusal bir sistem haline getirilecektir. Ardından kapalı çevrim kararlılığı sağlayan kontrol işareti belirlenecektir. Bunun için ilk olarak kontrol edilmek istenen sisteme  $u_1$ ,  $u_2$  ve  $u_3$  kontrol işaretlerinin ilavesi yapılacaktır. Bu Lorenz sisteminin kontrol işaretlerinin eklenmiş hali Eşitlik (1)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \sigma(x_2 - x_1) + u_1 \\ \dot{x}_2 &= -x_1x_3 + rx_1 - x_2 + u_2 \\ \dot{x}_3 &= x_1x_2 - bx_3 + u_3\end{aligned}\quad (1)$$

Bu sistem Eşitlik (2)'deki doğrusal forma getirilecektir. Bu sistem Eşitlik (2)'deki doğrusal forma getirilecektir.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2)$$

Doğrusal olmayan sistemin yapısı Eşitlik (3)'te verilmiştir. Doğrusal ve zamanla değişmeyen A matrisi sistem matrisi ve B kontrol ise matrisidir. Eşitlikte bulunan a(x) sistemin içinde bulunan doğrusal olmayan terimleri ifade etmektedir. Bu terimler Eşitlik (4)'de kontrol işaretine ilave edilerek sistemde bulunan doğrusal olmayan terimler yok edilir. Ardından burada v kontrol işareti dizayn edilir.

$$\dot{x} = Ax + B\gamma(x)[u - a(x)] \quad (3)$$

$$u = a(x) + \gamma(x)^{-1}v \quad (4)$$

Bu yöntem Lorenz sistemi için genelleştirildiğinde ise kontrol işaretleri Eşitlik (5), Eşitlik (6) ve Eşitlik (7) de gösterildiği gibi elde edilir.

$$u_1 = rx_1 + v_1 \quad (5)$$

$$u_2 = +x_1x_3 - rx_1 + x_2 + x_3 + v_2 \quad (6)$$

$$u_3 = -x_1x_2 + bx_3 + v_3 \quad (7)$$

Üretilen kontrol işaretleri ile kapalı çevrim sistemin durum denklemleri Eşitlik (8)'deki gibi olur.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \sigma x_2 + v_1 \\ \dot{x}_2 &= x_3 + v_2 \\ \dot{x}_3 &= -v_3\end{aligned}\quad (8)$$

Tasarımda sistem kısmen faz kanonik formuna dönüştürülecektir. Bu nedenle kontrol işaretlerinden  $v_1$ ,  $v_2$  ve  $v_3$  Eşitlik (9)'daki gibi tasarlanmıştır. Sistemin olmasını istenen özdeğerlerine yani  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  'lar belirlendikten sonra Eşitlik (9)'da bulunan  $k_1, k_2, k_3$  belirlenecektir. Bu parametreler belirlendikten sonra kontrol işaretleri  $u_1, u_2$  ve  $u_3$  içinde bulunan  $v_1, v_2$  ve  $v_3$  işaretleri belirlenmiş olmaktadır.

$$\begin{aligned}v_1 &= 0 \\ v_2 &= 0 \\ v_3 &= k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_3\end{aligned}\quad (9)$$

Belirlenen kontrol işareti sisteme uygulandığında ise kapalı çevrim sistem matrisi Eşitlik (10)'da verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sigma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -k_1 & -k_2 & -k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

## 2.2. Yüksek Kazanç Kontrolü

Yüksek kazanç kontrolü Lyapunov kararlılık kriterine dayanan bir denetleyici türüdür. Eşitlik (11)'de verilen doğrusal olmayan sistemin doğrusal ve doğrusal olmayan kısımları birbirlerinden ayrıştırılır. Doğrusal ve zamanla değişmeyen A matrisi sistem matrisi ve B kontrol ise matrisidir. Doğrusal olmayan a(x) ise sistemin içinde bulunan doğrusal olmayan kısımları ifade etmektedir. Sisteme uygulanacak olan kontrol işareti Eşitlik (12)'de verilmiştir.

$$\dot{x} = Ax + B\gamma(x)[u - a(x)] \quad (11)$$

$$u = -kx + V_R \quad (12)$$

Eşitlik (12)'de sisteme uygulanacak olan kontrol işaretindeki  $V_R$  parametresinin ne olması gerektiği seçilmektedir. Bunun seçimi ise Lyapunov enerji fonksiyonuna göre yapılmaktadır. Sistemin kontrolü için oluşturulan Lyapunov enerji fonksiyonu Eşitlik (13)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}V &= \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}x_2^2 + \frac{1}{2}x_3^2 = x^T Px = \\ &= [x_1 \quad x_2 \quad x_3] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (13)$$

Lyapunov Kararlılığının 2. Kriterini sağlaması için Eşitlik (13)'deki fonksiyonun içindeki P matrisi pozitif tanımlı olacak şekilde seçilmiştir. Burada seçilen katsayılar enerji fonksiyonunun sürekli  $V > 0$  yapmaktadır. Diğer bir önemli kriter ise sistemin asimtotik kararlılığı için bu fonksiyonun türevinin sıfırdan küçük olmasıdır. Sıfıra eşit olduğunda ise sadece sistem kararlıdır denilebilmektedir. Aksi halde türevi sıfırdan büyük olduğunda enerjisi artan ve kontrol edilemeyen bir sistem gibi düşünülebilir. Bu fonksiyonun türevi Eşitlik (14)'te verilmiştir.

$$\dot{V} = x_1 \dot{x}_1 + x_2 \dot{x}_2 + x_3 \dot{x}_3 \quad (14)$$

Eşitlik (14)'te sistemin durumları yerlerine yazılınca Eşitlik (15) elde edilir.

$$\begin{aligned}\dot{V} &= x_1[\sigma(x_2 - x_1) - k_{11}x_2 + V_{R1}] \\ &+ x_2[-x_1x_3 + rx_1 - x_2 - k_{21}x_3 + V_{R2}] \\ &+ x_3[x_1x_2 - bx_3 - k_{31}x_1 - k_{32}x_2 - k_{33}x_3 + V_{R3}]\end{aligned}\quad (15)$$

Eşitlik (15) düzenlendiğinde ise Eşitlik (16) elde edilir.

$$\begin{aligned}\dot{V} &= (2\sigma - k_{11})x_1x_2 + x_1V_{R1} - (k_{21} - k_{32})x_2x_3 \\ &+ x_2V_{R2} - k_{31}x_1x_3 + x_3V_{R3}\end{aligned}\quad (16)$$

Eşitlik (16)'daki fonksiyonun  $\dot{V} \leq 0$  olması için parametreler Eşitlik (17)'deki gibi düzenlenmiştir.

$$\begin{aligned} (2\sigma - k_{11}) = 0 &\rightarrow k_{11} = 2\sigma \\ (k_{21} - k_{32}) = 0 &\rightarrow k_{21} = k_{32} \\ k_{31} &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

Bu durumda sistemin parametreleri Eşitlik (18)'de yerlerine yazılarak  $\dot{V}$  elde edilir.

$$\dot{V} = x_1 V_{R1} + x_2 V_{R2} + x_3 V_{R3} \quad (18)$$

Bu fonksiyonun  $\dot{V} \leq 0$  sağlaması için  $V_{R1}$ ,  $V_{R2}$  ve  $V_{R3}$  Eşitlik (19)'daki gibi seçilmiştir.

$$\begin{aligned} V_{R1} &= -x_1 \\ V_{R2} &= -x_2 \\ V_{R3} &= -x_3 \end{aligned} \quad (19)$$

### 2.3. Yüksek Frekans Kontrolü

Yüksek frekans kontrol belirli bir duruma göre çok yüksek frekanslarda kontrol işaretini değiştirerek exponansiyel kararlılığı sağlayan ve Lyapunov kararlılık kriterine dayanan bir denetleyici türüdür. Eşitlik (20)'de verilen doğrusal olmayan sistemin doğrusal ve doğrusal olmayan kısımları birbirlerinden ayrıştırılır. Doğrusal ve zamanla değişmeyen A matrisi sistem matrisi ve B kontrol ise matrisidir. Doğrusal olmayan  $a(x)$  ise sistemin için bulunan doğrusal olmayan kısımları ifade etmektedir. Sisteme uygulanacak olan kontrol işareti Eşitlik (21)'de verilmiştir.

$$\dot{x} = Ax + B\gamma(x)[u - a(x)] \quad (20)$$

$$u = -k_1 x + k_2 \operatorname{sgn}(x) \quad (21)$$

Sistemin kontrolünde yine Lyapunov enerji fonksiyonuna göre yapılmaktadır. Sistemin kontrolü için oluşturulan Lyapunov enerji fonksiyonu aşağıda verilmiştir. Bu Lyapunov enerji fonksiyonu eğer faz uzayında bir yüzey için tanımlanarak oluşturulan bir 's' yüzeyine göre tasarlanmış olsaydı o zaman bu denetleyici kayan kipli kontrol (sliding mode control) olarak adlandırılırdı.

$$V = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}x_2^2 + \frac{1}{2}x_3^2 \quad (22)$$

Lyapunov Kararlılığının 2. Kriterini sağlaması için Eşitlik (22) fonksiyonunun yüksek kazanç kontrolde olduğu gibi P matrisi pozitif tanımlı olacak şekilde seçilmiştir. Burada seçilen katsayılar enerji fonksiyonunun sürekli  $V > 0$  yapmaktadır. Diğer bir önemli kriter ise sistemin asimtotik kararlılığı için bu fonksiyonun türevinin sıfırdan küçük olmasıdır. Sıfıra eşit olduğunda ise sadece sistem kararlıdır denilebilmektedir. Bu fonksiyonun türevi Eşitlik (23)'te verilmiştir.

$$\dot{V} = x_1 \dot{x}_1 + x_2 \dot{x}_2 + x_3 \dot{x}_3 \quad (23)$$

Eşitlik (23)'teki sistemin durumları yerlerine yazılınca Eşitlik (24) elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{V} = x_1[\sigma(x_2 - x_1) + u_1] \\ + x_2[-x_1 x_3 + r x_1 - x_2 + u_2] \\ + x_3[x_1 x_2 - b x_3 + u_3] \end{aligned} \quad (24)$$

Eşitlik (24) düzenlendiğinde Eşitlik (25) elde edilir.

$$\dot{V} = 2\sigma x_1 x_2 + x_1 u_1 + x_2 u_2 + x_3 u_3 \quad (25)$$

Eşitlik 25'teki denklemin  $V \leq 0$  şartını sağlaması için  $u_1$ ,  $u_2$  ve  $u_3$  Eşitlik 26'daki gibi seçilmiştir.

$$\begin{aligned} u_1 &= -2\sigma x_2 - k_1 \operatorname{sgn}(x_1) \\ u_2 &= -x_2 - k_2 \operatorname{sgn}(x_2) \\ u_3 &= -x_3 - k_3 \operatorname{sgn}(x_3) \end{aligned} \quad (26)$$

Kontrol işaretleri Eşitlik (25)'teki yerlerine yazıldığında Eşitlik (27) elde edilir. Bu ifade düzenlendiğinde Eşitlik (28) elde edilir. Bu ifade içindeki  $\operatorname{sgn}(x)x$  ifadeleri her zaman pozitif olacağı için bu ifade  $|x|$  olarak yerine yazılır. Her bir durum için bu yapıldığında Eşitlik (29) elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{V} = 2\sigma x_1 x_2 + x_1(-2\sigma x_2 - k_1 \operatorname{sgn}(x_1)) \\ + x_2(-x_2 - k_2 \operatorname{sgn}(x_2)) \\ + x_3(-x_3 - k_3 \operatorname{sgn}(x_3)) \end{aligned} \quad (27)$$

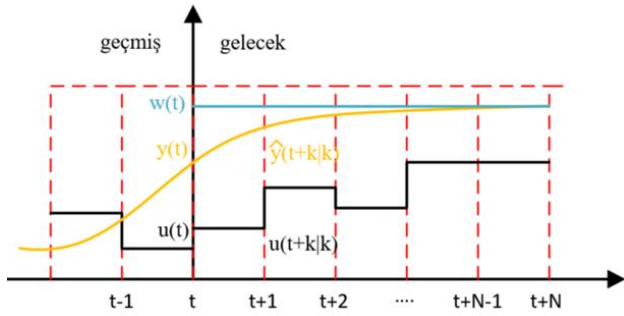
$$\dot{V} = -k_1 \operatorname{sgn}(x_1)x_1 - x_2 x_2 - k_2 x_2 \operatorname{sgn}(x_2) - x_3 x_3 - k_3 \operatorname{sgn}(x_3)x_3 \quad (28)$$

$$\dot{V} = -k_1 |x_1| - x_2^2 - k_2 |x_2| - x_3^2 - k_3 |x_3| \quad (29)$$

### 2.4. Model Öngörülü Kontrol

Bu bölümde Model Öngörülü kontrol tekniğinin kısaca açıklanacak ve matematiksel formülasyonu verilecektir. MPC kayan ufuk fikrine dayalı olarak geliştirilmiş model tabanlı bir denetleyicidir. Kayan ufuk mantığında her örnekleme anında optimal kontrol probleminin çözümü yapılmaktadır. Bu işlem aslında referans işareti, sistemin dinamikleri, sistemin ve kontrol işaretinin kısıtlarının içinde bulunduğu bir problemin çözümüdür. Bu işlem aslında her örnekleme anında yapılarak öngörü ufku boyunca kontrol kontrol kuralı belirlenmektedir. Şekil 1'de gösterildiği gibi sistemin örnekleme anındaki  $y(t)$  çıkışının bulunan t anı ile  $t + N$  anı arasında sistemi beklenen referans işaretine  $w(t)$ 'ye ulaştırmak için uygulanan kontrol işaretinin belirlenmesidir. Belirlenen kontrol dizisinin ilk işareti sisteme uygulanarak bir sonraki örnekleme anında yine bu kontrol dizisi sistemin durumlarına göre belirlenerek kontrol kuralının ilk elemanı sisteme uygulanmaktadır.





Şekil 1. Model Öngörülü Kontrol Şeması

Model öngörülü kontrol tekniğinin kalbi olan model kullanılarak öngörü ufkü boyunca örnekleme anında sisteme uygulanması gereken kontrol işaretini belirlemektedir. Doğrusal olmayan sistemlerde ise bu kontrol tekniği uygulanırken sistemin çalıştığı bölgeye göre doğrusallaştırılmış modeli kullanılarak yine sistem kontrol edilmektedir.

Lorenz kaotik sisteminin sürekli zamandaki sistem dinamiği  $\dot{x} = f(x, u)$  formundadır. Bu sistemin MPC ile kontrol edilebilmesi için belirli bir çalışma noktası etrafında sistemin doğrusallaştırılması gerekmektedir. Doğrusallaştırılan sistemin örnekleme zamanında göre ayrıklaştırılması gerekmektedir. Doğrusallaştırılan ve ayrıklaştırılan sistemin MPC ile kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sistemin daha iyi kontrol edilebilmesi yani referans işaretini daha iyi takip edilebilmesi için sistemin çıkışlarına yani durumlarına integratör ilave edilmiştir. Bu durumdan kontrol edilecek olan kaotik sistemin durum uzayındaki ifadesi Eşitlik (30)'daki gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned}\hat{x}_1 &= \sigma(x_2 - x_1) + u_1 \\ \hat{x}_2 &= -x_1x_3 + rx_1 - x_2 + u_2 \\ \hat{x}_3 &= x_1x_2 - bx_3 + u_3 \\ \hat{x}_1 &= -x_2 \\ \hat{x}_2 &= -x_2 \\ \hat{x}_3 &= -x_3\end{aligned}\quad (30)$$

Bu sistemin yapısı Eşitlik (31)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u, t) \\ y &= g(x, u, t)\end{aligned}\quad (31)$$

Doğrusal olmayan bu Lorenz sistemi her örnekleme anında doğrusallaştırılacaktır. Eşitlik (32)'de verilen Jakobien matrisi ile sistemin çalıştığı yere göre doğrusallaştırılmış sistem matrisleri elde edilir.

$$\begin{aligned}A &= \frac{\partial f}{\partial x} & B &= \frac{\partial f}{\partial u} \\ C &= \frac{\partial g}{\partial x} & D &= \frac{\partial g}{\partial u}\end{aligned}\quad (32)$$

Doğrusallaştırılmış olan sistemin ayrıklaştırılması yapılacaktır. Sistemin her örnekleme anında tekrardan oluşturulacak olan ayrık modeli eşitlik ise Eşitlik (33)'de verilmiştir. Buradaki sistem matrisi ve kontrol matrisi için Eşitlik (34)'de verilen basit ayrıklaştırma yöntemi kullanılmıştır. Burada sistem matrisi  $x(k)$  anındaki sistemin

durumlarına göre ve  $u(k-1)$  anında sisteme uygulanan kontrol işaretine göre elde edilmektedir.

$$x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) \quad (33)$$

$$\begin{aligned}A_d &= (I + AT_s)|_{x=x(k), u=u(k-1)} \\ B_d &= BT_s|_{x=x(k), u=u(k-1)} \\ x(k) &\in R^n \quad u(k) \in R^m\end{aligned}\quad (34)$$

Kabul olarak sistemin her örnekleme anında hem kontroledilebilir olduğu hem de gözlenebilir olduğu varsayımı yapılmıştır. Amaç fonksiyonu öngörü ufkü boyunca sistemin davranışını belirleyecek olan optimal kontrol problemidir. Bu fonksiyon Eşitlik (35)'de verilmiştir. Bu optimal kontrol problemi,  $x(k)$  ve  $u(k)$  matrisleri ile çok değişkenli optimizasyon problemi haline dönüştürülür. Bu problemin çözümünde QP, SQP algoritmaları kullanılarak çözüldükten sonra, mevcut örnekleme zamanı için öngörü ufkü boyunca kontrol kuralı elde edilir. Bu kontrol ufkünün sadece ilk elemanı sisteme uygulanır. Bir sonraki örnekleme zamanında, öngörü ve kontrol ufkü boyunca yeni kontrol kuralı üretmek için bu optimizasyon süreci tekrarlanır

$$\min_{(x_k, u_k)} J = \sum_{k=0}^N x_k^T Q x_k + \sum_{k=0}^M u_k^T R u_k \quad (35)$$

### 3. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Bu bölümde Lorenz sisteminin kontrolü geri beslemeli kontrolü, yüksek kazanç kontrolü, yüksek frekans kontrolü ve model öngörülü kontrol yöntemlerinin simülasyonları gerçekleştirilmiş ve sonuçları verilmiştir. Bu sistemlerin simülasyonları için MATLAB Simulink R2018A programı kullanılmıştır.

Eşitlik (1)'de bulunan sistemin  $\sigma = 10, r = \frac{8}{3}, b = 28$  olarak verilmiştir.

Geri beslemeli kontrol yönteminde sistemin denetlenmesi için denetleyicinin parametreleri belirlenmelidir. Bunun için kapalı çevrimde kullanılacak olan sistem kutupların keyfi olarak  $\lambda_1 = -1, \lambda_2 = -2, \lambda_3 = -3$  olması istenmektedir. Bu başka bir performans olarak seçilebilirdi. Buna göre atanan kutupların bu değerleri de olabilmeleri için sistemin kapalı çevrimde bu kutupları sağlayacak olan k parametreleri  $k_1 = \frac{6}{11}, k_2 = 11$  ve  $k_3 = 6$ 'dır. Bu yöntemde kontrol işareti Eşitlik (36)'daki gibi oluşturulmuştur. Parametreler Eşitlik (37)'de yerlerine yazılmıştır.

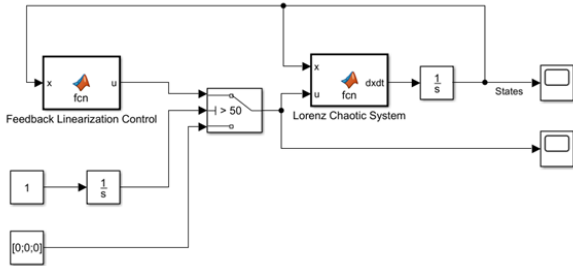
$$\begin{aligned}v_1 &= 0 \\ v_2 &= 0 \\ v_3 &= k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_3 \\ &\downarrow \\ u_1 &= rx_1 + v_1 \\ u_2 &= +x_1x_3 - rx_1 + x_2 + x_3 + v_2 \\ u_3 &= -x_1x_2 + bx_3 + v_3\end{aligned}\quad (36)$$

$$\begin{aligned}
u_1 &= rx_1 \\
u_2 &= +x_1x_3 - rx_1 + x_2 + x_3 \\
u_3 &= -x_1x_2 + bx_3 + \left(\frac{6}{11}\right)x_1 + (11)x_2 + (11)x_3
\end{aligned} \quad (37)$$

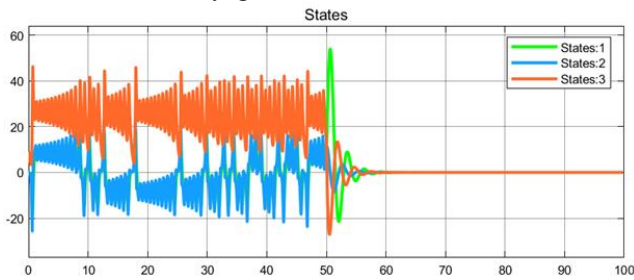
Kutup atama yöntemi ile tasarlanan denetleyicinin kapalı çevrim yapısı Eşitlik (38)'deki gibidir

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= \sigma x_2 \\
\dot{x}_2 &= x_3 \\
\dot{x}_3 &= -\left(\frac{6}{11}\right)x_1 + (11)x_2 + (11)x_3
\end{aligned} \quad (38)$$

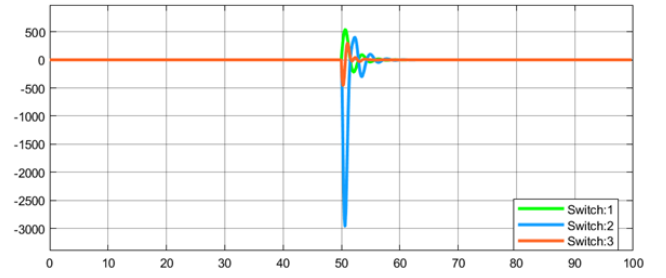
Tasarlanan sistemin kapalı yapısı Şekil 2'de verilmiştir. Sistem yanıtı ise Şekil 3'te verilmiştir. Sistem ilk başta kaotik davranış sergilemektedir. 50 saniye sonra tasarlanan denetleyici aktif olmaktadır. Görüldüğü gibi sistem daha önceden tasarlanan  $[0,0,0]$  noktasına denetleyici taşıyabilmektedir. Bu tasarım farklı bir denge noktası için yapılsaydı sistem belirlenen denge noktasına taşınabilir. Ayrıca sistemin kontrol işaretleri Şekil 4'te verilmiştir. Ardından literatürde yapılan bir çalışma ile karşılaştırma amacı ile [27]'de yapılan çalışmada elde edilen kontrol kuralı ile elde edilen sistemin durumları Şekil 5'de verilirken kontrol kuralı Şekil 3'de verilmiştir. Sistem yanıtları incelendiğinde sistemin denge noktasında sürekli salınım yaptığı ve performansının düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni tüm durumları tek bir kontrol işareti ile kontrol edilmesidir. Tüm durumlar istenen performans Şekil 4'deki gibi sağlanabilmektedir. Ayrıca keyfi olarak seçilen kutuplar değiştirilerek sistemin performansı istenildiği gibi ayarlanabilir. Ayrıca Şekil 6'da görüldüğü üzere sisteme kararlı hale geçemediği için kontrol işareti sürekli olarak salınım yapmaktadır. Bu sonuçtan görüldüğü üzere sistemin tüm durumları kontrol edildiğinde istenen performans geri beslemeli kontrol ile literatürdeki bazı çalışmalardan daha iyi bir şekilde elde edilebilmektedir.



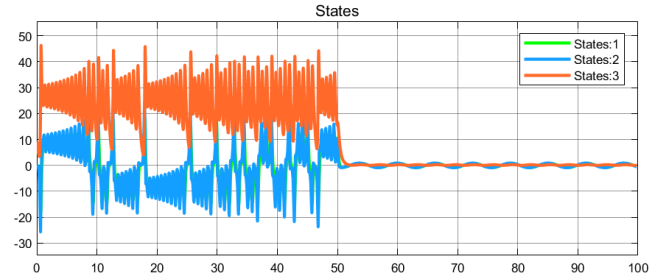
Şekil 2. Lorenz kaotik sisteminin geri besleme ile kontrolünün blok diyagramı



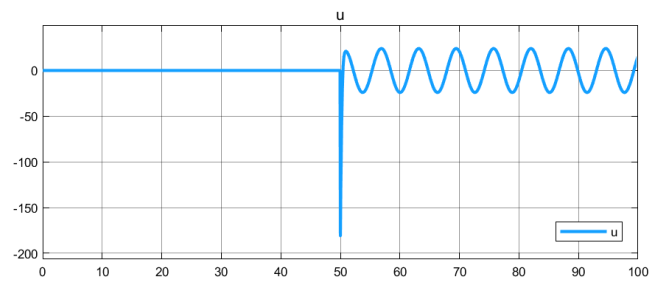
Şekil 3. Lorenz kaotik sisteminin geri beslemeli kontrol ile elde edilen sistemin durumları



Şekil 4. Lorenz kaotik sisteminin geri beslemeli kontrol ile elde edilen kontrol işaretleri



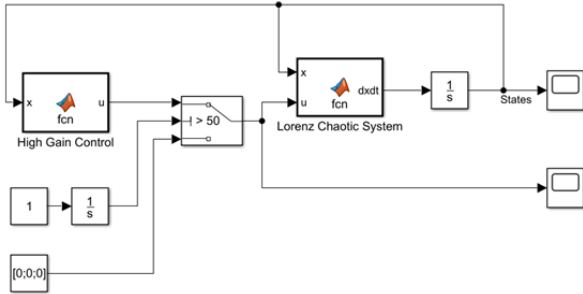
Şekil 5. Lorenz kaotik sisteminin literatürdeki geri beslemeli kontrol kuralı ile elde edilen sistemin durumları



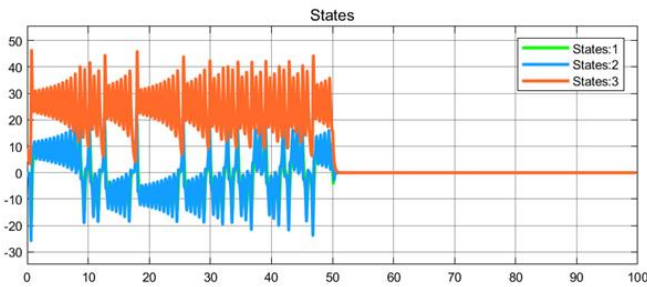
Şekil 6. Lorenz kaotik sisteminin literatürdeki geri beslemeli kontrol kuralı ile elde edilen kontrol işareti

Yüksek Kazanç kontrolü ile Lorenz sistemi kontrol edilmek istendiğinde sisteme uygulanacak olan kontrol işaretleri Eşitlik (19)'da verilmiştir. Bu kontrol işaretinin uygulanabilmesi için Eşitlik (18)'de verilen fonksiyonun  $\dot{V} \leq 0$  yapmaktadır. Bu kontrol kuralındaki parametrelerin belirlenmesi Eşitlik (17)'de yapılmıştır.  $k_{11} = 2\sigma, k_{21} = k_{32}, k_{21} = k_{32}$  ve  $k_{31} = 0$  seçildiği için Eşitlik (18)'deki denklem  $\dot{V} \leq 0$  şartını sağlamaktadır. Tasarlanan sistemin kapalı yapısı Şekil 7'de verilmiştir. Sistem yanıtı ise Şekil 8'de verilmiştir. Sistem ilk başta kaotik davranış sergilemektedir. 50 saniye sonra sistem için tasarlanan denetleyici aktif olmaktadır. Görüldüğü gibi sistem daha önceden tasarlanan  $[0,0,0]$  noktasına denetleyici taşıyabilmektedir. Bu tasarım farklı bir denge noktası için yapılsaydı sistem belirlenen denge noktasına taşınabilir. Ayrıca sistemin kontrol işaretleri Şekil 8'de verilmiştir. Literatürdeki Qiao ve ark. yaptığı çalışmada yüksek kazanç benzer bir yöntem ile denetlenen Lorenz sistemi tek durum üzerinden kontrol edilmiştir [26]. Qiao ve ark. önerdikleri denetleyici ile kontrol edilen sistemin durumları Şekil 10'da verilirken, sistemi kontrol eden kontrol işareti Şekil 11'da verilmiştir. Görüldüğü üzere Şekil 8 ve Şekil 10 karşılaştırıldığında sadece beklenen referans işaretine Şekil

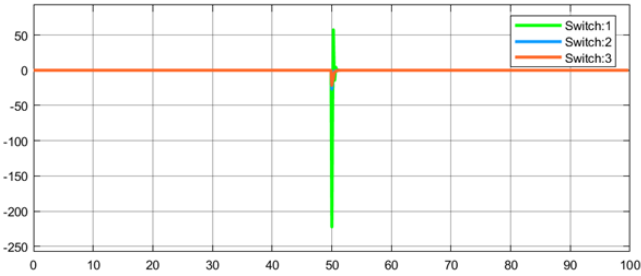
8'de daha hızlı geldiği ve Şekil 10'daki gibi sistemin 2. durumundaki (mavi renkli) kadar aşım yapmadığı görülmektedir.



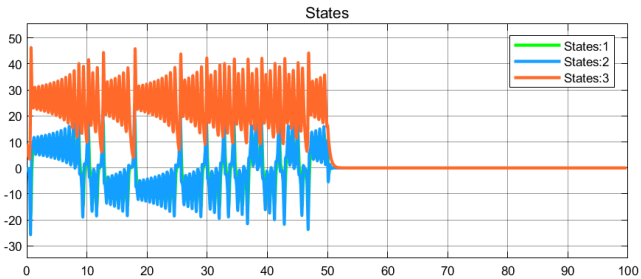
Şekil 7. Lorenz kaotik sisteminin yüksek kazanç ile kontrolünün blok diyagramı



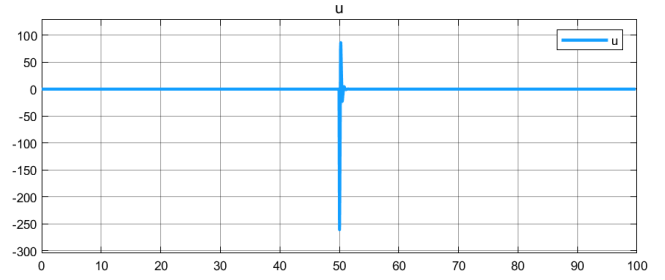
Şekil 8. Lorenz kaotik sisteminin yüksek kazanç kontrolü ile elde edilen sistemin durumları



Şekil 9. Lorenz kaotik sisteminin yüksek kazanç kontrolü ile elde edilen kontrol işaretleri



Şekil 10. Lorenz kaotik sisteminin literatürdeki yüksek kazanç kontrol kuralı ile elde edilen sistemin durumları



Şekil 11. Lorenz kaotik sisteminin literatürdeki yüksek kazanç kontrolü kuralı ile elde edilen kontrol işareti. Yüksek frekans kontrolü ile Lorenz sistemi kontrol edilmek istendiğinde sisteme uygulanacak olan kontrol işaretleri Eşitlik (26)'da verilmiştir. Bu kontrol işaretinin uygulanabilmesi için Eşitlik (39)'da verilen fonksiyonun  $\dot{V} \leq 0$  olması gereklidir. Bu şartlar  $k_1, k_2, k_3 \geq 0$  olduğunda sağlandığı için keyfi olarak  $k_1 = 1, k_2 = 1$  ve  $k_3 = 1$  olarak seçilmiştir. Dolayısıyla uygulanacak olan kontrol işareti Eşitlik (40)'da verilmiştir.

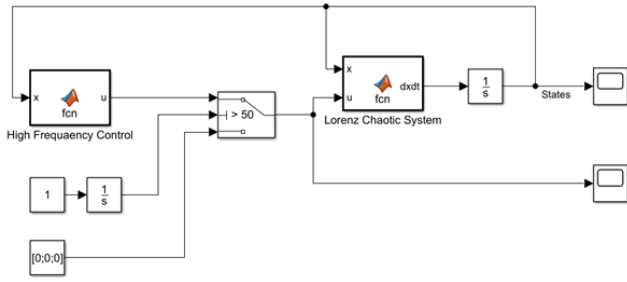
$$\dot{V} = -k_1|x_1| - x_2^2 - k_2|x_2| - x_3^2 - k_3|x_3| \leq 0 \quad (39)$$

$$\forall x \neq 0 \text{ ve } k_1, k_2, k_3 \geq 0$$

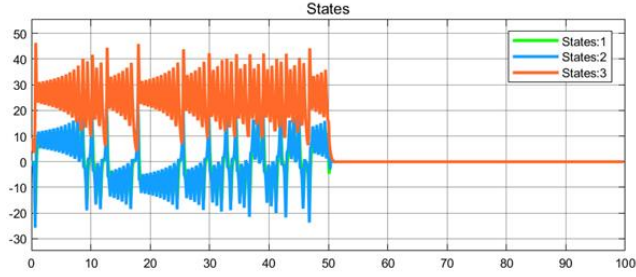
$$\begin{aligned} u_1 &= -2\sigma x_2 - k_1 \text{sgn}(x_1) \\ u_2 &= -x_2 - k_2 \text{sgn}(x_2) \\ u_3 &= -x_3 - k_3 \text{sgn}(x_3) \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} u_1 &= -2(10)x_2 - (1)\text{sgn}(x_1) \\ u_2 &= -x_2 - (1)\text{sgn}(x_2) \\ u_3 &= -x_3 - (1)\text{sgn}(x_3) \end{aligned}$$

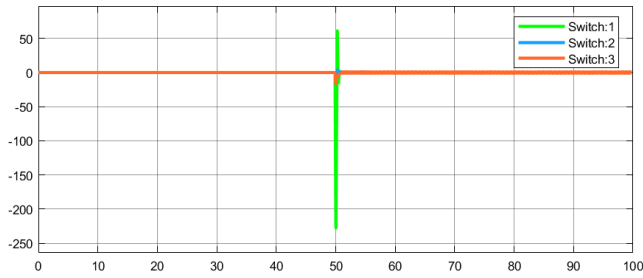
Tasarlanan sistemin blok yapısı Şekil 12'de verilmiştir. Sistem yanıtı ise Şekil 13'de verilmiştir. Sistem ilk başta kaotik davranış sergilemektedir. 50 saniye sonra tasarlanan denetleyici aktif olmaktadır. Görüldüğü gibi sistem daha önceden tasarlanan  $[0,0,0]$  noktasına denetleyici taşıyabilmektedir. Bu tasarım farklı bir denge noktasına taşınabilir. Ayrıca sistemin kontrol işaretleri Şekil 14'de verilmiştir. Ardından literatürde yapılan bir çalışma ile karşılaştırma amacı ile [35]'de yapılan çalışmada elde edilen kontrol kuralı ile elde edilen sistemin durumları Şekil 15'de verilirken kontrol kuralı Şekil 16'da verilmiştir. Şekil 15'de görüldüğü üzere sistem durumlarından 2. durum (mavi renkli) ufakta olsa belirli bir kararlı durum hatası ile sürekli hale geçmektedir. Ayrıca kontrolcü bu kararlı durum hatasını sürekli rejimde düzeltmemektedir. Bu sonuçtan görüldüğü üzere sistemin tüm durumları kontrol edildiğinde sistem istenen denge noktasına literatürdeki bazı çalışmalardan daha iyi bir şekilde geldiği görülmüştür.



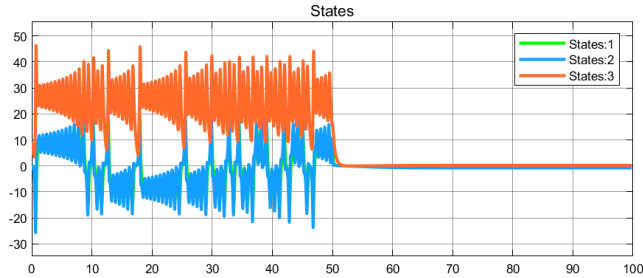
Şekil 12. Lorenz kaotik sisteminin yüksek frekans ile kontrolünün blok diyagramı



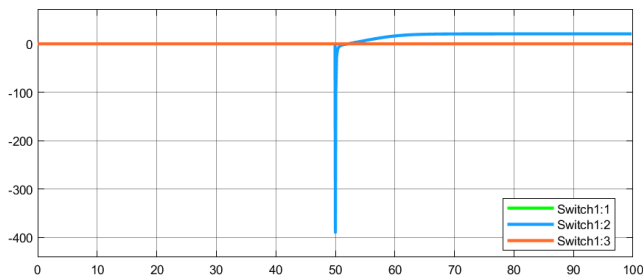
Şekil 13. Lorenz kaotik sisteminin yüksek frekans kontrolü ile elde edilen sistemin durumları



Şekil 14. Lorenz kaotik sisteminin yüksek frekans kontrolü ile elde edilen kontrol işaretleri



Şekil 15. Lorenz kaotik sisteminin literatürdeki yüksek frekans kontrol kuralı ile elde edilen sistemin durumları

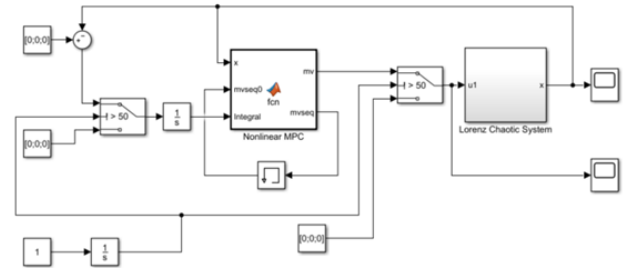


Şekil 16. Lorenz kaotik sisteminin literatürdeki yüksek frekans kontrol kuralı ile elde edilen kontrol işareti

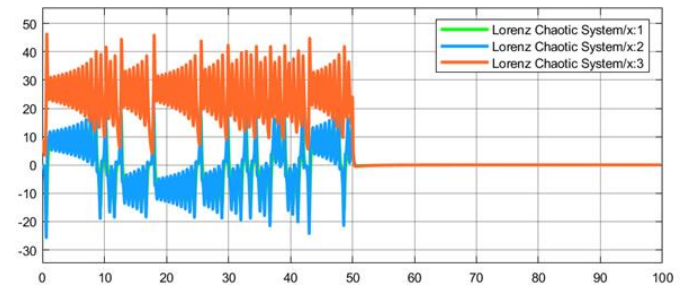
Lorenz sisteminin kontrol edilebilmesi için model öngörülü kontrol denetleyicinin öngörü ufkü parametresi ( $N$ ) 100 ve kontrol ufkü parametresi ( $M$ )'si 1 seçilmiştir. Ayrıca sistemde kullanılacak olan  $P$  ve  $Q$  matrisleri sistemin davranışını büyük oranda etkilemektedir. Lakin burada yine  $P$  matrisinin pozitif tanımlı olabilmesi için diyagonal olarak köşegen elemanları 1 olan  $6 \times 6$  boyutunda bir matris seçilmiştir. Ayrıca  $Q$  matrisi yine kontrol işaretinin ağırlıklarını belirlediği için bunlarında ağırlıkları 1 olarak seçilmiştir. Bu matrisler Eşitlik (41)'de verilmiştir. Sistem kaotik olarak hareket ettiği için denetleyicide kullanılan örnekleme zamanı ( $T_s$ )  $1ms$  olarak seçilmiştir.

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (41)$$

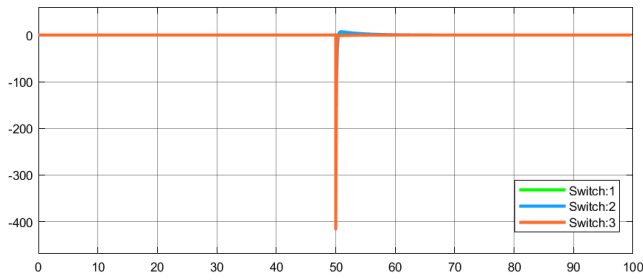
Tasarlanan sistemin yapısı Şekil 16'da verilmiştir. Sistem yanıtı ise Şekil 17'de verilmiştir. Sistem ilk başta kaotik davranış sergilemektedir. 50 saniye sonra tasarlanan denetleyici aktif olmaktadır. Görüldüğü gibi sistem daha önceden tasarlanan  $[0,0,0]$  noktasına denetleyici taşıyabilmektedir. Bu tasarım farklı bir denge noktası için yapılsaydı sistem belirlenen denge noktasına taşınabilir. Ayrıca sistemin kontrol işaretleri Şekil 18'de verilmiştir.



Şekil 16. Lorenz kaotik sisteminin model öngörülü kontrol ile kontrolünün blok diyagramı



Şekil 17. Lorenz kaotik sisteminin model öngörülü kontrolü ile elde edilen sistemin durumları



**Şekil 18.** Lorenz kaotik sisteminin model öngörülü kontrol kontrolü ile elde edilen kontrol işaretleri

#### 4. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada kaotik Lorenz sisteminin kontrolünde geri beslemeli, yüksek kazanç, yüksek frekans ve model öngörülü kontrol teknikleri kullanılarak kontrol edilmiştir. Bu yöntemlerden geri beslemeli kontrol, yüksek kazanç kontrolden farklı olarak geri beslemeli kontrolünde; sistemin çalışacağı bölgeye göre sistemin durağan sabit bir sistem matrisinin olmasıdır. Tüm doğrusal olmayan yapılar kontrol işareti içerisine gömülerek sistemin doğrusal yapısı elde edilmiştir. Ardından sistem matrisine göre sisteme denetleyici tasarımı yapılarak kapalı çevrim kararlılığı garanti altına alınmaktadır. Ama yüksek kazanç ve yüksek frekans kontrolünde sistemin kararlılığını belirleyen şey Lyapunov fonksiyonu yani enerji fonksiyonudur. Denetleyici oluşturulan bu fonksiyona ve gerekli şartlarına göre tasarlanmaktadır. Bu nedenle tüm parametrelerin bildiği farz edilerek tasarlanan geri beslemeli kontrol, parametrelere duyarlı bir kontrol tekniğidir. Buna mukabil yüksek kazanç kontrol, yüksek frekans kontrol ve model öngörülü kontrol teknikleri enerji fonksiyonları üzerinden tasarlandıkları için daha dayanıklı denetleyicilerdir. Buna mukabil tüm sonuçlar incelendiğinde sistemin kontrol edilmesinde en iyi performansı hem yüksek kazanç kontrolü hem de model öngörülü kontrol göstermiştir. Lakin yüksek kazanç kontrolünde; optimal bir kontrol işaretini üretmekten ziyade, enerji fonksiyonunu minimum yapması istenen bir kontrol kuralının üretilmesi amaçlanmaktadır. Yani sistemin performansından ziyade kararlılığın sağlanacağı bir kontrol işaretinin üretilmesi esasına dayanmaktadır. Buna mukabil model öngörülü kontrolde amaç fonksiyonu; hem durumların hem de kontrol işaretinin karesel hatalarının toplamını içeren bir yapısı bulunmaktadır. Dolayısıyla optimal kontrol açısından bakıldığında model öngörülü kontrol belirlenen performans kriterini her örnekleme anında optimize ettiğinden sisteme uygulanacak olan optimal kontrol işaretinin üretilmesini ve sistemi istenen optimal noktaya taşınmasını en iyi performansta yapmaktadır. Bunun yanında bu çalışmada ele alınmamasına rağmen ama model öngörülü kontrolün avantajlarına bakıldığında çok girişli-çıkışlı sistemlere rahatlıkla uygulanabildiği gibi sistem kısıtlarının da işin içine kolaylıkla katabilmektedir. Yüksek kazanç kontrolünde sistem modelinde belirsizlikler olduğu durumlarda gerekli kontrol işaretini aktuatör üretmeyebilmekte ve saturasyona neden olabilmektedir. Yüksek frekans kontrolü bunun üstesinden gelmekte fakat belirli bir durağan noktada çok yüksek frekanslarda

anahtarlama yapılması gerektiğinden bu sisteme zarar verebilmektedir veya aktuatörün zarar görmesine neden olabilmektedir. Model öngörülü kontrolde bu gibi durumların üstesinden rahatlıkla gelebilmektedir. Ama Model öngörülü kontrolde ise diğer denetleyicilere nazaran her örnekleme anında çok yüksek bir hesaplama işlemi yapılmaktadır. Bu işlemlerin örnekleme süresi içinde tamamlanması gerekmektedir. Eğer kontrol işareti örnekleme zamanı içinde üretilemezse bu sistemin kontrol edilememesine neden olabilmektedir. Bunun üstesinden gelinebilmesi içinde model öngörülü kontrol için literatürde genellikle explicit denilen daha önceden oluşturulmuş look-up tablosu yada eğitilmiş model yapıları kullanılmaktadır. İlerleyen çalışmalarda ise bu yöntemlerin yanı sıra sliding mode ve backstepping, adaptif sliding, fuzzy sliding adaptif backstepping, fuzzy backstepping yöntemleri de kullanılacak olup farklı kaotik sistemlerin kontrolü ve senkronizasyonları gerçekleştirilecektir.

#### KAYNAKÇA

- [1] V. G. Ivancevic and T. T. Ivancevic, *High-dimensional chaotic and attractor systems: a comprehensive introduction*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [2] W. J. Burroughs, *Climate change in prehistory: The end of the reign of chaos*. Cambridge University Press, 2005.
- [3] S. Solhjoo, A. M. Nasrabadi, and M. R. H. Golpayegani, "Classification of chaotic signals using HMM classifiers: EEG-based mental task classification," in *2005 13th European Signal Processing Conference*, IEEE, pp. 1-4, 2005.
- [4] G.-Q. Wu *et al.*, "Chaotic signatures of heart rate variability and its power spectrum in health, aging and heart failure," *PloS one*, vol. 4, no. 2, 2009.
- [5] D. S. Gutzler, "Ecological Climatology: Concepts and Applications," ed: JSTOR, 2003.
- [6] R. Steinitz, "Music, maths & chaos," *The Musical Times*, vol. 137, no. 1837, pp. 14-20, 1996.
- [7] J. Harley, "Generative processes in algorithmic composition: Chaos and music," *Leonardo*, vol. 28, no. 3, pp. 221-224, 1995.
- [8] M. Baptista, "Cryptography with chaos," *Physics letters A*, vol. 240, no. 1-2, pp. 50-54, 1998.
- [9] B. Ramakrishnan et al. "Infinite attractors in a chaotic circuit with exponential memristor and Josephson junction resonator," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 123, 2020.
- [10] A. Akgul, I. M. Moroz and A. Durdu. "A novel data hiding method by using a chaotic system without equilibrium points," *Modern Physics Letters B*, vol. 33, no. 29, 2019.
- [11] M. Sharafi, F. Fotouhi-Ghazvini, M. Shirali, and M. Ghassemian, "A low power cryptography solution based on chaos theory in wireless sensor nodes," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 8737-8753, 2009.
- [12] S. Cicek, U. E. Kocamaz and Y. Uyaroglu. "Secure chaotic communication with jerk chaotic system using sliding mode control method and its real circuit implementation," *Iranian Journal of Science and*

Technology, *Transactions of Electrical Engineering*, vol. 43, no. 3, pp. 687-698, 2019.

[13] J. S. Khan and J. Ahmad, "Chaos based efficient selective image encryption," *Multidimensional Systems and Signal Processing*, vol. 30, no. 2, pp. 943-961, 2019.

[14] A. Gökyıldırım, Y. Uyaroglu and I. Pehlivan. "A Weak Signal Detection Application Based on Hyperchaotic Lorenz System." *Tehnički vjesnik*, vol. 25, no. 3, pp. 701-708, 2018.

[15] A. Gökyıldırım, Y. Uyaroglu and I. Pehlivan. "A novel chaotic attractor and its weak signal detection application." *Optik*, vol. 127, no. 19, 2016.

[16] M. E. Cimen, Z. B. Garip, M. A. Pala, A. F. Boz, and A. Akgül, "Modelling of a Chaotic System Motion in Video with Artificial Neural Networks," *Chaos Theory and Applications*, vol. 1, no. 1, pp. 38-50.

[17] M. E. Çimen, S. Kaçar, E. Güleriyüz, B. Gürevin, and A. Akgül, "Kaotik bir hareket videosunun yapay sinir ağları ile modellenmesi," *Bahkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 20, no. 3, pp. 23-35, 2018.

[18] E. Ott, C. Grebogi, and J. Yorke, "Physical Review Letters 64, 1196} 1199," *Controlling chaos*, 1990.

[19] T. L. V. J. YU, "Control of a Chaotic System," *Dynamics and Control* vol. 1, pp. 35-52, 1990.

[20] A. Mohammadbagheri and M. Yaghoobi, "Lorenz-Type Chaotic attitude control of satellite through predictive control," in *2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Modelling & Simulation*, 2011: IEEE, pp. 147-152.

[21] Lu, Xia. "A Financial Chaotic System Control Method Based on Intermittent Controller." *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, doi:10.1155/2020/5810707.

[22] T. Yeap and N. Ahmed, "Feedback control of chaotic systems," *Dynamics and Control*, vol. 4, no. 1, pp. 97-114, 1994.

[23] Y. Zeng and S. N. Singh, "Adaptive control of chaos in Lorenz system," *Dynamics and Control*, vol. 7, no. 2, pp. 143-154, 1997.

[24] S. Emiroglu ve Y. Uyaroglu. "T Kaotik Sisteminin Geri Besleme ile Kontrolü", *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 10, no. 3, pp. 1649-1658, 2020.

[25] H. Kizmaz, U. E. Kocamaz and Y. Uyaroglu. "Control of memristor-based simplest chaotic circuit with one-state controllers." *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 28, no. 1, 2019.

[26] Z. Qiao and J. Cheng. "A novel linear feedback control approach of Lorenz chaotic system." *2006 International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents Web Technologies and International Commerce (CIMCA'06)*. IEEE, 2006.

[27] F. Gao et al. "Nonlinear feedback control for the

Lorenz system." *Dynamics and control*, vol. 11, no. 1, 2001.

[28] S.-K. Y. C.-L. C. H.-T. Yau, "Control of chaos in Lorenz system," *Chaos, Solitons and Fractals* vol. 13, pp. 767-780, (2002).

[29] P. P. Cardenas Alzate, G. C. Velez, and F. Mesa, "Chaos control for the Lorenz system," *Advanced Studies in Theoretical Physics*, vol. 12, no. 4, pp. 181-188, 2018, doi: 10.12988/astp.2018.8413.

[30] H.-T. Yau and J.-J. Yan, "Design of sliding mode controller for Lorenz chaotic system with nonlinear input," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 19, no. 4, pp. 891-898, 2004, doi: 10.1016/s0960-0779(03)00255-8.

[31] M. Chen, D. Zhou, and Y. Shang, "Nonlinear feedback control of Lorenz system," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 21, no. 2, pp. 295-304, 2004, doi: 10.1016/j.chaos.2003.12.066.

[32] M. T. Yassen, "Chaos control of chaotic dynamical systems using backstepping design," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 27, no. 2, pp. 537-548, 2006, doi: 10.1016/j.chaos.2005.03.046.

[33] L. Run-Zi, "Impulsive control and synchronization of a new chaotic system," *Physics Letters A*, vol. 372, no. 5, pp. 648-653, 2008, doi: 10.1016/j.physleta.2007.08.010.

[34] E. Daş, "Güdümlü Bir Mühimmat Kanatçık Tahrik Sistemi İçin İki Döngülü Kontrol Sistemi Tasarımı," *Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ*, 2014.

[35] E. Köse and A. Mühürücü, "Comparative Controlling of the Lorenz Chaotic System Using the SMC and APP Methods," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2018, pp. 1-9, 2018, doi: 10.1155/2018/9612749.

[36] V.-T. Pham, S. T. Kingni, C. Volos, S. Jafari, and T. Kapitaniak, "A simple three-dimensional fractional-order chaotic system without equilibrium: Dynamics, circuitry implementation, chaos control and synchronization," *AEU-international Journal of Electronics and Communications*, vol. 78, pp. 220-227, 2017.


[37] L. Zhang and Y. Yan, "Discrete active model predictive control of continuous unified chaotic system," in *2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 2019: IEEE, pp. 3390-3394.


[38] K.-S. Park, J.-M. Joo, J.-B. Park, Y.-H. Choi, and T.-S. Yoon, "Control of discrete-time chaotic systems using generalized predictive control," in *Proceedings of 1997 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Circuits and Systems in the Information Age ISCAS'97*, 1997, vol. 2: IEEE, pp. 789-792.


[39] S. M. Tabatabaei, S. Kamali, M. R. Jahed-Motlagh, and M. B. Yazdi, "Practical Explicit Model Predictive Control for a Class of Noise-embedded Chaotic Hybrid Systems," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 857-866, 2019.


## Mekanik Aktivasyon Yapılmış Çinko Konsantrelerinde Kavurma Sıcaklığının Redüksiyonuna Etkisinin Termal Analiz Yöntemleri ile İncelenmesi


<sup>1</sup>Faysal Demir, \*<sup>1</sup>Hasan Algül, <sup>2</sup>Harun Gül, <sup>2</sup>Mustafa Akçil, <sup>1</sup>Ahmet Alp

<sup>1</sup>Sakarya Üniversitesi, Müh. Fak., Metalurji ve Malzeme Müh. Böl., Sakarya, faysaldemirr1@gmail.com 

<sup>1</sup>Sakarya Üniversitesi, Müh. Fak., Metalurji ve Malzeme Müh. Böl., Sakarya, halgul@sakarya.edu.tr 

<sup>2</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Tek. Fak., Metalurji ve Malzeme Müh. Böl., Sakarya, harungul@subu.edu.tr 

<sup>2</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Tek. Fak., Metalurji ve Malzeme Müh. Böl., Sakarya, makcil@subu.edu.tr 

<sup>1</sup>Sakarya Üniversitesi, Müh. Fak., Metalurji ve Malzeme Müh. Böl., Sakarya, alp@sakarya.edu.tr 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 21.12.2020

Kabul Tarihi: 31.03.2021

### Öz

Sfaleritler çinko üretimi için dünyada en çok kullanılan cevherlerdir. Dünyada çinko üretimi hurda malzemelerinden sonra en çok sfalerit cevherlerinden üretilmektedir. Sfalerit cevherlerinde çinko eldesi için hem hidrometalurjik hem de pirometalurjik prosesler kullanılmaktadır. Türkiye’de sülfürlü çinko cevheri üretimi yapılmasına rağmen cevherden çinko üretimi yapan tesis bulunmamaktadır. Mevcutta flotasyonla zenginleştirilip yurt dışına satılmakta olan Çanakkale Yenice bölgesi konsantreleri mekanik aktive edilmiştir. Sonrasında farklı sıcaklıklarda oksitlenen konsantreler grafit ile karıştırılarak bir termal analiz cihazında redüklenmiştir. Redüksiyon işlemi azot atmosferinde gerçekleştirilerek cevherin yüksek sıcaklık davranışı ve kimyasal davranışlar incelenmiştir. Çalışmada analiz ve karakterizasyon için X ışını floresansı (XRF), X-ray difraktometresi (XRD), taramalı elektro mikroskopu-Enerji dağılımlı X-ışın spektrometresi (SEM-EDS-Mapping) ve termal analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çinko konsantresi, mekanik aktivasyon, XRF, SEM-EDS, termal analiz

## The Effect of Mechanical Activation and Roasting Temperature on the Reduction of Zinc Concentrates

Faysal Demir<sup>1</sup>, Hasan Algül\*<sup>1</sup>, Harun Gül<sup>2</sup>, Mustafa Akçil<sup>2</sup>, Ahmet Alp<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sakarya Üniversitesi, Müh. Fak., Metalurji ve Malzeme Müh. Böl., Sakarya, faysaldemirr1@gmail.com

<sup>1</sup>Sakarya Üniversitesi, Müh. Fak., Metalurji ve Malzeme Müh. Böl., Sakarya, halgul@sakarya.edu.tr

<sup>2</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Tek. Fak., Metalurji ve Malzeme Müh. Böl., Sakarya, harungul@subu.edu.tr,

<sup>2</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Tek. Fak., Metalurji ve Malzeme Müh. Böl., Sakarya, makcil@subu.edu.tr,

<sup>1</sup>Sakarya Üniversitesi, Müh. Fak., Metalurji ve Malzeme Müh. Böl., Sakarya, alp@sakarya.edu.tr

### Abstract

Sphalerites are the most widely used ores in the world for zinc production. Global zinc production is produced mostly from sphalerite ores as well as from scrap materials. To obtain zinc in sphalerite ores, hydrometallurgical and pyrometallurgical processes are used. Although zinc sulphide ore produced in Turkey, there are no plants for production of zinc from ore. Çanakkale Yenice region concentrates which are still enriched with flotation and sold abroad have been mechanically activated. Subsequently, concentrates oxidized at different temperatures were mixed with graphite and reduced in a thermal analyzer. Reduction was performed in a nitrogen atmosphere to investigate high temperature behavior and chemical behavior of ores. X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy- energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS-Mapping) and thermal analysis studies were carried out for analysis and characterization.

**Keywords:** Zinc concentrate, mechanic activation, XRF, SEM-EDS, thermal analysis

### 1. GİRİŞ

Çinko üretimi hurda malzemelerin yanında en çok sfalerit (ZnS) cevherinden üretilmektedir. Dünyada çinko üretimi için pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemler

kullanılmaktadır [1]. Bu yöntemlerin her ikisinde de ilk aşamada kavurma yapılmaktadır [2]. Türkiye’de sülfürlü çinko cevheri üretimi yapılmasına rağmen cevherden çinko üretimi yapan tesis bulunmamaktadır. Üretilen çinko-kurşun cevherleri ihraç edilmekte, çinko metal ihtiyacı ise ithalat

\*Sorumlu yazar: Sakarya Üniversitesi, Müh. Fak., Metalurji ve Malzeme Müh. Böl., Sakarya, halgul@sakarya.edu.tr

yoluyla karşılanmaktadır [3]. Endüstriyel uygulamalarda sülfürlü çinko konsantreleri öncelikle yüksek sıcaklıkta hava atmosferinde kavrulmakta olup, bu esnada konsantredeki çinkonun yaklaşık %90'ı çinko okside dönüşürken, %10'luk kısmı ise çinko ferriti ( $ZnFe_2O_4$ ) oluşturmaktadır [4]. Üretilen çinko oksit esaslı ürün (kalsine) daha sonra karbonla redüklenmektedir [5].

Çinko oksidin CO tarafından indirgenmesi  $700\text{ }^\circ\text{C}$ 'den sonra başlıyor olsa da reaksiyonun istenen hızda devamı için sıcaklığın  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerine çıkması gerekmektedir [6].

Literatürde birçok cevherin redüksiyonuna ait çalışmalar söz konusu olup, bu çalışmalardan birinde kromit cevherinin karbotermik indirgenmesi termal analiz çalışması ile incelenmiştir. Çalışmada kok, cevher ve bilya ağırlık oranlarının değişimi, değirmen koşullarında çalışılmış, numuneler oda sıcaklığından  $1823\text{ }^\circ\text{K}$  e kadar termal analiz cihazında kontrollü ortamda ısıtılmış ve alaşım oluşumu araştırılmıştır. Kromitin redüksiyonunun  $1573\text{ }^\circ\text{K}$  de başladığı,  $1623\text{ }^\circ\text{K}$  de iki çeşit krom karbür,  $1673\text{ }^\circ\text{K}$  de ise Cr-Fe-karbürlerin oluştuğu gözlenmiştir [7].

Manganez oksit cevheriyle ilgili bir başka çalışmada, manganez oksit cevherinin indirgenmesi ile ilişkili reaksiyonların, küçük bir ekzotermik reaksiyonla  $330\text{ }^\circ\text{C}$  civarında başlamış olduğu,  $400\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $480\text{ }^\circ\text{C}$ 'de iki endotermik reaksiyonla devam ettiği ifade edilmiştir. Bu reaksiyonların kaynağı olan CO in üretilmesi ise yaklaşık  $350\text{ }^\circ\text{C}$ 'deki biyokütle gazlaştırma reaksiyonu yoluyla gerçekleşmiş olup, üretilen indirgeyici CO gazı ile manganez oksit cevherinin aşamalı olarak redüksiyonunun vuku bulduğu açıklanmıştır [8].

Bu çalışmada yurt dışına satılan Çanakkale bölgesi sülfürlü konsantre çinko cevherlerinin kavurma ve grafitle redüksiyon koşulları Termal analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiş olup, literatüre de önemli özgün bilgiler sunmaktadır.

## 2. YÖNTEM

### 2.1. Numunenin Temini ve Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan çinko sülfür konsantresi, Çanakkale-Yenice yöresinden OREKS MADENCİLİK LTD.ŞTİ'den temin edilmiştir. Konsantrenin homojen hale gelmesi için bilyalı ve halkalı değirmende öğütüldükten sonra neminden arındırılmak üzere etüvde bekletilmiş ve akabinde 200 mesh elek altına elenmiştir. Sonraki çalışmalar bu numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin aktivasyon işlemi için Fritch marka gezegensel bilyalı değirmen kullanılmıştır. Aktivasyon için WC hazne kullanılmış olup, aktivasyonda 10 mm çaplı WC bilyalar kullanılmıştır. Bilya/numune ağırlık oranı 30 olarak seçilmiştir. Aktivasyon hızı 600 devir/dakikadır (devir/dk.). Öğütme işlemleri kuru ortamda gerçekleştirilmiştir.

### 2.2. Kimyasal Analiz

Konsantrenin analizi XRF analizi BRUKER AXS'in S8 Tiger Dalgaboyu Dağılımlı XRF analiz cihazı ile yapılmış olup, analiz sonucu aşağıdaki Tablo 1 de verilmiştir.

**Tablo 1.** Numunenin kimyasal bileşimi.

Elementler (%)						
ZnO	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	SiO	PbO	CuO
%41,75	30,48	3,50	1,59	1,56 <sub>2</sub>	1,27	0,53
CaO	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Diğerleri	K.K.	Nem
0,37	0,26	0,20	0,16	0,09	18,03	1,16

### 2.3. SEM-EDS Analiz Çalışmaları

Konsantre cevherin  $600, 700, 800$  ve  $900\text{ }^\circ\text{C}$  kavurma yapılmış numunelere tane boyut analizleri, elementel analizler ve mapping çalışmaları yapabilen "Jeol JSM 6060 LV" marka cihaz ile taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS) kullanılarak yapılmıştır.

### 2.4. X-Işınları Difraktometresi Çalışmaları

Rigaku marka D/MAX/2200/PC model X-ışını cihazı ile  $600, 700, 800$  ve  $900\text{ }^\circ\text{C}$ 'de kavrulma yapılmış çinko sülfür cevherlerine mineralojik analizler yapılarak kalsinasyon sıcaklığının etki incelenmiştir.

### 2.5. Termal Analiz Çalışmaları

Termal analiz çalışmaları TA marka Q600 model simültane termal analiz cihazı kullanılarak  $10^\circ\text{C}/\text{dk}$ . ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir. Aktive edilmiş ve  $600, 700, 800$  ve  $900\text{ }^\circ\text{C}$ 'de kavrulmuş numunelerin grafitle karıştırılarak, redüksiyon koşullarının incelenmesi için yapılan çalışmalar havasız ortamda ve azot atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Numunelere oda sıcaklığından  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar dinamik bir termal işlem uygulanmıştır.

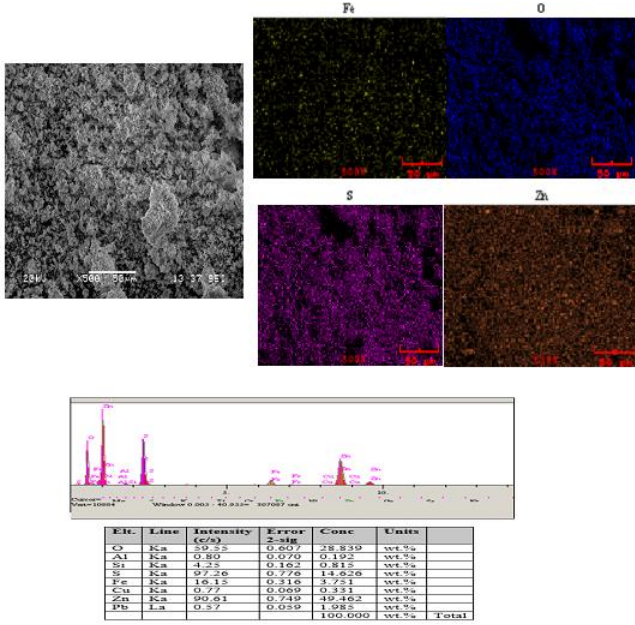
## 3. DENEYSEL BULGULAR

Kısım 2.1 de ifade edildiği şekliyle 30 dk aktive edilmiş konsantrenin  $600\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 240 dk kavrulmuş ürününün SEM-EDS ve Mapping analizi Şekil 1 de görüldüğü gibidir.

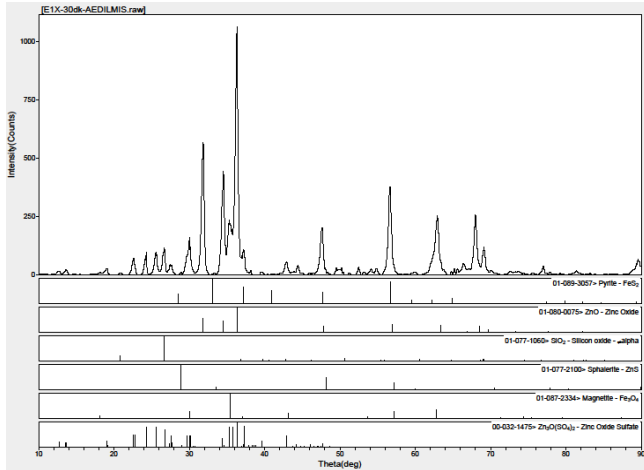
Şekil 1 de görüldüğü gibi üründe çinkodan sonra en çok bulunan elementin oksijen olduğu EDS değerlerinden anlaşılmaktadır. Kavurma sonucu yapıdaki kükürdün büyük oranda oksijen ile yer değiştirdiği gözükmektedir. Üçüncü en yüksek bileşenin kükürt olması ise oksidasyonun total oksitleyici kavurma şeklinde gerçekleşmediğini de ortaya koymaktadır.

30 dk aktive edilmiş ve  $600\text{ }^\circ\text{C}$  de kavrulmuş ürünün X-ray analizi ise Şekil 2'de görülmektedir.





**Şekil 1.** 600 devir/dk.'da, bilya/numune:30/1 şartlarında gezegendel değirmende 30 dk. aktive edilmiş, 600 °C'de 240 dk. kavrulmuş cevherin SEM-EDS ve mapping analizi.

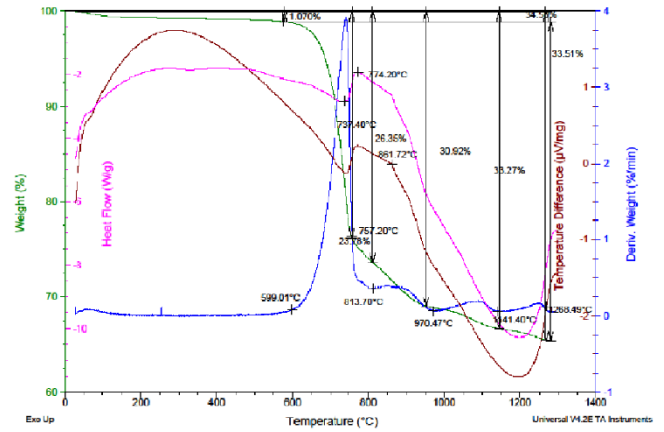


**Şekil 2.** Aktive edilmiş (30 dk.) ve 600 °C'de kavrulmuş ürünün X-ray analizi.

Şekil 2'den görüldüğü gibi kavrulmuş üründe ZnO yanında çok az miktarda da olsa ZnS ün varlığına da rastlanmış, yapıda sülfatların ( $Zn_3O(SO_4)_2$ ) da oluştuğu, piritin bir kısmının varlığını sürdürürken, diğer bir kısmının ise manyetite dönüştüğü de gözükmektedir.

30 dk. aktive edilmiş cevherin 600°C'de kavrulmuş ürüne grafit ilavesiyle hazırlanan numunenin TG, DTG, DTA ve DSC eğrileri Şekil 3'te verilmiştir.

Şekil 3'ten görüldüğü gibi toplam ağırlık kaybı %33,51 olarak gerçekleşmiştir. Yaklaşık 599 °C ye kadar %1,07'lik, bu sıcaklıktan sonra ise %32,44 lük ağırlık kaybı meydana gelmiştir. DTG de pikler şeklinde gözükken önemli ağırlık kayıplarının 599 °C -813,7 °C, 813,7 °C -970 °C, 970 °C -1141 °C ve 1141 °C -1268 °C sıcaklıklar arasında 4 adımda meydana geldiği gözükmektedir.



**Şekil 3.** Aktive edilmiş (600 devir/dk. da 30 dk.) mineralin 600°C'de kavrulmuş ürününe grafit ilavesiyle hazırlanan numunenin TG, DTG, DTA ve DSC eğrileri.

Şekil 3'te DTG deki en fazla ağırlık kaybı 599 °C-813,7 °C'ler arasında olup, numunede %26,35'lik ağırlık azalmasına sebep olmakta, bu da toplam ağırlık kaybının %78,63'lük kısmına tekabül etmektedir. Bu kayıp DTA ve DSC de ardarda meydana gelen endotermik-ekzotermik davranışla kendini göstermiştir. Ağırlık kaybından kaynaklı hadise, 600 °C'de yapılan kavurma işlemi sırasında yapıda oluşan sülfatların, termal analiz sırasında parçalanmasından oluşmuş olup, DCS ve DTA da 737,4°C'de endo pik vermiştir.

Kalsinedeki muhtemel olan ve kavurma sırasında oksitlenen bakırın (CuO veya  $Cu_2O$ ), soy davranması nedeni ile metale redüksiyonunun serbest enerji değerleri açısından en kolay olduğu ve ilk redüklenecekler arasında olduğu ifade edilmektedir. Hatta oluşacak bakırın, çinko ile alaşım yapabileceği de literatürde yer almaktadır [9]. Katı fazda var olması muhtemel bakır oksitlerin, sülfatların parçalanma hadiseleri nedeni ile gecikmeli olarak 737,4 °C'den sonra redüklenemeye başladıkları da muhtemeldir.

Kurşunun oksijene olan ilgisi de düşük düzeyde olduğundan bakırda olduğu gibi PbO in metale redüksiyonunun serbest enerji değerleri açısından kolay olduğu ve ilk redüklenecekler arasında olduğu ifade edilmektedir. Yapıdaki azlığı nedeni ile X-ray de varlığı ispatlanamasa da EDS de varlığı gözlemlendiğinden bu hadisenin olma olasılığı da mevcuttur.  $PbO + C = Pb + CO$  (veya  $PbO + CO = Pb + CO_2$ ,  $CO_2 + C = 2CO$ ) redüksiyon reaksiyonunun serbest enerjisinin negatif olduğu ve 600°C'lerde oluşabileceği, ancak bunun X-raylerden anlaşıldığı kadarıyla ortamda oksijen varsa sınırlı olarak gerçekleştiği, oksijen yoksa 500 °C'lerde bile metalik kurşuna redüklenebildiği ifade edilmiştir [10]. Bu nedenle bu reaksiyonun da bu aralıkta meydana gelmesi söz konusudur. Ayrıca yapıda varlığı X-ray ile (Şekil 2) ispatlanan bir miktar pirit ( $FeS_2$ ) de bu aralıkta parçalanırken kükürt gazı çıkararak oksitlenmektedir. Bakır ve kurşun oksitlerin redüksiyonu DTA ve DSC de 774,2 °C'de gözükken ekzotermik pik ile kanıtlanmıştır.

DTG deki büyük ikinci pik ile (813,7 °C-970,47 °C) muhtemelen şu hadiseler gerçekleşmektedir:

600 °C'de kavrulmuş üründe var olan  $Fe_3O_4$ 'ün  $FeO$  ya indirgenmesinin ( $Fe_3O_4 + CO = FeO + CO_2$ ) 650 °C'nin üzerinde gerçekleştiği de ifade edilmektedir. Ancak önceki adımda ifade edilen parçalanma ve bakır, kurşun redüksiyonları dolayısı ile bu hadise biraz gecikmeli olarak bu aralıkta gerçekleşmektedir.  $FeO$  in  $Fe$ 'e indirgenmesinin ise 705 °C'nin üzerinde mümkün olduğu, bu hadisenin de doğal olarak gecikmeli de olsa bu aralıkta meydana geleceği anlaşılmaktadır [11]. Burada 861 °C'de çok küçük bir ekzotermik pik gözükmiştir.

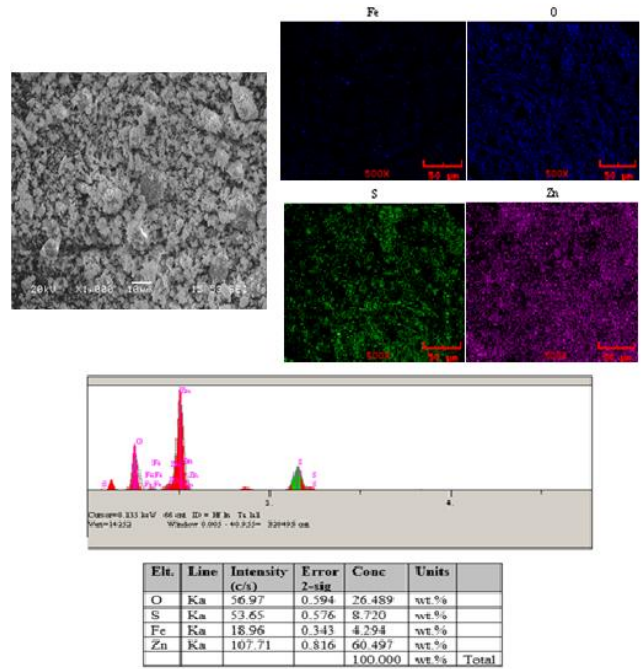
DTG deki büyük üçüncü pikle (970,47 °C-1141,4 °C) şu hadiseler gerçekleşmektedir:

ZnO in ise 920-950 °C'lerde indirgenmesinin başlayacağı ifade edilmiştir. Redüksiyon ürünü çinkonun daha önce redüklenmiş bakır, kurşun ve çinko metalleri ile alaşım yapabileceği de ifade edilmiş, diğer metal oksitlerinin redüksiyonuna nazaran çinkonun redüksiyon reaksiyonunun endotermik olduğu belirtilmiştir. DTA ve DSC eğrilerinin yönünün yaklaşık bu sıcaklıklardan itibaren aşağı (endo) yönde hareketi de bunu doğrulamaktadır. Çinkonun redüksiyonunun ( $ZnO + C = Zn + CO$ ) birkaç adımda cereyan ettiği de gözükmektedir.

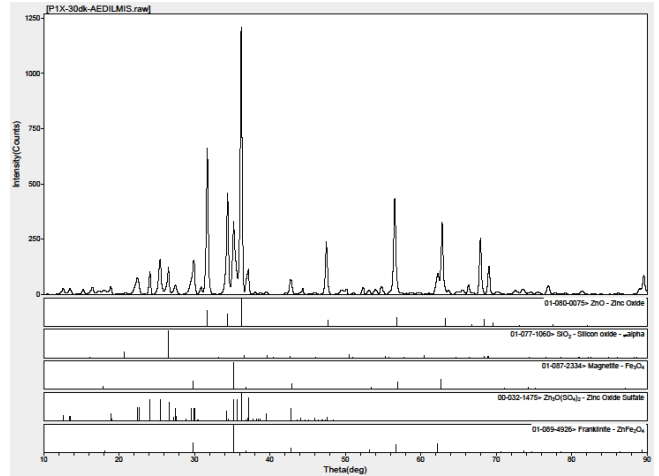
DTG'deki büyük dördüncü pik ile çinko oksitinin redüksiyonunun (1141,4 °C-1268,49 °C) devam etmekte olduğunu, DTA ve DSC eğrilerinin yönünün 970°C'den sonra aşağı yönde oluşması (endotermik reaksiyon) doğrulamaktadır.

Kısım 2.1 de ifade edildiği şekliyle 30 dk aktive edilmiş konsantrenin 700 °C'de 240 dk kavrulmuş ürünün SEM-EDS ve Mapping görüntüleri Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü gibi EDS analizinden numunenin % ağırlıkça en çok çinko içerdiği gözükmektedir. Kavrulmuş numunede kükürdün halen oldukça yüksek oranda var olmasına rağmen orijinal numuneye göre daha az olduğu da gözükmektedir. Öbür yandan numunedeki oksijen içeriğinin de ikinci en yüksek element olduğu, üçüncü bileşen olarak da kükürdün olduğu görülmektedir. Bu durum sülfatlayıcı kavurma işleminin gerçekleştiğini de göstermektedir.

Aktive edilip 700 °C'de 240 dk. kavrulmuş cevherin X-ray analizi Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'ten görüldüğü gibi 600 °C'de çok az miktarda da olsa  $ZnS$  ün varlığına da rastlanmış iken, 700 °C'de  $ZnS$  ün tamamının  $ZnO$ 'e dönüştüğü, sülfatların ( $Zn_3O(SO_4)_2$ ) da oluştuğu, piritin ise tamamının oksitlendiği, 600 °C'de numunede manyetit ( $Fe_3O_4$ ) oluştuğu, çinko ferritin ( $ZnFe_2O_4$ ) oluşmadığı, 700 °C'de ise çinko ferritin de oluştuğu gözükmektedir.



Şekil 4. 600 devir/dk.'da, bilya/numune:30/1 şartlarında gezegensel değirmende 30 dk. aktive edilmiş, 700°C'de 240 dk. kavrulmuş cevherin SEM-EDS ve Mapping analizi.

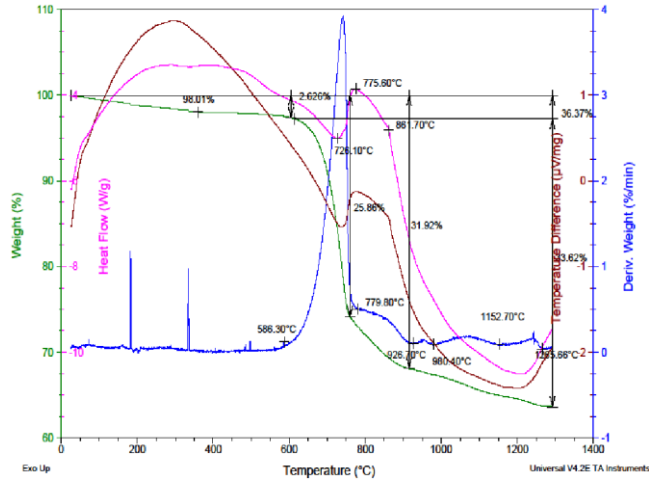


Şekil 5. 600 devir/dk.'da, bilya/numune:30/1 şartlarında gezegensel değirmende 30 dk. aktive edilmiş, 700°C'de 240 dk. kavrulmuş cevherin X-ray analizi.

600 devir/dk.'da 30 dk. aktive edilmiş cevherin 700 °C'de kavrulmuş ürüne grafit ilavesiyle hazırlanan numunenin TG, DTG, DTA ve DSC eğrileri Şekil 6'da verilmiştir.

Şekil 6'dan görüldüğü gibi toplam ağırlık kaybı %36,37 olarak gerçekleşmiştir. 600 °C'de kavrulmuş numuneye göre 700 °C'de kavrulmuş ürünün TG sinde daha fazla ağırlık kaybı meydana gelmektedir. Bu durum da 700 °C'de katı fazda daha fazla sülfatların teşekkül ettiğini göstermektedir.

En büyük pikin oluşmaya başladığı 586 °C'den sonra %33,74'lük bir ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Bu kayıp 600 °C'de kavrulmuş ürünün termal eğrisine göre kimyasal reaksiyonun hem daha düşük sıcaklıkta başladığını hem de daha fazla % ağırlık kaybının oluştuğunu göstermektedir. 600 °C'lik çalışma 4 adımlı gözükmüş iken, bu çalışmada ise DTG de pikler 5 adımda ve sırasıyla 586 °C-779 °C, 779 °C -926 °C, 926 °C -980 °C, 980 °C -1152 °C ve 1152 °C -1300°C sıcaklıklar arasında meydana gelmektedir.



**Şekil 6.** 600 devir/dk.'da 30 dk. aktive edilmiş cevherin 700°C'de kavrulmuş ürününe grafit ilavesiyle hazırlanan numunenin TG, DTG, DTA ve DSC eğrileri.

DTG'deki büyük ilk pik 600 °C'lik çalışmada 599 °C-813,7 °C'ler arasında meydana gelirken, 700 °C'lik çalışmada 586 °C-779 °C'ler arasında gerçekleşmektedir. Bu kayıpların sebebi aynı olup, bunu simgeleyen endo pik 600 °C'lik çalışmada 737,4 °C'de meydana gelirken 700 °C'lik çalışmada 726,1 °C'de endo pik vermiştir. Bu ilk pikin reaksiyon adımının ilk ve son sıcaklıkları ile maksimum pik sıcaklığının 600 °C'lik çalışmaya göre düşmesi, muhtemelen daha yüksek sıcaklıkta yapıda oluşmuş sülfatların daha fazla olmasından kaynaklı SO<sub>3</sub> kısmi basıncının daha fazla artmasıdır. Bakır ve kurşun oksitlerin redüksiyonu DTA ve DSC'de 600 °C'lik çalışmada 774,2 °C'de, 700 °C'lik çalışmada ise 775,6 °C'de ekzotermik pik şeklinde gözükmiştir.

600 °C'lik çalışmada DTG de büyük ikinci pik 813,7°C-970,47 °C'ler arasında meydana gelirken, 700 °C'lik çalışmada ise 779 °C-926 °C ve 926 °C-980 °C'ler arasında iki pik şeklinde gerçekleşmektedir. Daha önce 600 °C'lik ürün için ifade edilen gerekçeler ve çok küçük ekzotermik pikin sıcaklığı 700 °C'lik ürün için de aynıdır.

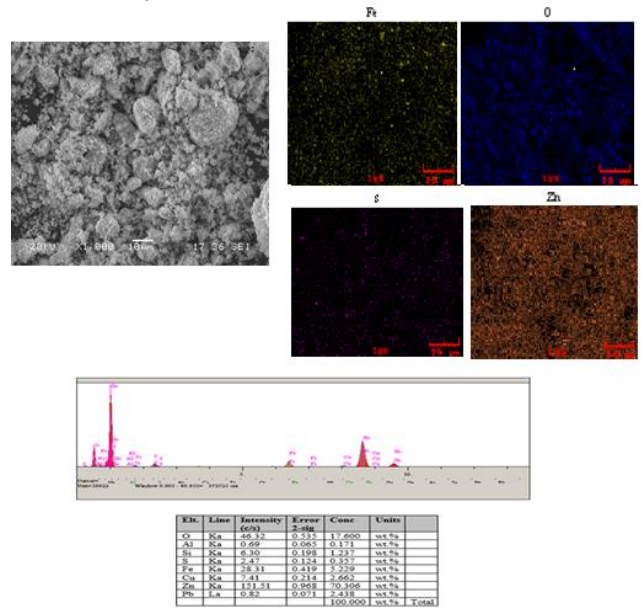
DTG'deki büyük üçüncü pikte (926°C-980°C'leri arasında) çinkoferritin redüklendiği, ilaveten DTA ve DSC eğrilerinde çinkonun oksitten de redüksiyonunun (ZnO+C=Zn+CO) endotermik olup, bu aralıkta cereyan ettiği de gözükmektedir.

DTG'deki büyük dördüncü ve beşinci pik ile (980 °C-1152 °C ve 1152 °C-1300 °C'ler arasında) DTA ve DSC eğrilerinde derin büyük bir vadi şeklinde bir endotermik reaksiyonların oluşması, çinkonun redüksiyonunun bu aralıkta da çok adımlı olarak devam ettiğini doğrulamaktadır.

Kısım 2.1'de ifade edildiği şekliyle 30 dk. aktive edilmiş konsantrenin 800 °C'de 240 dk. kavrulmuş ürünün SEM-EDS ve Mapping analizi Şekil 7'de görülmektedir.

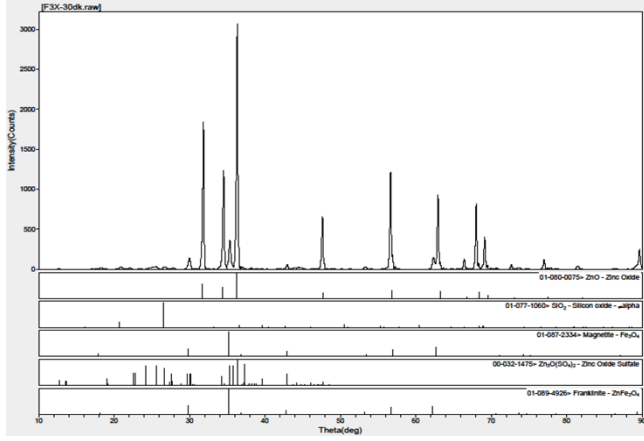
Şekil 7 kavrulmuş numunenin en çok çinko içerdiği, kükürdün hemen hemen yok denecek kadar az olduğu, oksijen içeriğinin ise son derece yüksek olduğu, kavurma işlemi sonucu oksit içeriğinin çok yükseldiğini de ispatlamaktadır. 700 °C'de üçüncü en yüksek element kükürt iken 800 °C'de çok az olması, sülfatların parçalandığını göstermektedir.

Kısım 2.1'de ifade edildiği şekliyle 30 dk. aktive edilmiş 800 °C'de 240 dk. kavrulmuş konsantrenin X-ray analizi Şekil 8'de verilmiştir.

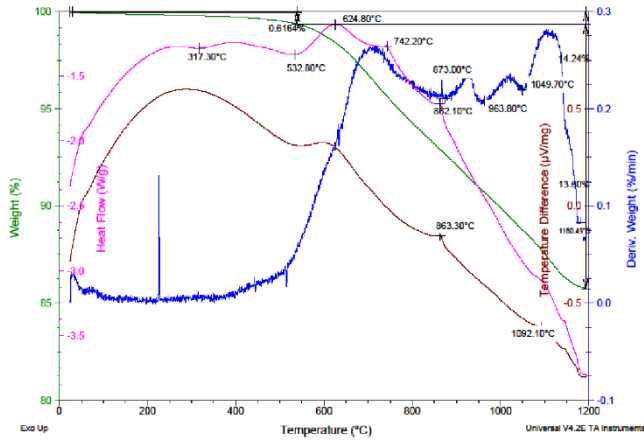


**Şekil 7.** 600 devir/dk.'da, bilya/numune:30/1 şartlarında gezegensel değirmende 30 dk. aktive edilmiş, 800 °C de 240 dk. kavrulmuş konsantrenin SEM-EDS ve Mapping analizi.

Şekil 8'den görüldüğü gibi 800 °C'de kavrulmuş numunede ZnO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Zn<sub>3</sub>O(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ve SiO<sub>2</sub> gözükmektedir. 600°C'de kavrulmuş numunede çok az miktarda da olsa ZnS ün varlığına da rastlanmış iken, 700 °C'de ve 800 °C'de ZnS'ün tamamının ZnO'e dönüştüğü görülmüştür. 600 °C ve 700°C'de fazla miktarda var olan sülfatların (Zn<sub>3</sub>O(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>) 800°C'de çok azaldığı gözükmektedir. 600 °C'de kavrulmuş üründe piritin bir kısmı varlığını sürdürürken, diğer bir kısmının ise manyetite dönüştüğü, 700 °C ve 800 °C'de ise piritin tamamının oksitlendiği görülmüştür. 600 °C'de çinko ferritin oluşmadığı, 700 °C ve 800 °C'de ise ilaveten çinko ferritin (ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) de oluşmaya başladığı gözükmektedir.



Şekil 8. 30 dk aktive edilmiş 800 °C'de 240 dk. kavrulmuş konsantrenin X-ray analizi.



Şekil 9. 600 devir/dk.'da 30 dk. aktive edilmiş cevherin 800°C'de kavrulmuş ürüne grafit ilavesiyle hazırlanan numunenin TG, DTG, DTA ve DSC eğrileri.

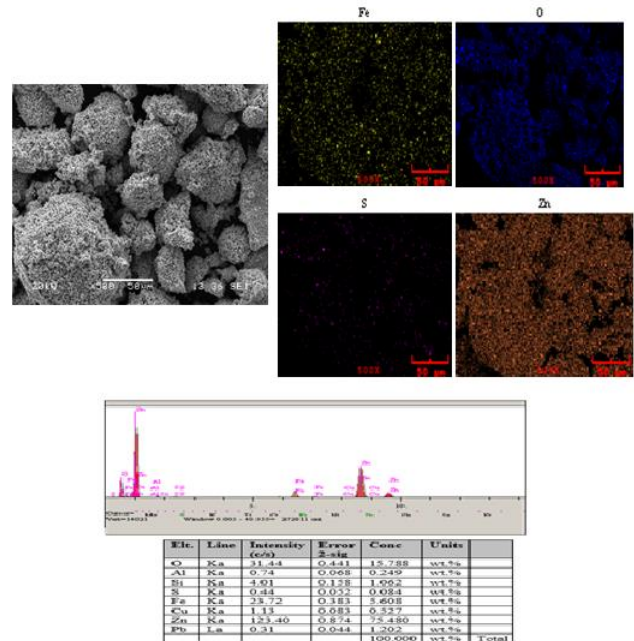
DTG'deki büyük ilk pikde (532 °C -873 °C'ler arasında) şu hadiseler gerçekleşmektedir:

Önceki çalışmalarda (600 °C ve 700 °C'lerde) ilk büyük pik endotermik hadise ile meydana gelirken, 800 °C'de ön kavurma sırasında parçalanmasından dolayı sülfatları çok çok az içeren bu ürünün termal analizi sırasında belirgin büyük bir endotermik pik aynı bölgede oluşmamıştır.

Konsantrede kavurma sırasında oksitlenen bakırın (CuO veya Cu<sub>2</sub>O), soy davranması nedeni ile metale redüksiyonunun en kolay olduğu oluşacak bakırın çinko ile alışım yapabileceği de literatürde yer almaktadır [11]. Kurşunun oksijene olan ilgisi de düşük düzeyde olduğundan PbO'in metale redüksiyonunun kolay olduğu, yapıdaki azlığı nedeni ile X-ray'de varlığı ispatlanamasa da EDS'de varlığı gözlemlendiğinden bu hadisenin olma olasılığı da mevcuttur. PbO'in Pb'a redüksiyon reaksiyonunun serbest enerjisinin negatif olduğu ve 600 °C'lerde oluşabileceği, ancak bunun X-raylerden anlaşıldığı kadarıyla ortamda oksijen varsa sınırlı olarak gerçekleştiği, oksijen yoksa 500 °C'lerde bile metalik kurşuna redüklenebildiği ifade edilmiştir [10].

800 °C'de kavrulmuş üründe varlığı ispatlanan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>'ün FeO'ya indirgenmesi 650 °C'nin üzerinde gerçekleşmektedir. Oluşan FeO'in Fe'e indirgenmesinin 705 °C'nin üzerinde mümkün olduğu, bu hadisenin de doğal olarak bu aralıkta meydana geleceği anlaşılmaktadır [11]. Katı fazda var olması muhtemel bakır oksitlerin ve kurşun oksitlerin redüksiyonu ile manyetit DSC'de 624 °C ve 722 °C'lerde toplam ısı yekünü olarak ekzotermik pikler şeklinde ortaya çıkması bu reaksiyonların komplike olarak bu aralıkta meydana geldiğini göstermektedir. DTG'deki ikinci büyük pik ile (873 °C-963 °C'de) muhtemelen şu hadiseler gerçekleşmektedir: X-ray'de kavrulmuş üründe varlığı gözlenen çinkoferritin ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>+3CO=ZnO+2Fe+3CO<sub>2</sub> şeklinde oluşan reaksiyonunun 900 °C'nin altında gerçekleşmeye başlayabileceği literatürde ifade edilmiştir. Daha önceki çalışmalarda parçalanma hadiselerinin sebep olduğu endo hadiselerden kaynaklı bu reaksiyon orada yüksek sıcaklıklarda meydana gelirken, çinko ferritin redüksiyonunun daha düşük olan bu sıcaklık aralığında meydana geldiği görülmektedir. ZnO'nin ise 920 °C-950 °C'lerde indirgenmesinin başlayacağı bilinmektedir. DTA ve DSC eğrilerinde çinko oksitten çinkonun redüksiyonu bu bölgede devam etmektedir. DTG'deki büyük üçüncü pikle (963 °C-1049 °C) ZnO'nin redüksiyonu devam etmektedir. DTG'deki büyük dördüncü pik ile (1049 °C-1180 °C) DTA ve DSC eğrilerinin yönünün bu sıcaklık aralığında aşağı yönde olması, derin büyük bir vadi şeklindeki bu eğilim, çinkonun redüksiyonunun bu aralıkta da devam ettiğine işaret sayılabilir.

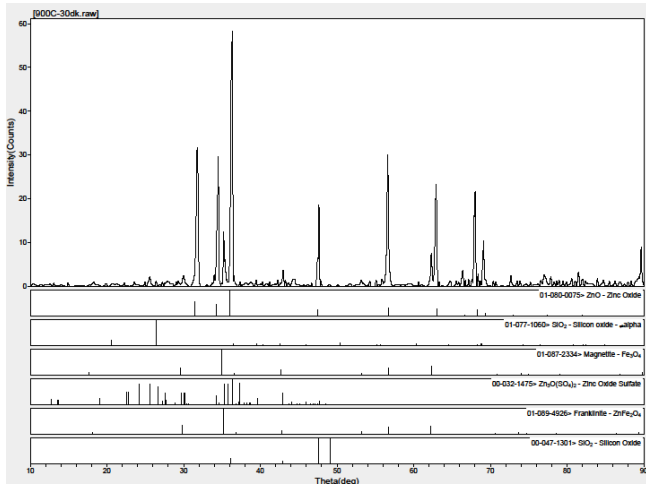
Kısım 2.1'de ifade edildiği şekliyle 30 dk. aktive edilmiş 900 °C'de 240 dk. kavrulmuş ürünün SEM-EDS ve Mapping analizi Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10. 600 devir/dk.'da, bilya/numune:30/1 şartlarında gezegensel değirmende 30 dk. aktive edilmiş, 900 °C'de 240 dk. kavrulmuş cevherin SEM-EDS ve Mapping analizi.

Şekil 10'da kavrulmuş numunenin elementel olarak ağırlıkça % olarak en çok çinko içerdiği gözükmektedir. Bu numunede kükürt yok denecek kadar azdır. Ayrıca numunedeki oksijen içeriğinin son derece yüksek olduğu da görülmektedir. EDS analizinden ikinci en yüksek element oranının ağırlıkça % olarak oksijen olduğu da gözükmektedir. 700 °C'de kavrulmuş numunelerde üçüncü en yüksek element olarak kükürt gözükürken 800 °C ve 900 °C'de çok az olması, sülfatların oluşmadığını, parçalandığını göstermektedir. Mapping analizinde de kükürdü temsil eden renk dağılımının çok az olduğu da gözükmektedir.

Kısım 2.1'de ifade edildiği şekliyle 30 dk. aktive edilmiş 900 °C'de 240 dk. kavrulmuş cevherin X-ray analizi Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 11'den görüldüğü gibi numunede ZnO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Zn<sub>3</sub>O(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ve SiO<sub>2</sub> gözükmektedir. 600°C'de kavrulmuş numunede çok az miktarda da olsa ZnS ün varlığına rastlanmış iken, 700 °C, 800 °C ve 900 °C'de kavrulmuş ürünlerde ZnS'ün tamamının ZnO'ye dönüştüğü görülmüştür. Ayrıca yapıda 600 °C, 700 °C ve 800 °C'de var olan sülfatların (Zn<sub>3</sub>O(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>) 900 °C'de çok çok azaldığı gözükmektedir. 600 °C'de kavrulmuş üründe piritin bir kısmı varlığını sürdürürken, diğer bir kısmının ise manyetite dönüştüğü gözükmekte, 700 °C, 800 °C ve 900 °C'de kavrulmuş ürünlerde ise piritin tamamının oksitlendiği görülmüştür. 600 °C'de çinko ferritin (ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) oluşmadığı, 700 °C, 800 °C ve 900 °C'de kavrulmuş numunelerde çinko ferritin artan oranda oluştuğu gözükmektedir.



Şekil 11. 600 devir/dk.'da, bilya/numune:30/1 şartlarında gezegensel değirmende 30 dk. aktive edilmiş, 900 °C'de 240 dk. kavrulmuş cevherin X-ray analizi.

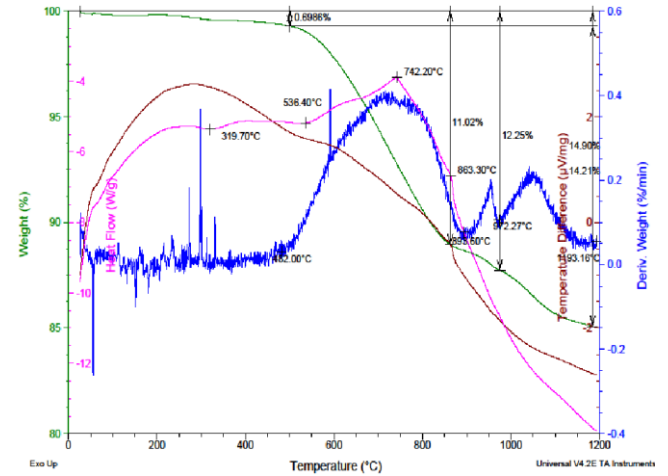
600 devir/dk.'da 30 dk. aktive edilmiş konsantrenin 900 °C'de kavrulmuş ürününe grafit ilavesiyle hazırlanan numunenin TG, DTG, DTA ve DSC eğrileri Şekil 12'de verilmiştir. Şekil 12'den görüldüğü gibi toplam ağırlık kaybı %14,9 olarak gerçekleşmiştir. Yaklaşık 482 °C ye kadar %0,7'lik bir ağırlık kaybı meydana gelmiş iken, bu sıcaklıktan sonra ise %14,2'lik ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Bu ağırlık kaybının 3 adımda meydana geldiği DTG'den gözükmektedir. Bu ağırlık kayıpları sırasıyla 482 °C-893 °C, 893 °C-972 °C ve 972 °C-1193 °C'ler arasında

meydana gelmektedir. Diğer sıcaklıklarda ağırlık kayıpları 4 ya da 5 adımlı olarak meydana gelirken, 900 °C'de 3 adımlı olarak meydana gelmiştir.

DTG'de görülen büyük ilk pikte (482 °C-893 °C'de) muhtemelen şu hadiseler gerçekleşmektedir:

Kurşunun oksijene olan ilgisi bakır oksitte olduğu gibi PbO in metale redüksiyonunun (PbO+C=Pb+CO veya PbO+CO=Pb+CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>+C=2CO) serbest enerji değerinin negatif olduğu ve 600 °C'lerde bile oluşabileceği, oksijen yokluğunda 500 °C'lerde bile metalik kurşuna redüklenebildiği ifade edildiğinden bu reaksiyonun da bakır oksitin redüksiyonu gibi bu aralıkta meydana gelme ihtimali söz konusudur [7, 8]. 900 °C'deki üründe var olan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>'ün FeO'ya indirgenmesinin (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>+CO=FeO+CO<sub>2</sub>) 650 °C'nin üzerinde gerçekleştiği de bilinmektedir.

Oluşan FeO'ın Fe'e indirgenmesinin 705 °C'nin üzerinde mümkün olduğu, bu hadisenin de doğal olarak bu aralıkta meydana geleceği anlaşılmaktadır [11].



Şekil 12. 600 devir/dk.'da 30 dk. aktive edilmiş cevherin 900 °C'de kavrulmuş ürününe grafit ilavesiyle hazırlanan numunenin TG, DTG, DTA ve DSC eğrileri

DTG'de görülen büyük ikinci pikte (893 °C-972 °C'leri arasında) muhtemelen şu hadiseler gerçekleşmektedir:

ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>'in ZnO'ye dönüşümü, akabinde ZnO'nin ise 920 °C-950 °C'lerde indirgenmesine eşlik edeceği, redüksiyon ürünü çinkonun daha önce redüklenmiş bakır ve kurşun metalleri ile alایش yapabileceği de ifade edilmiştir. Diğer metal oksitlerinin redüksiyonuna nazarın çinkonun redüksiyon reaksiyonunun endotermik olduğu gözükmekte, DTA ve DSC eğrilerinin yönünün yaklaşık bu sıcaklıklardan itibaren aşağı (endo) yönde hareketi de bunu doğrulamaktadır. Çinkonun redüksiyonu sonraki üçüncü adımda (972 °C-1193 °C'ler arası) da devam etmektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Çanakkale Yenice yöresi çinko konsantrelerinin sfalerit türü olduğu tespit edilmiştir. Cevherde en çok elementel olarak

çinko yer almaktadır. Ayrıca az miktarda bakır ve kurşunun da varlığına rastlanmıştır. Düşük sıcaklıklarda (600 °C ve 700 °C'de) kavurma işleminin sülfatlayıcı olarak gerçekleştiği, daha yüksek sıcaklıklarda oksitlerin oluştuğu, kavurma sırasında çinko ferritlerin de teşekkül ettiği anlaşılmıştır. Çinko oksitinin redüksiyonunun grafitle 900°C'lerde başladığı görülmüştür.

**Yazar Katkıları:** Kavramsal tasarım – Ahmet ALP, Faysal Demir.; Literatur Araştırması – Harun Gül, Mustafa Akçıl.; Yazım – Faysal Demir, Hasan Algül.; Deneysel çalışmalar – Faysal Demir

**Conflict of Interest:** Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir. Bu çalışma, 2018 yılında kabul edilen Faysal DEMİR tarafından " Çinko sülfür cevherlerinin oksidasyon ve redüksiyon koşullarına mekanik aktivasyonun etkisi" başlıklı YL tezinden üretilmiştir.

**Financial Disclosure:** Yazarlar bu çalışmanın finansal destek almadıklarını beyan etmişlerdir

#### KAYNAKÇA

[1] Aras Ali, "Koyulhisar sfalerit konsantrasyonunun asidik ferrik klorürlü ortamda liçing şartlarının belirlenmesi.", Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Bölümü, 2003.

[2] Dedemli İsmail, "Sfaleritin asidik potasyum dikromatlı (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) ortamda çözündürülmesi.", Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Bölümü, 2008.

[3] [https://sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2018/11/09\\_Madencilik\\_Madencilik.pdf](https://sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2018/11/09_Madencilik_Madencilik.pdf)  
Dokuzuncu kalkınma planı 2007-2013 madencilik özel ihtisas komisyonu raporu, Ankara 2007. (Erişim zamanı;

Aralık, 21, 2020).

[4] J. Han, W. Liu, W. Qin, Y. Zheng and H. Luo, "Optimization Study on the Leaching of High Iron Bearing Zinc Calcine After Reduction Roasting", Metallurgical And Materials Transactions B, vol. 47B, pp. 686-693, February 2016.

[5] A. D. BAŞ Et Al. , "Hydrometallurgy Over The Years - Geçmişten Günümüze Hidrometalurji," Madencilik Bilimsel , vol.5, pp.39-50, 2014.

[6] D. Chen, B. Peng, L. Y. Chai, N. Peng, M. Hu, and Y. C. Li, "Selective reduction reaction process of zinc ferrite and its application in treatment of zinc calcine," Zhongguo Youse Jinshu Xuebao/Chinese J. Nonferrous Met., vol. 25, no. 8, 2015.

[7] X. Hu, Q. Yang, L. Sundqvist Ökvist, and B. Björkman, "Thermal Analysis Study on the Carbothermic Reduction of Chromite Ore with the Addition of Mill Scale," Steel Res. Int., vol. 87, no. 5, pp. 562-570, 2016.

[8] Y. Zhao, G. Zhu, and Z. Cheng, "Thermal analysis and kinetic modeling of manganese oxide ore reduction using biomass straw as reductant," Hydrometallurgy, vol. 105, no. 1-2, pp. 96-102, 2010.


[9] Kahvecioğlu, Özgenur, "Pirinç küllerinin pirometalurjik değerlendirilmesi". Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 2002.


[10] M. Xing, Y. Wang, Y. Yang, X. Huang, C. Li, and H. Hong, "Lead recovery from CRT funnel glass through carbon thermal reduction enhanced acid leaching process," Chinese J. Environ. Eng., vol. 10, no. 12, pp. 7271-7276, 2016.


[11] Fuat Yavuz Bor, Ekstraktif Metalurji Prensipleri cilt-II, İTÜ Matbaası, 1990.

## Developing Turbulent Flow in Pipes and Analysis of Entrance Region

\*<sup>1</sup>Eyüb Canlı, <sup>2</sup>Ali Ateş, <sup>3</sup>Şefik Bilir

<sup>1</sup>Selçuk University, Technology Faculty Mechanical Engineering Department, Konya, ecanli@selcuk.edu.tr, 

<sup>2</sup>Selçuk University Ilgın Vocational High School, Department of Machinery and Metal Technologies, Konya, aates@selcuk.edu.tr, 

<sup>3</sup>Konya Technical University Faculty of Engineering and Natural Sciences Mechanical Engineering Department, Konya, sbilir@ktun.edu.tr 

Research Paper

Arrival Date: 12.11.2020

Accepted Date: 18.03.2021

### Abstract

Turbulent flows have complex structures due to its nature and its' analyses are hard either by numerical or experimental means. Hydrodynamic development of turbulent flow is also complex. In this study, velocity and turbulence distributions in hydrodynamic entrance length of pipes are investigated numerically depending on axial and radial locations. Implications of these distributions are qualitatively evaluated in terms of heat transfer. Literature was surveyed for a single empirical expression that provides velocity profile directly according to Reynolds number, radial and axial locations. Requisite for computational fluid dynamics in hydrodynamic entry length of pipes is stressed by assessing turbulence magnitudes in radial and axial directions. Definition of the development length and effects of the definition in respect of heat transfer are discussed. An axisymmetric pipe entrance region was analyzed by means of a commercial CFD code with nondimensional parameters. Therefore, dimensional parameters reduce into one dimensionless independent parameter, i.e. Reynolds number. Four different Reynolds numbers that are  $5 \times 10^3$ ,  $1 \times 10^4$ ,  $5 \times 10^4$ ,  $1 \times 10^5$  were used in calculations.  $k-\epsilon$  turbulence model and standard wall functions were used for turbulence modeling. Hydrodynamic entry length, velocity and turbulence values are presented by means of axial and radial profiles. According to the obtained results, two different directions of radial velocity component values exist in the hydrodynamic entry length that would lead to different radial thermal convection effects. It is found that simultaneously developing velocity profiles and turbulence quantities leads to a characteristic centerline velocity profile. Also, it is seen that a good resolution in hydrodynamic entrance length can be easily achieved by computational fluid dynamics. A detailed composition of hydrodynamic turbulent entrance length analysis, its physical explanations due to simultaneously developing hydrodynamic boundary layers and turbulence production, definition aspects of the entrance length in terms of heat transfer and literature survey for analytical solution of the region are provided.

**Keywords:** Axisymmetric flow, CFD, Developing turbulent pipe flow, Hydrodynamic entrance length,  $k-\epsilon$  turbulence model.

### Nomenclature

#### Symbols

$A$ :	Damping factor	$\kappa$ :	von Karman constant
$\alpha$ :	Empirical constant	$l$ :	Mixing length (m)
$b$ :	Mathematical expression abbreviation	$L$ :	Length or characteristic length (m)
$d$ :	Ordinary derivative	$\lambda$ :	Empirical constant
$\delta$ :	Boundary layer thickness	$\mu$ :	Dynamic viscosity (kg/m·s)
$D$ :	Diameter (m)	$n$ :	Reciprocal exponent
$e$ :	Exponential function	$\nu$ :	Kinematic viscosity (m <sup>2</sup> /s)
$\epsilon$ :	Dissipation of turbulence kinetic energy (m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ) / eddy diffusivity (m <sup>2</sup> /s) / Relative error	$p$ :	Pressure (Pa) /
$\eta$ :	Transformed variable		Order of discretization
$f$ :	Friction coefficient / dimensionless stream function / Output of mesh independency	$\Pi$ :	Empirical constant
$G$ :	Factor (1/m·s)	$\rho$ :	Density (kg/m <sup>3</sup> )
$\gamma$ :	Function	$\tau$ :	Shear stress (Pa)
$h$ :	Node spacing (m)	$\psi$ :	Transformed variable
		$r$ :	Distance in radial direction (m) /
			Mesh refinement ratio
		$R$ :	Radius (m)
		$u, U$ :	Velocity (m/s)

\*Corresponding Author: Selçuk University, Technology Faculty Mechanical Engineering Department, Konya, ecanli@selcuk.edu.tr

Doi: 10.21541/apjes.818717

$x$ : Distance in axial direction (m)  
 $y$ : Wall distance (m)

#### Abbreviations

CFD: Computational Fluid Dynamics  
 GCI: Grid Convergence Index  
 Re: Reynolds number

#### Subscripts

$0$ : Starting point  
 $c$ : Centerline  
 $D$ : Development

$i$ : Inner  
 $m$ : Momentum or mean  
 $\tau$ : Related to wall stress  
 $tr$ : Transition  
 $x$ : According to axial length

#### Superscript

$+$ : Dimensionless according to wall  
 $*$ : Dimensionless variable  
 $'$ : Derivative  
 $I$ : Inner  
 $F$ : Flat plate

## 1. INTRODUCTION

Present day control engineering has increased its capabilities by means of machine learning approaches. Human factor decreases in time by means of these artificial intelligence applications. However, data masses are needed in order to have machine learning approaches work as desired or in other words, to be trained. Data is mostly provided by research. This data can be divided into two types that are transient and steady for systems' operations depending on time. Different system responses can be observed at system startups, stops and instantaneous changes in the operation. These system responses are transient and they are filtered in steady regime. If transient responses are critical for an engineering system, then transient data is needed. This situation is valid for heat transfer works. Transient regime heat transfer is very different than steady regime at system startups, stops and instant changes. For instance, thermal convection at the initiation of a thermal boundary condition or change starts from zero and rises to infinity and then decreases to its steady value in time [1, 2]. Periodic changes in several conditions also induce transient changes [3-5]. Hydrodynamic entrance length flow field contributes and effects transient heat transfer. Pipes can be given as an example. If the hydrodynamic entrance length is comparatively long enough for the remaining part of the pipe, both transient and steady heat transfer regimes would be affected by the pattern in this region. Accordingly, this work aims to analyze hydrodynamic entrance length by velocity and turbulence distributions. By this way, its implications on transient and steady heat transfer regimes can be qualitatively evaluated. Also, these distributions can be used for calculating heat transfer. On the other hand, this work uses its obtained flow field to examine different approaches in the practice for defining hydrodynamic development length based on change rates of centerline velocity or pressure drop rate. Additionally, literature is surveyed for possible analytical and empirical means for resolving this region. Finally, the general pattern of the turbulent hydrodynamic entrance length of the pipe is explained by the simultaneous development of hydrodynamic boundary layers and turbulent production. Consequently, this work offers a composition of analyses for turbulent hydrodynamic entrance length of pipes. This type and content of composition has not been encountered in the

literature and to the best knowledge of the authors, it will contribute to the literature by basing a detailed figure.

Pipes and flow in pipes can be part of a numerical, experimental or analytical heat transfer investigation. However, analytical approaches cannot solve turbulence directly due to its nature. Therefore, experimental velocity profiles were used, especially in early works. There are difficulties for using experimental velocity profiles in hydrodynamic entrance length since velocity profiles spatially change in this region. On the other hand, developed velocity profile is single. Both analytical and numerical solutions of the energy equation were conducted mostly for hydrodynamic developed flow in heat transfer studies for this reason [6, 7]. Literature survey of reference [8] also shows this fact. In those kinds of works, flow field can be drawn from an empirical correlation or an analytical expression. Analytical solutions for turbulent heat transfer in hydrodynamic entrance length, on the other hand, partly use half analytical half empirical approaches, dividing flow field into regions in radial and axial direction for utilizing boundary layer theory and empirical profiles [9, 10]. Additionally, there are more recent analytical solution trials with higher level mathematics [11]. Some instances are provided in the literature survey. Nevertheless, all above mentioned approaches are burdensome comparing with Computational Fluid Dynamics (CFD) considering its developing abilities due to advancing technology. Therefore, using CFD to obtain spatially changing velocity distribution for heat and mass transfer where entrance length and its effects are important seems logical.

In the region where flow is hydrodynamically developing, thermal convection exists in at least two directions since radial velocity component emerges. Therefore, hydrodynamic entrance length should not be ignored if developed flow length has same order of magnitude [12]. On the other hand, transient turbulent conjugate heat transfer for pipes is further an interesting case since not only transient thermal development is effected by hydrodynamic development but turbulent diffusion also contributes to the heat transfer. Hydrodynamic development of turbulent flow is complex due to nature of turbulence. Turbulent structures also enhance diffusion and hence heat transfer. A PhD dissertation has been published by the first



authors on simultaneously developing turbulent flow in thick walled pipes for transient heat transfer [8]. Also, some preliminary works from the PhD thesis were published previously [13, 14]. Present work is a further step of sharing this experience. For the validation and evaluation, the ultimate comparison of the results of the present paper with the literature is done by using results of Bryant, et al. [15]. This work actually focuses on turbulent pipe flow for hydrodynamic entrance length. However, authors also consider pipe entrance geometry and tried several geometrical parameters. Nevertheless, the first case out of five in their work is exactly the same in terms of geometry. Since they used  $k-\omega$  SST turbulence model with up to 19 million nodes, results of this literature paper is perfect for comparison. There are three more literature reports on turbulent pipe flow in the hydrodynamic entrance length while they also use CFD [16-18]. All four papers are used for comparison, validation and evaluation of the turbulent entrance length. The differences of the present work with the four literature papers are; the way of nondimensionalization, utilized turbulence model with relatively low number of mesh elements and low calculation cost; tackled subjects such as means for analytical solution, development definition, simultaneous development that composing the value of the present work.

Before proceeding to the next section, a brief historical flow of events will be laid out in terms of the related literature. Also, traces of a single empirical correlation for resolving the hydrodynamic developing flow region will be searched. Early attempts for resolving turbulent heat transfer in pipes in radial and axial directions used analytical means mostly [19-21]. It is seen that those early works used readily available flow field data for turbulent flow [22]. Also, most works focus on developed flow. One prominent approach at that time is to use generalized solution for the flow field [23] by using Eigen values. There were also works trying to resolve turbulent flow by turbulence modeling. For instance, by means of Boussinesq Turbulent Viscosity Hypothesis and Prandtl's Mixing Length Theorem (in various versions), turbulent entrance region was tried to be solved. Boundary layer theory is used alongside empirical profiles. Turbulent diffusivity or mixing length algebraic models are used [24]. However, it can be said that energy equation solutions were done with analytical approaches. To this point, it is very hard to mention about a correlation or simple expression that uses radial, axial length and Reynolds number (Re) as inputs and gives radial velocity profiles. Accordingly, turbulence modeling and numerical methods seem indispensable for turbulent pipe flow, especially in entrance length.

An important reference on analytical solution of turbulent pipe flow is the book of Cebeci and Bradshaw [10]. This book contains several semi-analytical and numerical approaches as well as empirical correlations while an important part is dedicated to pipe flow. Likewise, a very recent book exists, dedicated to analytical methods [25]. This book includes heat transfer in pipes as parabolic problems and provides analytical solutions for Sturm-Liouville systems with large

Eigenvalues. The closest empirical expression to the one that present authors are looking for is given by Salami [9]. Salami uses boundary layer theory while dividing entrance region of turbulent pipe flow into more regions (i.e. six) than commonly practiced. Details are given in next section. Two empirical correlations are given in a recent paper [18]. Boundary layer solution for axisymmetric geometries is still being used and reader can find recent papers [26]. In another paper, authors investigated turbulent swirl flow by boundary layer solution with integral method [27]. Laplace transformation can be used in semi-empirical works at transient turbulent situation where quasi-steady models are insufficient for higher velocities leading to discrepancies with experimental results for same flow resistances. Since academic papers are relatively better on results and evaluations rather than methodology details, and boundary layer solution seems prominent in turbulent pipe heat transfer, dissertations can be a source for details of methodology. Stoltenkamp reported such work that includes details of boundary layer theory in an appendix [28]. Early works use empiricism mostly for obtaining empirical correlations for development length, pressure drop or maximum centerline velocity. The work of Singh et al. uses various correlations and power-law velocity profiles for an annulus and then presents them for friction factors [29]. Logarithmic correlations for turbulent pipe flow of power law fluids are given by Trinh [30]. Although paper of McEligot et al. focus on variable thermo-physical properties of gases depending on temperature for turbulent pipe flow, their literature survey show how quasi-steady solution and eddy diffusivity was common at that time for heat transfer problems [31]. Parallel plates are different from pipes, but analytical methodologies for analyzing two can be similar. Sakakibara and Endoh reported a heat transfer analysis of thick walled parallel plates using eigenvalues and eigenfunctions of the Sturm-Liouville problem and eddy diffusivity model [32]. The study is a typical example of that era for using tabulated data by generalization. Slaiman et al. presents a wide list containing expressions with references for obtaining a general idea about eddy diffusivity models [33]. A more recent and interesting work on analytical solution of turbulent pipe flow is done by Biglarian et al., using second-gradient theory [11]. The linear momentum equation in the case of second-gradient theory for turbulent pipe flow is reduced to an ordinary differential equation of fourth order, which is solved by analytical method. Algebraic models for eddy viscosity were compared to differential ones and a basic example can be given as Martinuzzi and Pollard [34]. For above references and present studies, experimental data of Barbin and Jones in graphical form is very clear for smooth pipe entrance length [35]. Another literature review for experimental results at that time is given by Klein [36]. Of course there are plenty of more recent and more precise experimentation and reports [37]. Recently pipe hydrodynamic entrance length and its subdivisions have been analyzed by CFD [17]. Author also considers surface roughness for several metals and compared results with literature empirical correlations. Finally, it is worth to mention about stream function solution as a

numerical tool for solving developing pipe flow and it was more common earlier periods of numerical studies [38].

In this work, velocity and turbulence resolution of pipe hydrodynamic entrance length is aimed. CFD is utilized for this task. On the other hand, literature is surveyed for a direct empirical correlation or expression that gives axial velocity profile in radial direction in the hydrodynamic entry region. Semi-analytical approaches are introduced as a general framework. CFD analysis using turbulence viscosity concept with standard wall functions is presented in order to give velocity and turbulence quantity profiles in the pipe hydrodynamic entry length. A sum up of historical evolution on the topic is done and recent knowledge is presented in brief. Development length definitions are discussed and their implications on heat transfer works are evaluated. Also simultaneous development of the boundary layers and turbulence production is examined.

## 2. THEORETICAL APPROACH

### 2.1. CFD Details

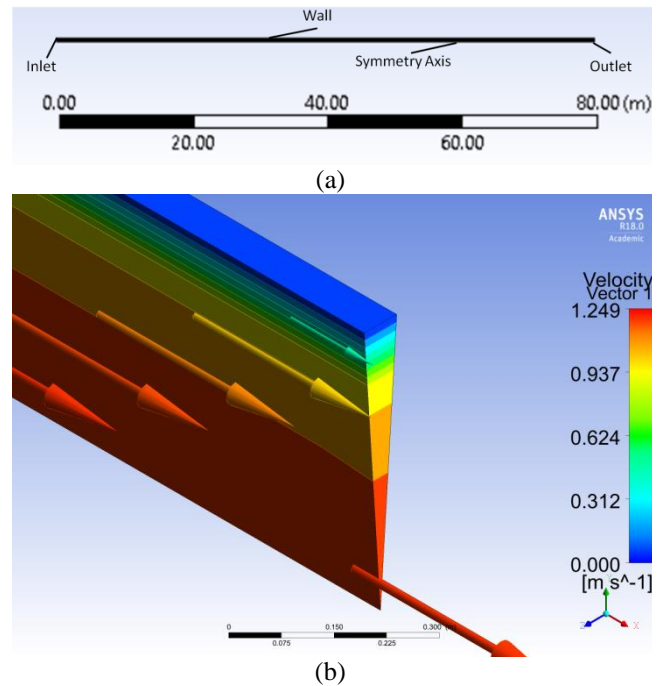
Fluent code in ANSYS 18 was used for CFD analysis of turbulent flow in axisymmetric pipe geometry for hydrodynamic entry length. In order to reduce dimensional parameters into one nondimensional parameter, which is Re, and obtain non-dimensional results, an approach suggested by Patankar was used[39]. In this approach, governing equations of flow for Newtonian fluid is assumed to be dependent only on Re number. Then, one parameter having dimension is changed while others set to unity in such a way that Re results in desired value. In this work, pipe inner diameter is set to 1 m ( $D=1$  m), uniform inlet velocity in axial direction is set to 1 m/s ( $u_{inlet}=1$  m/s), constant density is set to 1 kg/m<sup>3</sup> ( $\rho=1$  kg/m<sup>3</sup>) and constant viscosity is set to 1/Re kg/m\*s ( $\mu=1/Re$  kg/m\*s). This setup is given in Table 1.

**Table 1.** Parameter setup for dimensionless analysis

$u_{inlet}$ (m/s)	$D$ (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (kg/m*s)	Re
1	1	1	1/Re	$5 \times 10^3$
1	1	1	1/Re	$1 \times 10^4$
1	1	1	1/Re	$5 \times 10^4$
1	1	1	1/Re	$1 \times 10^5$

Results can be presented in nondimensional form with the setup in Table 1. This presentation necessitates nondimensionalization of all results by dividing them to the parameters in Table 1. Motion variables are divided by inlet velocity and length variables are divided pipe diameter. Since these denominators are equal to unity, numerical results obtained from CFD code can be directly used without using any dimension. This simple arrangement is not given explicitly in many nondimensional CFD works. In fact, it has not been seen in any reviewed papers by the authors. Accordingly, the present work also provides a chance to benchmark this approach.

Since pipe diameter is set to 1 m, axisymmetric geometry should be drawn as a rectangle having short edge of 0.5 m. Preliminary runs showed that 80 pipe diameters length for calculation domain is more than enough for the turbulent flow to reach development. Therefore, long edge of the rectangle geometry was set to 80 m. Very low aspect ratio of the geometry (which is 0.5 m divided by 80 m and equals to 0.00625) makes its figures harder to give in a single image. Nevertheless, Figure 1 shows the scale of the geometry and how CFD software interprets it.



**Fig. 1.** (a) Axisymmetric geometry (b) CFD post processor interpretation of the geometry for Re=5000 and Coarse Mesh

Figure 1b shows an axisymmetric geometry by Cartesian coordinate system. It is known that axisymmetric geometry has zero thickness but this is different from 2D planar geometry since there should be a differential tangential length difference between pipe axis and wall. At the pipe axis, the 2D volume goes to singularity. The differential tangential length is also drawn by using Cartesian coordinates; and therefore imposes an amount of numerical uncertainty. The mesh is actually a 2D domain without any tangential depth but tangential difference is included by modification of governing equations. An explanatory work has been published recently by the authors on how governing equations are modified for axisymmetric flow [8, 40]. The CFD software used 2D results for filling the quasi 3D domain in the post processor.

All discretization schemes for momentum and pressure terms were selected as “power-law” discretization scheme, which is described in Patankar’s book [39]. Simple algorithm was used for pressure velocity coupling. Standard  $k-\epsilon$  turbulence model described in Launder and Spalding [41] was used with standard wall functions. This enables using greatly reduced numbers of mesh elements with uniform distribution

in spatial domain. The reason of low computational cost comes from standard wall functions that do not require resolution of viscous-laminar sub-layer. Therefore, viscous-laminar sub-layer is covered with one mesh element in radial direction. The selected spatial discretization and SIMPLE algorithm also do not necessitate high computational cost. However, its order of spatial dependence will be shown by Grid Convergence Index (GCI) in the following part of this section. Fluid was assumed incompressible and having constant properties. No slip wall was set for wall boundary condition. No viscous dissipation was assumed and therefore energy equation was omitted. Initial values of  $k$  and  $\epsilon$  are calculated from pipe diameter and approximately 3.4% turbulence intensity. The turbulence intensity at the inlet is calculated by considering  $Re$  and empirical equations in Versteeg and Malalasekera [42]. For the derivation of governing equations, reader may refer to CANLI, et al. [40].

Mesh structure in the CFD solution should not affect results. This is called “mesh independency”. Mesh independency actually depends on spatial discretization. However, mesh is build prior to the numerical solution. Therefore, a trial and error process is utilized in order to detect if mesh structure has an effect on the results. Also, the order of spatial discretization can be determined during this trial and error process. A structured mesh is used since the 2D rectangle geometry enables easy implementation of structured mesh. Accordingly, orthogonal quadrilateral mesh elements were obtained. CFD favors these types of mesh elements because interpolation schemes are simpler in this case. With structured quadrilateral mesh elements, “Green-Gauss Cell Based” interpolation scheme, which is simpler comparing to “Least Squares Cell Based” interpolation, was used. The structured mesh was designed uniform throughout the pipe considering the low numerical cost of the CFD scheme. Therefore all mesh elements have same sizes from pipe axis to wall and from inlet to outlet. However, an exception was made for mesh elements next to the wall in order to maintain  $y^+$  values in the required range for standard wall functions. This will be further explained in the following. The mesh element size was determined with a ratio to pipe radius, i.e. pipe radius ( $r_{wi}$ ) over 5, 10 or 20. Accordingly, three mesh element numbers were tried for grid independency. Grid Convergence Index (GCI) analysis was also applied as suggested by Roache [43]. Data for mesh independency and

GCI are given in Table 2 and 3 respectively. Blue colors indicate that the changes are ignorable. Green colors indicate the selected meshes for further calculations.

Table 2 and 3 are evaluated together to determine proper mesh setup for four different  $Re$  numbers. It is seen that reducing mesh element size next to the wall under  $y^+$  values lower than 15 deteriorate results. This is an expected phenomenon since standard wall functions necessitate a radial location of calculation node next to the wall higher than 12 of  $y^+$  [42, 44]. Therefore, second version of mesh numbers for medium and fine meshes of  $Re=5 \times 10^3$  and  $10 \times 10^3$  contain a fixed first mesh element height in radial direction next to the wall. Figure 2 gives visual comparison of mesh versions. This figure also reveals a second fact that reducing mesh element size further for MediumV2 and FineV2 meshes would impose a severe transition from a relatively very big element to a very small one. This would numerically increase effect of mesh element next to the wall over subsequent mesh element in radial direction. All above evaluations can be justified by Table 2 and 3. However, at this point, it should be noted that changes in maximum axial velocity and hydrodynamic entry length based on 0.1% spatial change in centerline axial velocity are very different in magnitude. Hydrodynamic entry length is a derivative result and changes significantly with mesh structure. However, maximum axial velocity value is a primitive variable and the change according to mesh structures is very limited. Since the main goal is achieving distributions of primitives and the limit for hydrodynamic entry length is already determined very sensitive, the decision for mesh structure for calculation is based on maximum axial velocity. Although all meshes seem proper for  $Re=50 \times 10^3$  and  $100 \times 10^3$ , GCI analyses suggest Medium mesh since transition to Fine mesh changes maximum axial velocity very little. On the other hand, only MediumV2 and FineV2 seem proper for  $Re=5 \times 10^3$  and  $10 \times 10^3$  but GCI suggest MediumV2 because hydrodynamic entry length changes 11% by the transition from Coarse to MediumV2. In other words, the selected meshes for further calculations, which are marked with green in Table 2, are determined by the higher element values of intersecting blue marked ignorable changes.

**Table 2.** Mesh information and percentage changes

Mesh Denomination and Element Numbers						Percentage Changes of Maximum Axial Velocity				Percentage Changes of Hydrodynamic Entry Length based on 0.1% Spatial Change in Centerline Axial Velocity			
Re	Coarse (r <sub>wi</sub> /5)	Medium (r <sub>wi</sub> /10)	Fine (r <sub>wi</sub> /20)	MediumV2 (y <sup>+</sup> >15)	FineV2 (y <sup>+</sup> >15)	Coarse to Medium	Medium to Fine	Coarse to Medium V2	Medium V2 to FineV2	Coarse to Medium	Medium to Fine	Coarse to Medium V2	Medium V2 to FineV2
5×10 <sup>3</sup>	4000	16000	64000	14400 (r <sub>wi</sub> -(r <sub>wi</sub> /5))/8	54400 (r <sub>wi</sub> -(r <sub>wi</sub> /5))/16	3.33	4.03	0.04	0.06	8.05	14.45	4.29	2.35
10×10 <sup>3</sup>	4000	16000	64000	14400 (r <sub>wi</sub> -(r <sub>wi</sub> /5))/8	54400 (r <sub>wi</sub> -(r <sub>wi</sub> /5))/16	0.84	2.5	0.02	0.03	3.63	8.46	4.28	2.29
50×10 <sup>3</sup>	4000	16000	64000	64000 (r <sub>wi</sub> /20)	256000 (r <sub>wi</sub> /40)	1	0.12	0.12	0.02	3.49	1.65	1.65	0.88
100×10 <sup>3</sup>	4000	16000	64000	64000 (r <sub>wi</sub> /20)	256000 (r <sub>wi</sub> /40)	0.95	0.11	0.11	0.06	3.48	1.69	1.69	0.75
Approximate Iteration Number	≈750	≈1600	≈3000	NA	NA								

NA= Not Available

**Table 3.** GCI Results

Re	GCI based on Maximum Axial Velocity						GCI based on Hydrodynamic Entry Length for 0.1% Spatial Change in Centerline Axial Velocity						
	Medium to Fine	Coarse to Medium	Asymptotic Value	MediumV2 to FineV2	Coarse to MediumV2	Asymptotic Value	Medium to Fine	Coarse to Medium	Asymptotic Value	MediumV2 to FineV2	Coarse to MediumV2	Asymptotic Value	
5×10 <sup>3</sup>	19.38	16.12	0.66	0.26	0.20	0.61	32.51	16.86	0.31	3.32	6.17	≈1	
10×10 <sup>3</sup>	1.52	0.52	0.11	0.06	0.03	0.35	9.27	3.77	0.18	3.05	5.84	≈1	
50×10 <sup>3</sup>	0.02	0.17	≈1	NA	NA	NA	1.76	3.79	≈1	1.22	4.41	≈1	
100×10 <sup>3</sup>	0.02	0.15	≈1	NA	NA	NA	1.9	3.98	≈1	0.72	3.8	≈1	

NA= Not Available

Table 2 shows that four times increase in mesh element number only increases iteration number approximately two folds. “Not Available (NA)” results in Table 3 is due to the fact that GCI depends on Richardson extrapolation as Roache suggests [43]. When the extrapolation results gives an increase in changes instead of a decrease with increasing number of mesh elements, GCI cannot calculate percentage asymptotic value.

Selected mesh elements for the CFD analysis are; 54400 for Re=5x10<sup>3</sup> and 10x10<sup>3</sup>; and 64000 for 50x10<sup>3</sup> and 100x10<sup>3</sup>.

The equations of GCI analysis is given below [45]. Mesh refinement ratio (*r*) based on spacing between nodes (*h*) is calculated by equation (1). Due to the structured uniform mesh elements, refinement ratio is assumed 2.

$$r = \frac{h_{medium}}{h_{fine}} = \frac{h_{coarse}}{h_{medium}} = 2 \tag{1}$$

The measure of mesh structure, for instance maximum axial velocity component value, can be denoted as *f* and accordingly relative error is given in equation (2).

$$\epsilon = \frac{f_{medium} - f_{fine}}{f_{fine}} = \frac{f_{coarse} - f_{medium}}{f_{medium}} \tag{2}$$

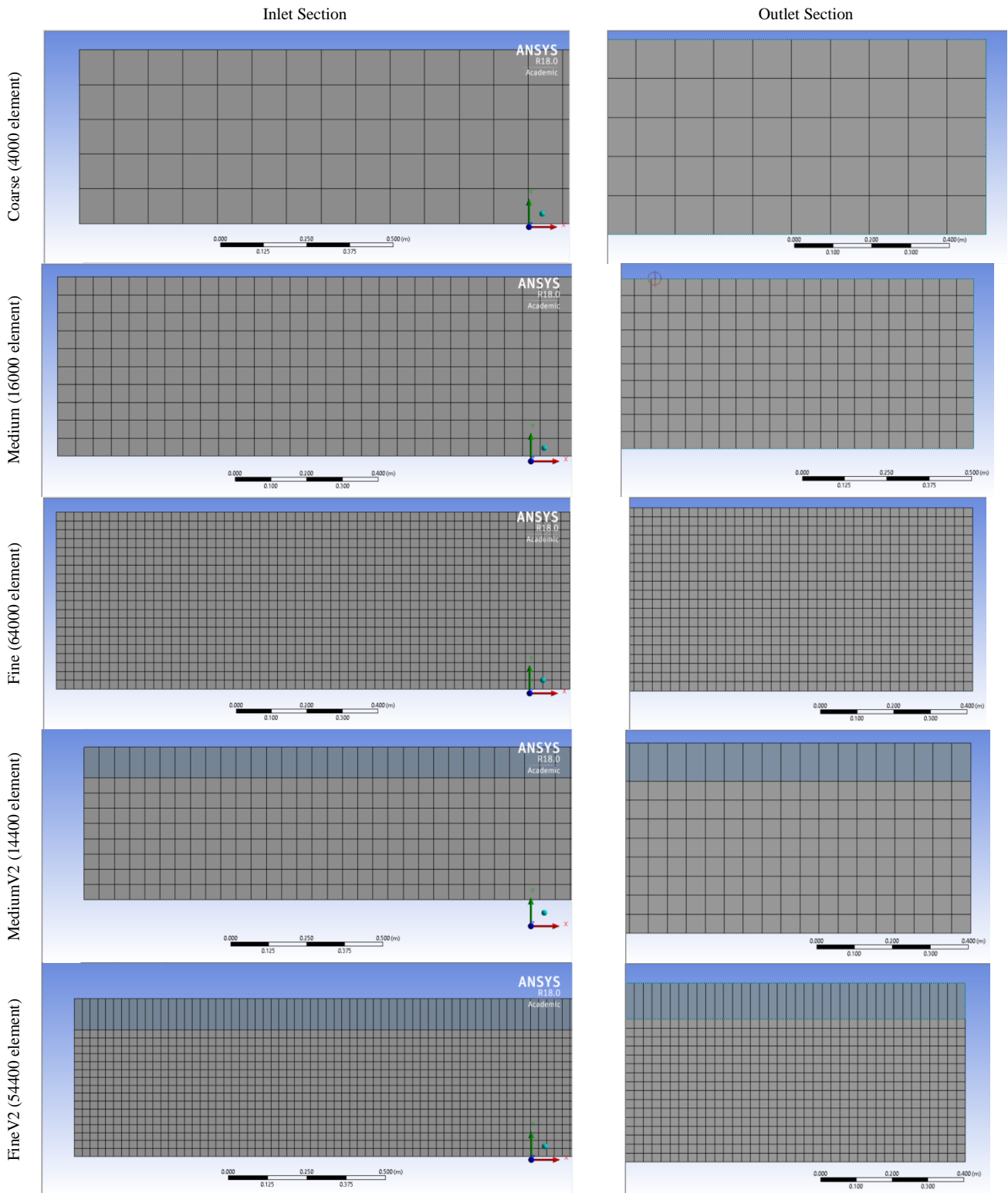


Fig. 2. Visual comparison of structured coarse, medium, fine, mediumV2 and fineV2 meshes.

The order of spatial discretization ( $p$ ) can be calculated by equation (3).

$$p = \ln \left( \frac{f_{coarse} - f_{medium}}{f_{medium} - f_{fine}} \right) / \ln(r) \quad (3)$$

Finally, GCI of two meshes is determined by equation (4).

$$GCI = \frac{1.25|\varepsilon|}{(r^p - 1)} \times 100 \quad (4)$$

The solution is desired to be asymptotically approaching to exact value. If so, equation (5) should be satisfied.

$$\frac{GCI_{coarse}}{GCI_{fine} r^p} = 1 \quad (5)$$

Percentage changes in Table 2 are calculated by multiplying relative errors with 100. Order of spatial discretization according to GCI is about 1.1.

All residual limits were set to  $10^{-9}$  and absolute residuals were used. Iterations were completed when all residuals decreased below limit values. Data were written to \*.txt files and then imported into MS-Excel for graphical arrangements.

## 2.2. Empirical Data and Expressions

From the literature survey and textbook principals, it is seen that theoretical calculations for turbulent boundary layer flow needs a modeling approach based on semi-empirical expressions. Otherwise all spatial flow field data is needed without a proper turbulence modeling. This leads to impractical amount of data to be produced, stored and distributed. Nevertheless, existing experimental data is crucial for validating models. Another interesting issue about experimental results for entrance region of turbulent flow in pipes is that this region is so sensitive to inlet conditions and disturbances [9, 36]. Therefore, experiments at same or close Re based of hydraulic diameter and mean flow velocity can give different results.

As mentioned earlier in the literature survey, there are reports on turbulent developing flow in pipes using some methods other than CFD; i.e. generalized solution by variable exponents, Eigen values and Eigen functions, integral method etc. in order to use experimental data. Some later works used boundary layer theory solution utilizing algebraic turbulence models. Relatively more recent works commonly give empirical expressions for only development length and pressure drop in the hydrodynamic entrance length. Although a lot of effort is paid during the literature survey towards finding a single empirical correlation that relates axial length, radial length and Re with radial distribution of axial velocity, none is

encountered. Earlier works are hard to find. Some works that are viewed from reference lists are not accessible online. Therefore, the closest expressions to the ones that are looked for are log-law and power law formulations. Power law velocity profile is easy to implement. It has an exponent that changes from 6 to 10, according to Re. However, this profile is for developed flow. In order to have a resolution for hydrodynamic entrance length without using CFD, only easy to implement method is boundary layer solution in parts for axial direction. Therefore, a framework is compiled in this section for boundary layer solution of pipe turbulent hydrodynamic entrance length.

Boundary layer calculations devise momentum thickness. Then, remaining work is to assume a profile for velocity. Some researchers used semi-log-law profile [9]. More common one is the power law at nth order while n changes between 6 and 10 (mostly 7). There are also examples who do not assume any velocity profile at all.

Since semi-analytical approach seems to be based on boundary layer theory mainly, its' main frame is tried to be given here referring to three sources [9, 10, 18].

In [9], entrance length of turbulent pipe flow divided to six regions. They are;

1. Laminar developing boundary layer which is very thin and very short;
2. Transition to laminar boundary layer to turbulent boundary layer in a very short length;
3. Developing turbulent boundary layer flow similar to that on a flat plate under favorable pressure gradient;
4. Transition from flat plate flow to pipe flow;
5. Interaction between boundary layers after they meet at the pipe axis;
6. Hydrodynamically developed pipe flow.

Reference [9] gives three correlations for regions 3, 4 and 5. Region six is not given since the flow is developed and not changing. Regions 1 and 2 are skipped since they are very short. The first correlation is for length of third region. The second correlation is for the change of boundary layer thickness in fourth region. The third correlation is for the changing value of reciprocal exponent for power-law velocity profile in fifth region. However, Re in the third correlation is based on distance from fourth region to sixth region. The three correlations are given below in (6), (7) and (8) from reference [9]. Lengths are made nondimensional with pipe radius. Explanations for all symbols are given in Nomenclature section. Equation (6) can be solved by graphical or numerical integration.

Although a lot of effort has been paid in order to adapt these three correlations between (6) to (8), there are certain issues relating to pipe Re and reference [9]. Nevertheless, author's numerical values are used in literature comparison.

$$\frac{L_4}{R} = \int_0^1 \left\{ \left[ \frac{n}{(n+1)(n+2)} - \frac{2n}{(2n+1)(2n+2)} \frac{\delta}{R} \right] + \left[ \frac{2}{(n+1)} - \frac{2}{(2n+1)} \frac{\delta}{R} \right] \left[ \frac{2n+2}{(n+1)(n+2)} \frac{\delta}{R} - \frac{3n+1}{(2n+1)(2n+2)} \frac{\delta^2}{R^2} \right] \right\} \times \left\{ \frac{3.294 + 5.893 \log \left( \frac{u_0 D}{\nu} \right) + 5.893 \log \left( \frac{\left( \frac{n}{(n+1)(n+2)} \frac{\delta}{R} - \frac{n}{(2n+1)(2n+2)} \frac{\delta^2}{R^2} \right)^2}{\left( 1 - \frac{\delta}{R} \right)^2 + \frac{2n}{(n+1)R} - \frac{2n}{(2n+1)} \frac{\delta^2}{R^2} \right)}{\frac{d\delta}{R}} \right\} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta \delta_4}{R} = 2.77 \times 10^{-6} \left( \frac{L_4}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \text{Re} \quad (7)$$

$$n = 5.16 + 2.8 \times 10^{-6} (\text{Re}_x) \quad (8)$$

For developed pipe flow, radial profile of axial velocity can be approximated by (9) and necessary power value can be drawn from (10) [18].

$$\frac{u}{u_c} = \left( 1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

$$n = -1.7 + 1.8 \log (\text{Re}) \quad (10)$$

More accurate radial profiles of axial velocity component for developed flow can be constructed by correlations in the literature. Reader can find more in [25, 32].

For analytical solution of turbulent pipe flow, two references were studied [10, 25]. Here Cebeci and Bradshaw [10] is used for relevant expressions. For a hydrodynamically developed radial velocity profile, (11) and (12) is proposed.

$$u^+ = \int_0^{y^+} \frac{2 \left( 1 - \frac{y^+}{r_0^+} \right)}{1 + \sqrt{1 + 4 \left( 1 - \frac{y^+}{r_0^+} \right) (L^+)^2}} dy^+ \quad (11)$$

$$L^+ = l^+ \left[ 1 - e^{-\left( \frac{y^+}{A^+} \right)} \right] \quad (12)$$

Definitions of variables in (11) and (12) are given below.

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (13)$$

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad (14)$$

$$r_0^+ = \frac{r_0 u_\tau}{\nu} \quad (15)$$

$$l^+ = \frac{lu_\tau}{\nu} \quad (16)$$

$$A^+ = 26 \quad (17)$$

The remaining work is to find friction factor to calculate  $\tau_w$  and accordingly  $u_\tau$  for the radial velocity profile. One explicit expression for friction factor is given in (18).

$$f = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}}, \text{Re} \leq 10^5 \quad (18)$$

Wall shear stress and friction velocity can be calculated using equations (18), (19) and (20).

$$\tau_w = \frac{1}{8} \rho u_m^2 f \quad (19)$$

$$u_\tau = \sqrt{\tau_w} \quad (20)$$

Mixing length of hydrodynamically developed flow can be drawn from following empirical formulation. This is also named as algebraic turbulence modelling and it is proposed by Nikuradse based on Prandtl's mixing length theorem [10].

$$l = R \left[ 0.14 - 0.08 \left( 1 - \frac{y}{R} \right)^2 - 0.06 \left( 1 - \frac{y}{R} \right)^4 \right] \quad (21)$$

It is possible to construct a radial hydrodynamically developed axial velocity component profile by equations between (11) and (21).

For hydrodynamically developing pipe flow, [10] divides entrance length in to two regions and treats these regions differently. Since entry length has two regions, turbulent pipe flow has three regions together with developed region according to this approach. For the first region, transformation of variables are done in order have a boundary layer solution.

$$d\eta = \left( \frac{u_0}{\nu x} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{r}{R} \right) dy \quad (22)$$

$$\psi(x, y) = R(u_0 \nu x)^{\frac{1}{2}} f(x, \eta) \quad (23)$$

For transformed variables, momentum equation can be given as;

$$(bf''') + \frac{1}{2} ff'' = x \frac{dp^*}{dx} + x \left( f' \frac{df'}{dx} - f'' \frac{df}{dx} \right) \quad (24)$$

$f$  is dimensionless stream function and prime denotes derivative with respect to  $\eta$ .

$$b = (1-t)^2 (1 + \varepsilon_m^+) \tag{25}$$

$$p^* = \frac{p}{\rho u_0^2} \tag{26}$$

$$t = 1 - \left[ 1 - 2\eta \left( \frac{x}{R} \frac{1}{\text{Re}} \right)^{1/2} \right] \tag{27}$$

For the eddy diffusivity in (25), two different approaches are used for the first and second regions of developing flow. They are given below. Equations (28) to (34) are for the first region.

$$(\varepsilon_m)_i = l^2 \left| \frac{du}{dy} \right| \gamma_r \gamma, 0 \leq y \leq y_c \tag{28}$$

$$l = \kappa y \left[ 1 - e^{-\left( \frac{y^+}{A^+} \right)} \right], \kappa = 0.41 \tag{29}$$

$$\gamma_{tr} = 1 - e^{-\left[ -G(x-x_{tr}) \int_{x_{tr}}^x \frac{dx}{u_c} \right]} \tag{30}$$

$$G = 8.33 \times 10^{-4} \frac{u_c^3}{v^2} \text{Re}_x^{-1.34} \tag{31}$$

$$(\varepsilon_m)_0 = \alpha \int_0^\infty (u_c - u) dy \left| \gamma_r \gamma, y_c \leq y \leq \delta \right. \tag{32}$$

$$\alpha = 0.0168 \frac{1.55}{1 + \Pi} \tag{33}$$

$$\Pi = 0.55 \left[ 1 - e^{-\left( -0.243 \left( \frac{\text{Re}}{425} - 1 \right)^{1/2} - 0.298 \left( \frac{\text{Re}}{425} - 1 \right) \right)} \right] \tag{34}$$

The second region with transition needs hybrid eddy diffusivity. For this, (35) is given and then (35) is used together with (28) and (32) to yield (36).

$$\varepsilon_m = l^2 \left( 1 - e^{-\left( \frac{y}{A} \right)} \right)^2 \frac{du}{dy} \tag{35}$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_m^I + (\varepsilon_m^F - \varepsilon_m^I) \left[ 1 - e^{-\left( \frac{x-x_0}{\lambda r_0} \right)} \right] \tag{36}$$

$\varepsilon_m^I$  denotes (28) and (32) and  $\varepsilon_m^F$  denotes (35). Of course, there are intermediate steps and the references should be used for a whole guidance. Still, from the literature survey and presented expressions, analytical solution of turbulent developing and developed pipe flow is possible with aids of empirical expressions and numerical methods. As said before, no single correlation is found, giving the axial velocity profile in radial direction after inputs as Re, radial and axial coordinates are given.

In order to account turbulence diffusion in energy equation for thermal boundary layer and development, eddy diffusivity can be divided by turbulent Prandtl number, which is practically constant at about 0.9. Thermal boundary layers develop before hydrodynamic boundary layer for Prandtl numbers below unity and later for Prandtl numbers above unity.

### 3. RESULTS

Results are discussed under three subtitles, i.e. literature comparison via development lengths and maximum centerline velocity of developed flow, semi-analytical solution by the given frame, and CFD resolution by profile plots.

#### 3.1. Literature Comparison

The first figure in this section is the comparison of CFD developed radial profiles of axial velocity and power-law developed radial profiles of axial velocity in Figure 1. It is seen that power-law profiles become distinct from CFD profiles, at regions very close to wall and very close to pipe axis. The discrepancies between power-law profiles and CFD profiles are due to the ability of power-law expression. It is already known that this expression is not true for pipe axis and regions very close to wall though a big portion of the radius is filled approximately correct. The reciprocal exponent  $n$  is changed between 6 to 10 in order to have a coverage of low and high Re pipe flows. Usage of standard wall functions coarsen the mesh element next to the wall for  $\text{Re}=5 \times 10^3$  and  $10 \times 10^3$ . This may be seen a negative aspect of standard wall functions in terms of heat transfer solutions. However, further standard wall functions are available for assisting thermal boundary layer in that region. Accordingly, wall functions for energy equation compensates the resolution deficit due to wall functions of velocity solution.



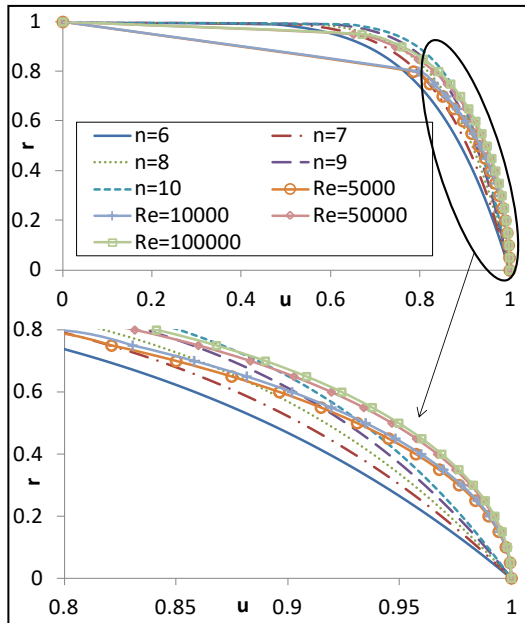


Fig. 1. Comparison of power-law profiles and CFD results.

Equation (9) and (10) is used to reproduce developed radial profiles of axial velocity for the four Re in this work in Figure 2. In order to calculate centerline maximum velocity values from normalized velocity values, 1 is divided by the average of normalized velocities and then equation (10) is multiplied by centerline velocity values. Although centerline maximum axial velocity values are as expected, radial profiles are somewhat less flattened. This is due to the unable approximation of near proximity of the wall.

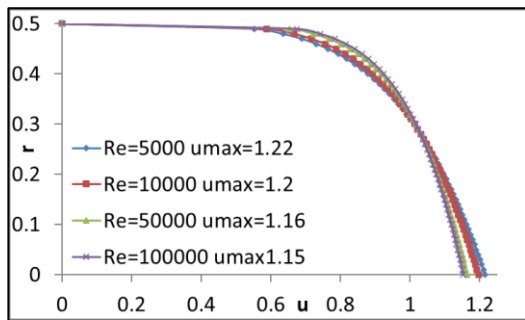


Fig. 2. Comparison of power-law profiles and CFD results.

Figure 3a shows percentage change and of axial velocity at pipe axis for  $Re=100 \times 10^3$  based on developed maximum centerline velocity. Figure 3b is the differential change in the centerline axial velocity at the same Re. When changes of axial velocity in Figure 3 is examined according to axial distance, one can see three regions clearly. Change in axial velocity at pipe axis is relatively high at the beginning of the pipe. The change rate gradually reduces but the gradient itself also fluctuates. At about 20 to 30 pipe diameters, the increase in centerline velocity stops and a decrease is seen up to 50 pipe diameters. Centerline velocity increase slightly after 50 pipe diameters to 70 pipe diameters. After this point, change seems ignorable. This is also validated by Figure 4. At a point, the change becomes “0” and end of the first regions is marked by this way. This first region is the region

where the semi-analytical calculations can be done by boundary layer approach as in flat plate. The point where the differential change of axial velocity becomes zero is the point of merging boundary layers. At this point, axial velocity at pipe axis has the highest value. After first zero point to second zero point in Figure 3, mixing process continues at pipe axis. This mixing is expected to be observed from turbulence intensity or turbulent viscosity results. Axial velocity decreases as mixing continues as shown in Figure 4. At about 70 pipe diameters, third region commences. This region is also commonly regarded as developed region. However, it is seen that a relatively low change still underway up to 60 pipe diameters although it is much less than 1%. In practice, 10 pipe diameters value for development length is assumed in text books [46]. However, 65 pipe diameters for hydrodynamic entrance length for  $Re=100 \times 10^3$  seems more accurate. Also, hydrodynamic entrance length changes based on Re if this approach is followed. Figure 5 is given for hydrodynamic entrance lengths based on this.

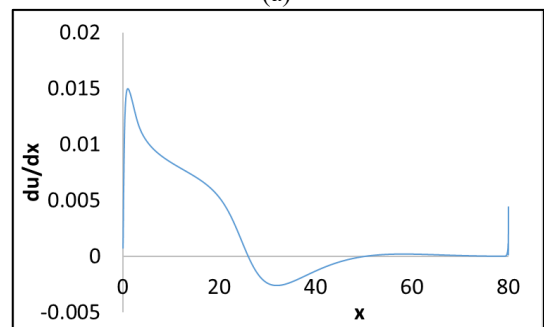
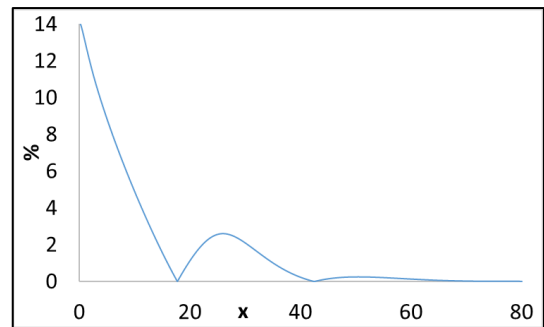


Fig. 3.  $Re=100 \times 10^3$  (a) Percentage change of centerline axial velocity based on developed maximum centerline velocity (b) Spatial differential change in centerline axial velocity.

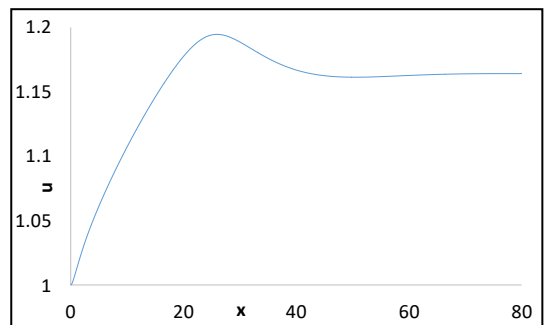


Fig. 4. Development of centerline axial velocity profile.

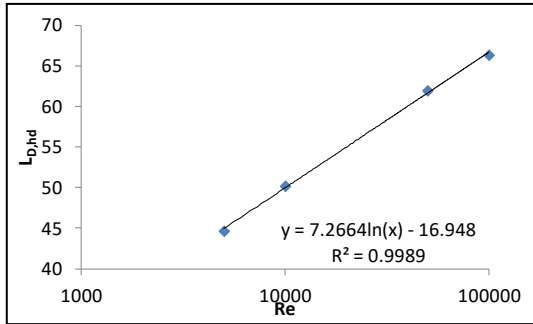


Fig. 5. Hydrodynamic development length according to Re.

(37) is given for curve fitting of Figure 5 that gives the entrance length according to Re for 0.1% change in axial velocity. (38) to (40) are given for a radial profile of developed axial velocity at different Re ( $5000 \leq Re \leq 100000$ ).

$$L_D = 7.2664 \ln Re - 16.9748 \tag{37}$$

$$\frac{u}{u_c} = ae^{(br)} \tag{38}$$

$$a = 0.2043 Re^{0.684} \tag{39}$$

$$b = 4.0161 Re^{0.0715} \tag{40}$$

For comparing results of present study with the literature, Table 4 is provided for certain magnitudes.

Table 4. Literature Comparison

Reference	Re	$u_{max}$	$L_{D,hd}$	Velocity Overshoot
[15]	$25-100-400 \times 10^3$	1.2-1.16-1.14	52-60-68	Exists
[9]	$195 \times 10^3$	1.25	85	Exists
[17]	$4-25 \times 10^3$	1.3	55	Exists
[18]	$120-717 \times 10^3$	1.2	60	Exists
[16]	$12-84-167 \times 10^3$	1.23-1.18-1.16	70	Exists

Table 4 suggests that increasing Re decreases maximum developed centerline axial velocity magnitude. This means more flattened radial profiles and thinner viscous sub layers. Also, entrance length has higher values as Re increases. Numerous papers show velocity overshoot at the pipe axis however only Bryant, et al. [15] relate this phenomenon with inlet turbulence intensity. Authors show that, if turbulence intensity at inlet condition match turbulence intensity of developed flow, centerline velocity magnitude exhibits an asymptotic behavior by approaching to maximum centerline velocity without any velocity overshoot. Also, the only work in the surveyed literature that brings radial velocity component profiles is Bryant, et al. [15]. The present work in this paper enhances this resolution by providing radial and axial profiles of velocity components and turbulence indicators. Also, the hydrodynamic development is explained by simultaneous development of hydrodynamic boundary layers and turbulence magnitudes.

### 3.2. Semi-analytical Solution

For semi-analytical construction of hydrodynamically developed flow axial velocity component radial profile, equations between (11) and (21) are used. The profiles are compared with CFD profiles in Figure 6. Area weighted averages for mean flow velocities are used in order to calculate Re according to the profiles and following percentage errors are found for  $Re=5 \times 10^3, 10 \times 10^3, 50 \times 10^3, 100 \times 10^3$  at semi empirical and CFD results respectively: 12, 13, 7, 1, 4, 4, 2 and 2. Percentage errors in semi-analytical calculation is due to empirical expressions and discrete area weighting. In case of CFD, percentage errors are due to discrete area weighting. It is seen that semi-empirical calculation overestimates low Re profiles and underestimates high Re profiles. On the other hand, regions close to wall have theoretically infinite resolution with semi-analytical approach. Equation (35) can be used for calculating eddy diffusivity in order to calculate energy equation for heat transfer analysis by means of the semi-analytical profiles. In case of CFD, no such measure is necessary since eddy viscosity is already calculated.

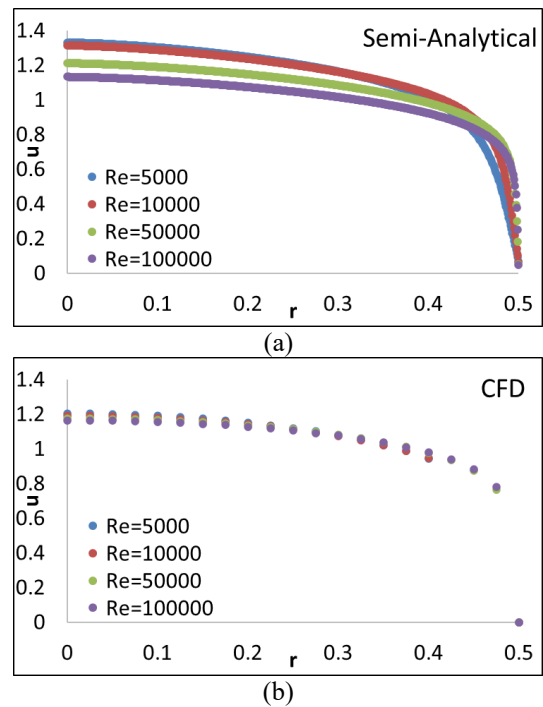


Fig. 6. (a) Semi-analytical hydrodynamically developed profiles (b) CFD hydrodynamically developed profiles.

### 3.3. CFD Resolution

Figure 7 is given for axial profiles of axial velocities at different Re numbers. Figure 7 shows same trends for different Re, as expected since it is known that development length changes very few with Re. Development length elongates with increasing Re and this results with lower slopes and gradients. There are little differences between developed centerline values of axial velocities. Axial profiles at the closest locations to the wall are different at the beginning of the pipe between higher and lower Re. This is

due to higher resolution of high Re mesh. It is understood that there is a slight increase in axial velocity close to wall, showing that entrance boundary layer is yet to reach that location. Therefore, higher Re starts with thinner boundary layer thicknesses. Figure 8 is given for the axial profiles of radial velocity component. Radial velocity component approaches to zero as flow develops. This velocity component promotes transport heat and mass transfer in the entrance region where it has relatively higher magnitudes. The resolution of radial velocity is crucial, thus, for correct calculations of transfer processes. As Re increases, radial velocity component disperses to a longer distance in axial length since entrance length elongates. It is also seen that highest radial velocity components occur near to wall. Higher Re flow radial velocity axial profiles justify the axial velocity magnitude rise close to wall in a short distance at the close proximity of the pipe inlet. Radial velocity component change its direction to the wall after axial velocity peak is realized. This suggest a short distance of the wall is exposed to radial positive convective flow in steady state conditions. That region may be effected more in mechanical manner comparing to the remaining parts of the pipe. The changes in velocity profiles are not just due to boundary layer development but also due to changing domestic turbulence cost. In order to show this, axial profiles of turbulent kinetic energy are given in Figure 9. This figure shows that distribution of turbulent kinetic energy reaches its final values relatively earlier than velocities. Peak values are rather less significant. The more interesting phenomenon is that turbulent kinetic energy values are higher for lower Re. As Re increases, values of turbulent kinetic energy for all profiles get lower average values. Also changes are steeper for lower Re as boundary layers grow and merge. The increase in turbulent kinetic energy starts with the profile close to the wall. the second profile after the first profile from the wall to the pipe axis increase later in spatial distance. This trend continues till the profile at the pipe axis starts to rise. Accordingly, it is understood that turbulence kinetic energy generation is mainly done by thickening boundary layers. This is the reason of decreasing values of turbulence kinetic energy close to pipe axis at high Re close to pipe inlet. When boundary layers meet at the pipe axis, turbulence kinetic energy rise slows down and starts to converge an asymptotic value. After flow is developed, turbulent kinetic energy has almost constant values indicating that the production of turbulent kinetic energy is balanced, which make us to look for turbulent energy dissipation that is given in Figure 10. Axial profiles of turbulent kinetic energy dissipation show that most of its magnitude comes from wall functions since its maximum values are seen in the axial profile close to wall. After some distance, there is small contribution from inner parts of the pipe. As seen in turbulent kinetic energy profiles, the values of turbulent kinetic energy dissipation also have lower values as Re increases. Similar to the axial profiles of turbulent kinetic energy, dissipation profiles increase spatially later as pipe is traversed from wall to pipe axis. This again suggest that dissipation of turbulence energy mainly takes place in hydrodynamical boundary layers. However, dissipation generation has relatively very high values very

close to wall. This should be due to fact that the main mechanism of dissipation generation is molecular viscosity. Also, different generation rates of turbulent kinetic energy and dissipation suggest a parabolic radial profile of turbulent viscosity.

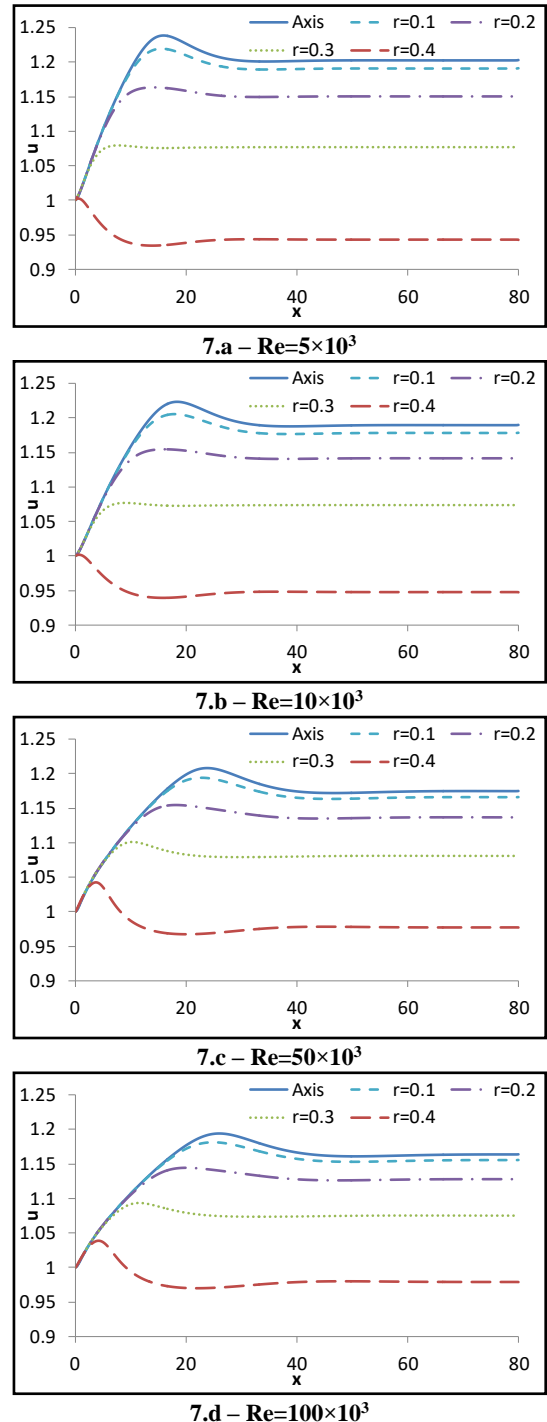
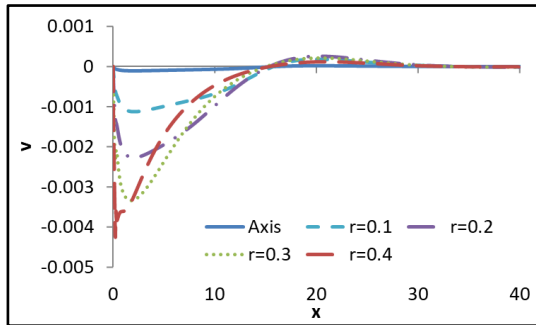
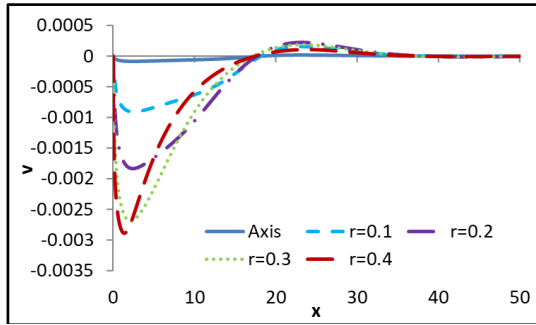


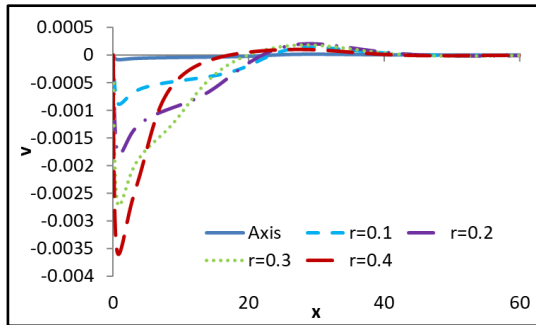
Fig. 7. Axial velocity axial development.



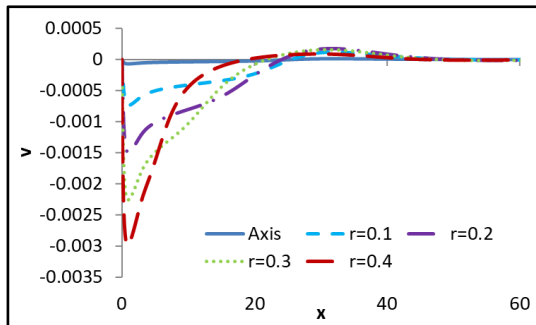
8.a –  $Re=5 \times 10^3$



8.b –  $Re=10 \times 10^3$

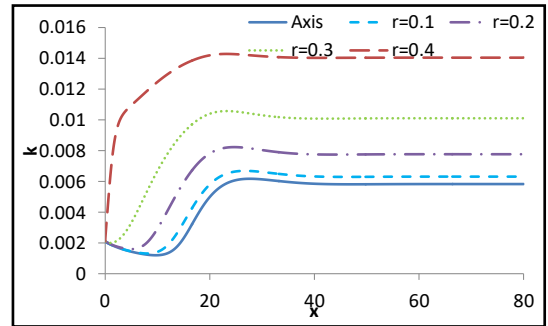


8.c –  $Re=50 \times 10^3$

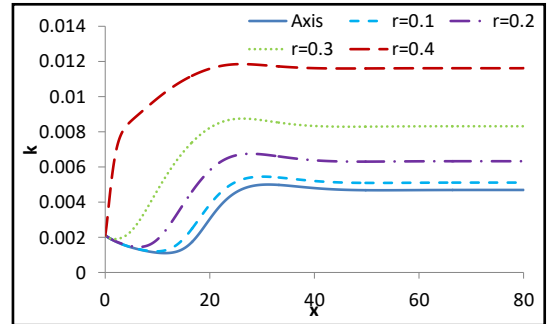


8.d –  $Re=100 \times 10^3$

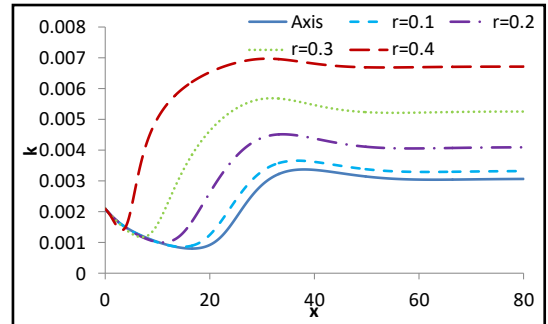
Fig. 8. Radial velocity axial development.



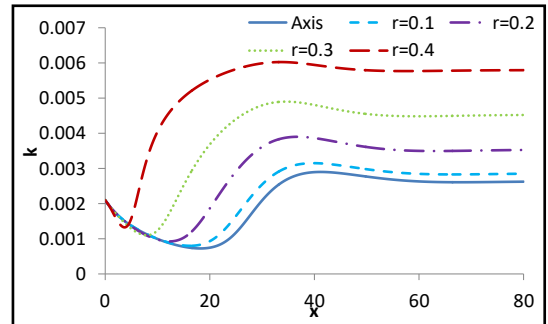
9.a –  $Re=5 \times 10^3$



9.b –  $Re=10 \times 10^3$



9.c –  $Re=50 \times 10^3$



9.d –  $Re=100 \times 10^3$

Fig. 9. Turbulent kinetic energy axial development.

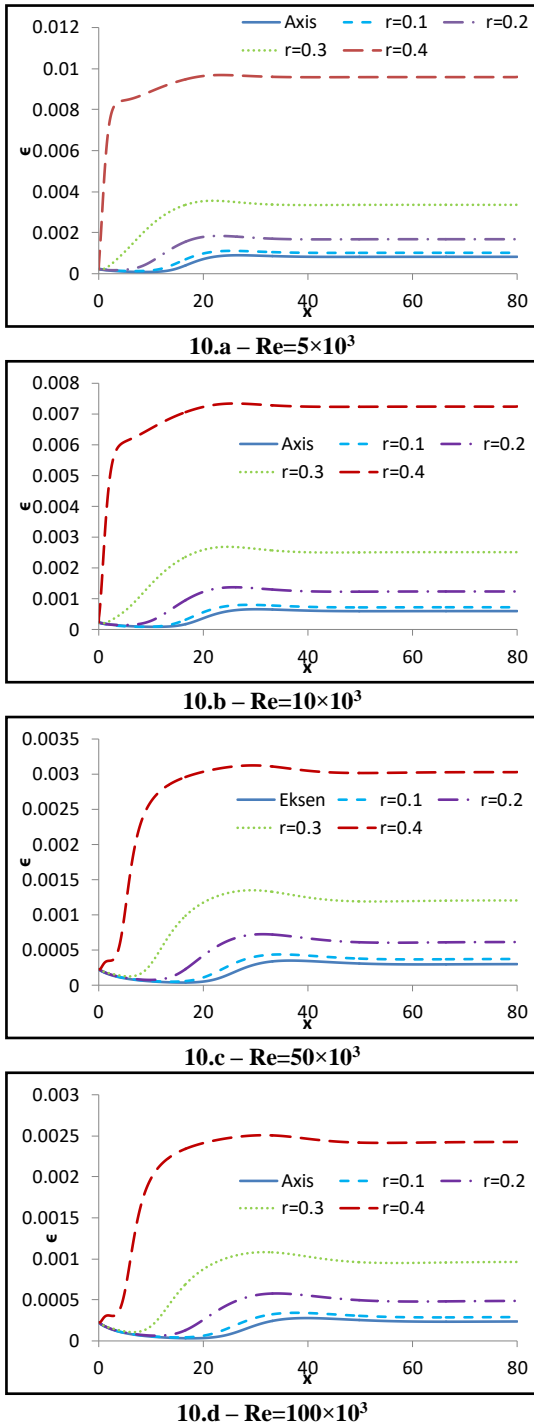
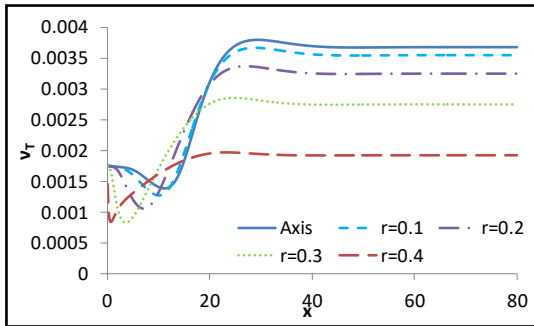


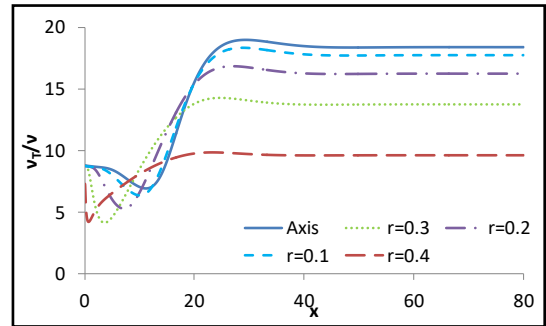
Fig. 10. Turbulent kinetic energy dissipation axial development.

Thus far, it is seen that turbulent kinetic energy and dissipation change and develop faster for lower Re. Also,

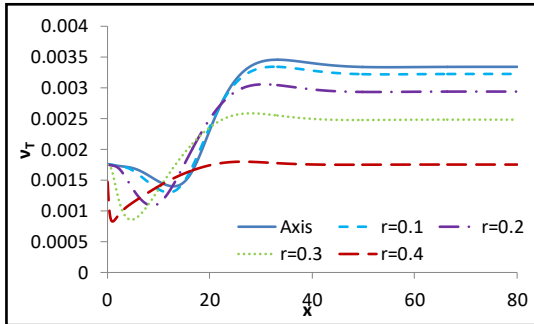
they have higher nondimensional values. This is due to the effect of molecular viscosity. Lower Re represents higher molecular viscosity. Therefore, shear layers between fluid elements generates more nondimensional turbulent kinetic energy and dissipation. However, their development is achieved earlier. If this phenomenon is interpreted, it is seen that increasing effect of molecular viscosity contributes to the regulation of flow in a considerable manner. However, absolute dimensional values of turbulence would be higher for high Re since dimensional velocity magnitudes would be much higher comparing to lower Re. So, nondimensional turbulent viscosity is relatively higher for low Re comparing to high Re. But dimensional turbulence with absolute values is directly proportional with Re. In order to express this phenomenon and explain it more, turbulent viscosity, calculated by utilization of turbulent kinetic energy and dissipation is given in Figure 11 with axial profiles. Turbulent viscosity axial profiles have a characteristic change, marking the characteristic development of axial velocity profiles for turbulent flow. The value of turbulent viscosity decreases till boundary layers grow and merge at pipe axis. Then it shows a rapid increase as mixing process take place between boundary surfaces. After mixing process lose its strength, turbulent viscosity settles as turbulent kinetic energy and turbulent kinetic energy dissipation balances each other. This also indicates that hydrodynamic development depends on turbulence rather than molecular viscosity for turbulent flows. Otherwise, axial velocity would increase up to 2 at pipe axis as in laminar flow. Turbulent viscosity axial profiles are developed earlier as they approach to wall. This shows that the turbulent kinetic energy and dissipation balance each other earlier due to the earlier developed one-dimensional flow in boundary layer close to wall. Turbulent viscosity has lower changes in low Re flows close to wall showing that the dissipation generation rates are higher comparing to the high Re flows. Boundary layers of low Re flows develops earlier than high Re flows. However, the development of turbulent viscosity in the boundary layers seems very close in terms of axial distance at a Re. This axial distance increases as Re increases. The weaker viscous forces can be responsible from this phenomenon and this also explains the elongated entrance length in high Re flows. Also, higher and lower values of turbulent viscosity have a narrower band as Re increases. Again, turbulent viscosity has lower nondimensional values with higher Re. In order to give an explanation, the ratio between turbulent viscosity and molecular viscosity is given in Figure 12.



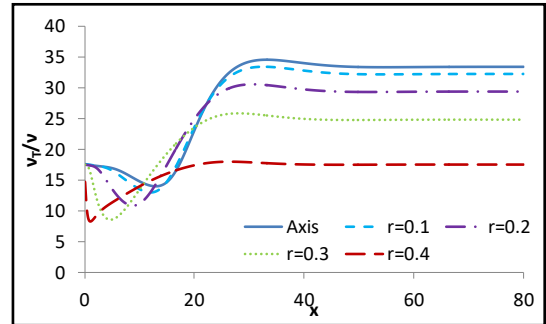
11.a -  $Re=5 \times 10^3$



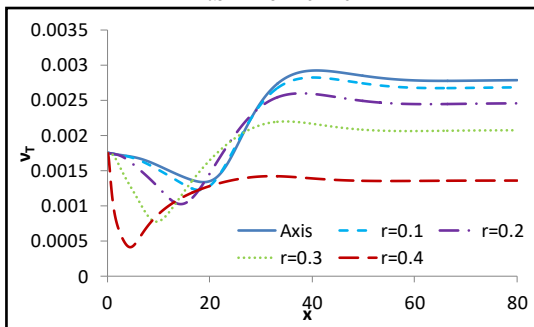
12.a -  $Re=5 \times 10^3$



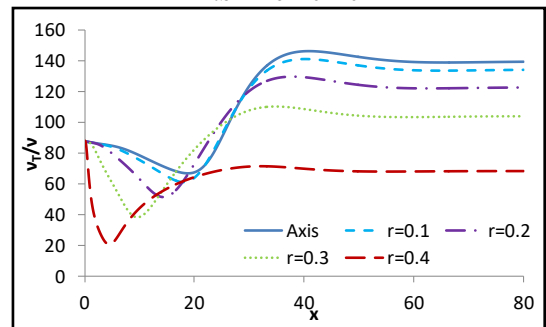
11.b -  $Re=10 \times 10^3$



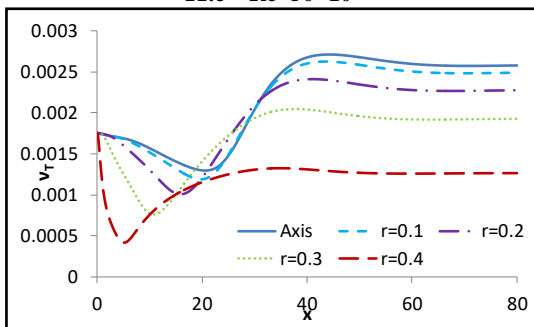
12.b -  $Re=10 \times 10^3$



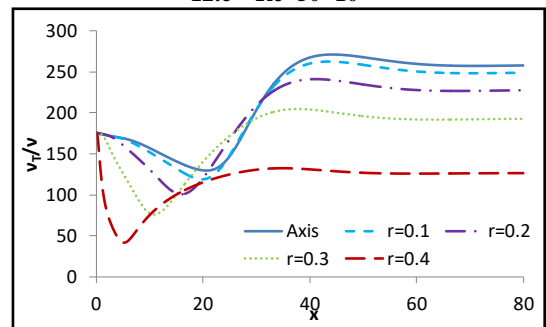
11.c -  $Re=50 \times 10^3$



12.c -  $Re=50 \times 10^3$



11.d -  $Re=100 \times 10^3$



12.d -  $Re=100 \times 10^3$

Fig. 11. Turbulent viscosity axial development.

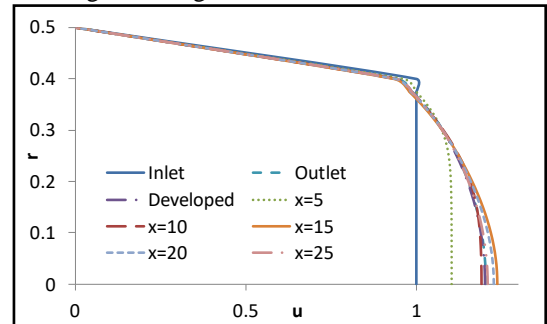
Fig. 12. Viscosity ratio axial development.

It is seen that development length increases as Re increases, while trends are similar. The reason of developing turbulence effects for longer distances with increasing Re is the ratio of turbulent viscosity to molecular viscosity. This ratio can be as high as about 300 as Re gets bigger values. For the lowest Re, i.e. 5000, the interval of viscosity ratio is between 5 and 20. Difference that is 15 for Re=5000 starts to grow and reaches to 25 as Re gets double and reaches to 200 as Re multiplied with 20. Of course, the trends in Figure 12 are identical to those in Figure 11 because molecular viscosity is assumed constant. It can be concluded that viscosity ratio is a better indicator comparing to dimensionless turbulent viscosity. On the other hand, it should be stated that effect of molecular viscosity diminishes as Re grows. Turbulent viscosity is an indicator of turbulence cost. Turbulence sourced energy cost is higher as Re grows bigger relative to molecular viscosity. At high Re flow, it can be seen as the only flow regulator mechanism after hydrodynamic development. Close values of viscosity ratio as pipe axis is approached suggest that developed velocity profiles are flatter since turbulence cost almost applies homogenously to a big portion of the flow.

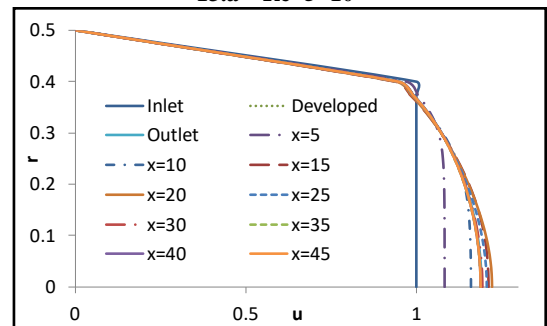
Radial profiles of axial velocity, given in Figure 13, marks the mesh cells that use wall functions. This radial profiles also show the final developed velocity profile while they change back and forward as flow is developing. This is why outlet radial profile of axial velocity is between other velocity profiles. The flatter profiles are seen at the entrance region of the pipe. They then grow to a power-law profile. Actually the main difference can only be identified at a very narrow interval close to pipe axis. Most of the profiles coincide to each other except the ones at the early phases of development. One may notice that wall function cells for low values of Re are relatively bigger. This is expected since viscous sub-layer is thicker for low values of Re due to the higher effect of molecular viscosity. Also, radial profiles of axial velocity are less parabolic as Re increases, showing the decreasing effect of molecular viscosity and increasing effect of turbulence.

The integral area under the radial profiles of radial velocity profiles in Figure 14 indicates the transport in radial direction at that axial point. It is seen that, for locations close to pipe inlet, there is relatively very high motion in radial direction and this motion expand axially as Re grows. Nevertheless, radial velocity magnitudes are close to each other for different Re. Radial profiles of radial velocity also show that entrance length elongates as Re increases. It can also be stated that entrance length is important for heat and mass transport due to radial transport contribution when entrance length is long comparing to the remaining part of

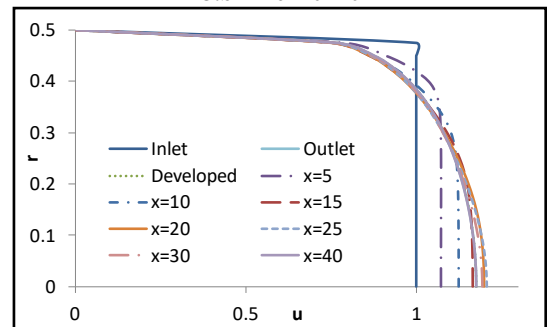
the pipe. It is also seen that peak values of radial velocity tends to get close to wall as Re increases. After boundary layers merge at pipe axis, radial velocity occurs at inverse direction. This indicates that, for a small distance, a portion of the pipe wall can be subjected to an inverse effect that may cause to fatigue in long run.



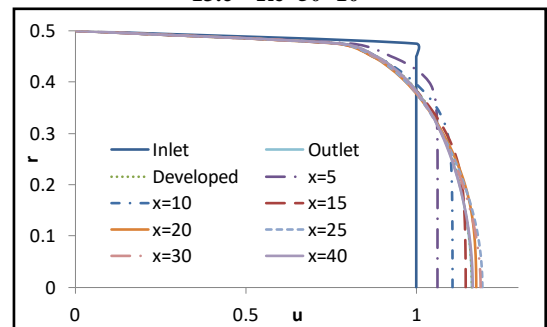
13.a –  $Re=5 \times 10^3$



13.b –  $Re=10 \times 10^3$



13.c –  $Re=50 \times 10^3$



13.d –  $Re=100 \times 10^3$

Fig. 13. Axial velocity profile in radial direction.

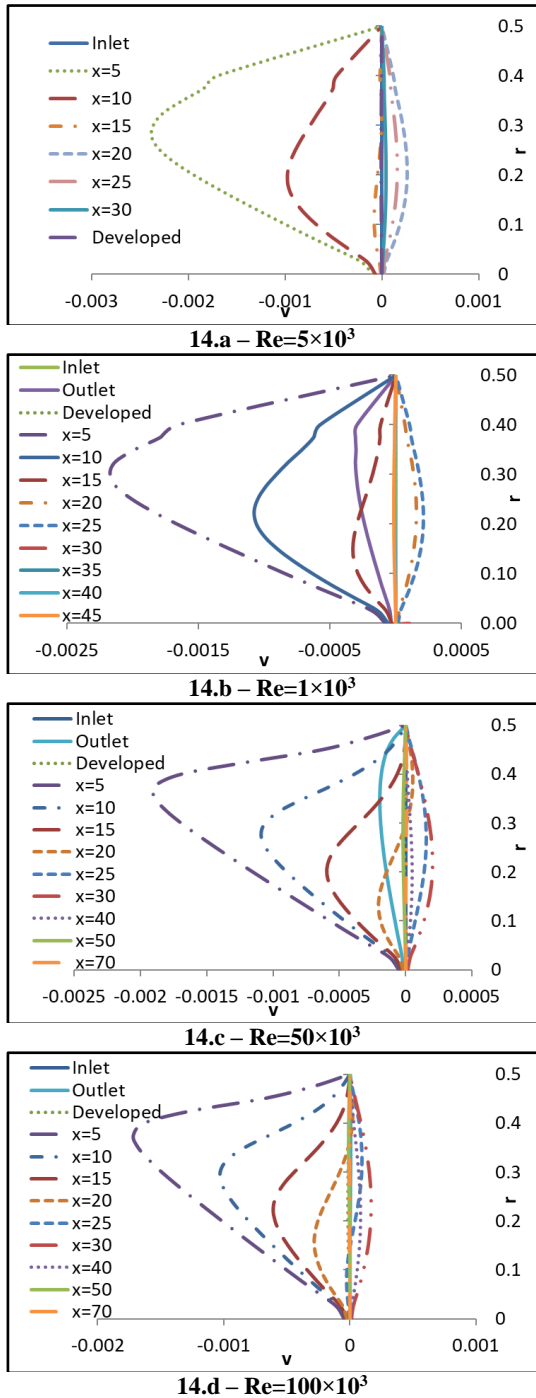


Fig. 14. Radial velocity profile in radial direction.

Radial profiles of turbulent kinetic energy are given in Figure 15. It is interesting to see the radial profiles of turbulent kinetic energy are similar in shape to a temperature profile of heated flow. This is due to the fact that most of the turbulent kinetic energy generation is done by the phenomena near the wall. So, turbulent kinetic energy is transferred from regions close to wall to pipe axis. But after some axial distance, turbulence kinetic energy

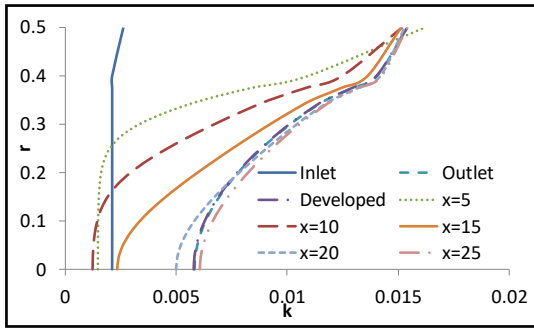
radial profile stops changing since velocity gradients that generates turbulence kinetic energy approaches to zero, indicating that flow is developed. The initial estimation seems a little overvalued for especially higher Re but calculation rapidly resolves correct values starting right after the inlet.

Figure 16 shows radial profiles of turbulent kinetic energy dissipation. It is very clear that almost all turbulent kinetic energy dissipation is generated by wall functions. As Re increases, the turbulent kinetic energy dissipation values get lower values in radial direction after a certain distance from the wall while they are bigger close to wall comparing with lower Re. Therefore, the role of turbulent kinetic energy dissipation is mainly in regions close to wall and it can be predicted algebraically. The remaining part of the pipe, i.e. away from the wall towards pipe axis is subjected to a very small effect of turbulent kinetic energy dissipation.

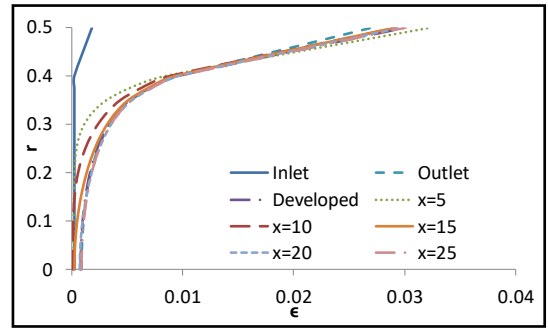
Radial profiles of turbulent viscosity are given in Figure 17. Radial profiles for developed flow resemble axial velocity radial profiles. Relatively different ones are those of close to pipe inlet. It is deduced from former graphics that turbulent kinetic energy and turbulent kinetic energy dissipation are not balanced close to pipe inlet. Therefore, turbulent viscosity fluctuates in radial direction. Additionally, the inlet profile is uniform. Consequently, this uniform profile changes its shape in radial direction. Nevertheless, as Re increases, the main trend of development for turbulent viscosity is more understandable by viewing radial profiles close to pipe inlet. It is clear that not only velocity profiles are developing but also turbulent viscosity profiles also develop. This creates the characteristic velocity development profile in the entrance region since there is a simultaneous development in the absence of thermal development, which would add another one. With other words, turbulent viscosity would develop in a very short length if turbulent intensity would be selected about its developed value, leading to a laminar like asymptotical development of velocity profiles without any positive direction radial velocity values.

Viscosity ratio radial profiles given in Figure 18 for different Re are also identical to Figure 17 since molecular viscosity is taken constant, as earlier explained. Still, distribution of quantitative results can give insight of the physics. Viscosity ratio gets very high values close to pipe axis, but those regions have very small velocity gradients. When viscosity ratio gets small values close to wall, velocity gradients get bigger values. The change of turbulent viscosity ratio and turbulent viscosity is what regulates the flow, consume energy of the flow and shape the velocity profiles. Therefore, radial profile of axial velocity is flatter comparing with viscosity ratio radial profiles or turbulent viscosity radial profiles.

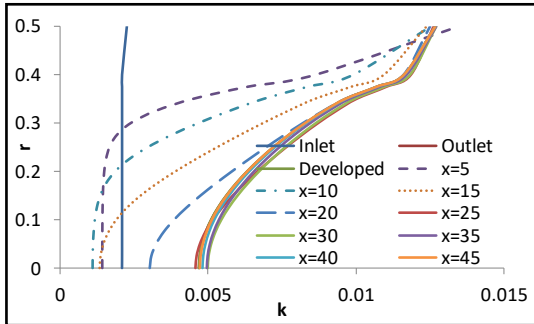




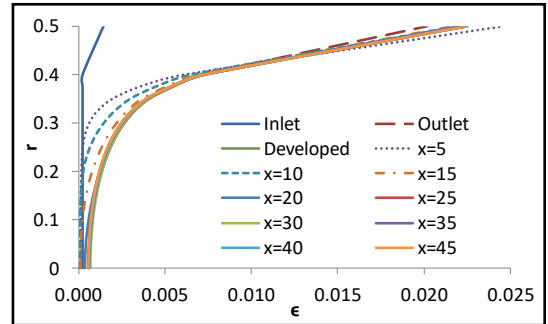
15.a –  $Re=5 \times 10^3$



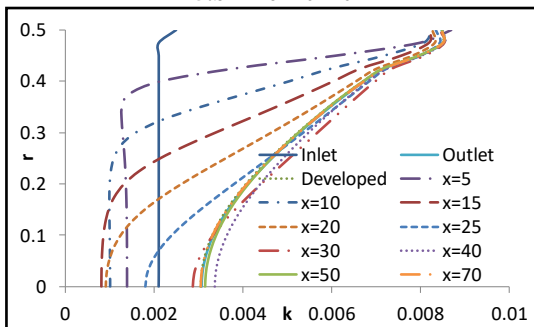
16.a –  $Re=5 \times 10^3$



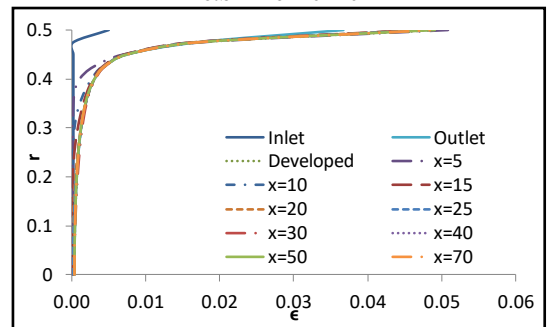
15.b –  $Re=10 \times 10^3$



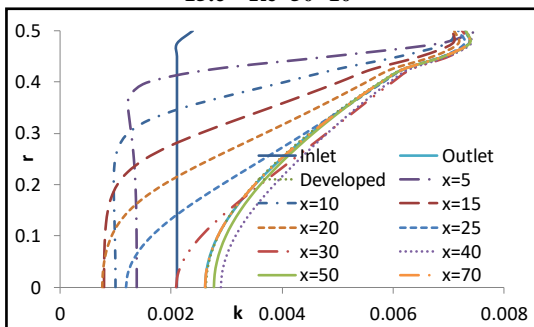
16.b –  $Re=10 \times 10^3$



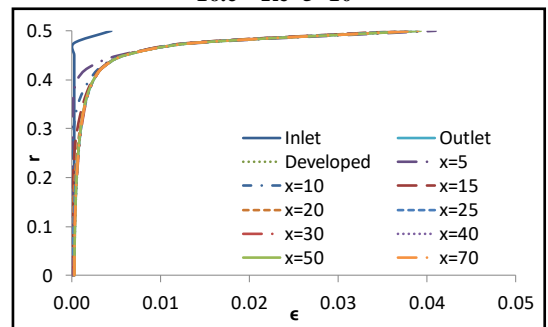
15.c –  $Re=50 \times 10^3$



16.c –  $Re=50 \times 10^3$



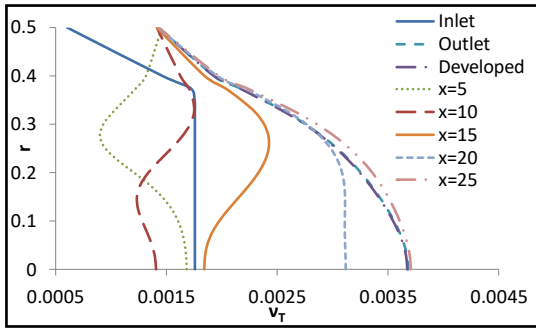
15.d –  $Re=100 \times 10^3$



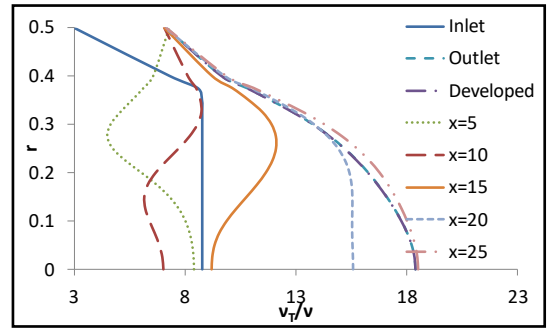
16.d –  $Re=100 \times 10^3$

Fig. 15. Turbulent kinetic energy profile in radial direction.

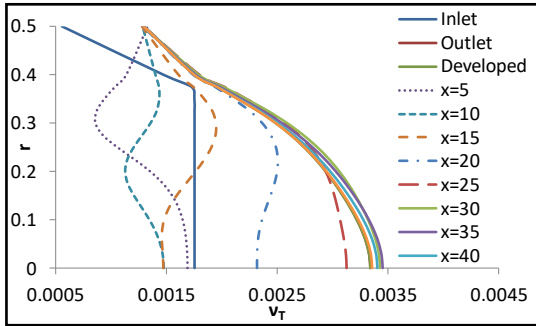
Fig. 16. Turbulent kinetic energy dissipation profile in radial direction.



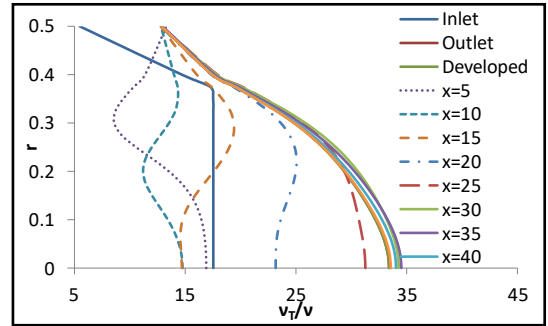
17.a –  $Re=5 \times 10^3$



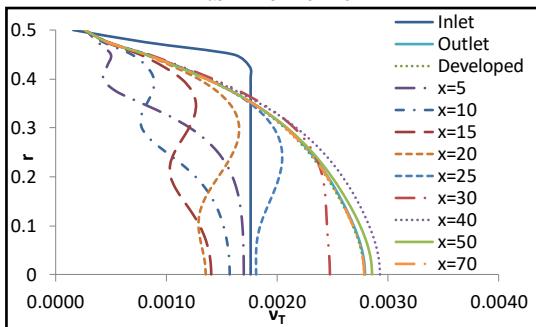
18.a –  $Re=5 \times 10^3$



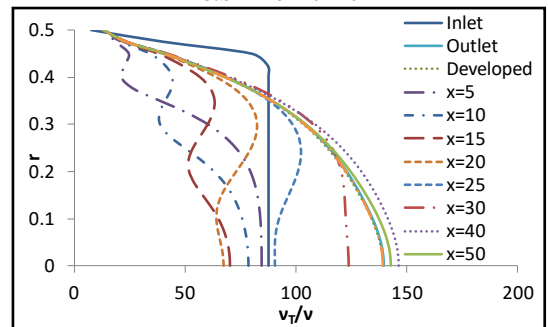
17.b –  $Re=10 \times 10^3$



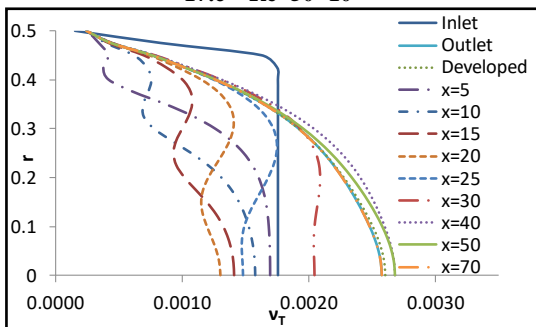
18.b –  $Re=10 \times 10^3$



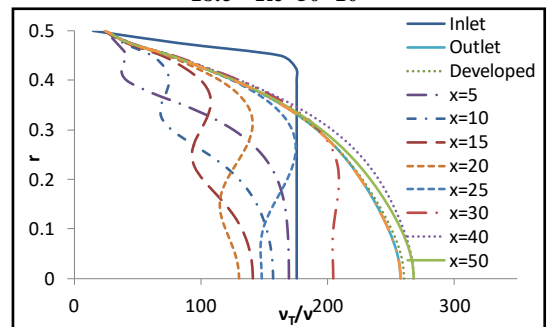
17.c –  $Re=50 \times 10^3$



18.c –  $Re=50 \times 10^3$



17.d –  $Re=100 \times 10^3$



18.d –  $Re=100 \times 10^3$

Fig. 17. Turbulent viscosity profile in radial direction.

Fig. 18. Viscosity ratio profile in radial direction.

#### 4. CONCLUSION

A steady dimensionless CFD analysis is conducted in order to draw velocity and turbulence profiles in the hydrodynamic entry length of pipes. Hydrodynamic entry length is evaluated in respect of subdivisions and their implications on heat and mass transfer are discussed. Literature is also surveyed in an extensive manner in respect of historical development.

It is concluded that, considering the present capabilities and opportunities of CFD, simultaneously developing hydrodynamic and thermal quantities for turbulent flow of Newtonian fluids in pipes having wall thickness necessitate CFD. No direct empirical correlation is encountered in literature, correlating dimensionless numbers, pipe diameter and pipe length to give distribution of axial velocity component in radial direction. An alternative way is to use boundary layer theory or empirical turbulent velocity profiles using power-law. There is also a relatively earlier method to use in heat transfer works directly skipping the velocity computation by means of Eigen values. However, this latter method is mainly for thermal entry length instead of simultaneous development.

Turbulent pipe flow has a characteristic axial velocity profile in axial direction. This is due to the sequel in which boundary layers grow and meet at the pipe axis, leading to simultaneous development of turbulent viscosity and velocity profiles due to mixing process. A peak value is followed by a decrease which is not seen in laminar flow. The turbulence model maintains this phenomenon by changing turbulent viscosity locally. Therefore, positive direction radial velocity component exists in the hydrodynamic entrance length unlike laminar flow.

Radial velocity component approaches to zero as flow develops. This velocity component promotes transport in the entrance region where it has relatively higher magnitudes. The resolution of radial velocity is crucial, thus, for correct calculations of transfer processes. As  $Re$  increases, radial velocity component distributed to a longer distance in axial length.

The scheme for nondimensionalization in commercial CFD software is also presented and it is very convenient if governing equations depend on a single dimensionless number, i.e.  $Re$ . This scheme can be tested further with more than one dimensionless parameters are considered.

**Author Contribution:** Literature survey and evaluation – E.C., A.A.; Numerical analysis – E.C., A.A.; Evaluation and writing – E.C., A.A.; Supervising – Ş.B.

**Conflict of Interest:** None is declared.

**Financial Disclosure:** None is declared.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This content is part of PhD dissertation of Eyub CANLI, Selcuk University, Konya, TURKEY [8].


#### REFERENCES

- [1] Ş. Bilir and A. Ateş, "Transient conjugated heat transfer in thick walled pipes with convective boundary conditions," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 46, pp. 2701-2709, 2003.
- [2] A. Ateş, S. Darıcı, and Ş. Bilir, "Unsteady conjugated heat transfer in thick walled pipes involving two-dimensional wall and axial fluid conduction with uniform heat flux boundary condition," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 5058-5064, 2010.
- [3] A. H. Altun, Ş. Bilir, and A. Ateş, "Transient conjugated heat transfer in thermally developing laminar flow in thick walled pipes and minipipes with time periodically varying wall temperature boundary condition," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 92, pp. 643-657, 2016.
- [4] J. Sucec and A. M. Sawant, "Unsteady, conjugated, forced convection heat transfer in a parallel plate duct," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 27, pp. 95-101, 1984.
- [5] X. Wang and N. Zhang, "Numerical analysis of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 3957-3970, 2005.
- [6] Ş. Bilir, "Transient conjugated heat transfer in pipes involving two-dimensional wall and axial fluid conduction," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 45, pp. 1781-1788, 2002.
- [7] U. Atmaca, Ş. Bilir, and A. Ateş, "Effects of wall conjugation and fluid axial conduction in circumferentially partly heated pipes and minipipes," *Heat Transfer Research*, vol. 48, 2017.
- [8] E. Canli, "NUMERICAL SOLUTION OF TRANSIENT CONJUGATED HEAT TRANSFER IN THICK WALLED PIPES WITH TURBULENT FLOW," PhD, Mechanical Engineering, Selcuk University, Konya, Turkey, 2020.
- [9] L. Salami, "An investigation of turbulent developing flow at the entrance to a smooth pipe," *International journal of heat and fluid flow*, vol. 7, pp. 247-257, 1986.
- [10] T. Cebeci and P. Bradshaw, *Physical and computational aspects of convective heat transfer*: Springer-Verlag, 1984.
- [11] H. Biglarian, H. Beyrami, Q. Dorosti, and A. Sattari, "Analytical solution of turbulent pipe flow according to second-gradient theory," *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, vol. 10, pp. 318-324, 2015.
- [12] S. Darıcı, Ş. Bilir, and A. Ateş, "Transient conjugated heat transfer for simultaneously developing laminar flow in thick walled pipes and minipipes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 84, pp. 1040-1048, 2015.
- [13] E. Canli, A. Ates, and S. Bilir, "Comparison of turbulence models and CFD solution options for a plain pipe," in *EPJ Web of Conferences*, 2018, p. 02013.

- [14] E. Canli, A. Ates, and S. Bilir, "Conjugate heat transfer for turbulent flow in a thick walled plain pipe," in EPJ Web of Conferences, 2018, p. 02014.
- [15] D. Bryant, E. M. Sparrow, and J. M. Gorman, "Turbulent pipe flow in the presence of centerline velocity overshoot and wall-shear undershoot," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 125, pp. 218-230, 2018.
- [16] E. KAHRAMANOĞLU, S. Sezen, and S. Bayraktar, "Computational fluid dynamics analyses on the hydrodynamic entry length in internal flows," *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, vol. 23, 2017.
- [17] D. Hasan, "Numerical Flow Analysis of The Variation of Central Axial Velocity Along The Pipe Inlet," *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics*, vol. 2, pp. 323-333.
- [18] W. Kumara, B. Halvorsen, and M. Melaaen, "Computational study on non-asymptotic behaviour of developing turbulent pipe flow," *Advances in Fluid Mechanics VIII*, vol. 69, pp. 39-52, 2010.
- [19] E. Sparrow and R. Siegel, "Unsteady turbulent heat transfer in tubes," *Journal of Heat Transfer Transactions of the ASME*, pp. 170-178, 1960.
- [20] R. Johnk and T. Hanratty, "Temperature profiles for turbulent flow of air in a pipe—II The thermal entrance region," *Chemical Engineering Science*, vol. 17, pp. 881-892, 1962.
- [21] Y. Lin and L. Chow, "Effects of wall conduction on heat transfer for turbulent flow in a circular tube," *Journal of Heat Transfer Transactions of the ASME*, vol. 106, pp. 597-604, 1984.
- [22] O. Dwyer and H. Berry, "Heat transfer to liquid metals flowing turbulently and longitudinally through closely spaced rod bundles: Part I," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 23, pp. 273-294, 1972.
- [23] T. Cebeci and K. Chang, "A general method for calculating momentum and heat transfer in laminar and turbulent duct flows," *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, vol. 1, pp. 39-68, 1978.
- [24] B. Ruth and H. Yang, "An empirical correlation for velocity distribution of turbulent fluid flow," *AIChE Journal*, vol. 3, pp. 117-120, 1957.
- [25] B. Weigand, *Analytical Methods for Heat Transfer and Fluid Flow Problems*: Springer, 2015.
- [26] R. Maddahian, B. Farhanieh, and B. Firoozabadi, "Turbulent flow in converging nozzles, part one: boundary layer solution," *Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 32, p. 645, 2011.
- [27] A. Vardy and J. Brown, "Transient turbulent friction in smooth pipe flows," *Journal of sound and vibration*, vol. 259, pp. 1011-1036, 2003.
- [28] P. W. Stoltenkamp, "Dynamics of turbine flow meters," *Technische Universiteit Eindhoven*, 2007.
- [29] R. Singh, K. Nigam, and P. Mishra, "Developing and fully developed turbulent flow through annuli," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 13, pp. 349-353, 1980.
- [30] K. T. Trinh, "Logarithmic Correlations For Turbulent Pipe Flow Of Power Law Fluids," arXiv preprint arXiv:1007.0789, 2010.
- [31] D. M. McEligot, S. Smith, and C. A. Bankston, "Quasi-developed turbulent pipe flow with heat transfer," 1970.
- [32] S. Mikio and E. Kazuo, "Effect of conduction in wall on heat transfer with turbulent flow between parallel plates," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 20, pp. 507-516, 1977.
- [33] Q. Slaiman, M. Abu-Khader, and B. O. Hasan, "Prediction of heat transfer coefficient based on eddy diffusivity concept," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 85, pp. 455-464, 2007.
- [34] R. Martinuzzi and A. Pollard, "Comparative Study of Turbulence Models in Predicting Turbulent Pipe Flow Part I: Algebraic Stress and  $k-\epsilon$  Models," *AIAA Journal*, vol. 27, pp. 29-36, 1989.
- [35] A. R. Barbin and J. B. Jones, "Turbulent Flow in the Inlet Region of a Smooth Pipe," *Journal of Basic Engineering*, vol. 85, pp. 29-33, 1963.
- [36] A. Klein, "Review: Turbulent Developing Pipe Flow," *Journal of Fluids Engineering Transactions of the ASME*, vol. 103, pp. 243-249, 1981.
- [37] J. Doherty, P. Ngan, J. Monty, and M. Chong, "The development of turbulent pipe flow," presented at the 16th Australasian Fluid Mechanics Conference, Australia, 2007.
- [38] J. W. Richman and R. S. Azad, "Developing turbulent flow in smooth pipes," *Appl. Sci. Res.*, vol. 28, pp. 419-441, 1973.
- [39] S. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*: CRC Press, 1980.
- [40] E. CANLI, A. Ali, and Ş. BİLİR, "Derivation of Dimensionless Governing Equations for Axisymmetric Incompressible Turbulent Flow Heat Transfer Based on Standard  $k-\epsilon$  Model," *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 20, pp. 1096-1111, 2020.
- [41] B. Launder and D. Spalding, "THE NUMERICAL COMPUTATION OF TURBULENT FLOWS," *COMPUTER METHODS IN APPLIED MECHANICS ANR ENGINEERING*, vol. 3, pp. 269-289, 1974.
- [42] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*: Pearson education, 2007.
- [43] P. J. Roache, "Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 116, pp. 405-413, 1994.
- [44] U. Manual, "ANSYS FLUENT 12.0," *Theory Guide*, 2009.
- [45] J. W. Slater, "Examining spatial (grid) convergence," NPARC Alliance CFD Verification and Validation Web Site, NASA Glenn Research Center, Cleveland, OH, accessed June, vol. 7, p. 2017, 2008.
- [46] Y. A. Cengel, *Fluid mechanics*: Tata McGraw-Hill Education, 2010.

## Hill Tipi Kas Modeli ile Pazu Kasının Mekanik Analizi: Ön Kol Bükme Hareketinin Benzetimi

\*<sup>1</sup>Kasım Serbest

<sup>1</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Türkiye,  
kserbest@subu.edu.tr, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 25.05.2020

Kabul Tarihi: 17.01.2021

### Öz

İskelet kaslarının dinamik analizleri için matematiksel yöntemler veya bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır. Matematiksel yöntemler doğrusal olmayan yapılarından dolayı uğraştırıcı olabilir. Kas mekaniğine yönelik geliştirilen özel yazılımları kullanmak ise uzmanlık gerektirmektedir. Dolayısıyla kas mekaniği analizleri için herkes tarafından kolaylıkla kullanılabilir bir model geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada MATLAB araçları kullanılarak pazu kası için bir benzetim modeli önerilmektedir. Model kullanılarak dambıl ile ön kol bükme egzersizinin dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Dirsek eklemi momenti, pazu kası kuvveti ve kas işi hesaplanmıştır. Eklem momenti değişiminin 14.45 – 28.24 Nm arasında, maksimum kas kuvvetinin 941.5 N ve kas işinin 27.58 J olduğu bulunmuştur. Elde edilen sonuçların, protez ve ortez tasarımlarında ve rehabilitasyon süreçlerinin değerlendirilmesinde kullanılacağı düşünülmektedir. Model üzerinde kolayca değişiklik yapılarak farklı egzersizler ve farklı kas grupları için incelemeler yapılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Pazu kası, Hill kas modeli, biyomekanik, MATLAB

## A Mechanical Analysis of Biceps Brachii with Hill Type Muscle Model: a Simulation of Forearm Curl

### Abstract

Mathematical methods or computer software are used for dynamic analysis of skeletal muscles. Mathematical methods could be challenging because of nonlinear equations forms. The use of special software for muscle mechanics requires expertise. Therefore, a model needs to be developed that can be easily used by researchers to analyse muscle mechanics. In this study, a simulation model is proposed for biceps brachii using MATLAB tools. A dynamic analysis of the forearm curls exercise with dumbbell was performed using this simulation model. Elbow joint moment, biceps brachii force and muscle work were calculated. The results were as follows: The joint moment was between 14.45 – 28.24 Nm, the maximum muscle force was 941.5 N and the muscle work was 27.58 J. It is thought that the results can be used in prosthesis and orthosis designs and in the evaluation of rehabilitation processes. Examinations for different exercises and different muscle groups can be carried out by modifying the model easily.

**Keywords:** Biceps brachii, Hill muscle model, biomechanics, MATLAB

### 1. GİRİŞ

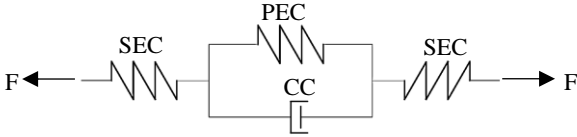
Kaslar, vücudumuzdaki kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye çeviren biyokimyasal makinelerdir. İskelet kasları (çizgili veya kırmızı kaslar), kemikler ve eklemlerle birlikte vücut uzuvlarının hareket etmesini sağlarlar. Ayrıca iskelet sisteminin maruz kaldığı darbeler için sönümleyici olarak görev yaparlar [1]. Aktin ve miyozin liflerin hareketi sonucu kas kasılması meydana gelir ve kaslarda kuvvet üretilir [2]. Kaslarda üretilen kuvvetin etkilerini eklem momenti, kas işi ve kas gücü şeklinde mekanik olarak değerlendirmek

mümkündür. Kas mekaniğinin anlaşılması yapay kas geliştirme [3], protez ve ortez tasarımları [4], egzersiz planlaması ve rehabilitasyon süreçleri [5] açısından önem arz etmektedir.

Kas kuvvetinin incelenmesi için temelde iki yaklaşım kullanılmaktadır. Bunlardan biri kayan lifler hipotezidir [6]. Bu hipotez fizyolojik model olarak da adlandırılabilir. Aktin ve miyozin liflerin hareketi ile kas kuvveti açıklanmaktadır. Bir diğer yaklaşım ise Hill kas modelidir. Bu modelde kasların viskoelastik özellikleri dikkate alınarak kaslardaki

\*Sorumlu Yazar: Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Türkiye, kserbest@subu.edu.tr, +90 (264) 616 0305

kuvvet üretimi, yay ve sönüm elemanları yardımıyla açıklanmaktadır [7]. Şekil 1'de Hill kas modelinin şematik gösterimi yer almaktadır. Burada CC kasılabilen bileşenleri (aktin ve miyozin lifler), PEC kas liflerine destek olan bağ dokuları (endomisyum, perimisyum, sarkolemma), SEC ise tendonlar tarafından kasa iletilen kuvveti temsil etmektedir. Bu modelde CC bir sönüm elemanı, PEC ve SEC yay elemanı olarak temsil edilmektedir. Dolayısıyla kas kuvveti – kasılma hızı ilişkisi CC ile, kas kuvveti – kas uzunluğu arasındaki ilişki ise PEC ile ifade edilmektedir.



**Şekil 1.** Hill kas modeli. CC; kasılabilen bileşen (contractile component), PEC; paralel elastik bileşen (parallel elastic component), SEC; seri elastik bileşen (series elastic component)

Kas kuvvetinin en belirleyici bileşeni CC'dir. Kas kuvvetine katkı yapan ikincil derecedeki bileşenler ise SEC'dir. Kasılma devam ederken tendonlarda üretilen kuvvet kaslara aktararak kas kasılmasına katkı sağlanır. Hill'e benzer şekilde Crowe'da [8] üç elemandan oluşan bir viskoelastik model önermiş ve kas kasılmasının matematiksel ifadesini ortaya koymuştur. Hill ve Crowe tarafından önerilen modeller ve matematiksel ifadeler kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmakta ve kas mekaniği incelenmektedir.

Yu ve Wilson [9] yeniden düzenlemiş bir Hill kas modeli kullanarak pazu ve arka kol kasının pasif mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Tao ve So [10] dirsek ekleminin fleksiyon hareketini Hill kas modeline göre incelemişler ve eklem momentlerini hesaplamışlardır. Rohrle ve arkadaşları [11] pazu ve arka kol kası için sürekli ortam mekaniği prensiplerine göre bir model önermişler ve ileri dinamik yöntem ile kas kuvvetini ifade etmişlerdir. Yukarıda sayılan çalışmalarda kas mekaniği ile ilgili incelemeler matematiksel yöntemlerle gerçekleştirilmiştir.

Matematiksel yöntemlerin yanı sıra kas mekaniği ile ilgili benzetimler için bilgisayar yazılımları (paket program) da kullanılmaktadır. Kas ve iskelet sistemi analizleri için geliştirilen ticari yazılımlardan biri AnyBody'dir. Damsgaard ve arkadaşları [12] tarafından geliştirilen bu yazılım ile kas ve iskelet sistemi analizleri katı cisim mekaniği prensiplerine göre ters dinamik yöntem kullanılarak yapılmaktadır. Delp ve arkadaşları [13] tarafından açık kaynak olarak sunulan OpenSim yazılımı ile atletik hareketlerin bile benzetimleri yapılabilmektedir. Kas ve iskelet sistemi analizlerine yönelik özel olarak geliştirilen bu yazımların haricinde kas mekaniği incelemeleri için ADAMS [14] ve COMSOL [15] gibi çoklu-fizik yazılımları da kullanılmaktadır. Bunların haricinde kas mekaniği hesaplamaları için önerilen denklemler, MATLAB/Simulink blok diyagramları kullanılarak çözülebilmektedir [16].

Kas mekaniği incelemeleri için önerilen matematiksel ifadeler doğrusal olmayan yapıda olduğundan bunların çözümleri uğraştırıcı olmaktadır. AnyBody, OpenSim, ADAMS gibi yazılımlar ise karmaşık modelleme tekniklerinden dolayı sadece alanında uzman kişiler tarafından tercih edilmektedir. Bununla birlikte bu platformlardan elde edilen sonuçların başka platformlara entegre edilmesi zahmetli olmaktadır. Ayrıca elde edilen sonuçların orteز-protez kontrolü gibi alanlarda kullanılması gerektiğinde başka yazılımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Yukarıdaki bilgiler doğrultusunda kas mekaniği ile ilgili analizler için daha basit, herkes tarafından yaygın olarak kullanılabilir ve matematiksel ifadelerin karmaşıklığıyla uğraşmaya gerek duyulmayan yazılımlara ihtiyaç vardır.

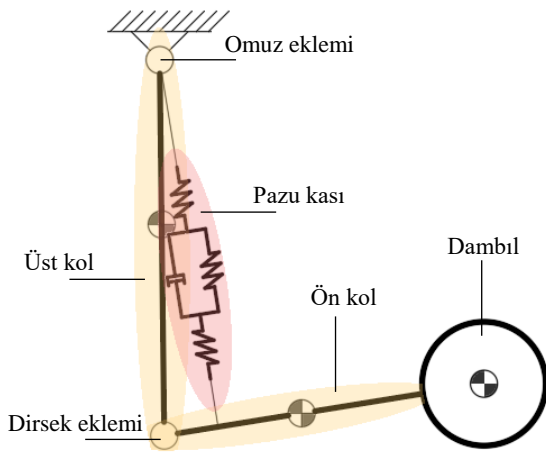
Bu çalışmada kas mekaniği analizlerinin MATLAB / Simscape Multibody araçları kullanılarak nasıl gerçekleştirilebileceği açıklanmıştır. Böylece kas mekaniği çalışmaları için herkes tarafından kolayca kullanılabilir esnek bir model sunulması amaçlanmıştır. Simscape Multibody ile gerçek boyutlardaki mekanik sistemler blok diyagramları şeklinde modellenir ve dinamik analizler gerçekleştirilebilir. Mekanik sistemler için geliştirilmiş olmasına rağmen insan hareketinin analizlerinde de kullanılabilir [17-19]. Çalışma kapsamında ön kol, üst kol, dirsek eklemi ve pazu kası Simscape Multibody araçları kullanılarak modellenmiştir. Pazu kası için Hill kas modeli tercih edilmiştir. Daha sonra bu model kullanılarak dambıl ile ön kol bükme egzersizinin benzetimi yapılmıştır. Benzetim sonucunda eklem momenti, kas kuvveti ve kas işi hesaplanmıştır. Önerilen model üzerinde değişiklikler yapılarak farklı kas ve eklemler için de analizler gerçekleştirmek mümkün olacaktır.

## 2. YÖNTEM

Dambıl ile ön kol bükme egzersizinin benzetimi için öncelikle ön kol, üst kol, dirsek eklemi ve pazu kasının eklem uzun modeli oluşturulmuştur. Ardından uzuvların kütle ve atalet özellikleri önceki çalışmaların sonuçlarına göre belirlenmiştir. Bir erkek denek ile ön kol bükme egzersizinin hareket analizi yapılmıştır. Eklem uzuv modeli, uzuvların kütle ve atalet özellikleri Simscape Multibody blok diyagramları ile modellenmiştir. Hareket analizi verileri kullanılarak Simscape Multibody modeli ile ön kol egzersizinin benzetimi yapılmıştır. İlerleyen bölümlerde bu işlemlerin detaylarına yer verilmiştir.

### 2.1. Eklem Uzun Modeli

Ön kol, üst kol, dirsek eklemi, omuz eklemi, pazu kası ve dambıldan oluşan eklem uzuv modeli Şekil 2'de görülmektedir. Ön kol ve üst kol uzuvları katı cisim olarak ele alınmıştır. Dirsek eklemi tek serbestlik dereceli döner mafsalsı olarak modellenmiştir. Omuz ve el bileği eklemlerinde bir inceleme yapılmayacağından bu eklemlerin hareketi sabitlenmiştir. Pazu kası, Hill kas modeline uygun olarak yay ve sönüm elemanları kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 2. Tek serbestlik dereceli eklem uzuv modeli.

Hill kas modeline göre pazu kasının maksimum kasılma kuvveti Denklem 1 ile ifade edilebilir. Bu formül aynı zamanda kasılma hızı ile kas kuvveti arasındaki ilişkiyi de tanımlar.

$$[\vec{F}(x) + a][\vec{v}(t) + b] = [\vec{F}(x)_{max} + a]b \quad (1)$$

Burada  $F$  kas kuvvetini,  $v$  kasın kısılma hızını,  $F_{max}$  maksimum izometrik kuvvetini,  $t$  zamanı,  $x$  kasın uzamasını ifade etmektedir.  $a$  ve  $b$  sabitlerdir. Ön kol bükme hareketi sırasında meydana gelen pazu kası kuvveti aynı zamanda dirsek eklemi üzerinde bir dönme momenti meydana getirmektedir (Denklem 2).

$$\vec{M}(t) = \vec{F}(t) \cdot d \quad (2)$$

Denklem 2’de  $M$  dirsek eklemine meydana gelen reaksiyon momentini,  $d$  ise pazu kasının ön kola bağlandığı yer ile dirsek eklemi dönme merkezi arasındaki mesafeyi belirtmektedir. Kasın ürettiği mekanik güç Denklem 3, harcadığı enerji ise Denklem 4 ile hesaplanabilir.

$$P(t) = \vec{M}(t) \cdot \vec{\omega}(t) \quad (3)$$

$$W(t) = \int_{t_1}^{t_2} P(t) \cdot dt \quad (4)$$

Burada  $P$  gücü,  $\omega$  eklem açılma hızını,  $W$  belirli zaman aralığında yapılan işi ifade etmektedir. Denklem 1 doğrusal olmayan bir yapıda olduğundan [7] kas kuvvetini, eklem momenti üzerinden hesaplamak daha kolaydır. Kas kuvveti belirlendikten sonra kas gücü ve kas işi kolay bir şekilde hesaplanabilir.

## 2.2. Antropometrik Parametreler

Uzuvların kütle, atalet momenti, uzunluk, kütle merkezinin yeri gibi özellikleri ile pazu kasının yay sabiti, sönüm sabiti, kemiğe bağlanma noktasının eklem merkezine uzaklığı gibi özellikleri önceki çalışmaların sonuçlarına göre belirlenmiştir. Kütle ve boy uzunluğu parametreleri hareket analizi çalışmasına katılan erkek denek (70 kg, 174 cm)

referans alınarak belirlenmiştir. Tablo 1’de eklem uzuv modelinin antropometrik özellikleri yer almaktadır. İnce bir disk şeklinde modellenen 10 kg kütleli dambılın, xx, yy ve zz eksenlerindeki atalet momenti sırasıyla 250000, 250000, 500000  $g \cdot cm^2$ ’dir.

Tablo 1. Antropometrik özellikler.  $k$ ; yay sabiti,  $b$ ; sönüm sabiti,  $l$ ; pazu kasının serbest haldeki uzunluğu.

Uzuv özellikleri						
Uzuv	Boy (cm) [20]	Kütle (kg) [20]	Atalet momenti ( $g \cdot cm^2$ ) [21]			Proksimal uçtan itibaren kütle merkezi (cm) [20]
			$I_{xx}$	$I_{yy}$	$I_{zz}$	
Üst kol	30.52	1.965	$132 \cdot 10^3$	$22 \cdot 10^3$	$133 \cdot 10^3$	13.3
Ön kol	26.3	1.123	$64.5 \cdot 10^3$	$8.8 \cdot 10^3$	$66.9 \cdot 10^3$	11.31
Pazu kası özellikleri						
$k = 196 \text{ N/m}$ [22]		$b = 49 \text{ Ns/m}$ [22]		$l = 30.1 \text{ cm}$ [22]		$d = 3 \text{ cm}$ [23]

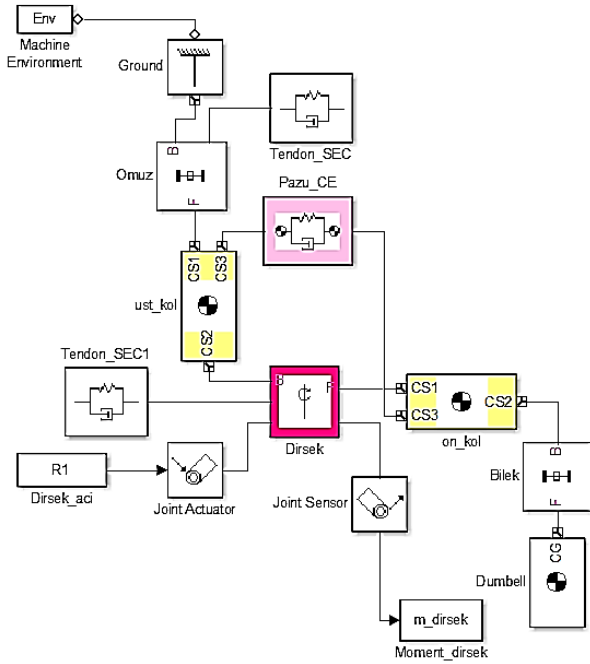
## 2.3. Hareket Analizi

Geliştirilen biyomekanik model ile ön kol bükme egzersizinin benzetimi yapılacağından eklemlerin hareket verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikleri Bölüm 2.2’de belirtilen erkek denek üzerinde hareket analizi işlemi yapılmıştır. Bu doğrultuda deneyin omuz eklemi, dirsek eklemi ve dambıl üzerine pasif işaretleyiciler yerleştirilmiştir. Denek, dambıl ile egzersiz hareketini gerçekleştirmiştir. Hareket analizine, ön kol yere paralel konumda iken başlanmış, ön kolun fleksiyonu ile devam edilmiş ve ön kol başlangıç konumuna geri getirilerek hareket tamamlanmıştır. Hareket analizi sırasında denek ayakta durmuş ve kendi belirlediği bir hızda hareketi gerçekleştirmiştir. Bu esnada görüntüler bir video kamera (30 kare/saniye) ile kaydedilmiştir. Kamera görüntülerinden faydalanarak Tracker (Open Source Physics) video analiz yazılımı ile dirsek eklemine açısal yer değiştirme hesaplanmıştır. Daha sonra bu verilerin türevi alınarak eklem açılma hızı ve açısal ivme değerleri elde edilmiştir. Verilere MATLAB ortamında alçak geçiren filtre uygulanmıştır.

## 2.4. Eklem Uzuv Modelinin Simscape Multibody Yapısı

Eklem uzuv modeli Simscape Multibody araçları kullanılarak Şekil 3’deki gibi ifade edilmiştir. Hareket analizindeki başlangıç konumuna göre uzuvların x, y, ve z eksenlerindeki konumları blok parametreleri içerisine girilmiştir. “Ground” bloğunun konum değerleri (0, 0, 0) şeklinde girilmiştir. Uzuvların koordinat değerleri ise Tablo 2’de yer almaktadır. Dirsek eklemi “Joint Actuator” bloğu ile hareketlendirilmiştir. Hareket analizi sonucunda elde edilen değerler, MATLAB Workspace’deki “R1” (yer değiştirme, hız, ivme, zaman) isimli dosyadan modele aktarılmaktadır. Simscape Multibody modelinin çözümü ters dinamik yöntem (inverse Dynamics) ile sabit adımlı (fixed-step, sample time: 0.033) olarak yapılmıştır. “Joint Sensor”

bloğu ile dirsek eklemine meydana gelen reaksiyon momenti hesaplanmıştır. Ardından kas kuvveti ve kas işi belirlenmiştir.



Şekil 3. Eklem uzuv modelinin Simscape Multibody blok diyagramı.

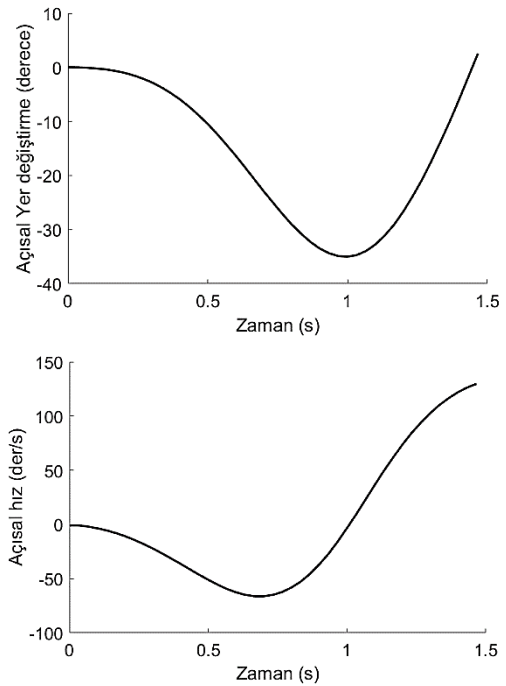
**Tablo 2.** Modelin koordinat parametreleri. CG; ağırlık merkezi, CS; koordinat sistemi. Bağlı; kendinden önceki nokta ile aynı koordinat değerinde olduğunu ifade eder.

Koordinat	Uzuv	
	Üst kol (x, y, z)	Ön kol (x, y, z)
CG	(1.6, -133.3, 0)	(115.3, -286.5, 0)
CS1	Bağlı	Bağlı
CS2	(3.7, -304.6, 0)	(263.3, -262.5, 0)
CS3	(0, 0, 0)	(47.4, -297.5, 0)

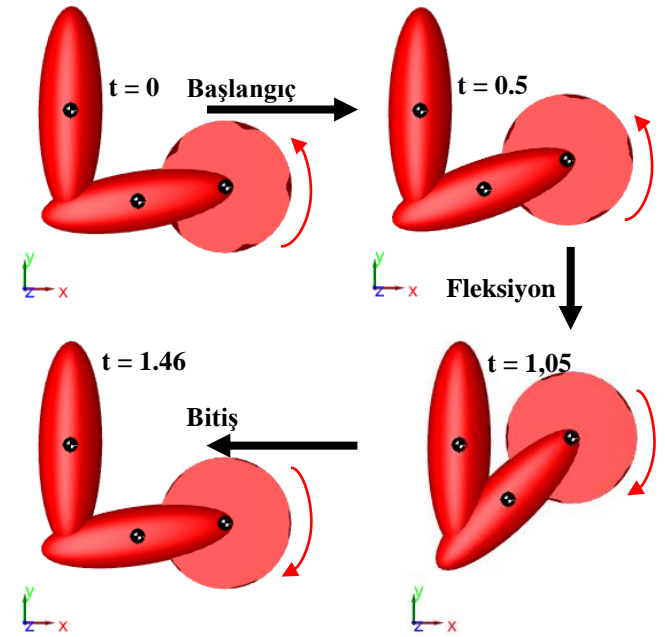
### 3. BULGULAR

Dirsek eklemine hareket analizi sonunda hesaplanan açısal yer değiştirme ve açısal hız değerleri Şekil 4'de görülmektedir. Dirsek eklemi yaklaşık 30 derecelik bir yer değiştirme yapmakta ve ön kol fleksiyon konumuna gelmektedir. Ardından ön kol tekrar başlangıç konumuna gelmektedir.

Simscape Multibody ortamında yapılan benzetim işlemine ait görüntü kareleri Şekil 5'de yer almaktadır. Görsel benzetim işlemi yazılımın "Simulation" özelliği kullanılarak yapılmıştır. Buradaki kırmızı renkli elipsoidler, atalet özelliklerini ifade etmektedir.



Şekil 4. Dirsek eklemine yer değiştirme (üstte) ve açısal hızı (altta).

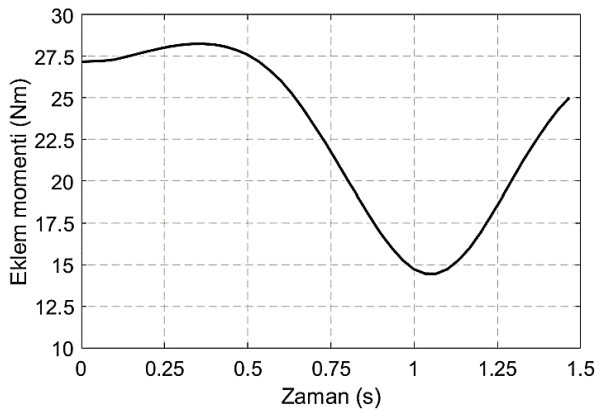


Şekil 5. Ön kol bükme hareketinin görsel benzetimi.

Yapılan benzetim işlemi sonucunda hesaplanan dirsek eklemi momentine Şekil 6'da yer verilmiştir. Burada en yüksek eklem momenti 28.24 Nm, en düşük eklem momenti de 14.45 Nm olarak hesaplanmıştır. En yüksek eklem momenti hareketin başında meydana gelmektedir. Başlangıçta ön kola ivme kazandırmak için yüksek bir eklem



momenti gerekirken, fleksiyonun sonuna doğru ön kolun ivmesi azaldığından eklem momenti de azalmaktadır. Fleksiyondan tekrar başlangıç konumuna gelirken (bitiriş esnasında) eklem momenti tekrar artmaktadır. Ön kolun fleksiyonu sırasında pazu kası konsantrik kasılırken boyu kısalmaktadır. Bitiş esnasında ( $t = 1,05 - 1,46$  s) pazu kası uzayarak eksantrik kasılmaktadır. Eksantrik kasılma eklem hareketini yavaşlatarak bitiriş hareketinin kontrolünü sağlamaktadır. Bitiriş sırasında yer çekimi kuvveti harekete destek olmaktadır. Bu durum eklem momentini azaltıcı yönde etki yapmaktadır.



Şekil 6. Dirsek eklemi momentinin değişimi.

Eklem momenti belirlendikten sonra pazu kası kuvvetinin maksimum değeri 941.5 N, minimum değeri ise 481.8 N olarak hesaplanmıştır. Hareket esnasında kas tarafından harcanan mekanik enerji 27.58 J olarak bulunmuştur.

#### 4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Kas mekaniğinin incelenmesi için bir bilgisayar benzetim modeli geliştirilen bu çalışmada, pazu kasının ön kol bükme egzersizi sırasındaki dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Simscape Multibody ortamında yapılan benzetim sonucunda eklem momenti hesaplanmıştır. Sonrasında kas kuvveti ve kas işi bulunmuştur. Eklem momentinin değişim davranışı Challis ve Kervin [24] tarafından yapılan çalışmanın sonuçları ile benzerlik göstermektedir. Dambıl ile ön kol bükme hareketi esnasında pazu kasındaki maksimum fleksiyon momentinin ters dinamik yöntemle hesaplandığı bu çalışmada, kas momentinin 23 – 47 Nm arasında değiştiği bulunmuştur. Nolte ve arkadaşları [25] ADAMS yazılımını kullanarak 3 boyutlu bir simülasyon modeli ile ön kol bükme egzersizini incelemişler ve erkek katılımcılarda maksimum dirsek eklemi momentinin 20 – 30 Nm arasında değiştiğini göstermişlerdir. Bizim çalışmamızda ise eklem momentinin maksimum değeri 28.24 Nm olarak hesaplanmıştır. Sonuçlarımızın literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir. Dolayısıyla Simscape Multibody araçları kullanılarak geliştirilen model pazu kasının biyomekanik analizleri için kullanılabilir. Modelin parametreleri kolayca değiştirilerek farklı bireysel özelliklere ve farklı hareketlere göre analizler yapılabilir. Ayrıca pazu kası için önerilen bu model, benzer

özelliklerdeki (eklemlere fleksiyon ve ekstansiyon hareketi yaptıran kaslar) diğer kaslara da uyarlanabilir. İlaveten önerilen modele dambıl, bar, ağırlık sehpası gibi egzersiz ekipmanları eklenebilir ve bu ekipmanların ölçüleri kolayca değiştirilebilir. Böylece kullanılan ekipmanın egzersiz üzerindeki etkinliği incelenebilir.

Bu çalışmada önerilen MATLAB Simscape modeli ile eklemlerin yer değiştirmesini belirlemek için yapılan hareket analizi birbirinden bağımsızdır. Dolayısıyla işaretçi yerleşimi ve kamera seçimi gibi konularda esnek davranmak mümkündür. Ayrıca eklemlerin serbestlik dereceleri (döner mafsalsal veya küresel mafsalsal gibi) Joints blokları ile (revolute veya spherical) kolayca değiştirilebilmektedir.

Yumuşak doku hareketlerinden ve eklemlerin çok merkezli olmalarından dolayı ön kolun fleksiyon hareketi sırasında pazu kasının ön kola bağlantı noktası ile eklem dönme merkezi arasındaki mesafe (d) bir miktar değişmektedir. Bu çalışmada önerilen modelde bu mesafenin sabit kaldığı varsayılmıştır. Bu durum çalışmanın sınırlılığı olarak gösterilebilir. Benzetim işlemi sonucunda hesaplanan moment, kuvvet ve iş değerleri protez ve ortez tasarımları için bir tasarım parametresi olarak kullanılabilir. Üst ekstremite için geliştirilen ortez ve protezlerde kullanılacak eyleyicilerin çalışma şartları pazu kası mekaniğine göre ayarlanabilir. Bununla birlikte elde edilen sonuçlar, rehabilitasyon süreçlerinin değerlendirilmesinde fayda sağlayabilir. Özellikle inme sonrası üst ekstremite rehabilitasyonunda, kas fonksiyonlarının geri kazanımı değerlendirilirken pazu kası kuvveti ve dirsek eklemi momenti nicel bir kıyaslama için kullanılabilir. İlaveten Hill kas modeliyle temsil edilen pazu kası üzerinde gerilme gevşemesi ve sürünme gibi zamana bağlı değişimler incelenebilir.

Gelecek çalışmalardan bir tanesi, önerilen modelin tüm üst ekstremiteye uyarlanması olacaktır. Bunun için modele arka kol kası ile parmak hareketlerini kontrol eden ön kol bölgesindeki fleksör ve ekstansör kas grupları ilave edilecektir. Ayrıca elde edilen kas kuvveti sonuçları, elektromiyografi ölçümleri ile karşılaştırılarak modelin hassasiyeti daha iyi ortaya konabilir.


#### KAYNAKÇA

- [1].K. Serbest, "İskelet Kaslarının Yapısı ve Biyomekaniği," Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, vol. 2, no. 3, pp. 41-51, 2014.
- [2].A. F. Huxley, "Muscular contraction," J Physiol, vol. 243, no. 1, pp. 1-43, 1974.
- [3].S. M. Mirvakili and I. W. Hunter, "Artificial Muscles: Mechanisms, Applications, and Challenges," Advanced Materials, vol. 30, no. 6, pp. 1-28, 2018.
- [4].T. Yan, M. Cempini, C. M. Oddo, and N. Vitiello, "Review of assistive strategies in powered lower-limb orthoses and exoskeletons," Robotics and Autonomous Systems, vol. 64, pp. 120-136, 2015.

- [5].A. W. Andrews and R. W. Bohannon, "Short-term recovery of limb muscle strength after acute stroke," *Arch Phys Med Rehabil*, vol. 84, no. 1, pp. 125-130, 2003.
- [6].H. E. Huxley, "Fifty Years of Muscle and the Sliding Filament Hypothesis," *Eur J Biochem*, vol. 271, no. 8, pp. 1403-1415, 2004.
- [7].J. M. Winters and S. L. Y. Woo, *Multiple Muscle Systems Biomechanics and Movement Organization*, New York: Springer-Verlag, 1990.
- [8].A. Crowe, "A mechanical model of muscle and its application to the intrafusal fibres of the mammalian muscle spindle," *J. Biomech.*, vol. 3, pp. 583-592, 1970.
- [9].T. F. Yu and A. J. Wilson, "A passive movement method for parameter estimation of a musculo-skeletal arm model incorporating a modified hill muscle model," *Comput Meth Prog Bio*, vol. 114, pp. e46-e59, 2014.
- [10].X. Wang, X. Tao, and R. C. H. So, "A Bio-mechanical Model for Elbow Isokinetic and Isotonic Flexions," *Scientific Reports*, vol. 7, pp. 1-10, 2017.
- [11].O. Rohrle, E. Ramasamy, and S. Schmitt, "Forward dynamics applied to a three-dimensional continuum-mechanical model of the upper limb," *Proc. Appl. Math. Mech.*, vol. 11, pp. 155-116, 2011.
- [12].M. Damsgaard, J. Rasmussen, S. T. Christensen, E. Surma, and M. de Zee, "Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody Modeling System," *Simul Model Pract Theory*, vol. 14, pp. 1100-1111, 2006.
- [13].S. L. Delp, F. C. Anderson, A. S. Arnold, P. Loan, A. Habib, C. T. John, E. Guendelman, and D. G. Thelen, "OpenSim: Open-Source Software to Create And Analyze Dynamis Simulations of Movement," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 54, no. 11, pp. 1940-1950, 2007.
- [14].X. Huang and X. Wu, "Simulation Analysis on Mechanical Effect Based on ADAMS and Matlab Software," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 427-429, pp. 388-391, 2013.
- [15].J. M. Ford, "Skeletal Muscle Contraction Simulation: A Comparison in Modeling", Ph. D. thesis, University of South Florida, 2013.
- [16].C. L. Lim, N. B. Jones, S. K. Spurgeon, and J. J. A. Scott, "Modelling of knee joint muscle during the swing phase of gait – a forward dynamics approach using MATLAB/Simulink," *Simul Model Pract Theory*, vol. 11, pp. 91-107, 2003.
- [17].K. Serbest, M. Cilli and O. Eldogan, "Biomechanical effects of daily physical activities on the lower limb," *Acta Orthop Traumatol Turc*, vol. 49, no. 1, pp. 85-90, 2015.
- [18].K. Serbest, M. Cilli and O. Eldogan, "A dynamic virtual hand model for estimating joint torques during the wrist and fingers movements," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 13, no. 6, pp. 1665-1676, 2018.
- [19].K. Serbest, M. Berisha, and M. Cilli, "Dynamic Analysis of Three Different High Bar Dismounts in the Simmechanics Environment," *J Mech Med Biol*, vol. 18, no. 3, pp. 1850030-1-1850030-11, 2018.
- [20].D. Gordon, E. Robertson, G. E. Caldwell, J. Hamill, G. Kamen and S. N. Whittlesey, *Research methods in biomechanics*, Champaign: Human Kinetics, 2004.
- [21].R. F. Chandler, C. E. Clauser, J. T. McConville, H. M. Reynolds, and J. W. Young, "Investigation of inertial properties of the human body" *Aerospace Medical Research Laboratory, Technical Report DOT-HS-017-2-315-1A*, (1975).
- [22].Z. U. Zeren, "Simulation of a 1-d muscle model in Simulink", Master thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2007.
- [23].A. Tozeren, *Human Body Dynamics Classical Mechanics and Human Movement*, New York: Springer-Verlag, 2000.
- [24].J. H. Challis and D. G. Kerwin, "Determining individual muscle forces during maximal, activity: Model development, parameter determination, and validation," *Human Movement Science*, vol. 13, pp. 29-61, 1994.
- [25].K. Nolte, P. E. Krüger, and P. S. Els, "Three dimensional musculoskeletal modelling of the seated biceps curl resistance training exercise," *Sport Biomechanics*, vol. 10, pp. 146-160, 2011.

## Çok Amaçlı Salonlarda Değiştirilebilir Akustik Tasarım: Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu Örneği

\*<sup>1</sup>Okan Şimşek

<sup>1</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 26555, Eskişehir,  
osimsek@eskisehir.edu.tr, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 09.06.2020

Kabul Tarihi: 08.04.2021

### Öz

Çok amaçlı salonlar, ülkemizde farklı nitelikteki etkinliklerin gerçekleştirilmesi için sıklıkla tercih edilmektedir. Literatürde çok amaçlı salonlarla ilgili çok sayıda çalışma olmasına rağmen çalışmalarda incelenen salonlarda icra edilen işlev sayısı çok sınırlı tutulmuş ayrıca sinema işlevini de inceleyerek bu işlev için de öneri getirilen çalışmalara rastlanamamıştır. Literatürdeki boşluğu dolduracak olan bu çalışmada, konser, konferans, tiyatro ve sinema etkinlikleri için akustik açıdan uygun koşulları sağlaması gereken bu salonlara örnek oluşturabilecek nitelikte Anadolu Üniversitesi bünyesindeki 421 kişilik çok amaçlı salon analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Salonun hacim akustiği açısından uygun koşulları sağlayabilmesi için değiştirilebilir hacim ve değiştirilebilir yüzey gereçleri önerilmiştir. Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu için yapılan hacim akustiği analizleri doğrultusunda, ülkemizde yürürlükte olan yönetmeliklerin, uluslararası standartların ve literatürde önerilen kabul edilebilir akustik konfor koşullarının sağlanmasına yönelik öneriler geliştirilmiştir. Geliştirilen bu öneriler doğrultusunda, Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nda icra edilen dört farklı işleve yönelik ulusal/uluslararası mevzuatlarda önerilen kabul edilebilir akustik konfor koşulları sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çok amaçlı salon, mimari akustik, hacim akustiği, akustik tasarım, değiştirilebilir akustik tasarım

## Replaceable Acoustic Design in Multi-Purpose Halls: Cinema Anadolu Multi-Purpose Hall Example

\*<sup>1</sup>Okan Şimşek

<sup>1</sup>Eskişehir Technical University, Faculty of Architecture and Design, Department of Architecture, osimsek@eskisehir.edu.tr

### Abstract

Multi-purpose halls are often preferred for the realization of different events in our country. Although there are many related studies in multi-purpose halls in the literature, the number of functions performed in the halls examined in the studies was kept very limited, and studies suggesting this function were not found by examining the cinema function as well. In this study, which will fill the gap in the literature, a multi-purpose hall of 421 people in Anadolu University, which can serve as an example for these halls, which should provide acoustically appropriate conditions for concerts, conferences, theater and cinema events, was analyzed and evaluated. In order to provide suitable conditions in terms of volume acoustics, replaceable volume and replaceable surface materials have been proposed. In line with the volume acoustics analysis conducted for the Cinema Anadolu Multi-Purpose Hall, suggestions have been developed to provide regulations in force in our country, international standards and acceptable acoustic comfort conditions recommended in the literature. In line with these suggestions, acceptable acoustic comfort conditions recommended in the national / international regulations for four different functions performed in the Cinema Anadolu Multi-Purpose Hall are provided.

**Keywords:** Multi-purpose hall, architectural acoustics, room acoustics, acoustic design, replaceable acoustic design

### 1. GİRİŞ

Bir ortamda insanı yakından etkileyen ve saran fizik koşullarının tümüne yapı fiziği denilmektedir. Isı, ışık, ses, renk, nem gibi etkenler yapı fiziği öğeleri olarak bir mekanın

fiziki ortam koşullarının oluşmasına neden olurlar. Bu fiziki etkenler mimaride önemli bir yer tutarlar. Kullanıcılar için uygun ortamlar tasarlamak zorunda olan mimarlar, kullanıcıların fizyolojik ve psikolojik yapısına uygun olarak yaşama, öğrenme, çalışma, sosyalleşme vb. faaliyetlerini

\*Sorumlu Yazar: Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Eskişehir, Türkiye, osimsek@eskisehir.edu.tr, 05346879303

Doi: 10.21541/apjes.750212

yerine getirecek mekanları tasarlarlar. Tasarlanan bu mekanların fiziki ortam koşulları bireylerin üzerinde fizyolojik, psikolojik ve iş performansı yönünden ciddi etkileri vardır [1-5].

Yapılarda fizik ortam denetiminin bir bölümü olan ses denetiminin, gürültü denetimi ve hacim akustiği olmak üzere iki hedefi vardır. Gürültü denetimi, yapı kabuğu ve bölme elemanları aracılığıyla iletilen seslerin düzeylerini kontrol altında tutmak için alınacak önlemleri kapsar. Bu sayede her türlü yapı, işletme ve tesisin faaliyetleri sırasında bireylerin etki altında kalacağı, her türlü gürültünün, kişilerin, iyi duyma ve algılama koşullarının gerçekleşmesi için, bireylerin fizyolojik ve psikolojik yapılarına gelebilecek her türlü zarar ortadan kaldırılmış olur. Hacim akustiği ise, kapalı hacimlerdeki reverberasyon süresi başta olmak üzere hacim akustiği parametrelerinin düzenlenmesidir [6-9].

Yapı ya da mekanın işlevine göre, bazı fizik ortam öğeleri diğerlerinden daha öncelikli olabilir. Örneğin, temel işlevi işitsel etkinliğe dayanan konferans, toplantı, konser salonu benzeri salonlarda işitsel; temel işlevi işitsel ve görsel etkinliğe dayanan opera, bale, tiyatro, sinema benzeri salonlarda işitsel ve görsel konfor koşullarının sağlanması birinci derecede önem taşır. Hacmin fiziksel sınırlarının oluşumu, tefrişi-iç planlaması ve iç yüzey gereçlerinin seçimi aşamalarında mekanın konuşma ya da müzik etkinliğine hizmet edecek olması, alınacak kararlarda belirleyici olmaktadır. Günümüzde ise, genellikle ekonomik nedenlerde ötürü, salonlarda birden fazla işlev gerçekleşmekte ve bu tür salonlar “çok amaçlı salon” olarak adlandırılmaktadır. Bu tip salonların mekansal ve teknik özelliklerinin konuşma ve müzik etkinliklerine uygun olarak tasarlanması, gerektiğinde değiştirilebilir elemanlarla akustik ortamın uygun hale getirilmesi sağlanmalıdır.

Literatürde çok amaçlı salonlarla ilgili yapılan bazı çalışmalarda ise, Maria Cairolı çok amaçlı salonlar üzerine yaptığı bir çalışmada dairesel bir plana sahip oditoryum için akustik tasarım yaklaşımları ve çözüm önerileri getirmiştir. Çok amaçlı bir hacim yaratmak için hareketli mimari elemanların farklı kombinasyonlarını kullanarak simülasyon programlarını kullanarak önerilen geliştirmiştir [10]. Yapılan başka bir çalışmada ise esas olarak konserler için tasarlanmış tipik bir salonun bilgisayar programı kullanılarak akustik tasarımı gerçekleştirilmiştir. Hareketli tavan tasarımı, ses yutucu ve dağıtıcı elemanlarının kullanılmasıyla değiştirilebilir akustik tasarım elde edilmiştir [14]. Barron ve Kissner’in yaptığı çalışmada ise çok amaçlı salonlar için hem konuşma hem de müzik işlevine uygun olası bir akustik tasarım yaklaşımı geliştirilmiştir. Reverberasyon süresinin beklenenden daha uzun olduğu örnek iki salon üzerinden gerçekleştirilen çalışma hem konuşma hem de müzik işlevine uygun olması istenen salonlara öneriler getirmiştir [12]. Literatür özeti olarak çok amaçlı salonlarla ilgili çok sayıda çalışma olmasına rağmen çalışmalarda incelenen salonlarda icra edilen işlev sayısı çok

sınırlı tutulmuş ayrıca sinema işlevini de inceleyerek bu işlev için de öneri getirilen çalışmalara rastlanamamıştır.

Bu çalışma kapsamında, çok amaçlı salonlarda akustik tasarım konusu, Anadolu Üniversitesi bünyesinde bulunan, konuşmaya dayalı etkinliklerin (konferans ve tiyatro) yanı sıra, sinema ve kimi zaman da konser etkinlikleri için kullanılacak bir salon ile örneklenmiştir. Çalışmada, aktif olarak kullanılan 421 kişi kapasiteli salonun mevcut durumu için akustik değerlendirmeler, sesin nesnel parametrelerinden; reverberasyon süresi (RT), erken düşme süresi (EDT), netlik (C80), açıklık (D50), konuşmanın anlaşılabilirliği (STI), A ağırlıklı ses basınç düzeyi (SPLA), yanal enerji oranı (LF80) ve zamansal ağırlık merkezi (Ts) üzerinden yapılmıştır. Sesin nesnel parametrelerini elde etmek amacıyla ODEON (V 14.0 Auditorium) hacim akustiği simülasyon programı kullanılarak çok amaçlı salonunun analizleri gerçekleştirilmiş ve geliştirilen önerilerden elde edilen bulguların ulusal/uluslararası mevzuat ile karşılaştırılarak, geliştirilen önerilerin doğruluğu kanıtlanmıştır [13].

## 2. MATERYAL VE METOT

Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu, 16 m x 31,50 m boyutlarında, dikdörtgen planlıdır. Akustik tavan olmadan hacmi 2330 m<sup>3</sup> olan salonun kapasitesi 421 kişidir. Salon yüksekliği ortalama 5,10 m, açık sahne ise döşemeden 1,30 m yükseklikindedir (Şekil 1). Kişi başına düşen hacim 5,53 m<sup>3</sup> olup bu değer göz önüne alındığında hacim çok amaçlı salon işlevi için gerekli olan literatürde önerilen optimum kişi başına düşen değerlere çok yakın olduğu tespit edilmiştir (Tablo 1).

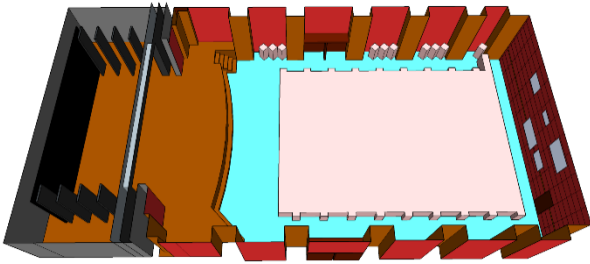
**Tablo 1.** İşlevlere göre önerilen kişi başına düşen hacim

Salon	Hacim (m <sup>3</sup> /Kişi)			
	Doelle [14]			Maekawa [15]
	Min	Max	Önerilen	Önerilen
Konuşma	2,3	4,3	3,1	4-6
Tiyatro-Sinema	2,8	5,1	3,5	4-6
Opera	4,5	7,4	5,7	6-8
Çok amaçlı	5,1	8,5	7,1	6-8
Konser	6,2	10,8	7,8	8-10

Salonun akustik açıdan değerlendirilmesi için sesin nesnel parametre değerlerinin elde edilebilmesi amacıyla gerçekleştirilen simülasyonlar öncesinde mekanın üç boyutlu modeli SketchUp 2017 yazılımında hazırlanmıştır (Şekil 2). Hazırlanan model ODEON (V 14.0 Auditorium) hacim akustiği simülasyon programına aktarıldıktan sonra program kapsamında gerekli kontroller gerçekleştirilmiştir. Öncelikle modellerde herhangi bir hata olup olmadığı denetlenmiş sonrasında yüzeylere malzeme girişleri gerçekleştirilmiştir.

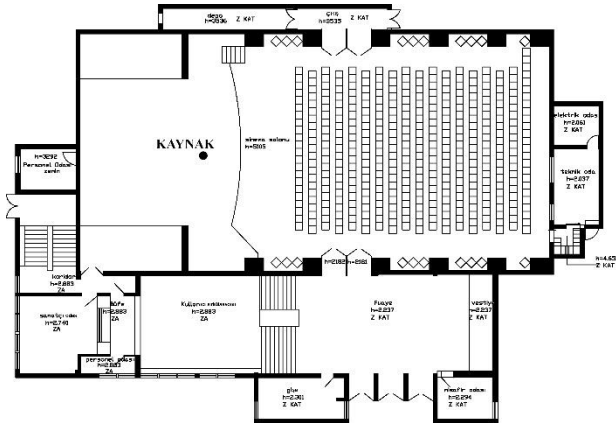


Şekil 1. Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nun iç görünümü



Şekil 2. Salon için hazırlanmış üç boyutlu model

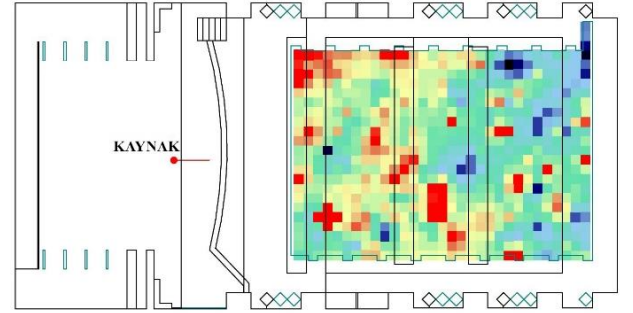
Simülasyonlarda kaynak olarak sahne ortasında konumlanmış 1,50 metre yükseklikte yüksek düzeyli konuşma tayfına karşılık gelen BB93\_RAISED\_NATURAL.S08 (SWL:75,4 dBA) kullanılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Salonun planı ve kaynak konumu

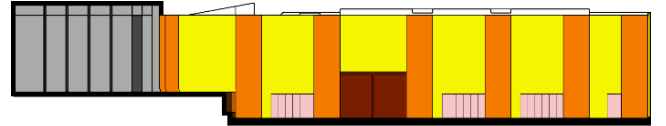
Salonun parter bölümünde döşemeden 1,20m yükseklikte seçilen alıcı alanı 0,50m\*0,50m ızgara sistemi olarak tanımlanarak parametrelerin salon genelindeki dağılım durumları görsel ve sayısal olarak elde edilmiştir (Şekil 4). Hacim akustiği parametrelerinin salon genelindeki dağılım durumlarının incelenmesinde ODEON (V 14.0 Auditorium) hacim akustiği simülasyon programından elde edilen X5, X50 ve X95 değerlerinden ve yüzdelik dağılım

grafiklerinden yararlanılmıştır. (Xn: Koşulun sağlandığı dinleyici alanı(%) yüzdesi)



Şekil 4. Salonun alıcı noktaları için tanımlanan ızgara düzlemi

Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nun iç mekan yüzeylerinde kullanılan kaplama malzemeleri Şekil 5'deki kesit düzleminde ve 63-8000 Hz oktav bant frekans aralığındaki ses yutma katsayıları Tablo 2'de verilmektedir.



Kumaş Kaplı Panel (Mevcut)	Ahşap Kaplama (Mevcut)	Ahşap Kapı (Mevcut)
Sıva (Mevcut)	Alçı Tavan (Mevcut)	Koltuk (Mevcut)

Şekil 5. Salon genelinde kullanılan mevcut malzemelerin kesit düzlemindeki yerleşimi

Program çalıştırdıktan sonra sesin nesnel parametre değerlerine ait elde edilen sonuçlar ulusal/uluslararası mevzuat ve literatürde önerilen optimum değer aralıkları ile karşılaştırılmıştır. Sonrasında ise optimum sınır değerler dışında kalan nesnel parametre değerlerinin optimum düzeylerde elde edilebilmesi için değiştirilebilir hacim ve değiştirilebilir iç yüzey gereçleri kullanılarak farklı işlevlere göre farklı önerilerde bulunulmuştur. Geliştirilen bu önerilerin tekrar simülasyonu gerçekleştirilerek çok amaçlı salonun konser, konferans, tiyatro ve sinema işlevleri için elde edilen bulguların ulusal/uluslararası mevzuat ile karşılaştırılarak, geliştirilen önerilerin doğruluğu kanıtlanmıştır.

### 3. BULGULAR

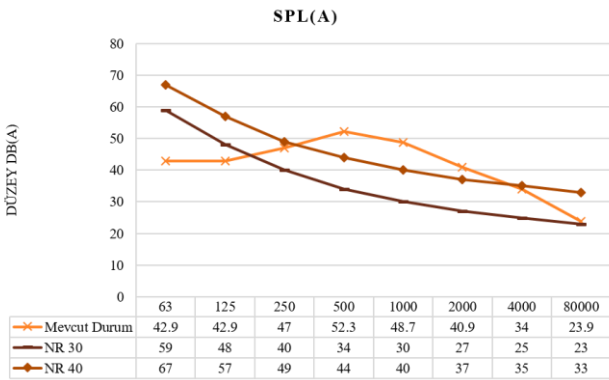
Salon ile ilgili değerlendirmeler; reverberasyon süresi (RT), erken düşme süresi (EDT), netlik (C80), açıklık (D50), konuşmanın anlaşılabilirliği indeksi (STI), A ağırlıklı ses basınç düzeyi(SPLA), yanal enerji oranı (LF80) ve zamansal ağırlık merkezi (Ts) parametrelerinin literatürde önerilen kabul edilebilir değerleri ile karşılaştırılması yoluyla gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 2.** Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nun iç mekan yüzeylerinde kullanılan malzemeler ve 63-8000 Hz oktav bant frekans aralığındaki ses yutma katsayıları

NO	Yüzey	Malzeme Kodu[16]	Malzeme	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
1	Sahne Döşemesi	3005	Parke	0,2	0,2	0,15	0,10	0,10	0,05	0,10	0,10
2	Duvar Panelleri	12004	Kumaş Kaplı	0,15	0,15	0,7	0,6	0,6	0,85	0,9	0,9
3	Sahne Duvarları	4000	Sıva	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05
4	Camlar	10004	Lamine Çift Cam	0,15	0,15	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
5	Salon Döşemesi	6001	PVC Kaplama	0,02	0,02	0,02	0,04	0,05	0,05	0,1	0,1
6	Tavan	4043	Alçı	0,3	0,3	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05	0,05
7	Kolonlar	3066	Ahşap Kaplama	0,28	0,28	0,22	0,17	0,09	0,1	0,11	0,11
8	Kapılar	10007	Ahşap	0,14	0,14	0,1	0,06	0,08	0,1	0,1	0,1
9	Sahne Perdesi	8010	Kumaş	0,14	0,14	0,35	0,55	0,72	0,7	0,65	0,65
10	Yan Sahne Bölücüleri	4000	Sıva	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05
11	Dinleyici Alanı	11057	Kumaş Kaplı Koltuklar	0,35	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55	0,55

### 3.1. Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nun Mevcut Durum Akustik Analizi Ve Değerlendirilmesi

Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu mevcut durumu genelinde ses düzeyinin seslendirmesiz koşulda yetersiz olabileceği simülasyon sonucu elde edilen A ağırlıklı ses düzeylerinin NR 30 ve NR 40 kabul edilebilir fon gürültüsü değerleri ile karşılaştırılmasıyla görülmüştür. Konuşmanın anlaşılabilirliği açısından önem taşıyan 500Hz, 1000Hz, 2000Hz ve 4000Hz frekanslarında salondaki ses düzeyleri ile kabul edilebilir fon gürültüsü düzeyleri arasındaki ayrımların yetersiz olduğu görülmektedir (Şekil 6).

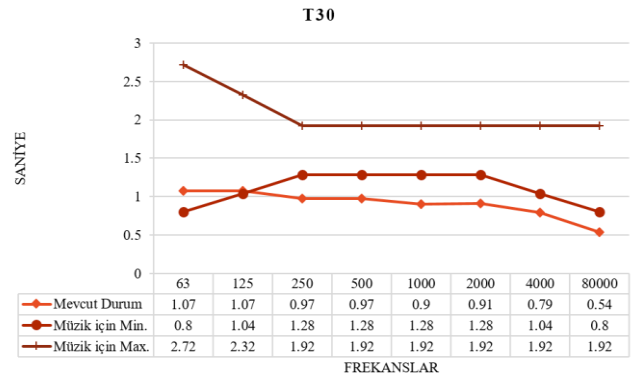
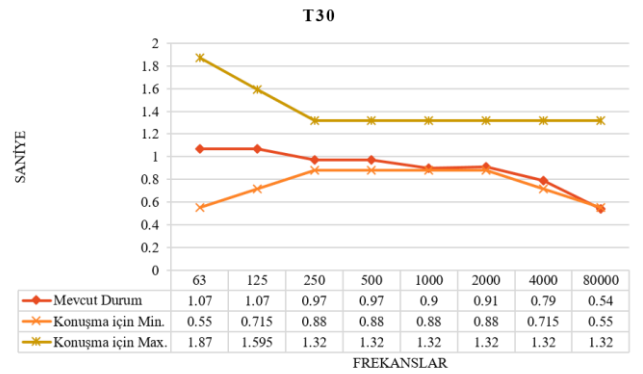


**Şekil 6.** Salon genelinde ses düzeylerinin NR30 ve NR40 fon gürültüsü düzeyleri ile karşılaştırılması

Salon geneli için 1/1 oktav bant aralıklarına göre, mevcut durum için elde edilen reverberasyon süresi değerleri farklı işlevleri göz önünde bulundurularak kabul edilebilir reverberasyon süreleri ile karşılaştırılmıştır. Konuşma işlevi açısından mevcut durum için elde edilen değerler, tüm frekanslar için kabul edilebilir değerleri sağlamakla birlikte, müzik işlevi açısından mevcut durum kabul edilebilir değerlerin çok altında kaldığı, sadece 63 Hz – 125 Hz(düşük

frekans bölgesi) aralığında sağlayabildiği görülmektedir (Şekil 7).

Salonun mevcut akustik koşullarını ortaya koymak için yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen bulgular; aşağıdaki Tablo 3'de sunulmuştur.



**Şekil 7.** Salonun mevcut reverberasyon süresi değerlerinin konuşma ve müzik işlevleri için kabul edilebilir değerlerle karşılaştırılması

**Tablo 3.** Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nun mevcut durumunun farklı işlevlere göre hacim akustiği açısından analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Hacim Akustiği Parametreleri	Optimum Değerler		Mevcut Durum Analizi			Koşulun Sağlandığı Dinleyici Alanı (%)	Değerlendirme
			X5	X50	X95		
<b>RT30 (500-1000 Hz) Reverberasyon Süresi, sn [17]</b>	Müzik	1.6	0.875	0.93	1.015	0	UYGUN DEĞİL
	Konferans	1.1				90	UYGUN
	Tiyatro	1.1				90	UYGUN
	Sinema	0.6				0	UYGUN DEĞİL
<b>EDT (500-1000 Hz) Erken Düşme Süresi, sn [18]</b>	Müzik	EDT>1,00s	0.795	0.905	1.04	10	UYGUN DEĞİL
	Konferans	EDT<1,00s				90	UYGUN
	Tiyatro	EDT<1,00s				90	UYGUN
	Sinema	-				-	-
<b>SPL(A) Ses Basınç Düzeyi, dBA [19]</b>	Müzik	Fon gürültüsünün(40 dB) 10 dB üzeri	49.1	52.4	56.2	82	UYGUN DEĞİL
	Konferans					82	UYGUN DEĞİL
	Tiyatro					82	UYGUN DEĞİL
	Sinema					82	UYGUN DEĞİL
<b>D50 (500-1000 Hz) Açıklık [20]</b>	Müzik	-	0.53	0.62	0.68	-	-
	Konferans	0,30 - 0,70				100	UYGUN
	Tiyatro	0,30 - 0,70				100	UYGUN
	Sinema	-				-	-
<b>C80 (500-1000 Hz) Netlik [20]</b>	Müzik	(-5dB) - (+5dB) aralığı	3.25	4.85	5.95	59	UYGUN DEĞİL
	Konferans	-				-	-
	Tiyatro	-				-	-
	Sinema	-				-	-
<b>STI Konuşmanın Anlaşılabilirlik İndeksi [21]</b>	Müzik	-	0.63	0.67	0.7	-	-
	Konferans	> 0,60				100	UYGUN
	Tiyatro	> 0,60				100	UYGUN
	Sinema	-				-	-
<b>LF80 (500-1000 Hz) Yanal Enerji Oranı [22]</b>	Müzik	0,20-0,25	0.162	0.22	0.283	49	UYGUN DEĞİL
	Konferans	0,05-0,35				100	UYGUN
	Tiyatro	0,05-0,35				100	UYGUN
	Sinema	-				-	-
<b>Ts (500-1000 Hz) Zamansal Ağırlık Merkezi [20]</b>	Müzik	70-150ms(1000Hz)	49	54.5	66.5	0	UYGUN DEĞİL
	Konferans	60-80ms(500 - 4000Hz)				18	UYGUN DEĞİL
	Tiyatro	60-80ms(500 - 4000Hz)				18	UYGUN DEĞİL
	Sinema	-				-	-

Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu mevcut durumu için hacim akustiği parametrelerinin aldığı değerler ile literatürde yer alan kabul edilebilir değerler ve gerekli koşulun sağlandığı yüzdelik dinleyici alanı değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

Elde edilen reverberasyon süresi(T30) değerleri istatistiksel açıdan değerlendirildiğinde; mevcut durumun konuşma işlevi açısından tamamen sağladığı, müzik işlevi açısından neredeyse tamamen sağlamadığı söylenebilir. Erken düşme süresi(EDT) parametresi açısından ise reverberasyon süresinde olduğu gibi mevcut durumun daha çok konuşma işlevi için uygun olduğu görülmektedir. Ayrıca, salon genelinde yayıncı ses alanı koşulunun sağlanması için EDT/T30 oranının 0,8 - 1,1 arasında olması

istenmektedir[23]. Bu değer, mevcut durum için 0,97 olduğundan salon genelinde yayıncı yani homojen dağılımlı bir ses alanı olduğu varsayılabilir.

Salon geneli için 1/1 oktav bant aralıklarına göre konuşmanın anlaşılabilirliğinin göstergesi olan STI ve 500 Hz - 1000 Hz orta frekans bölgesinde konuşmanın belirginliğinin göstergesi olan D50 parametreleri dinleyici alanın tamamında kabul edilebilir değerleri sağladığı görülmektedir. Müziğin netliğinin göstergesi olan C80, yine müzik işlevi sırasında sarmalanmışlık hissini güçlendiren LF80 ve Ts parametreleri açısından parametre değerlerinin müzik işlevi açısından kabul edilebilir olmadığı görülmektedir.

**Tablo 4.** Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu için farklı işlevlere göre geliştirilen senaryoların iç mekan yüzeylerinde kullanılan malzemeler ve 63-8000 Hz oktav bant frekans aralığındaki ses yutma katsayıları

NO	Yüzey	Malzeme	Alanı (m <sup>2</sup> )	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
1	Salon Yan Duvarları	Hareketli Ses Yutucu Perdeler	147 m <sup>2</sup>	0,15	0,15	0,7	0,6	0,6	0,85	0,9	0,9
2	Salon Yan Duvarları ve Sahne Ağzı	Yansıtıcı Ahşap Paneller	172 m <sup>2</sup>	0,17	0,15	0,1	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02
3	Salon Döşemesi	Halı	143 m <sup>2</sup>	0,08	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73	0,73

Parametrelerin dinleyici alanı genelindeki dağılım durumları incelendiğinde Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu mevcut durumu konuşma işlevi için daha uygun olduğu söylenebilir. Bu bulgular ışığında Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nun hem konuşma hem de müzik işlevi açısından uygun akustik konfor koşulları sağlayabilmesi için müzik, konferans, tiyatro ve sinema işlevlerine yönelik ihtiyaç duyulan akustik koşullar ayrı ayrı ele alınarak değiştirilebilir hacim ve değiştirilebilir iç yüzey gereçleri önerilmiştir.

### 3.2. Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nun İşlevlerine Yönelik Akustik Tasarım Önerileri

Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nun da icra edilen 4 farklı işlev için ortak bir salon tasarımı geliştirilmiştir. Salonun kullanım senaryosu değiştiğinde her biri için değişken akustik koşulları sağlamak için, salon tasarımı değiştirilmeden sahne ağzı ve salon yan duvarlarında uygulanacak hareketli sistemler ve düzenlemeler önerilmiştir. İlk aşamada salonda icra edilen bütün işlevlerde sabit tutulacak ve dinleyicilerin ilk ses yansımalarını almasına katkı sağlayacak sahne üzerine dış bükey elemanlarla birlikte yansıtıcı bir tavan tasarımı ve mevcut durumda ses yutucu olan salon yan duvarlarındaki elemanların ses yansıtıcı elemanlarla değiştirilmesi önerisi geliştirilmiştir (Şekil 8).

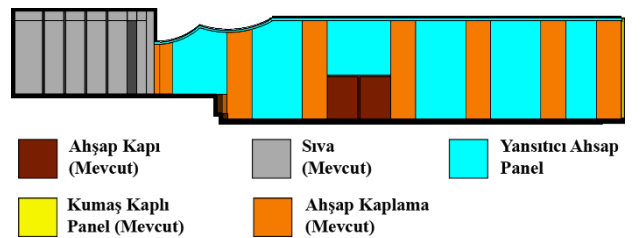
Aynı hacim içerisinde farklı işlevlerin gerçekleştirilebilmesi için ihtiyaç duyulan akustik konfor koşullarının sağlanması amacıyla geliştirilen önerilerin birbirleri ile bütünleştirilmesiyle tasarlanmış olan, Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nda;

- Sahnenin, hacimden hareketli ses yansıtıcı paneller yardımıyla koparılarak reverberasyon süresinin azaltılması konferans ve sinema işlevlerinde,
- Salon yan duvarlarındaki ses yansıtıcı yüzeylerin, hareketli (manuel) ses yutucu perdeler sayesinde konferans, tiyatro ve sinema işlevlerinde sağlanması gereken akustik konfor koşullarının sağlanmasına katkı sağlayacağı düşünülmüştür.
- Makaralı sistemlere sahip hareketli ses yutucu perdeler, salonun betonarme üzerine ahşap kaplama yapılmış kolonları arasındaki boşlukta hareket edeceği ve yansıtıcı ahşap tavan tasarımının arkasına gizleneceği düşünülmüştür.

Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nda değişken akustik konfor koşullarının sağlanması için sahne ağzı ve salon yan duvarlarında uygulanacak hareketli sistemlerin yüzeylerinde kullanılacak malzemeler ve malzemelerin 63-8000 Hz oktav bant frekans aralığındaki ses yutma katsayıları Tablo 4'te verilmiştir.

#### 3.2.1. Konser işlevi analizleri ve değerlendirmeleri

Bu çalışma kapsamında, Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nda icra edilecek konser işlevine yönelik olarak sağlanması gereken akustik konfor koşulları salon tasarımı sabit tutularak (Şekil 8) sağlanabilmiştir. İlk aşamada salonda icra edilen bütün işlevlerde sabit tutulacak sahne üzerine dış bükey elemanlarla birlikte yansıtıcı bir tavan tasarımı ve mevcut durumda ses yutucu olan salon yan duvarlarındaki elemanların ses yansıtıcı elemanlarla değiştirilmesi önerisi diğer işlevlere göre daha yüksek reverberasyon süresine ihtiyaç duyan konser işlevi için tasarlanmıştır. Diğer işlevlerde daha düşük reverberasyon süresi ihtiyaçları kademeli olarak değiştirilebilir hacim ve malzeme yutuculukları kullanılarak gerekli akustik koşullar sağlanmıştır.



**Şekil 8.** Konser işlevi için salon genelinde önerilen dış bükey tavan tasarımının ve malzemelerin kesit düzlemindeki yerleşimi

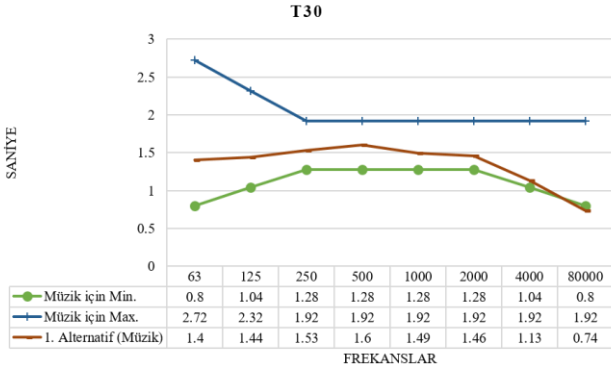
Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nun konser işlevi için elde edilen reverberasyon süresi (T30) değerleri istatistiksel açıdan değerlendirildiğinde; RT değeri 500-1000 Hz'de (orta frekans bölgesi) literatürde önerilen kabul edilebilir değerleri sağladığı görülmektedir. Sadece 8000 Hz'de literatürde önerilen kabul edilebilir değerlerin biraz altında olduğu tespit edilmiştir (Şekil 9).

Konser işlevi için ulusal/uluslararası mevzuata uygun akustik konfor koşulları sağlanarak, önerinin doğruluğu kanıtlanmıştır (Tablo 5).



**Tablo 5.** Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu için geliştirilen önerinin konser işlevi açısından simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi

Hacim Parametreleri	Akustiği	Optimum Değerler	Mevcut Durum			Koşulun Sağlandığı Dinleyici Alanı (%)	Değerlendirme
			X5	X50	X95		
<b>T30 (500-1000 Hz) Reverberasyon Süresi, sn [17]</b>	Konser	1.6	1.46	1.54	1.665	100	UYGUN
<b>EDT (500-1000 Hz) Erken Düşme Süresi, sn [18]</b>	Konser	EDT>1,00s ya da 0.8<EDT/T30<1.1	1.29	1.48	1.725	100	UYGUN
<b>SPL(A) Ses Basınç Düzeyi, dBA [19]</b>	Konser	Fon gürültüsünün 10 dB üzeri	53.2	55.4	58.2	100	UYGUN
<b>D50 (500-1000 Hz) Açıklık [20]</b>	Konser	-	0.315	0.42	0.53	-	UYGUN
<b>C80 (500-1000 Hz) Netlik [20]</b>	Konser	(-5dB) - (+5dB) aralığı	-0.25	1.1	2.75	100	UYGUN
<b>STI Konuşmanın Anlaşılabilirlik İndeksi [21]</b>	Konser	-	0.52	0.56	0.61	-	UYGUN
<b>LF80 (500-1000 Hz) Yanal Enerji Oranı [22]</b>	Konser	0.20-0.25	0.211	0.267	0.328	52	UYGUN
<b>Ts (500-1000 Hz) Zamansal Ağırlık Merkezi [20]</b>	Konser	70-150ms (1000Hz)	81.5	99.5	114.5	100	UYGUN

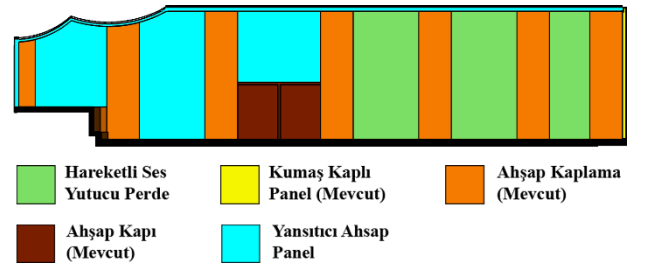
**Şekil 9.** Konser işlevi için T30 parametresinin frekanslara göre literatürde önerilen kabul edilebilir değerler ile karşılaştırılması

### 3.2.2. Konferans işlevi analizleri ve değerlendirmeleri

Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nda dinleyici alanı yan duvarlarının ses yansıtıcı panellere sahip olması hacimdeki reverberasyon süresinin uzun çıkmasına sebep olmaktadır. Konuşmanın anlaşılabilirliği indeksi, anlamının ön planda olduğu konferans işlevinde önemli bir hacim akustiği parametresi olarak değerlendirilmektedir. Reverberasyon süresinin kabul edilebilir değerlerin üstünde çıkması salon içerisinde konuşmanın anlaşılabilirliği indeksini negatif yönde etkileyecektir.

Salonda icra edilecek konferans işlevine yönelik gerekli akustik konfor koşullarının sağlanması için;

- reverberasyon süresinin azaltılması için, sahne ağızı; hareketli ses yansıtıcı yüzeyle kapatılarak toplam hacim azaltılmış,
- salon kısmının sahneye yakın duvarları yansıtıcı olarak sabit tutulurken arka kısımları hareketli perdeler sayesinde ses yutucu haline dönüştürülmüştür (Şekil 10).

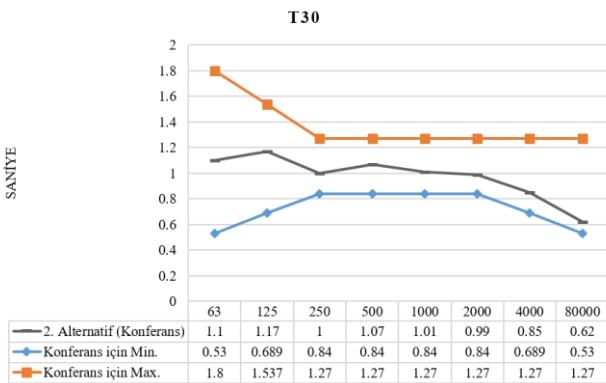
**Şekil 10.** Konferans işlevi için salon genelinde önerilen akustik tasarımın kesit düzlemindeki yerleşimi

Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nda icra edilecek konferans işlevi için literatürde kabul edilebilir değerleri sağlayan akustik konfor koşullarının sağlanabilmesi amacıyla salonun duvar ve tavan malzemelerini içeren iyileştirmelerle (Şekil 8) birlikte Şekil 10'de verilen akustik tasarım önerisi geliştirilmiştir.

Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nun konferans işlevi için elde edilen reverberasyon süresi(T30) değerleri istatistiksel açıdan değerlendirildiğinde; RT değeri 500-1000 Hz'de (orta frekans bölgesi) literatürde önerilen kabul edilebilir değerleri sağladığı görülmektedir (Şekil 11).

**Tablo 6.** Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu için geliştirilen önerinin konferans işlevi açısından simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi

Hacim Parametreleri	Akustiği	Optimum Değerler	Mevcut Durum			Koşulun Sağlandığı Dinleyici Alanı (%)	Değerlendirme
			X5	X50	X95		
<b>T30 (500-1000 Hz) Reverberasyon Süresi, sn [17]</b>	Konferans	1.06	0.97	1.02	1.16	100	UYGUN
<b>EDT (500-1000 Hz) Erken Düşme Süresi, sn [18]</b>	Konferans	EDT>1,00s ya da 0.8<EDT/T30<1.1	0.97	1.095	1.22	100	UYGUN
<b>SPL(A) Ses Basınç Düzeyi, dBA [19]</b>	Konferans	Fon gürültüsünün 10 dB üzeri	53.2	55.3	58.7	100	UYGUN
<b>D50 (500-1000 Hz) Açıklık [20]</b>	Konferans	0.30 – 0.70	0.38	0.47	0.57	100	UYGUN
<b>C80 (500-1000 Hz) Netlik [20]</b>	Konferans	-	1.15	2.55	3.85	-	UYGUN
<b>STI Konuşmanın Anlaşılabilirlik İndeksi [21]</b>	Konferans	> 0,60	0.57	0.6	0.64	55	UYGUN
<b>LF80 (500-1000 Hz) Yanal Enerji Oranı [22]</b>	Konferans	0.05-0.35	0.2	0.26	0.33	100	UYGUN
<b>Ts (500-1000 Hz) Zamansal Ağırlık Merkezi [20]</b>	Konferans	60-80ms(500 – 4000Hz)	65	75.5	87.5	75	UYGUN

**Şekil 11.** Konferans işlevi için T30 parametresinin frekanslara göre literatürde önerilen kabul edilebilir değerler ile karşılaştırılması

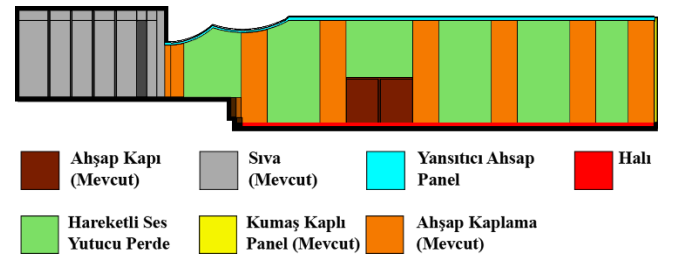
Konferans işlevi için; Şekil 10'da gösterildiği şekilde, ses yutucu ve yansıtıcı yüzeylerin önerilmesi ile ulusal/uluslararası mevzuata uygun akustik konfor koşulları sağlanarak, önerinin doğruluğu kanıtlanmıştır (Tablo 6).

### 3.2.3. Tiyatro işlevi analizleri ve değerlendirmeleri

Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nun tiyatro işlevi için kabul edilebilir reverberasyon süresi, konser işlevi için kabul edilebilir reverberasyon süresine göre daha düşüktür. Ayrıca tiyatro işlevinde sahne aktif olarak kullanılacağı için konser işlevinde olduğu gibi sahne açık olarak kullanılacaktır. Hacmin artmasıyla birlikte artan reverberasyon süresinin tiyatro için kabul edilebilir aralığa getirilmesi gerekmektedir.

Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nda icra edilecek tiyatro işlevine yönelik gerekli akustik konfor koşullarının sağlanması için;

- Tiyatro işlevinin temel eylemi olan oyunların gerçekleştirilebilmesi için sahne ağızı; hareketli ses yansıtıcı yüzeyler kullanılmayarak sahne salona dahil edilmiştir (Şekil 12).
- Sahnenin salona dahil edilmesiyle birlikte artan hacim, reverberasyon süresinin artmasına sebep olmuştur. Tiyatro işlevi için reverberasyon süresinin kabul edilebilir aralığa getirilmesi için salon kısmının ses yansıtıcı olan duvarları hareketli perdeler sayesinde ses yutucu haline dönüştürülmüştür (Şekil 12).
- Dinleyici alanının sirkülasyon alanı toplam yutuculuğu arttırmak için halı kaplanmıştır (Şekil 12).

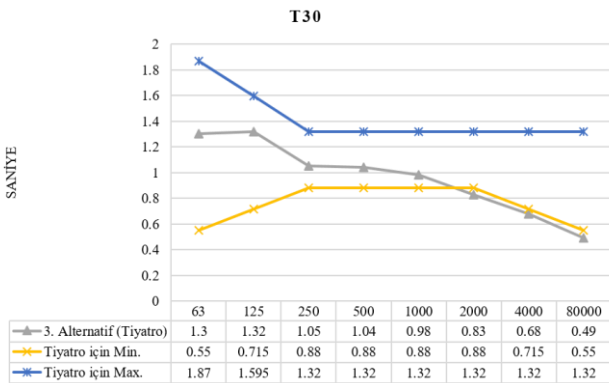
**Şekil 12.** Tiyatro işlevi için salon genelinde önerilen akustik tasarımın kesit düzlemindeki yerleşimi

**Tablo 7.** Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu için geliştirilen önerinin tiyatro işlevi açısından simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi

Hacim Parametreleri	Akustiği	Optimum Değerler	Mevcut Durum Analizi			Koşulun Sağlandığı Dinleyici Alanı (%)	Değerlendirme
			X5	X50	X95		
<b>T30 (500-1000 Hz) Reverberasyon Süresi, sn [17]</b>	Tiyatro	1.1	0.93	0.99	1.13	100	UYGUN
<b>EDT (500-1000 Hz) Erken Düşme Süresi, sn [18]</b>	Tiyatro	EDT>1,00s ya da 0.8<EDT/T30<1.1	0.64	0.8	0.97	100	UYGUN
<b>SPL(A) Ses Basınç Düzeyi, dBA [19]</b>	Tiyatro	Fon gürültüsünün 10 dB üzeri	50.1	52.2	55.7	100	UYGUN
<b>D50 (500-1000 Hz) Açıklık [20]</b>	Tiyatro	0.30 – 0.70	0.54	0.68	0.77	90	UYGUN
<b>C80 (500-1000 Hz) Netlik [20]</b>	Tiyatro	-	4.15	6.15	7.85	-	UYGUN
<b>STI Konuşmanın Anlaşılabilirlik İndeksi [21]</b>	Tiyatro	> 0,60	0.65	0.7	0.74	55	UYGUN
<b>LF80 (500-1000 Hz) Yanal Enerji Oranı [22]</b>	Tiyatro	0.05-0.35	0.16	0.21	0.27	100	UYGUN
<b>Ts (500-1000 Hz) Zamansal Ağırlık Merkezi [20]</b>	Tiyatro	60-80ms(500-4000Hz)	46	59	75	50	UYGUN

Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nun tiyatro işlevi için elde edilen reverberasyon süresi(T30) değerleri istatistiksel açıdan değerlendirildiğinde; RT değeri 500-1000 Hz'de (orta frekans bölgesi) literatürde önerilen kabul edilebilir değerleri sağladığı görülmektedir. Sadece 2000-8000 Hz'de (yüksek frekans bölgesi) literatürde önerilen kabul edilebilir değerlerin biraz altında olduğu tespit edilmiştir (Şekil 13).

Tiyatro işlevi için, Şekil 12'de verildiği gibi, ses yutucu ve yansıtıcı yüzeylerin önerilmesi ile ulusal/uluslararası mevzuata uygun akustik konfor koşulları sağlanarak, önerinin doğruluğu kanıtlanmıştır (Tablo 7).



**Şekil 13.** Tiyatro işlevi için T30 parametresinin frekanslara göre literatürde önerilen kabul edilebilir değerler ile karşılaştırılması

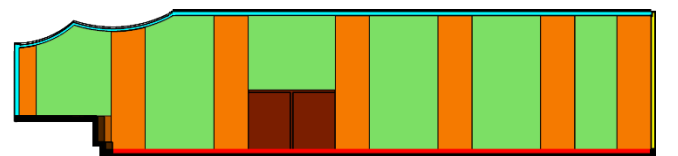
### 3.2.4. Sinema işlevi analizleri ve değerlendirmeleri

Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nun sinema işlevi için diğer işlevlerden çok daha düşük bir reverberasyon süresine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple hacmin akustik açıdan

oldukça yutucu olması beklenmektedir. Bu durumun başlıca sebebi hacimde gerekli akustik koşullarının yapay seslendirme sistemleriyle sağlanmasıdır. Bu sebeple Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nun sinema işlevi için sadece reverberasyon süresi literatürde önerilen kabul edilebilir değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu durum için konferans işlevinde olduğu gibi sahne ağız hareketli panellerle kapatılarak toplam hacim azaltılmıştır.

Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nda icra edilecek sinema işlevine yönelik gerekli akustik konfor koşullarının sağlanması için;

- reverberasyon süresini azaltmak için sahne ağız hareketli yüzeyle kapatılarak toplam salon hacmi azaltılmış,
- sinema işlevi için reverberasyon süresinin kabul edilebilir aralığa getirilmesi için salon kısmının ses yansıtıcı olan yan duvarları hareketli perdeler sayesinde ses yutucu haline dönüştürülmüş,
- dinleyici alanının sirkülasyon alanı, toplam yutuculuğu arttırmak için halı kaplanmıştır (Şekil 14).



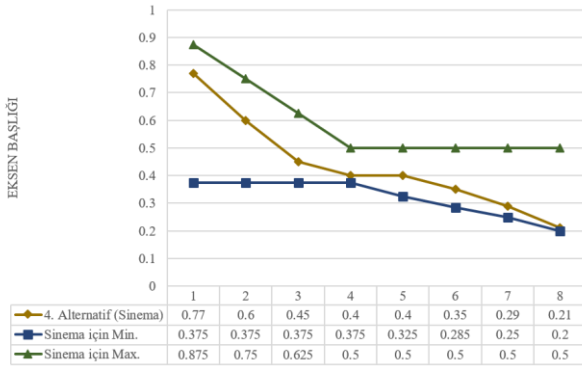
- Hareketli Ses Yutucu Perde
- Kumaş Kaplı Panel (Mevcut)
- Ahşap Kaplama (Mevcut)
- Ahşap Kapı (Mevcut)
- Yansıtıcı Ahşap Panel
- Halı

**Şekil 14.** Sinema işlevi için salon genelinde önerilen akustik tasarımın kesit düzlemindeki yerleşimi

**Tablo 8.** Konser, konferans, tiyatro ve sinema işlevi için sahne kullanım kılavuzu

Alternatif	İşlev	Toplam Salon Hacmi (m <sup>3</sup> )	Sahne (hareketli yansıtıcı yüzey)	Ağzı ses	Salon Yan Duvarlarında Hareketli Ses Yutucu Perdeler	Dinleyici Sirkülasyon Alanında Hali
1. Alternatif	Konser	2330	Açık		Kapalı	Yok
2. Alternatif	Konferans	1787	Kapalı (25 m <sup>2</sup> )		Yarı Açık (78 m <sup>2</sup> )	Yok
3. Alternatif	Tiyatro	2330	Açık		Açık (147 m <sup>2</sup> )	Var (143 m <sup>2</sup> )
4. Alternatif	Sinema	1787	Kapalı (25 m <sup>2</sup> )		Açık (147 m <sup>2</sup> )	Var (143 m <sup>2</sup> )

Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nun sinema işlevi için elde edilen reverberasyon süresi (T30) değerleri istatistiksel açıdan değerlendirildiğinde; RT değeri 500-1000 Hz'de (orta frekans bölgesi) dahil bütün frekans bölgelerinde literatürde önerilen kabul edilebilir değerleri sağladığı görülmektedir (Şekil 15).



**Şekil 15.** Sinema işlevi için T30 parametresinin frekanslara göre literatürde önerilen kabul edilebilir değerlerle karşılaştırılması

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu mevcut durumunda, yapılan simülasyon çalışması sonucunda hacimde icra edilen 4 farklı işlev için literatürde önerilen kabul edilebilir akustik konfor koşullarının sağlanamadığı tespit edilmiştir. Kabul edilebilir akustik konfor koşullarının sağlanabilmesi için salonda; duvar ve tavan yüzeylerinde değişiklikler yapılarak salon tasarımı sabit tutulmuş (Şekil 8), konser, konferans, tiyatro ve sinema işlevleri için kabul edilebilir hacim akustiği parametreleri değiştirilebilir hacim ve değiştirilebilir iç yüzey gereçleri ile sağlanmıştır. Sahne ağzı hareketli ses yansıtıcı yüzeye kapatılarak değiştirilebilir hacim, salon yan duvarlarında ses yutucu hareketli perde sistemi ve dinleyici sirkülasyon alanında ise halı aracılığı ile değiştirilebilir iç yüzey gereçleri önerilerek salon kullanım kılavuzu geliştirilmiştir (Tablo 8).

Hacimde genel olarak, salon arka duvarında, geç gelen yansımaları ortadan kaldırmak ve yankı tehlikesini engellemek için ses yutucu gereçler kullanılmıştır. Salon yan duvarlarında ise salon içerisinde en yüksek reverberasyon süresine ihtiyaç duyan konser işlevi için ses yansıtıcı yüzeyler kullanılmıştır. Daha sonra hacimde icra edilecek işleve göre hareketli ses yutucu perdeler aracılığıyla kademeli olarak hacmin toplam yutuculuğu artırılarak o

işlev için gereken reverberasyon süresine ulaşılmıştır. Salonun sahne kısmı üzerinde, kaynaktan çıkan sesin ilk yansımalarla doğrudan alıcıya ulaşması amacı ile dış büyük ses yansıtıcı yüzeyler önerilmiştir. Hacimde icra edilecek olan her türlü işleve yönelik olarak geliştirilen alternatifler Odeon yazılımı aracılığıyla simülasyonları gerçekleştirilmiş hacim akustiği parametreleri her işlev için ayrı ayrı ortaya konmuştur. Yapılan bu çalışmalar ışığında; Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu'nda gerçekleştirilecek olan farklı işlevler (konser, konferans, tiyatro ve sinema) için geliştirilen alternatifler sonucunda ulaşılan değerler, ulusal/uluslararası mevzuat ile karşılaştırılarak geliştirilen alternatiflerin doğruluğu kanıtlanmıştır (Tablo 5, Tablo 6, Tablo 7).

Bu çalışma aracılığı ile farklı işlevlerin aynı hacim içerisinde çözümlenmesi gerekliliği ve akustik açıdan uygun çözümlerin oluşturulması Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu örneği üzerinden 4 farklı işlev için incelenmiştir. Bu bağlamda bu çalışma çok amaçlı salonlarda alınacak tasarım kararlarında yol gösterici olacak ve literatürdeki açığı kapatmaya katkı sağlayacaktır.

#### KAYNAKÇA

- [1]. Monterio, C., Machimbarrera, M., Tarrero, A.I., Smith, S.R. (2017). Translation Between Existing And Proposed Harmonized Airborne Sound Insulation Descriptors: A Statistical Approach Based On In-Situ Measurements. Applied Acoustics, 116, 93-107.
- [2]. Hongisto, V., Mäkilä, M., Suoakas, M. (2015). Satisfaction With Sound Insulation In Residential Dwellings -The Effect Of Wall Construction. Building and Environment, 85, 309-321.
- [3]. Pääkkönen, R., Vehviläinen, T., Jokitalppo, J., Niemi, O., Nenonen, S., Vinha, J. (2015). Acoustics and New Learning Environment – A Case Study. Applied Acoustics, 100, 75-78.
- [4]. Jagniatinskis, A., Mickaitis, M., Fiks, B. (2013). Development Classification Scheme for Evaluation Dwellings Sound Insulation Performance in Lithuania. Procedia Engineering, 57, 443-450.
- [5]. Garg, N., Kumar, A., Maji, S. (2013). Significance and Implications of Airborne Sound Insulation Criteria in Building Elements for Traffic Noise Abatement. Applied Acoustics, 74, 1429-1436.
- [6]. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü. (2018). Binaların Gürültüye Karşı Korunması Yönetmeliği Açıklama ve Uygulama

Kılavuzu. Ankara, Ziyaret tarihi Mart 23, 2020, <https://www.izoder.org.tr/dosyalar/binalarin-gurultuye-karsi-korunmasi-yonetmeligi-aciklama-ve-uygulama-klavuzu.pdf>.

[7]. Rossing T. D. (2007). Springer Handbook of Acoustics. Springer, New York, 1280.

[8]. EEA. (2014). Noise in Europe 2014. European Environment Agency, Copenhagen.

[9]. Jariwala H. J., Syed H. S., Pandya M. J. ve Gajera Y. M. (2017). Noise Pollution & Human Health: A Review. Noise and Air Pollution: Challenges and Opportunities, Mart 2017, 29 Ağustos 2017 tarihinde ResearchGate'e yüklendi.

[10]. M. Cairoli, "The architectural acoustic design for a multipurpose auditorium: Le Serre hall in the Villa Erba Convention Center", *Appl. Acoust.*, c. 173, s. 107695, Şub. 2021, doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107695.

[11]. A. Krokstad ve S. Strøm, "Acoustical design of the multi-purpose 'Hjertnes' hall in Sandefjord", *Appl. Acoust.*, c. 12, sayı 1, ss. 45–63, Oca. 1979, doi: 10.1016/0003-682X(79)90038-0.

[12]. M. Barron ve S. Kissner, "A possible acoustic design approach for multi-purpose auditoria suitable for both speech and music", *Appl. Acoust.*, c. 115, ss. 42–49, Oca. 2017, doi: 10.1016/j.apacoust.2016.08.018.

[13]. Odeon A/S, "Room Acoustics Modelling Software, V 14.0 Auditorium", Denmark, (2009).

[14]. Doelle, L.L. (1965). Acoustics in Architectural Design. Bibliography 29, National Research Council,

Ottawa, 516.

[15]. Maekawa, Z., Lord, P. (1994). Environmental and Architectural Acoustics. Spon Press, UK, 376.

[16]. Odeon A/S, "Room Acoustics Modelling Software Malzeme Kütüphanesi, V 14.0 Auditorium", Denmark, (2009).

[17]. DIN. (2016). Acoustic quality in rooms - Specifications and instructions for the room acoustic design, DIN 18041: 2016-03.

[18]. Bistafa, S.R., Granado, M.V. (2005). A Survey of The Acoustic Quality For Speech in Auditoriums. Electronic Journal Technical Acoustics, 15, 1-16.

[19]. Şerefhanoglu, M., Gürültü Denetiminde Kabul Edilebilecek Gürültü Düzeylerinin Belirlenmesi, YÜ, 1984.

[20]. ISO. (2009). Acoustics – Measurement of rooms acoustic parameters – Part 1: Performance spaces, BS EN ISO-3382-1.


[21]. IEC60268-16, third edition, "Sound system equipment, part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index", CEI/IEC publication, 2003-05.


[22]. Bistafa, S.R., Granado, M.V. (2002). Objective Measurements of Speech Intelligibility in Proscenium Type of Theatres. XX Encontro da Sociedade Brasileira de Acustica SOBRAC, 2002, Rio de Janeiro, 1-6.

[23]. Voronina N. (1996). Improved empirical Model of Sound Propagation Through a Fibrous Material. Applied Acoustics, 48, 121–132.

## Yağış Verilerinin Trend Analizi: Kızılırmak Havzası Örneği

\*<sup>1</sup>Özlem Terzi, <sup>2</sup>Ahmet İlker

<sup>1</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Isparta,  
ozlemterzi@isparta.edu.tr, 

<sup>2</sup>Çankırı Karatekin Üniversitesi Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü Çankırı,  
ahmetilker@karatekin.edu.tr, 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 10.05.2020

Kabul Tarihi: 12.02.2021

### Öz

Günlük yaşantımızı birçok açıdan etkileyen yağış, hidrolojik döngünün en önemli parametrelerinden biridir. İklim değişikliği göstergelerinden biri olan yağışın trendini belirlemek, yağışın gelecekteki davranışı hakkında tahminde bulunmak açısından son derece önemlidir. Yapılan çalışmada Kızılırmak havzasında bulunan on il merkezindeki meteoroloji istasyonlarına ait yağış verilerine trend analizi uygulanmıştır. Yağış verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden elde edilmiştir. Yağış verilerinin trendini belirlemek için parametrik olmayan Mann-Kendall testi uygulanmıştır. Ayrıca birim zamandaki değişim miktarı Sen'in trend eğim yöntemi ile belirlenmiştir. Trend analizi on il merkezi için aylık, mevsimlik ve yıllık olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda Kızılırmak havzasındaki on il merkezinin yağış verilerinde istatistiksel açıdan anlamlı bir trend olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yağış, Kızılırmak Havzası, trend analizi.

## Trend Analysis of Precipitation Data: Case Study of Kızılırmak Basin

\*<sup>1</sup>Özlem Terzi, <sup>2</sup>Ahmet İlker

<sup>1</sup>Isparta Applied Sciences University Technology Faculty Civil Engineering Department Isparta, ozlemterzi@isparta.edu.tr

<sup>2</sup>Çankırı Karatekin University Technical and Business College Construction Technology Department Çankırı,  
ahmetilker@karatekin.edu.tr

### Abstract

The precipitation influencing our daily lives in many aspects is one of the most important parameters of hydrologic cycle. To determine the trend of precipitation which is one of the climate change indicators is extremely important in order to forecast about the future behavior of precipitation. In the study, trend analysis has been applied to the precipitation data belonging to the meteorology stations at the ten city centers in Kızılırmak basin. The precipitations data has been acquired from Turkish State Meteorological Service. Non-parametric Mann-Kendall test has been applied to determine the trend of precipitation data. Moreover amount of exchange in unit time has been determined with Sen's trend test. Trend analysis has been carried out as monthly, seasonally and yearly for the ten city centers. As the result of the study, the notion that there is no statistically meaningful trend in precipitation data at the ten city centers of Kızılırmak basin has been reached.

**Keywords:** Precipitation, Kızılırmak Basin, trend analysis.

### 1. GİRİŞ

Yağış, iklim, tarımsal üretim, su kaynaklarının kullanılması vb. alanlarla gündelik hayatımıza etki eden karmaşık hidrolojik çevrimin belki de en önemli bileşenidir. Bu sebeple yağış iklim değişikliğinin anlaşılmasına direkt olarak etki etmektedir [1].

Yağışlarda oluşan değişimler su kaynakları ve hidroloji açısından oldukça önemli sonuçlar ortaya çıkarabilir. Yağışların dönemsel dağılımında oluşan değişiklikler, yıllar

arasındaki farklılık ve uzun kuraklık periyotları, düşük veya kuraklık seviyesinde olan yüzey akışlarının debisini oldukça fazla etkilemektedir [2].

Hidrometeorolojik bir parametre olan yağış, noktasal bir veri olmakla birlikte sıcaklık gibi zamansal ve mekânsal olarak ciddi değişkenlik gösterir. Yağışta meydana gelen değişimler iklim değişikliği hakkında fikir verdiğinden, iklim değişikliğini belirlemek amacıyla yapılan çalışmalarda yağışın trend analizinin belirlenmesi işlemine sıkça rastlanılmaktadır.

\*Sorumlu Yazar: Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Isparta, +902462146799

Yağış verilerinin trendlerini belirlemek amacıyla araştırmacılar birçok çalışma bölgesinde çeşitli yöntemlerle çalışmalar yapmışlardır. Karabulut ve Cosun (2009) Kahramanmaraş ilinin yağış verilerine Mann-Kendall, lineer regresyon, yağış değişkenliği ve değişim katsayısı yöntemleriyle trend analizi uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda yıllık yağışta istatistiksel olarak anlamlı artan ya da azalan trend olmadığını ifade etmişlerdir. Ayrıca mevsimsel olarak da anlamsız trend olduğunu belirtmişlerdir [3]. Özfidaner vd. (2016) İç Anadolu Bölgesi'nde bulunan yedi adet meteoroloji istasyonunun aylık toplam yağış verilerine Mann-Kendall sıra korelasyon testiyle trend analizi uygulamışlardır. İstatistiksel olarak anlamlı bir trend olmadığı sonucuna varmışlardır [4]. Taylan ve Aydın (2018) Göller bölgesinde bulunan Ağlasun, Barla, Aksu, Burdur, Yalvaç, Sütçüler, Kızılkaya, Kasımlar ve Gelendost meteoroloji istasyonlarının aylık yağış verileri için trend analizi yapmışlardır. Yaptıkları istatistiksel analizler sonucunda istasyonların çoğunda azalma eğilimi olduğunu ifade etmişlerdir [5]. Dalkılıç (2019) Erzincan, Gümüşhane ve Bayburt il merkezlerinde bulunan meteoroloji istasyonlarının 31 yıllık (1978-2018) yağış verilerine Şen eğilim testi, Spearman Rho, Mann-Kendall ve Mevsimsel Mann-Kendall testlerini kullanarak trend analizi yapmıştır. Kış mevsiminde bazı aylarda artış trendi, yaz mevsiminde bazı aylarda azalış trendi görmüştür [6]. Çeribaşı (2018) Batı Karadeniz Havzası'nda bulunan on meteoroloji istasyonunun yağış verilerine yenilikçi Şen yöntemini uygulayarak trend analizini araştırmıştır. On meteoroloji istasyonundan bir istasyonda artış trendi, dört istasyonda azalış trendi ve beş istasyonda ise trend olmadığı sonucuna ulaştığını söylemiştir [7]. Çeribaşı ve Doğan (2015) Sakarya Havzası, Batı Karadeniz Havzası ve Doğu Karadeniz Havzası'nda bulunan meteoroloji istasyonlarına ait yıllık ortalama yağış verilerinin trend analizini yapmışlardır. Analiz sonucunda, Sakarya Havzası'nda azalış trendi olduğunu, Batı Karadeniz Havzasında trend olmadığını, Doğu Karadeniz Havzasında ise artış trendi olduğunu ifade etmişlerdir [8]. Büyükyıldız ve Berktaş (2004) Sakarya Havzasında bulunan yirmi beş meteoroloji istasyonunun kırk bir yıllık (1960-2000) aylık toplam yağış verilerinin trendlerini belirlemek için çeşitli istatistiksel test yapmışlardır. Bu testlerin, sonucunda istasyonların yarısında istatistiksel olarak anlamlı azalış trendine rastladıklarını belirtmişlerdir [9]. Coşkun (2020) Van gölü kapalı havzasında bulunan 7 meteoroloji istasyonunun ortalama yağış verilerine Mann Kendall, Spearman'ın Rho ve Şen Testi uygulayarak trend analizi çalışması yapmıştır. Van Bölge meteoroloji istasyonu dışında havza genelinde yağışlarda azalma eğilimi olduğunu ifade etmiştir [10]. Polat ve Sunkar (2017) dört meteoroloji istasyonunun (Trabzon, Rize, Pazar, Hopa) yağış ve sıcaklık verilerine Mann Kendall ve Sen yöntemleriyle trend analizi yapmışlardır. Yağış verilerinde Hopa meteoroloji istasyonu dışındaki istasyonlarda artış eğilimi, sıcaklık verilerinde ise Rize, Trabzon ve Hopa istasyonlarında artış eğilimi

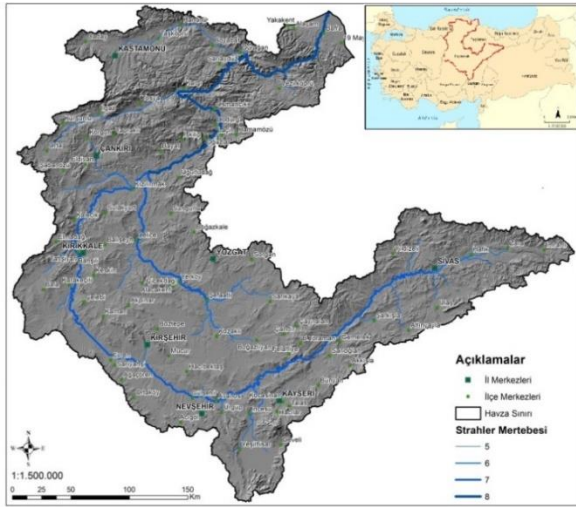
olduğunu ifade etmişlerdir [11]. Arslan (2017) Coutagne ve Turc formülleri ile Niğde ilinin potansiyel evapotranspirasyonunu hesaplamış, hesaplanan verilere Mann Kendall Mertebe Korelasyon testi ile trend analizi yapmıştır. Trend analizi sonucunda istatistiksel açıdan anlamsız artış trendi olduğunu belirtmiştir [12]. Köyceğiz ve Büyükyıldız (2019) Innovative Şen, Mann-Kendall ve Spearman's Rho yöntemleriyle ekstrem yağışların trend analizini Konya, Karaman, Aksaray ve Niğde istasyonları için araştırmışlardır. Konya istasyonu dışındaki istasyonlarda istatistiksel olarak anlamsız azalma trendi, Konya istasyonunda ise istatistiksel olarak anlamsız artış trendi olduğu sonucuna ulaşmışlardır [13]. Tokgöz ve Partal (2020) Karadeniz Bölgesinde bulunan 16 meteoroloji istasyonunun yağış ve sıcaklık verilerinin Yenilikçi Şen yöntemi ve Mann-Kendall testini kullanarak trend analizini araştırmışlardır. Sıcaklık verilerinde Mann-Kendall testi 7 istasyonda artan trend sonucu verirken, Yenilikçi Şen yönteminin istasyonların hepsinde artan trend sonucu verdiğini tespit etmişlerdir. Bununla birlikte yağış verilerinde de benzer sonuçlara ulaştıklarını ifade etmişlerdir [14]. Keskin vd. (2018) Doğu Anadolu Bölgesinde bulunan 14 ilin meteoroloji istasyonlarına ait yağış ve sıcaklık verilerinin trend analizini Mann-Kendall yöntemi ile araştırmışlardır. Sıcaklık verilerinde Bitlis ve Erzurum illeri dışındaki 12 ilde artan trend sonucuna ulaşmışlardır. Yağış verilerinde; Kars ve Ardahan illerinde artan trend varken, diğer illerde trend olmadığını belirtmişlerdir [15].

Literatürden de anlaşıldığı üzere, yağış, sıcaklık vb. gibi meteorolojik verilerde trend varlığının araştırılması iklim değişikliğini belirlemek açısından önem arz etmektedir. Bundan dolayı, Kızılırmak Havzası'nda bulunan on il merkezinin meteoroloji istasyonlarından elde edilen 1980-2017 yılları arasındaki 38 yıllık döneme ait yağış verilerine trend analizi uygulanarak, aylık, mevsimlik ve yıllık dönemlerde trend varlığı araştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Çalışma Bölgesi ve Veriler

Çalışma bölgesi olarak seçilen Kızılırmak havzası; Karadeniz'le bağlantısı olmakla birlikte Orta Anadolu'nun doğu bölümünde yer almaktadır. Havza 37° 58' - 41° 44' kuzey enlemleri ile 32° 48' - 38° 22' doğu boylamları arasında bulunmaktadır [16]. Türkiye yüzölçümünün %11'ine sahip havzanın kuzey ve doğu kısımları dağlık iken geriye kalan büyük kısım tepelik görünümündedir. 78.180 km<sup>2</sup>'lik drenaj alanına sahip Kızılırmak 1151 km'lik uzunluğuyla Türkiye'nin en uzun akarsuyudur. Sivas İmranlı çevresinden doğarak sırasıyla, Kayseri, Nevşehir, Aksaray, Kırşehir, Ankara, Kırıkkale, Çankırı, Çorum, Sinop ve Samsun il topraklarından geçerek Bafra Ovası'ndan Karadeniz'e dökülmektedir. Kızılırmak Havzası'nın haritası Şekil 1'de verilmiştir [17].



Şekil 1. Kızılırmak Havzası [17,18]

Yağış alanı 78.646 km<sup>2</sup> olan Kızılırmak Havzası'nın toplam alanı 8.210.007 hektardır. Kıyı kesimlerde deniz, iç kesimlerde karasal iklimin hakim olduğu havzanın yıllık ortalama yağış yüksekliği 446 mm iken, en az yağış alan havzanın çukurluk olan orta kesiminde yıllık yağış ortalaması 300-400 mm arasındadır. Havzanın yıllık ortalama akışı 164,15 m<sup>3</sup>/s'dir. Yıllık ortalama verimi 2,09 L/s/km<sup>2</sup> olan havzada akışın yağışa oranı 0,15 iken iştirak oranı %2,82'dir [17].

Kızılırmak Havzası'nda bulunan on il merkezinin yağış verileri Meteoroloji İşleri Müdürlüğü'nden alınmıştır. Çalışmada kullanılan veriler 1980-2017 yılları arasındaki 38 yıllık dönemi kapsayan aylık toplam yağış verileridir.

## 2.2. Trend Analizi

Trend, seçilen herhangi bir parametrenin değerinde zamana bağlı artış ya da azalış olarak değişimin meydana gelmesidir. Trendi belirlemek amacıyla parametrik ve parametrik olmayan testler gerçekleştirilir. Parametrik olmayan testler, hidro-meteorolojik gibi çoğunlukla normal olarak dağılmamış ve eksik verilerin sıklıkla bulunduğu hidrolojik zaman serilerinin analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Parametrik olmayan testlerde problem, veri setinin istatistiksel dağılımından bağımsız hale geleceğinden, bu testler parametrik testlere göre avantajlıdır [19]. Verilerde kesikli, kısa süreli, çarpık ve düzensiz gibi olumsuz durumların var olması durumunda, bu olumsuzlukları bertaraf eden parametrik olmayan testler kullanılır [20]. Bu çalışmada trend analizini belirlemek için uygulanan testler aşağıda verilmiştir.

### 2.2.1. Mann-Kendall Testi

Kendall'in Tau olarak bilinen testin özel bir uygulaması olan Mann-Kendall testi parametrik olmayan bir testtir.  $H_0$  hipotezine göre zamandan bağımsız ve benzer dağılımı rasgele değişkenler olan  $x_1, \dots, x_n$  gözlemleri zamana göre

sıralanmıştır.  $H_1$  hipotezine göre ise ( $k \neq j$ ) olmak üzere tüm ( $k, j \leq n$ ) için seride  $x_k$  ve  $x_j$  değerlerinin dağılımı benzer değildir, yani seride lineer bir trend bulunmaktadır. Mann-Kendall testinin istatistiği  $S$  eşitlik (1) ve (2) ifadesiyle hesaplanır.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{Eğer } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{Eğer } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{Eğer } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Asimptotik olarak normal bir dağılıma sahip ve ortalaması sıfır olan test istatistiği  $S$ 'nin varyansı,

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

ifadesiyle hesaplanır. Eğer verilerde benzer değerler varsa, bu ifadenin payından  $\sum_t t(t-1)(2t+5)$  değeri çıkartılır. Burada  $t$  herhangi bir bağ durumundaki benzer  $x$ 'lerin sayısını ve  $\sum_t$  bütün bağ durumları üzerinden alınan toplamı göstermektedir. Süreklilik düzeltme birimi (eşitlik (4)'deki paylarda bulunan 1 değeri) kullanılırsa  $n \leq 10$  olmak üzere  $S$  istatistiğinin teorik olasılık dağılımı için normal dağılım oldukça uygundur. Böylece standart normal değişken ( $z$ ) aşağıdaki eşitlikle hesaplanarak kritik ( $z$ ) değeri ile karşılaştırılır [21;22].

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{Eğer } S > 0 \\ 0 & \text{Eğer } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{Eğer } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Eğer  $\alpha$  anlamlılık seviyesi  $|z| \leq z_{\alpha/2}$  ise  $H_0$  hiotezi kabul edilir, aksi durumda reddedilir. Hesaplanan  $S$  değeri pozitif ise artan, negatif ise azalan bir trendin varlığına işaret eder. Bu yöntem herhangi bir dağılıma uyma şartı aramadığı için ve eksik verilerle çalışabilme imkanı sağladığı için kullanışlıdır [22;23].

### 2.2.2. Sen'in Trend Eğim Yöntemi

Birim zamandaki değişim (gerçek eğim) için doğrusal bir trend varlığında, ekstrem değerlerden veya veri hatalarından etkilenmeyen, eksik veri ile çalışabilen parametrik olmayan bir yöntem olan bu yöntem kullanılabilir [22;23]. Burada  $j$  ve  $k$  zamanlarındaki veriler  $x_j$  ve  $x_k$  olmak üzere ( $j > k$  şartıyla)

$$N = n(n-1)/2 \quad (5)$$

adet  $Q_i$  parametresi;

$$Q_i = \frac{(x_j - x_k)}{j - k} \quad (i = 1, \dots, N) \quad (6)$$

hesaplanır ve küçükten büyüğe doğru sıralanır. Bu  $N$  adet  $Q_i$  değerlerinin medyanı Sen'in eğim tahmincisi, yani söz



konusu doğrusal trend eğim parametresini tahmin etmek için ilgili bir istatistiktir.  $N$  sayısının tek olması durumunda

$$Q_{medyan} = Q_{(N+1)/2} \quad (7)$$

eşitliği, çift olması durumunda ise,

$$Q_{medyan} = \frac{Q_{N/2} + Q_{(N+2)/2}}{2} \quad (8)$$

eşitliği kullanılarak, ilgili gözlemlerin birim zamandaki değişimi bulunur. Bulunan  $Q_{medyan}$  değeri, Sen'in önerdiği parametrik olmayan bir teknik kullanılarak iki taraflı test ile  $\%100(1-\alpha)$  güven aralığında test edilir ve gerçek eğim hakkında karar verilir [22;23].

### 3. BULGULAR

Kızılırmak Havzası'nda yer alan il merkezlerinin meteoroloji istasyonlarından 38 yıllık dönemde (1980-2017) elde edilen yağış verilerine trend analizi uygulanmadan önce otokorelasyon işlemi uygulanmış olup, otokorelasyon tespit edilenlere ön beyazlatma işlemi uygulanmıştır. Böylece veriler trend analizi yapmaya uygun hale getirilmiştir. Trend varlığını araştırmak amacıyla parametrik olmayan bir test olan Mann-Kendall testi uygulanmıştır. Ayrıca Sen'in trend eğim yöntemi yağış verilerinde birim zamandaki değişimi saptamak amacıyla kullanılmıştır. Havzadaki bulunan on meteoroloji istasyonunun toplam yağış verilerinde aylık, mevsimlik ve yıllık olarak trend varlığı Mann-Kendall testinde 0,05 anlamlılık seviyesine göre değerlendirilmiştir. Buna göre,  $z \geq 1,96$  şartı sağlanıyorsa istatistiksel olarak anlamlı artış trendi,  $z \leq -1,96$  şartı sağlanıyorsa istatistiksel olarak anlamlı azalış trendi olduğu kabulü yapılmıştır. Yukarıda belirtilen şartların sağlanmadığı durumlarda, bir trend olmakla birlikte bu trendin istatistiksel açıdan bir anlam ifade etmediği için trend yoktur kabulü yapılmıştır.

On meteoroloji istasyonunun ortalama aylık toplam yağış verilerinin trend analizi sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1 incelendiğinde, Sivas il merkezi meteoroloji istasyonunda istatistiksel açıdan anlamlı bir trend olmadığı görülmektedir. İstatistiksel olarak anlamlı olmamak ile birlikte Nisan, Temmuz, Ağustos, Ekim, Kasım, Aralık aylarında, sonbahar döneminde ve yıllık olarak azalış trendi görüldüğü, diğer aylar ve dönemlerde ise artış trendi görüldüğü tespit edilmiştir. Kayseri istasyonunun analiz sonuçlarına göre, Ocak, Şubat ve Mart aylarında anlamlı artış trendi belirlenmişken, diğer aylar, dönemler ve yıllık olarak anlamlı bir trend belirlenmemiştir. Anlamlı artış trendinin belirlendiği aylarda en büyük artış miktarının 0,023 mm/yıl ile Mart ayında olduğu görülmüştür. Nevşehir meteoroloji istasyonunun trend analizi sonuçlarında ise istatistiksel açıdan anlamlı bir trend görülmemekle birlikte, Ocak, Şubat, Mart, Haziran, Ağustos, Eylül

aylarında ve yaz döneminde anlamsız artış trendi, diğer aylar, dönemler ve yıllık olarak ise azalış trendi olduğu görülmüştür. Kırşehir istasyonunda aylık, mevsimlik ve yıllık olarak anlamlı trend olmadığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte Şubat, Nisan, Mayıs, Temmuz, Kasım ve Aralık aylarında, ilkbahar, sonbahar ve kış dönemlerinde ve yıllık olarak anlamsız olsa da azalış trendi olduğu belirlenmiştir. Belirtilen aylar ve dönemler dışında kalan aylar ve dönemlerde anlamsız artış trendi olduğu gözlemlenmiştir. Yozgat istasyonu için istatistiksel olarak anlamlı trendin Şubat ve Nisan aylarında azalış trendi şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Meydana gelen en büyük değişim miktarının ise -0,042 mm/yıl olduğu belirlenmiştir. Diğer aylar, dönemler ve yıllık olarak trendler istatistiksel açıdan anlamlı olmadığı için trend yoktur kabulü yapılmıştır. Kırıkkale meteoroloji istasyonunun trend analizi sonuçları incelendiğinde, aylık, mevsimlik ve yıllık olarak hiçbir noktada anlamlı trend olmadığı belirlenmiştir. İstatistiksel açıdan anlamsız olsa da Nisan, Mayıs, Haziran, Temmuz, Kasım ve Aralık aylarında, ilkbahar ve yaz dönemlerindeki trendlerin azalış trendi şeklinde, diğer aylar dönemler ve yıllıktaki trendlerin ise artış trendi şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Çankırı istasyonunun trend analizi sonuçlarına göre, istatistiksel açıdan anlamsız olmakla birlikte Ocak, Şubat, Mart, Mayıs, Haziran, Ağustos, Eylül ve Ekim aylarında, ilkbahar dışındaki mevsimlerde artış trendi olduğu, diğer aylarda, ilkbahar mevsiminde ve yıllık olarak ise azalış trendi olduğu görülmektedir. İstatistiksel açıdan anlamlı ise trend varlığı kabul edildiğinden Çankırı istasyonunda aylık, mevsimlik ve yıllık olarak trend varlığı tespit edilmemiştir. Kastamonu meteoroloji istasyonunda istatistiksel açıdan anlamlı bir trend görülmemektedir. İstatistiksel olarak anlamlı olmasa da Ocak, Nisan, Mayıs, Temmuz, Ekim, Kasım ve Aralık aylarında azalış trendi görülürken, diğer aylarda artış trendi görülmüştür. Mevsimsel olarak ilkbahar ve yaz mevsimlerinde artış, sonbahar, kış mevsimlerinde ve yıllık olarak ise azalış trendi olduğu tespit edilmiştir. Sinop meteoroloji istasyonunun yağış verilerinin trend analizi sonuçları incelendiğinde, Mart, Aralık aylarında, sonbahar ve kış dönemlerinde istatistiksel olarak anlamlı trend olduğu belirlenmiştir. Bu anlamlı trendlerin tamamı artış trendi şeklindedir. Anlamlı trendin belirlendiği yerlerde en büyük artış miktarının 0,072 mm/yıl ile Aralık ayında olduğu görülmüştür. İstatistiksel olarak anlamsız olmakla birlikte Mayıs, Ağustos ve Kasım aylarında azalış trendi, diğer noktalarda ise artış trendi olduğu saptanmıştır. Çorum istasyonunda istatistiksel olarak anlamlı bir trend olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte Ocak, Şubat, Mart, Haziran, Ağustos, Eylül ve Ekim aylarında, yaz ve kış dönemlerinde istatistiksel açıdan anlamlı olmayan artış trendi, belirtilen aylar ve dönemlerin dışında kalan aylar ve dönemlerde ise istatistiksel olarak anlamsız azalış trendi olduğu tespit edilmiştir.

**Tablo 1.** Ortalama aylık toplam yağış verilerinin trend analizi sonuçları

İstasyon Adı		O	Ş	M	N	M	H	T	A	E	E	K	A	İ	Y	S	K	Y
Sivas	Mann-Kendall (Z)	0,97	0,63	0,73	-0,23	0,78	0,08	-1,28	-0,20	0,83	-0,38	-0,84	-0,45	-0,01	0,11	-0,62	0,92	-0,06
	Sen'in trend eğim metodu	0,012	0,006	0,007	-0,002	0,014	0,001	-0,002	0,000	0,004	-0,005	-0,012	-0,006	0,000	0,000	-0,005	0,008	0,000
	Trend	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Kayseri	Mann-Kendall (Z)	2,05	2,02	1,99	-0,92	-0,33	0,79	-1,74	-0,25	1,68	-0,31	-1,92	-1,16	0,24	0,63	-1,11	1,40	0,63
	Sen'in trend eğim metodu	0,017	0,020	0,023	-0,013	-0,007	0,010	-0,006	0,000	0,007	-0,003	-0,025	-0,007	0,002	0,004	-0,007	0,009	0,002
	Trend	↑	↑	↑	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Nevşehir	Mann-Kendall (Z)	0,87	0,31	0,80	-0,41	-0,78	0,85	-1,50	1,48	0,79	-0,49	-1,16	-0,89	-1,31	0,62	-0,99	-0,14	-0,77
	Sen'in trend eğim metodu	0,008	0,005	0,007	-0,006	-0,009	0,008	-0,002	0,004	0,003	-0,004	-0,017	-0,012	-0,007	0,004	-0,008	-0,001	-0,004
	Trend	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Kırşehir	Mann-Kendall (Z)	0,09	-0,77	0,36	-1,55	-0,48	0,15	-0,35	0,80	0,98	0,23	-1,08	-1,37	-0,48	0,38	-0,20	-0,43	-0,15
	Sen'in trend eğim metodu	0,003	-0,006	0,002	-0,014	-0,006	0,002	-0,001	0,000	0,003	0,002	-0,020	-0,018	-0,003	0,002	-0,001	-0,002	-0,001
	Trend	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Yozgat	Mann-Kendall (Z)	0,13	-2,09	0,99	-2,73	0,00	0,13	-1,65	0,66	1,22	0,16	-1,43	-1,42	-0,40	-0,29	-0,52	-1,04	-1,52
	Sen'in trend eğim metodu	0,004	-0,042	0,014	-0,034	0,000	0,002	-0,007	0,001	0,007	0,002	-0,034	-0,029	-0,003	-0,002	-0,006	-0,015	-0,008
	Trend	---	↓	---	↓	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Kırıkkale	Mann-Kendall (Z)	0,53	0,00	1,13	-1,67	-0,35	-0,16	-1,94	1,03	1,52	0,64	-0,62	-0,55	-0,91	-0,14	1,02	0,54	0,11
	Sen'in trend eğim metodu	0,006	0,000	0,014	-0,022	-0,004	-0,002	-0,008	0,003	0,005	0,007	-0,007	-0,009	-0,005	-0,001	0,005	0,004	0,001
	Trend	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Çankırı	Mann-Kendall (Z)	0,77	0,38	0,58	-0,54	0,01	0,21	-1,33	0,97	1,41	0,97	-0,73	-0,42	-0,45	0,06	0,69	1,28	-0,11
	Sen'in trend eğim metodu	0,011	0,005	0,005	-0,006	0,000	0,003	-0,010	0,006	0,009	0,008	-0,007	-0,007	-0,004	0,001	0,003	0,010	-0,001
	Trend	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Kastamonu	Mann-Kendall (Z)	-0,09	0,00	1,32	-0,48	-0,36	0,87	-0,16	0,15	1,85	-0,68	-1,67	-0,47	0,29	1,67	-0,19	-0,33	-0,22
	Sen'in trend eğim metodu	0,000	0,000	0,011	-0,008	-0,008	0,029	-0,002	0,002	0,018	-0,007	-0,010	-0,005	0,004	0,023	-0,001	-0,003	0,000
	Trend	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Sinop	Mann-Kendall (Z)	0,53	0,84	2,29	0,21	-0,16	0,38	0,00	-0,47	1,84	1,60	-0,21	3,38	1,58	0,29	1,96	2,82	1,61
	Sen'in trend eğim metodu	0,005	0,010	0,025	0,002	-0,002	0,006	0,000	-0,008	0,042	0,036	-0,004	0,072	0,011	0,005	0,027	0,028	0,010
	Trend	---	---	↑	---	---	---	---	---	---	---	---	↑	---	---	↑	↑	---
Çorum	Mann-Kendall (Z)	0,44	0,26	1,89	-0,98	-0,21	0,86	-1,25	0,19	1,32	0,48	-0,92	-0,69	-0,48	0,41	-0,20	0,05	0,00
	Sen'in trend eğim metodu	0,006	0,002	0,019	-0,015	-0,003	0,015	-0,009	0,000	0,010	0,004	-0,012	-0,011	-0,004	0,004	-0,002	0,001	0,000
	Trend	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

---: Trend yok, ↓: Azalan trend, ↑: Artan trend

#### 4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Kızılırmak havzasındaki on il merkezinde bulunan meteoroloji istasyonlarının yağış verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. 1980-2017 yılları arasındaki 38 yıllık dönemi kapsayan yağış verilerine trend analizi uygulanarak havzada bulunan on il merkezinde yağışta anlamlı trend olup olmadığı araştırılmıştır. Trend analizi için Mann-Kendall testi, birim zamandaki değişimi belirlemek için ise Sen'in trend eğim yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre on istasyonda aylık, mevsimlik ve yıllık olarak birçok noktada istatistiksel açıdan anlamlı bir trend görülmemiştir. Bir istasyon için aylık, mevsimlik ve yıllık olmak üzere toplam on yedi verinin trendinin belirlendiği düşünülürse on istasyonda bu sayının toplam yüz yetmiş veri olduğu görülmektedir. Bu yüz yetmiş veriden sadece dokuzunda istatistiksel olarak anlamlı bir trend olduğu belirlenmiştir. Bunların Kayseri il merkezi meteoroloji istasyonunda Ocak, Şubat ve Mart aylarında, Sinop il merkezi meteoroloji istasyonunda Mart ve Aralık aylarında, sonbahar ve kış mevsimlerinde artış trendi, Yozgat il merkezi meteoroloji istasyonunda ise Şubat ve Nisan aylarında azalış trendi şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Geriye kalan yüz altmış bir veride istatistiksel açıdan anlamlı bir trend görülmemiştir. İstatistiksel açıdan anlamsız olmakla birlikte geriye kalan bu noktadaki trendlere bakıldığında seksen iki noktada artış, yetmiş dokuz noktada azalış trendi olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, trend varlığı kabulü % 95 güven aralığına göre yapıldığından Kızılırmak Havzası'ndaki il merkezlerinin yağış verilerinde artan ya da azalan bir trend olmadığı sonucuna varılmıştır.

Kızılırmak Havzası'nda bulunan il merkezlerindeki meteoroloji istasyonlarının yağış verilerinin trend analizi sonucu göstermiştir ki yağışta artış ya da azalış trendi bulunmamaktadır. Ülkemizin farklı bölgeleri için yapılan sıcaklık, yağış vb. gibi hidro-meteorolojik verilerin trend analizi çalışmalarında da benzer sonuçlar olduğu literatür incelendiği zaman görülmektedir [3,4,6,7]. İklim değişikliğinin önemli göstergeleri sayılabilecek yağış ve sıcaklık parametrelerinin trend analizi sonuçları, yağışın, sıcaklıktan daha az etkilendiğini ve ülkemizde genel olarak sıcaklık verilerinde artan trend görülürken, yağış verilerinde trend olmadığını göstermektedir. Ayrıca, Ercan ve Yüce (2017) tarafından Kızılırmak Havzasında yapılan çalışmada elde edilen sonuçlarla bu çalışmada elde edilen sonuçların benzerlik gösterdiği görülmüştür [24].

Kızılırmak Havzası'nda bulunan il merkezlerinde gelecek dönemlerde yağışlarda önemli bir artış ya da azalış gerçekleşme ihtimalinin düşük olduğu söylenebilir. Yapılan çalışmanın, iklim değişikliğinin tahmininde kullanılan iklim modelleri ve emisyon senaryolarından Kızılırmak Havzası için yağışlarda önemli bir değişiklik öngörmeyen model ve senaryoların tercih edilmesi açısından referans olabileceği düşünülmektedir.


#### KAYNAKÇA


- [1] R. Acar, S. Şenocak, "Türkiye'deki kısa süreli yağışların trend analizi," İklim Değişikliği ve Çevre, vol. 1, no 1, pp.18-25, Mart 2008.
- [2] Z. Şen, "Su kaynakları ve iklim değişikliği. Küresel ısınma iklim değişikliği su, çevre ve enerji kaynaklarımıza etkisi," I. Türkiye İklim Değişikliği Kongresi, İTÜ, İstanbul, 1-7, (2006).
- [3] M. Karabulut and F. Cosun, "Kahramanmaraş ilinde yağışların trend analizi, ", Coğrafi Bilimler Dergisi, vol. 7, no 1, pp. 65-83, Nisan 2009.
- [4] M. Özfıdaner, D. Şapolyo, F. Topaloğlu, "İç Anadolu Bölgesi yağış verilerinin gidiş analizi," Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, vol. 5, no 1, pp. 161-168, Ocak 2016.
- [5] D. Taylan, T. Aydın, "The trend analysis of lakes region precipitation data in Turkey," Cumhuriyet Science Journal, vol. 39, no 1, pp. 258-273, Ocak 2018.
- [6] H. Y. Dalkılıç, "Yağışların trend analizi, ", Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, vol. 12, no 3, pp. 1537-1549, Ocak 2019.
- [7] G. Çeribaşı, "Batı Karadeniz Havzasının yağış verilerinin Yenilikçi Şen Yöntemi ile analizi," Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, vol. 6, no 3, pp. 168-173, Ocak 2018.
- [8] G. Çeribaşı, E. Doğan, "Karadeniz ve Sakarya havzalarında yıllık ortalama yağışların trend analizi," Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, vol. 7, no 1, pp. 1-7, Ocak 2015.
- [9] M. Büyükyıldız, A. Bertay, "Parametrik olmayan testler kullanılarak Sakarya Havzası yağışlarının trend analizi," Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, vol. 19, no 2, pp. 23-38, Ocak 2004.
- [10] S. Coşkun, "Van Gölü kapalı havzasında yağışların trend analizi," Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, vol. 8, no 2, pp. 521-532, Haziran 2020.
- [11] P. Polat, M. Sunkar, "Rize'nin iklim özellikleri ve Rize çevresinde uzun dönem sıcaklık ve yağış verilerinin trend analizleri," Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, vol. 27, no 1, pp. 1-23, Ocak 2017.
- [12] O. Arslan, "Niğde ili'ndeki potansiyel evapotranspirasyon tahminlerinin trend analizi," Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 6, no 2, pp. 602-608, Temmuz 2017.
- [13] C. Köyceğiz, M. Büyükyıldız, "Temporal trend analysis of extreme precipitation: a case study of Konya Closed Basin," Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 25, no 8, pp. 956-961, Aralık 2019.
- [14] S. Tokgöz, T. Partal, "Karadeniz Bölgesinde yıllık yağış ve sıcaklık verilerinin yenilikçi şen ve mann-kendall yöntemleri ile trend analizi, ", Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, vol. 10, no 2, pp. 1107-1118, Haziran 2020.
- [15] M. E. Keskin, İ. Çakto, V. Çetin, O. Bektaş, "Doğu Anadolu Bölgesi sıcaklık ve yağış trend analizi, ", Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, vol. 6, no 2, pp. 294-300, Haziran 2018.

- [16] Oğuztürk Gaye, "Kızılırmak Havzası'nda syi ile kuraklık analizi ve ysa yöntemi ile kuraklık tahmini", Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 2010.
- [17] T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, "İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkisi Projesi" Proje Nihai Raporu Ek 17- Kızılırmak Havzası, (2016).
- [18] <https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/FotografGalerisi/KIZILIRMAK%20HAVZASI-09.08.2019/02.jpg> (Erişim zamanı; Nisan, 6, 2020).
- [19] C. B. Karakuş, "Hidro-meteorolojik parametreler için trend analizi yöntemleri,", International Journal of Scientific and Technological Research, vol. 3, no 2, pp. 22-32, Ocak 2017.
- [20] Cebe Enise Neyran, "Türkiye akarsularında mevsimsel trend analizi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- [21] R. M. Hirsch, J.R. Slack, R. A. Smith, "Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data,", Water Resources Resarch, vol.18, no 1, pp. 107-121, Ocak 1982.
- [22] S. Kalaycı, E. Kahya, "Susurluk Havzası nehirlerinde su kalitesi trendlerinin belirlenmesi,", Turkish Journal of Engineering and Environmental Science, vol. 22, no 6, pp. 503-514, Aralık 1998.
- [23] Y. S. Yu, S. Zou, D. Whitemore, "Non-parametric trend analysis of water quality data of rivers in Kansas,", Journal of Hydrology, vol. 150, no 1, pp. 61-80, Ocak 1993.
- [24] B. Ercan, M. İ. Yüce, "Kızılırmak Havzasının hidrometeorolojik verilerinin trend analizi,", Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, vol. 6 no özel sayı, pp. 333-340, Aralık 2017.

## Scheduling Optimization in Automotive Supplier Industry under Sequence Dependent Constraints

<sup>1</sup>Muhammed Mohamedsalih, \*<sup>2</sup>Fuat Şimşir,

<sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Sakarya University,  
msalih.ac21@gmail.com 

<sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Karabuk University,  
fuatsimsir@karabuk.edu.tr 

Research Paper

Arrival Date: 21.04.2021

Accepted Date: 25.05.2021

### Abstract

In today's production conditions, it is very important for companies to produce products that meet the determined quality standards. In addition to the production of semi-finished products produced in plastic injection lines with high quality and efficiency, it is aimed to reduce the lost time and waste materials in production. Since automobile headlights can be in many different colors, it is necessary to keep the product quality at a high level in the transition between colors in the production made by plastic injection and to reduce the number of defective products caused by color errors. In this study, the problem of a single row-dependent machine to reduce the amount of waste that occurs between color transitions in the plastic injection line of an automotive side-industry company producing headlights is discussed. Tabu Search method, which is one of the heuristic optimization algorithms was used to solve the problem. In the solution, production sequences that will reduce the amount of waste of the products in the production program were created by using the annual data kept by the production department of the factory. The algorithm was run using data from two machines out of 18, saving 134 kg of waste materials. It has been clarified that if the developed algorithm is applied to all machines in the department, productivity and product quality will be increased by saving waste materials.

**Keywords:** Sequence dependent setup time, Single machine scheduling, Tabu Search, Plastic Injection

### 1 INTRODUCTION

It has become very important for each enterprise to produce products that meet the quality standards determined in the living and production conditions of recent times. For companies to maintain their continuity, their products must meet customer expectations, but they must often offer more. Because there are many competitors that put the same product on the market and the increase in quality standards is a factor that increases customer loyalty. To ensure the standing of companies, the importance given to quality in competition is increasing. While aiming to keep the quality high, it is important to minimize the cost.

The plastic industry, like other branches of industry, has developed rapidly and still continues this development [1]. Plastic injection molding is one of the methods used in the production of plastic materials. The most important advantage of injection is that parts with complex shapes are produced in a controlled manner without the need for a final process. Plastic injection molding is one of the most widely used industrial technologies for producing high productivity plastic products.

The point that distinguishes plastic parts production from other productions is that it includes raw material and color parameters at the same time. The reason of this, to produce different products sequentially on a single machine, the colors or raw materials used in the production of the next product are required to comply with the required quality standards at the time of change [1]. To ensure this compliance, it is a must to clean the color and raw material residues of the previous produced product in the injection part of the production machines. The process of cleaning the residues in the machine is known as the ejection stage. The waste raw material that occurs in the ejection process is called a residue. The ejection process continues until the parts in the queue to be produced reach the determined quality standards. Since the products produced during this process do not comply with the determined quality standards, it also causes serious losses in time and raw materials. Therefore, it is of great importance to complete the ejection process as soon as possible to minimize the loss of time. At this point, we encounter the sorting and scheduling problem in production systems. Determining production sequences to keep the quality at the highest level and reduce the amount of waste in the plastic injection molding process is one of the interesting research problems in this area.

\*Corresponding Author: Karabük University Department of Industrial Engineering, fuatsimsir@karabuk.edu.tr, +90 533 249 42 32

Sequencing and scheduling problems in production systems are classified from different perspectives. According to the classification made by considering the number of works and machines, the problems are examined under two main categories as "single-machine" and "multi-machine" scheduling. In the classification made in terms of the complexity of scheduling problems, it is accepted that there are four titles:

- Single stage, one machine problem is the simplest type of problem. The processes here require a single operation to be processed on a single machine.
- Single stage, parallel machine problem. The parts still require a single process step to be machined on each of the parallel machines. However, in such problems, there are more than one machine processing the similar part.
- Multistage problems are those in which there is a clear order of priority between operations. The functions involved in the process are optimally arranged according to the priority relationship in the machines. These types of problems are dealt with in terms of flow type and workshop type. In flow type problems, existing tasks are handled in the same set of devices with a similar process sequence. The operation order and priority relationship for each function on the devices are the same.
- Job shop type problems are the most general, comprehensive, and complex type of problem in creating classifications. There are no restrictions on process steps in this process. In other words, in the problems of workshop type, the person in charge of planning ensures that the works are processed in different machines in their specified sequence.

The simplest and special case of these problems is single-machine scheduling and it is one of the scheduling problems where jobs are processed sequentially. [2]. The problem of optimal scheduling of semi-finished products in injection molding machines is a good example of single machine scheduling problems [3]. Finding the best solutions for scheduling problems, which are included in combinatorial optimization problems, becomes more difficult as the size of the problem increases. That is why instead of methods that provide exact solutions in large-scale scheduling problems in the NP-Hard class, heuristic methods which may not reach the best solution but with short processing time are used.

Plastic injection department is the first stage of production in the company where the developed algorithm is applied. In this section, the required semi-finished products (lens and body) are produced. In order to produce a product in injection machines, the mold of this product must be clamped to the relevant machine [4]. Injection molding machines are identical in terms of production time. Since each mold cannot be clamped to all machines with different tonnages and dimensions, these machines are not completely alternative to each other. There is an intense setup time in this process and it is important to minimize this setup time. A second situation is that more than one product is produced with different raw materials on a machine. A certain amount of residue and

waste arises due to the difference in raw materials in product transitions. The residue is the residual semi-finished product that is produced when the machine is cleaned. The semi-finished products produced in the production trials that take place after the cleaning process create the waste.

The contribution of this study is to determine the production sequence that will provide high quality and efficiency, low lost time and waste amount. The company works with a 100% quality policy and does not include any errors in the production line in line with this policy. The Plastic Injection department, which is in the first phase of the production line, is the process that forms the basis of the production. The loss of time and error in plastic injection affects other production lines. The decrease in the time and error rate gained in Plastic Injection will greatly affect the reduction of production waste costs and increase of production capacity. The gains in the work made strengthen the Just-In-Time Delivery Policy offered to the customer and ensure that orders are produced and shipped on time with minimum time and error.

The variables (time, cost, distance, wastage, etc.) between the elements of most problems whose solutions in the literature are based on scheduling and series creation were accepted as symmetrical. In our study, there is no symmetry in the transition between the elements / products due to the color effect. For example, in case of transition from product A to product B, the same amount of residue as in transition from B to A does not occur. This means more data and therefore longer solution time. In our study, it is aimed to create a production order that will create the least waste amount in the transition between products (during production) by using the transition data in the database of the company. Minimization of wastage is also directly related to the above-mentioned ejection process. The short duration of the ejection process depends on switching from light colored raw material to dark colored raw material or continuing production with the same raw material but switching from dark-colored raw materials to light-colored raw materials or continuing to produce with different raw materials may prolong the duration of the ejection process by a large amount. The purpose of this study is to create an optimal schedule to determine the preparation time of product transitions, it aims to minimize the amount of waste arising in the production trials, thus the production trial period and the amount of residue generated during the passes, accordingly, the machine cleaning time.

In the next parts of the study first, the literature was reviewed and examples were given, and as a result of the search, the appropriate methodology was determined and explained. Afterwards, the application of the methodology to the problem was explained and the results were analysed. In the last part, there is a conclusion and discussion part.

## 2 LITERATURE REVIEW

When the literature is examined, it is seen that there are studies conducted in various fields and with different

solution methods for the sequence dependent scheduling problem. Viagas and Costa (2021) developed two different algorithms, one is constructive heuristic based on a beam search strategy and the other is metaheuristic population-based iterated greedy algorithm to solve the single machine scheduling problem. They aimed to minimize the makespan with release dates and sequence-dependent setup times. The population-based iterated greedy algorithm has been outperformed better results than the other algorithm and the most promising examples in the literature. [5]. Zhao et al. (2020) studied queue-linked single machine scheduling problem. In this problem, job sequences and processing times are not previously determined. The aim is to minimize the maximum delay. Although this problem is one of the most important production scheduling problems, it is underrepresented in the literature. In this study, a dynamic differential evolution algorithm was proposed to solve this problem. The local search method has been used to create a starting solution. Results were tested on 1000 samples from the literature. The algorithm proposed in the calculation results has been shown to be quite effective compared to known methods [6]. Mustu and Eren (2018) addressed the single machine scheduling problem to minimize total delay with a sequence-dependent learning effect and sequence-dependent setup times. They developed a branch-bound algorithm that includes some dominance properties and a lower bound to get the best solution. In addition, four well-known heuristics, two types of genetic algorithms and two types of variable neighborhood search algorithms, have been proposed to obtain the best solution. The results showed the efficiency of the Branch and Bound algorithm, as it could solve problems of smaller sizes or equal to 30 in reasonable time. [7]. Perez-Gonzalez and Framinan (2018) discussed the single-machine scheduling problem that aims to minimize the time to complete the final job ( $C_{max}$ ) in their study. Mixed integer programming was used in modeling the problem, and heuristic methods were used in the solution approach. [8]. Rosa et al. (2017) addressed a single machine scheduling problem with distinct time windows and sequence-based setup times. The goal is to reduce the overall early and the likely delay. In order to determine start times, a general variable neighborhood search algorithm (GVNS) and an implicit enumeration algorithm (IE) has been proposed. The (IE) algorithm found a result able to be suitable for problems of less than or equal to 15 jobs. A general variable neighborhood search algorithm produces good quality solutions for problems of larger sizes. [9]. Ben-Yehoshua and Mosheiov (2016) addressed the single-machine scheduling problem and aimed at minimizing the total number of jobs completed early. Dynamic programming algorithm is used to solve the problem. [10]. Herr and Goel (2015) discussed the problem of product transients in sequential single machine problems in their studies. In their study, the goal is to find a program that minimizes the total delay based on the given deadlines of the jobs. A mathematical formulation and heuristic solution approach are presented for two types of the problem. The computational results showed the superiority of the proposed

inference in terms of time and solution quality over other commercial programming solutions.[11].

Prabhakar (2014) tackled one type of production scheduling problem with sequencing type present in various production facilities in the chemical industry. The problem is solved by using a mixed integer programming problem and branch and boundary algorithm [12]. Cheng et al. (2011) showed that single machine scheduling problems can be solved polynomially to minimize the production time, total completion time, and square sum of completion times. They also showed that if the working times and due dates are appropriate, the problems of minimizing the total delay and the maximum delay can be solved polynomially [13]. Wang and Li (2011) discussed the effects of general situational and time-dependent learning and the problems of scheduling sequential setup times for a single machine [14]. Türker and Sel (2011) presented an intuitive approach to minimize the completion time of the job scheduling problem, where the preparation time in parallel machines is sequence dependent, in other words, the setup time of the job differs depending on the previous job and the setup operations are carried out by a team. An approach that uses genetic algorithm and tabu search approaches together has been proposed for problem solving [15].

Zhao and Tang (2010), Wang et al. (2009) and Savard et al. (2008), addressed single machine scheduling problems related to lead times and time to complete jobs in their works [16,17,18]. Polynomial time algorithms have been proposed to solve these types of problems. Karabatı and Akkan (2006) A branch bound algorithm (B & B) is presented to minimize the sum of preparation times in the sequence-dependent setup time in single machine scheduling problem. As a result, it has been shown that the B & B algorithm used can solve problems of up to 60 jobs and 12 groups, where setup and processing times are evenly distributed in various combinations of [1,50] and [1,100] ranges [19]. Rabadi et al. (2004) proposed a branch and boundary algorithm for the solution of the problem with a main function consisting of a linear combination of total early termination and total delay. They have shown that they can solve problems up to 25 jobs in a reasonable time with the proposed method. [20]. Gupta and Smith (2006) is discussed the single machine scheduling problem to minimize the sequence-dependent setup times and total delay. Two heuristic algorithms have been proposed for this problem, namely the space-based local search and the Greedy Random Adaptive Search Procedure (GRASP). Comparisons were made with Simulated Annealing, Genetic Algorithm, Branch and Bound and Ant Colony to show that their algorithms perform very competitive [21]. Armentano and Mazzini (2000), proposed a genetic algorithm whose parameters are determined by statistical method for a single machine scheduling problem to minimize the total delay. It has been shown that the solutions obtained with the proposed algorithm for small-sized problems give better results by comparing them with the heuristic methods in the literature [22]. Lee et al. (1997) aimed to minimize the total weighted delay in a single

machine with sequence dependent setup times. It has been proposed a three-phase heuristic method for this problem. The computational experiments emphasized that the algorithm can be successfully applied in an industrial planning system. [23]. Tan and Narasimhan (1997) addressed the problem of minimizing delay in sequence dependent scheduling. Where the delay time was reduced by using the simulated annealing algorithm, and the experimental results showed that the algorithm is able to find a good quality solution in record time compared to other algorithms. [24]. Shin et al. (2002), proposed a tabu search algorithm to reduce the completion time for several functions executed on the same machine. Each function has a start time, end time and turnaround time dependent on the sequence. The first solution was formed by MATCS (apparent delay cost modified with settings) rule, then the Tabu Search algorithm was used to find the optimal solution. Experimental results have shown that the taboo search algorithm obtains much better solutions than the heuristic method. [25]. Rubin and Ragatz (1995) discussed the application of a sequential scheduling problem. They aimed to determine the order of a series of n jobs on a single machine that will minimize the total delay of the jobs. In this study, the method of genetic algorithm was used to solve the problem and the performance of genetic search was compared with a branch and boundary algorithm with a pure random search on a set of 32 test problems [26].

Automotive manufacturers reacts zero tolerance for major problems, such as color tone defects in any part of automobiles. In terms of spare part suppliers, production plans that will not cause such errors and increase waste raw material costs are needed. It is aimed to contribute to the literature with this study made for the optimization of the use of expensive raw materials in the automobile sub-industry, where part costs are high and quality is given a high level of importance. The method can also be considered as a model that can be used in different sectors with similar production styles. Tabu Search is one of the important optimization algorithms used in solving combinatorial optimization problems. Tabu Search Algorithm avoids falling into local solution points in the search area and aims to reach the global best. In order to achieve this goal, it provides speed and efficiency in reaching the optimum solution since it ensures that the solutions visited in the previous iterations are banned.

In this study, it is aimed to reduce the lost time and wastage in the Plastic Injection section, which is at the first stage of the production line of an automotive supplier company and forms the basis of its production. To achieve this goal, a solution to a real scheduling problem is offered using the Tabu Search algorithm, which can create production sequences with less waste by using data that has been realized for a year.

### 3 TABU SEARCH

The Tabu Search (TA) technique, named after the word Tabu, which is used to express the sacred prohibitions in primitive tribes, is a heuristic algorithm proposed by Glover (1989,1990) to be used in the solution of combinatorial optimization problems [27,28]. Algorithm is a heuristic technique that guides local search methods to get rid of local best solutions and reach global best [29]. In order to prevent the steps leading to the final solution from making circular movements, it is ensured that repetition is prohibited or punished in the next cycle. Tabu is a successful algorithm that progresses in an iterative way (sequential processes) used in solving search optimization problems. The first step in TA is to create the initial solution. After that, it continues with the stages of creating the candidate list of the movements, selecting the most suitable candidate from this list, and repeating or terminating the search according to the stop criteria. The flow chart showing the stages of the Tabu Search algorithm is given in Figure 2.1. The basic components of the algorithm and the operation of these components are explained in the following section under subheadings.

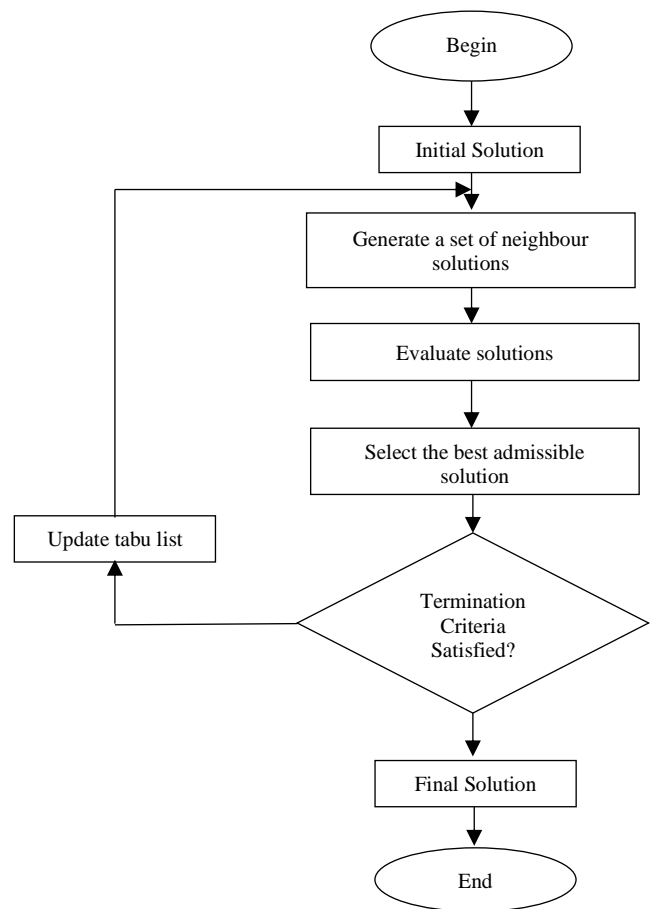


Figure 3.1 Tabu Search algorithm’s Flow chart



### 3.1 Tabu List

The nature of this list is that the current tabu list can update itself through a ranking and comparison process after determining possible candidate solutions. For this purpose, this algorithm developed a tabu list in which the list of solutions found in previous loops is recorded. If a potential solution candidate is the same or has similar characteristics as a tabu-listed solution, that solution will not be considered. While creating the tabu list, the best potential solution is added to the list in line with the purpose function in each cycle, in case the capacity of the tabu list is exceeded, the initial solutions in the list are deleted from the list, and the new solutions obtained in the last loops are added to the list [FIFO]. When the tabu list is full and there is a new banned solution, as shown in Figure 3.1, the oldest available solution is removed from the list and the new solution is registers as the newest solution.

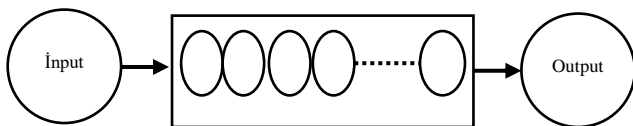


Figure 3.2 The structure of the Tabu List

### 3.2 Tabu Tenure

Proximity-based memory works with a tabu list that holds the tabu active elements. Each tabu active element is kept in the tabu list for a specific iteration period. When this period is completed, the tabu active element is will be removed from the list and the solutions containing these elements will be not tabu. The length of time (the number of iterations) that an element included in the tabu list will be kept in this list is generally determined by the size of the problem. The point to be considered in determining the tabu period is that this period will neither be small nor large. When the tabu duration is small, it can cause the algorithm to hang likewise this time may negatively affect the quality of the solution. A balance can be struck between the variable selection of the tabu retention period, meticulous examination of one region of the solution space, and then moving to another solution area [30].

### 3.3 Short Term Memory Strategy

Since the tabu search method is a general method, there are no definite principles regarding the application method [32]. In order to reach a satisfactory solution with the tabu search method, additions are often required according to the problem structure. Therefore, when designing the method, a suitable memory should be designed for the problem that is sought. In problems where short-term memory is used, an element marked as active is kept in its proximity-based memory, and in the next iterations, while searching for a solution, it is prevented to go to the area of that element. Although short-term memory does not obtain extensive

information such as long-term memory, it is a highly preferred method in many problem structures. The working steps of short-term memory are given in Figure 3.2.

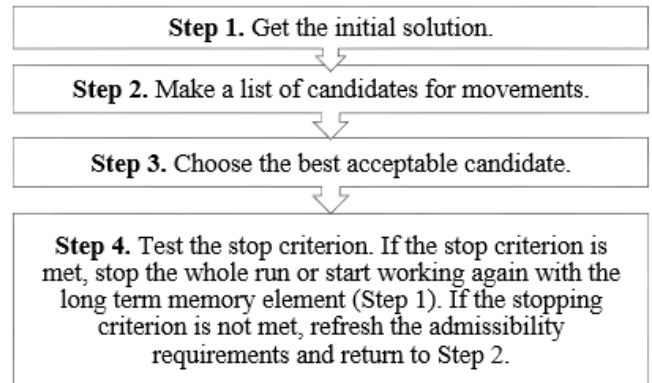


Figure 3.3 Short-term memory work steps

### 3.4 Long-Term Memory Strategy

For many types of problems, short term memory is quite sufficient to produce good quality solutions. By adding long-term memory, the method is getting stronger in finding the best solution [31]. Long-term memory saves information from all possible solution areas without being limited to specific field information during the operation of the algorithm, and the progress of the algorithm is monitored, and solutions that approach the global area can be accepted and solutions that lead to local areas can be prevented through certain strategies. For example, when registering elite solutions, only solutions that are significantly different from previous solutions can be registered. And when each elite solution is selected for review, the short-term memory of the previous solution can be freed.

## 4 PROBLEM DEFINITION

The company, which manufactures headlights in the automotive supplier industry, has 16 injection machines in the plastic injection department. The study focuses on machines 06-19 and 06-28, using one-year products production sequence information recorded by the company's production department. The explanation of the problem and the explanation of the problem data will be made over the information of the 06-19 coded machine. The algorithm solution results of the other machine will be discussed in the application part.

In Table 4-1, production transition data of 11 products in the 06-19 coded machine are shown. In the table, the raw materials of the previous and next product, the amount of the wasted residues formed, the number of produced product and duration of production are shown. Production transition number 1 in the table, it shows that the machine with the code 06-19 switched from producing the Aa87 / 88 coded product to the Bf32 product. The raw materials of these products are Aa81 and Ab80, respectively. In this transition, the production of the Bf32 coded product takes 240 minutes and

it is shown that 145 pieces are produced, while 2.5 Kg of wasted residues is produced in this operation.

**Table 4-1** Data samples of 06-19 coded machine

#	Previous Product	Prev. Raw Mater.	Next Product	Next Raw Material	Resid. amount (kg)	Prod. Time (min)	Prod. Unit (Piece)
1	Aa87/88	Aa81	Bf32	Ab80	2,50	240	145
2	Bf32	Ab80	Bf32	Ab80	3,50	525	417
3	Bf32	Ab80	Ae50/51	Ab44	14,8	365	548
4	Ae50/51	Ab44	Ab70/71	Bb44	8,80	525	1168
5	Ab70/71	Bb44	Ai70/71	Aa53	4,54	545	2048
6	Ai70/71	Aa53	Bh50/51	Aa14	2,41	550	854
7	Bh50/51	Aa14	Aa87/88	Aa81	5,00	525	74
8	Aa87/88	Aa81	Ar24/25	Ab400	0,00	300	704
9	Bh51/55	Aa14	Bh51/55	Aa14	7,00	180	252
10	Bh51/55	Aa14	Bh56/57	Aa14	0,00	350	496
11	Bh56/57	Aa14	Ah56/57	Aa14	5,00	120	84
12	Ah56/57	Aa14	Ar24/25	Ab400	4,70	340	780
13	Ar24/25	Ab400	Ai70/71	Ab400	4,91	590	1180
14	Ar24/25	Ab400	Aa87/88	Aa81	6,80	450	296
15	Ad96/97	Bb80	Ad96/97	Bb80	12,3	525	525
16	Ad96/97	Bb80	Ad96/97	Bb80	4,70	430	708
17	Ad96/97	Bb80	Aa87/88	Aa81	13,70	525	600
18	Ar24/25	Ab400	Ar24/25	Ab400	1,815	310	626
19	Ar24/25	Ab400	Ab70/71	Ab44	4,50	405	810
20	Ab70/71	Ab44	Ab70/71	Ab44	3,10	250	518
21	Bf32	Ab80	Bh51/55	Aa14	4,64	255	336
22	Bh51/55	Aa14	Bh51/55	Aa14	5,34	360	508
23	Bh51/55	Aa14	Bh51/55	Aa14	3,75	400	568
24	Bh51/55	Aa14	Bh56/57	Aa14	3,88	310	512
25	Bh56/57	Aa14	Bh56/57	Aa14	3,20	330	420

**5 APPLICATION**

Tabu search method was used for the solution of the problem presented in Chapter 4. The tabu algorithm was written using the Python programming language using the Spyder operator, where the Panda and Numpy libraries specialized in data analysis and mathematical operations were used to write the algorithm. The program was run on a computer with a Core i5 processor and 4GB RAM.

**Table 5-1** Parameters of the tabu algorithm

	problem size (n)	Tabu Tenure	stop criterion
<b>06-19</b>	36	$\sqrt{36} = 6$	30000 iteration
<b>06-28</b>	21	$\sqrt{21} \cong 5$	30000 iteration

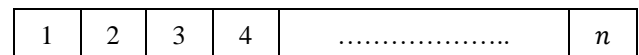
Table 5-1 shows that the algorithm parameters have been defined in line with the problem presented in our study. Where Tabu Tenure represents the number of steps in which the chosen solution in the current step will be blocked, and the stop criterion was defined as the arrival of the algorithm at 30,000 steps. Tabu search algorithm was first run with the monthly order information of the 06-19 coded machine, given in Table 5-2.

**Table 5-2** One month of product order data

C	Week 1	Week 2	Week 3	Week 4
1	Bf32	Bh51/55	Bf32	Bh50/51
2	Aa87/88	Bh56/57	Ac72/73	Bh51/55
3	Ab70/71	Ac72/73	Aa87/88	Bh56/57
4	Ad96/97	Ab11/12	Ab70/71	Ab11/12
5	Ae50/51	Ad96/97	Ad96/97	Ad96/97
6	Ah56/57	Ai70/71	Ae50/51	Ai70/71
7	Ar24/25	Aa87/88	Ah56/57	Aa87/88
8	Ai70/71	Bh56/57	Ar24/25	Bh56/57
9	Bh50/51	Ad96/97	Ai70/71	Ad96/97

**5.1 Problem Size and Initial Solution**

Choosing a good initial solution saves time and allows better exploration of the solution space [33]. A procedure or any heuristic method that guarantees the feasibility of the solution can be used to create the initial solution. In our study, a product series consisting of *n* products whose optimum order is requested by the production engineer represents the initial solution of problem. For example, after the product series to be produced in the next month is determined, this product series is entered into the program and the initial solution is shown as in Figure 5.1.



**Figure 5.1** Problem size

**5.2 Objective Function**

The objective function to be used in the tabu search method is a function that minimizes the residual amount in products production transition. The initial solution used in the tabu search method and the solutions obtained in the next steps are evaluated in terms of compliance with the objective function. The objective function is in the structure of a function that minimizes the sum of the cost (Billet quantities) that resulting from the transfer of production from product *i* to produc (*i* + 1). in the evaluated product series. The number one equation represents the object function where  $C_{i,(i+1)}$  represents the amount of residues resulting from the transfer of production from product *i* to product (*i* + 1).

$$Min \sum_{i=1}^{n-1} C_{i,(i+1)} \tag{1}$$

**5.3 Mechanism of Movements**

In the transition from an existing solution to a neighboring solution, the movements of displacement and intervention were used. Within the limits of the size of the problem ( $0 < r \leq n$ ), two unequal (*r*1,*r*2) random numbers are generated. Then, the neighbor/candidate solution is generated by replacing the r1 index product with the r2 index product in current best solution series.

### 5.4 Candidate Movement List and Choosing the Best Movement

The candidate movement list is determined according to the strategy of choosing the best move in our problem. This strategy chooses the best action produced from the current solution to achieve improvement in the value of the objective function, provided it meets the tabu constraints and aspiration criteria. This strategy is based on the assumption that a movement chosen as the best candidate movement will lead to the best solution or optimum solution faster after a few steps [34]. The first step is to create a list of candidate solutions. Then, the tabu status and aspiration criteria are checked for each solution in this list, respectively. Objective function values of non-tabu solutions are calculated and the action with the best objective function value is considered the best solution and used to generate a new solution in the next iteration. To better understand the working mechanism of this strategy, the flowchart is shown in Figure 5.2 below.

### 5.5 Tabu List and Tabu Periods

A  $(n \times n)$  dimensional matrix is used to check whether a move is tabu or not. This matrix records the length of time a banned solution candidate will remain on the tabu lists. An action taken to the next action, that is, an accepted action, is kept in the tabu list for a period of time. This time is recorded as  $t$  in the cell where  $r1$  and  $r2$  intersect. At each subsequent iteration, it is decremented by 1 until it becomes zero or until the aspiration criterion is met. Tabu times were taken statically and calculated by rounding the square root of the number of products in the list ( $n$ ) to the nearest integer.

$$t = \text{round}(\sqrt{n}) \tag{1}$$

The working mechanism of the tabu list is shown in Table 5-3. Here, if the displacement between the 2nd product and the 1st product is included in the candidate movement list and is considered the best move in the candidate action list, this action is prohibited until the next round  $(\sqrt{n})$  iteration.

### 5.6 Aspiration Criterion

In this study, tabu breaking is used according to the purpose. Accordingly, if a tabu move provides a better solution than the best solution found up to the current iteration, it can be implemented despite being tabu. However, if all the actions that can be taken from the current solution without breaking the feasibility are tabu, the current solution is updated with the move closest to the end of the tabu situation.

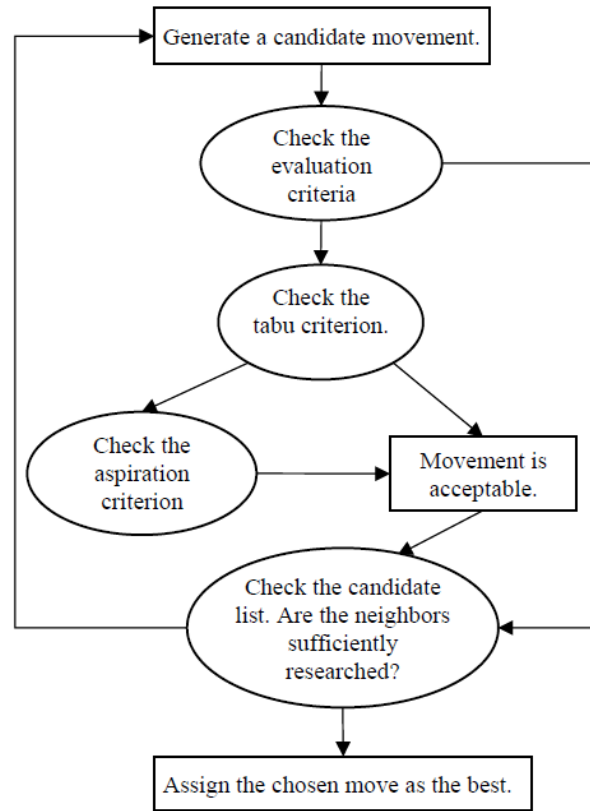


Figure 5.2 Best move selection strategy

Table 5-3 The working mechanism of the tabu list

	1	2	.....	n
1	0	0	.....	0
2	round( $\sqrt{n}$ )	0	.....	0
.	.	.	.....	.
n	0	0	.....	0

## 6 RESULTS

In order to achieve optimal sequencing, the tabu search algorithm coded in the Python programming language was run using the parameters defined in the previous titles. The results obtained from the runs were examined separately based on machines. Table 6-1 shows the starting sequence of the 06-19 coded machine.

Table 6-1 Starting order of products for 06-19 coded machine.

Item no	Week 1	Item no	Week 2	Item no	Week 3	Item no	Week 4
1	Bf32	10	Bh51/55	19	Bf32	28	Bh50/51
2	Aa87/88	11	Bh56/57	20	Ac72/73	29	Bh51/55
3	Ab70/71	12	Ac72/73	21	Aa87/88	30	Bh56/57
4	Ad96/97	13	Ab11/12	22	Ab70/71	31	Ab11/12
5	Ae50/51	14	Ad96/97	23	Ad96/97	32	Ad96/97
6	Ah56/57	15	Ai70/71	24	Ae50/51	33	Ai70/71
7	Ar24/25	16	Aa87/88	25	Ah56/57	34	Aa87/88
8	Ai70/71	17	Bh56/57	26	Ar24/25	35	Bh56/57
9	Bh50/51	18	Ad96/97	27	Ai70/71	36	Ad96/97

**Table 6-2** Results by number of iterations for 06-19 coded machine.

Iteration no	Time	Object Function Value (Kg)
0	00:00:00	224,348
5000	00:02:28	177,000
15000	00:16:00	170,376
30000	00:28:25	164,394

As seen in Table 6-2, the algorithm's working time took approximately 29 minutes, the time varies according to the size of the problem. Even if the working time is short in a small size problem, it can take hours for large size ones. The Table 6-3 shows the optimal result given by the.

**Table 6-3** the optimum solution for the 06-19 coded machine After 30 thousand iterations.

Item no	Week 1	Item no	Week 2	Item no	Week 3	Item no	Week 4
1	Bh56/57	10	Ah56/57	19	Bh50/51	28	Ai70/71
2	Bh56/57	11	Ad96/97	20	Ah56/57	29	Ab70/71
3	Bf32	12	Bh56/57	21	Bf32	30	Ad96/97
4	Ar24/25	13	Ad96/97	22	Ai70/71	31	Ai70/71
5	Ai70/71	14	Bf32	23	Bh56/57	32	Bh51/55
6	Aa87/88	15	Ab70/71	24	Ad96/97	33	Ae50/51
7	Bh51/55	16	Aa87/88	25	Ad96/97	34	Aa87/88
8	Bh56/57	17	Ar24/25	26	Ai70/71	35	Ar24/25
9	Ae50/51	18	Ad96/97	27	Aa87/88	36	Bh50/51

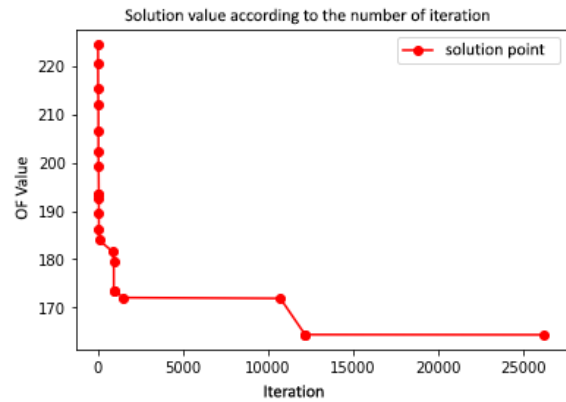
Figure 6.1, shows the solution value reached according to the number of iterations. In the light of the results obtained, the value of the objective function decreased from 224.3 Kg to 164.3 Kg in the best solution found. Thus, an improvement / saving of 60 Kg has been achieved in the use of raw materials. When the algorithm is run and the determined number of iterations is completed, the graph of the best solutions obtained with optimum ranking is shown.

In Table 6-4, shows the starting order of the product belonging to the 06-28 coded machine. The working time of the algorithm for the 06-28 machine shown in Table 6-5 is 20 minutes. At the end of this working period, it has been observed that the amount of wasted row materials has decreased by 54%.

**Table 6-4** Starting order of products for 06-28 coded machine.

Item no	Week 1	Item no	Week 2	Item no	Week 3	Item no	Week 4
1	Ab02/03	7	Ab02/03	13	Ba76/77	19	Ba76/77
2	Bb18/19	8	Bb18/19	14	Ab02/03	20	Bc95/96
3	Bc97/98	9	Bc97/98	15	Bb18/19	21	Ab02/03
4	Ab02/03	10	Ba76/77	16	Ba78/79		
5	Bc97/98	11	Bc97/98	17	Ba76/77		
6	Ba76/77	12	Ab02/03	18	Bb18/19		

The objective function value of optimum result : ### 164.394 Kg ###



**Figure 6.1** Solution graph according to iteration for 06-19 machine after 30 thousand iterations.

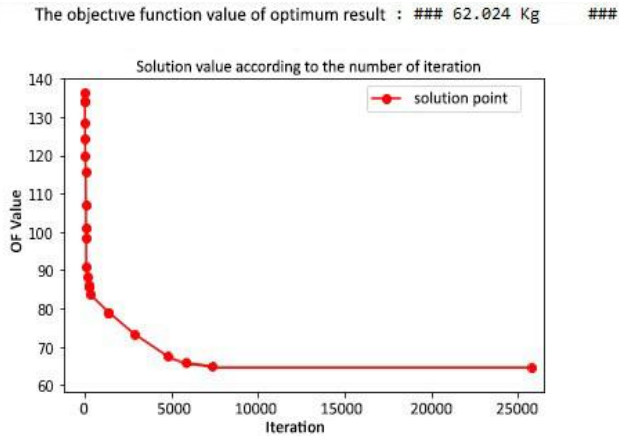
**Table 6-5** Results by number of iterations for 06-28 coded machine.

Iteration no	Time	Object Function Value (Kg)
0	00:00:00	136,330
5000	00:02:12	93,200
15000	00:09:38	67,536
30000	00:19:44	62,024

Table 6-6, shows the algorithm's optimal result for the 06-28 coded machine. In addition, the best solutions provided by the algorithm in the working process are shown in Figure 6.2. Since the Tabu search method evaluates many potential solutions at each stage, the time to find the optimal solution can be long. However, as the duration increases, it may provide a small improvement in the target function value. Tabu search algorithm is a very general search method and the lack of precise principles about the operation of this method can provide great flexibility to the developer of the algorithm [34]. However, the success of the tabu search method depends on how well and appropriately the algorithm is designed for the relevant problem. For this reason, the advantage of the tabu search method to provide flexibility should be used well and it is extremely important to make a suitable design for the problem to be solved.

**Table 6-6** the optimum solution for the machine 06-28 After 30 thousand iterations.

Item no	Week 1	Item no	Week 2	Item no	Week 3	Item no	Week 4
1	Ba78/79	7	Ba76/77	13	Ab02/03	19	Bb18/19
2	Ab02/03	8	Bb18/19	14	Ba76/77	20	Bc97/98
3	Ba76/77	9	Bc97/98	15	Bb18/19	21	Ba76/77
4	Bc97/98	10	Bb18/19	16	Ab02/03		
5	Ab02/03	11	Ba76/77	17	Ab02/03		
6	Ab02/03	12	Bc97/98	18	Bc95/96		



**Figure 6.2** Solution graph according to iteration for 06-19 machine after 30 thousand iterations.

## 7 CONCLUSION

The plastic injection line of the company where this study was carried out was examined and it was observed that raw material and product wastage and lost time emerged due to the color change in semi-finished products. Accordingly, it has been determined that the problem should be handled as a sequence dependent single machine scheduling problem. With the aim of reducing lost time and wastage in the plastic injection line, one-year product sequence transition data were collected and analysed. When the structure of the problem and the data obtained were examined, it was decided to use the tabu search method for the solution with its flexible structure. In this study, it is aimed to find the order of products that will minimize the residues amounts to be produced by the monthly product orders to be produced in two machines in the injection department.

As a result of the solution, it was seen that the total amount of residues was reduced by 134 kg as a result of one month production on two machines. Although the focus of the study is two machines out of 18 machines, a large amount of raw material can be saved. If the algorithm is applied in all injection machines of the company, significant savings can be achieved in resources such as labor, material and time spent. On the other hand, in the study, orders were found to reduce waste by considering the finalized orders. Hybrid use of an artificial intelligence model, which can create more sorting options by predicting the customer orders in the future, can be carried out in future studies.

### Author contributions:

*Muhammed MOHAMEDSALİH:* Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Data Curation, Writing - Original Draft, Visualization

*Fuat ŞİMŞİR:* Methodology, Investigation, Writing - Review & Editing, Supervision, Project administration

### Conflict of Interest:

We do not have any conflict of interest or common interest with any institution or person that we know that could affect our work.

**Financial Disclosure:** We declared that this study has received no financial support.

## REFERENCES

- [1] T. Saraç and S. Kaya, "Plastik enjeksiyon makinelerinin vardiya bazında çizelgelenmesi problemi için bir hedef programlama modeli," *Journal of Industrial Engineering*, vol. 24, pp. 12–26.
- [2] T. Eren and E. Güner, "Sıra-Bağımlı Hazırlık Zamanlı İki Ölçütlü Çizelgeleme Problemi: Toplam Tamamlanma Zamanı Ve Maksimum Erken Bitirme," *Erciyes University Journal of Science and Technology*, vol. 23, no. 1-2, pp. 95–105, 2007.
- [3] T. Eren, "Learning and Deteriorating Effects on the Single Machine Scheduling Problems," *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 6, no. 1, pp. 15–20, Jan. 2014.
- [4] "Digital Conversion on the Way to Industry 4.0", Springer Science and Business Media LLC, 2021
- [5] V.F. Viagas, A. Costa, Two novel population based algorithms for the single machine scheduling problem with sequence dependent setup times and release times, *Swarm and Evolutionary Computation*, Volume 63, 2021, 100869, ISSN 2210-6502, <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2021.10086>.
- [6] Y. Zhao and G. Wang, "A dynamic differential evolution algorithm for the dynamic single-machine scheduling problem with sequence-dependent setup times Yue," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 71, no. 2, pp. 225–236, 2020.
- [7] S. Muştu and T. Eren, "The Single Machine Scheduling Problem with Sequence-Dependent Setup Times and a Learning Effect on Processing Times.," *Applied Soft Computing*, vol. 71, pp. 291–306, 2018.
- [8] P. Perez-Gonzalez and J. M. Framinan, "Single machine scheduling with periodic machine availability," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 123, pp. 180–188, 2018.
- [9] R. M. Souza, S. Ricardo, and M. Felizardo, "Algorithms for job scheduling problems with distinct time windows and general earliness/tardiness penalties," *Computers and Operations Research*, vol. 81, pp. 203–215, 2017.
- [10] Z. Ceylan, E. Karan, Ç. Bakırcı, and S. Sabuncu "Single Machine Scheduling Problem with Sequence Dependent Setup Times : An Application in White Goods I," *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, vol. 3, no. 1, pp. 14–21, 2019.
- [11] O. Herr and A. Goel, "Minimising total tardiness for a single machine scheduling problem with family setups and resource constraints," *European Journal of Operational Research*, vol. 248, no. 1, pp. 123–135, 2016.
- [12] T. Prabhakar, "A Production Scheduling Problem with Sequencing," *Management Science*, vol. 21, no. 1, pp. 34–42, 2014.
- [13] T. C. E. Cheng, W. C. Lee, and C. C. Wu. "Single-Machine Scheduling with Deteriorating Jobs and Past-Sequence-Dependent Setup Times." *Applied Mathematical*

- Modelling* 35 (4):1861–67,2011. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.10.015>.
- [14] J.B. Wang and J. X. Li., Single Machine Past-Sequence-Dependent Setup Times Scheduling with General Position-Dependent and Time-Dependent Learning Effects. *Applied Mathematical Modelling* 35 (3): 1388–95,2011. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.09.017>.
- [15] K. Türker and Ç. Sel, “Sıra Bağımlı Hazırlık Operasyonları İçin Tek Ekipli Paralel Makinalarda Çizelgeleme Problemine Karma Yaklaşım,” *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, vol. 26, no. 4, pp. 731–740, 2011.
- [16] C. Zhao and H. Tang, “Single machine scheduling with past-sequence-dependent setup times and deteriorating jobs,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 59, no. 4, pp. 663–666, 2010.
- [17] J.-B. Wang, D. Wang, L.-Y. Wang, L. Lin, N. Yin, and W.-W. Wang, “Single machine scheduling with exponential time-dependent learning effect and past-sequence-dependent setup times,” *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 57, no. 1, pp. 9–16, 2009.
- [18] D. Biskup and J. Herrmann. “Single-Machine Scheduling against Due Dates with Past-Sequence-Dependent Setup Times”, *European Journal of Operational Research* 191 (2): 587–92,2008. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.08.028>.
- [19] S. Karabati and C. Akkan., “Minimizing Sum of Completion Times on a Single Machine with Sequence-Dependent Family Setup Times.” *Journal of the Operational Research Society* 57 (3): 271–80,2006. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601989>.
- [20] G. Rabadi, M. Mollaghasemi, G.C. Anagnostopoulos, “A Branch-And-Bound Algorithm For The Early/Tardy Machine Scheduling Problem With A Common Due-Date And Sequence Dependent Setup Time,” *Computers and Operations Research*, 31, 1727–1751, 2004.
- [21] S.R. Gupta and J. S. Smith. “Algorithms for Single Machine Total Tardiness Scheduling with Sequence Dependent Setups.” *European Journal of Operational Research* 175 (2): 722–39,2006. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.05.018>.
- [22] V. A. Armentano and R. Mazzini. “A Genetic Algorithm for Scheduling on a Single Machine with Set-up Times and Due Dates.” *Production Planning and Control* 11 (7): 713–20, 2000. <https://doi.org/10.1080/095372800432188>.
- [23] Y.H. Lee, K. Bhaskaran and M. Pinedo. “A Heuristic to Minimize the Total Weighted Tardiness with Sequence-Dependent Setups.” *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)* 29 (1): 45–52,1997. <https://doi.org/10.1080/07408179708966311>.
- [24] K.C. Tan and R. Narasimhan. “Minimizing Tardiness on a Single Processor with Sequence-Dependent Setup Times: A Simulated Annealing Approach.” *Omega* 25 (6): 619–34, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(97\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(97)00024-8).
- [25] H. J. Shin, C.-O. Kim, and S. S. Kim, “A Tabu Search Algorithm for Single Machine Scheduling with Release Times, Due Dates, and Sequence-Dependent Set-up Times,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 19, no. 11, pp. 859–866, 2002.
- [26] P.A. Rubinand and G. L. Ragatz. “Scheduling in a Sequence Dependent Setup Environment with Genetic Search.” *Computers and Operations Research* 22 (1): 85–99,1995. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(93\)E0021-K](https://doi.org/10.1016/0305-0548(93)E0021-K).
- [27] F. Glover, “Tabu Search-Part I”, *ORSA Journal on Computing*, Cilt 1, No 3, 190-206, 1989.
- [28] F. Glover, “Tabu Search-Part II”, *ORSA Journal on Computing*, Cilt 2, No 1, 4-32 1990
- [29] S. Özyön , C. Yaşar ve H. Temurtaş , "Ham Enerji Kaynağı Kısıtlı Termik Birim İçeren Sistemlerde Çevresel Ekonomik Güç Dağıtım Probleminin Çözümü", *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 24, sayı. 1, ss. 47-72, Haz. 2011
- [30] F. Glover and M. Laguna, “Tabu Search,” *Tabu Search*, no. July, 1997, doi: 10.1007/978-1-4615-6089-0.
- [31] J. Xu, M. Sohoni, M. McCleery, and T. G. Bailey, “A dynamic neighborhood based tabu search algorithm for real-world flight instructor scheduling problems,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 169, no. 3, pp. 978–993, 2006, doi: 10.1016/j.ejor.2004.08.023.
- [32] A. M. Mohammed and S. O. Duffuaa, “A tabu search based algorithm for the optimal design of multi-objective multi-product supply chain networks,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 140, p. 112808, 2020, doi: 10.1016/j.eswa.2019.07.025.
- [33] A. Y. Abdelaziz, F. M. Mohamed, S. F. Mekhamer, and M. A. L. Badr, “Distribution system reconfiguration using a modified Tabu Search algorithm,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 8, pp. 943–953, 2010, doi: 10.1016/j.epsr.2010.01.001.
- [34] Wan, Guohua, and Benjamin P.-C. Yen, “Tabu Search for Single Machine Scheduling with Distinct Due Windows and Weighted Earliness/Tardiness Penalties.,” *European Journal of Operational Research*, vol. 142, no. 2, pp. 271–281, 2002.