

# FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ



*The Design and Technology Journal, which is part of the Gazi University Journal of Sciences family as Part C, aims to deliver the most up-to-date scientific and technological developments in engineering sciences to researchers, engineers and interested audiences. Our journal, which includes both experimental and theoretical studies in basic engineering fields, gives priority to the publication of articles related to the rapidly developing fields of engineering.*

First published in 2013



## 2022, Volume 10, Issue 3 Content

1. AISI 316L Paslanmaz Çeliğin Tornalanmasında Takım Geometrisi ve İşleme Parametrelerinin Yüzey Bütünlüğü Özelliklerine Etkisinin Taguchi Yöntemi ile Analizi (Araştırma Makalesi), Fırat KAFKAS, Hüseyin GÜRBÜZ, Ulvi ŞEKER, Page: 391-407
2. PET Lif Takviyeli Farklı Puzolanlık İkameli Çimento Harçlarının Mekanik Etkisi (Araştırma Makalesi), Ahmet FİLAZİ, Page: 408-422
3. Bi-Ga Kısmi Yer Değiştirme Etkisinin Manyetik, Mekanik ve Mikroyapısal Özellikler Bi(1,8-x)Pb0,2GaxSr2CaCu2Oy Süperiletken Üzerinde İncelenmesi (Araştırma Makalesi), Şükrü ÇAVDAR, Neslihan TURAN, Selçuk İZMİRLİ, Haluk KORALAY, Page: 423-438
4. Impactor Diameter and Ply Number Effects on the Impact Behavior of Carbon Fiber Composite Laminates (Araştırma Makalesi), Mehmet İskender ÖZSOY, Page: 439-454
5. Improving the Mechanical Properties of GPLs-SiAlON Composites by Microfluidization Technique as a New Approach to Dispersion of GPLs (Araştırma Makalesi), Sinem BAŞKUT, Servet TURAN, Page: 455-467
6. Hava Kaynaklı Yüksek Defrost Verimine Sahip ve Doğal Soğutucu Akışkanlı Bir Isı Pompası Sisteminin Tasarımı (Araştırma Makalesi), Mustafa GÜLMEZ, Mustafa AKTAŞ, Süleyman ERTEN, Fatma Nur ERDOĞMUŞ, Melis ÖDER, Page: 468-478
7. The Effect of Some Managerial Motivators on Employee Motivation in Furniture Enterprises (Araştırma Makalesi), Eray KAMIŞLI, Kıvanç YILMAZ, Yasemin ÖZTÜRK, Erol BURDURLU, Page: 479-494
8. Güçlendirilmiş Polyester Reçine Matrisli Kompozit Malzemelerin Tek Yönlü Karbon Fiberler Üzerinde Katmanların Etkisi (Araştırma Makalesi), Levent URTEKİN, Deniz GÜNEŞ, Faik YILAN, Murat ÇANLI, Page: 495-503
9. KARE KESİT YAPAY PÜRÜZLÜ GÜNEŞ DESTEKLİ HAVA ISITICI TASARIMININ SAYISAL ANALİZİ (Araştırma Makalesi), Abdülkadir KOÇER, Page: 504-518
10. Investigation of Different Superplasticizers Effect on Workability and Strength Parameters in Ultra High Performance Concretes (Araştırma Makalesi), Muhammet SEİS, Betül İSBİLİR KULA, Volkan OZDAL, Muhammed MARASLI, Serkan SUBASI, Heydar DEHGHANPOUR, Page: 519-531
11. Pv Panel Entegreli Fdm-Nanopartikül Karışımının 1-D Matematiksel Model Kullanılarak İncelenmesi (Araştırma Makalesi), Korhan ÖKTEN, Page: 532-546
12. Oscillation Control of Two-Wheeled Robot using a Gyrostabilizer (Araştırma Makalesi), Faruk ÜNKER, Page: 547-557
13. Eliptik Dişli Tasarımı, İmalatı, Analizi ve Eliptik Dişlilerin Endüstriyel Uygulamaları (Derleme Makalesi), İbrahim PAZARKAYA, Mehmet YAZAR, Ahmet ÖZDEMİR, Page: 558-576
14. Evaluation Of Irreversibility Analysis For Different Coal Types Of A Thermal Power Plant, Sinem UZUN, Page: 577-587
15. Kullanılmayan Zaman Dilimlerinin ve Sıra Bağımlı Hazırlık Sürelerinin Olduğu Paralel Makina Çizelgeleme Problemi (Araştırma Makalesi), Feriştah ÖZÇELİK, Tuğba SARAÇ, Page: 588-600
16. Bulaşık Makinası Yıkama Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi (Araştırma Makalesi), Oğuzhan KELEŞ, Zeynep PARLAR, Page: 601-612
17. Dönüştürülmüş bir kıvılcım ateşlemeli doğal gaz motorunda motor hızının performans ve yanma özellikleri üzerindeki etkilerinin sayısal olarak incelenmesi (Araştırma Makalesi), Fatih AKTAS, Page: 613-626
18. Tasarım Kavramı ve Tasarım Değerleme (Derleme Makalesi), Reyhan Pınar SÖZBİLEN, Hüdayim BAŞAK, Page: 627-640
19. İki Zamanlı Benzinli Motorların Teorik Çevrimlerinin Parametrik İncelenmesi (Araştırma Makalesi), Recep Çağrı ORMAN, Page: 641-649
20. Improved Knowledge Distillation with Dynamic Network Pruning (Araştırma Makalesi), Eren ŞENER, Emre AKBAŞ, Page: 650-665

### Editor in Chief

**Prof. Dr. Ahmet GÜRAL**, Gazi University

### Assistant Editors

**Assoc. Prof. Dr. Hanifi ÇİNİCİ**, Gazi University

**Asst. Prof. Dr. Onur ALTUNTAŞ**, National Defense University

### Technical Editors

**Çağrı SUIÇMEZ**, Gazi University

**Ahmet ERDAĞ**, Gazi University

**Onur POLAT**, Gazi University

### (Alan Editörleri) Field Editors

**Ali Rıza MOTORCU** Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

**Ferhat AYDIN** Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

**Melika ÖZER** Gazi Üniversitesi

**Şengül GÜVEN** Pamukkale Üniversitesi

**Abdullah Cemil İLÇE** Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

**Ali KASAL** Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi

**Onur ALTUNTAŞ** Milli Savunma Üniversitesi

**Faraz AFŞARİ** Erzurum Teknik Üniversitesi

**Murat MAYDA** Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi

**Suat ÖZDEMİR** Hacettepe Üniversitesi

**Mustafa Aktaş** Gazi Üniversitesi

**Gökhan DURMUŞ** Gazi Üniversitesi

**Sabri ÖZTÜRK** Bolu İzzet Baysal Üniversitesi

**Onur ÇAVUŞOĞLU** Gazi Üniversitesi

**Barış AVAR** Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

**Alpay ÖZER** Gazi Üniversitesi

**Seyfi ŞEVİK** Hitit Üniversitesi



# Analysis of The Effect of Tool Geometry and Machining Parameters on Surface Integrity Properties in Turning of AISI 316L Stainless Steel by Taguchi Method

Fırat KAFKAS<sup>1,\*</sup>  Hüseyin GÜRBÜZ<sup>2</sup>  Ulvi ŞEKER<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar/ANKARA

<sup>2</sup>Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 72100, BATMAN

## Graphical/Tabular Abstract

In this study, an optimal combination of cutting parameters were investigated which could be used for optimum surface integrity properties in turning of the AISI 316L stainless steel.

### Article Info:

Research article

Received: 27.07.2022

Revision: 06.08.2022

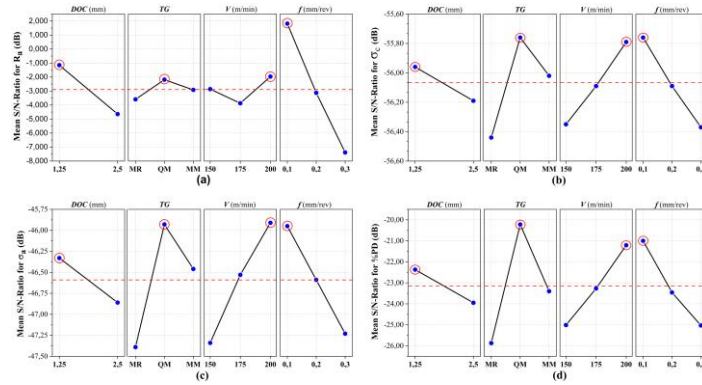
Accepted: 09.08.2022

### Highlights

- Surface integrity in turning AISI 316L stainless steel
- Effect of turning parameters on the surface integrity
- Determination of optimal turning condition for surface integrity based on the Taguchi approach

### Keywords

Stainless Steel  
Cutting Tools  
Surface Roughness  
Surface Residual Stresses  
Strain Hardening  
Taguchi Method



**Figure A.** Main effect plots of SN ratio: (a) average surface roughness,  $R_a$ ; (b) circumferential surface residual stress,  $\sigma_c$ ; (c) axial surface residual stress;  $\sigma_a$ ; (d) degree of strain hardening, %PD

**Purpose:** In this study, it was aimed to determine the effect of the turning parameters on the surface integrity properties in turning of AISI 316L stainless steel.

**Theory and methods:** In this study, the Taguchi method has been applied to evaluate the surface integrity features of AISI 316L by using coated carbide inserts with three different tool geometry under dry turning conditions. Analysis of variance (ANOVA) was used to determine the effects of the machining parameters on average surface roughness, circumferential and axial surface residual stresses and degree of strain hardening. The depth of cut, cutting tool geometry, cutting speed and feed rate were selected as machining parameters.

**Results:** It was observed that the processing parameters had different effects on the quality properties as seen in figure A. The depth of cut was a relatively efficient parameter on the average surface roughness. Tool geometry had a greater effect on the degree of strain hardening, and the circumferential and axial surface residual stresses, respectively. Cutting speed had a more significant effect on the axial and circumferential surface residual stresses and the degree of strain hardening, respectively. Feed rate was the most effective parameter on the average surface roughness. However, feed rate also had a significant effect on the circumferential and axial surface residual stresses and the degree of strain hardening, respectively.

**Conclusion:** It was determined that a combination of minimum depth of cut, minimum feed rate, maximum cutting speed and QM tool geometry should be used for minimum surface integrity properties. It was confirmed that the determined optimal combination condition provided an improvement of 53.90% in degree of strain hardening, 20.39% in average surface roughness, 5.61% in axial surface residual stress and 1.89% in circumferential surface residual stress.



## Analysis of The Effect of Tool Geometry and Machining Parameters on Surface Integrity Properties in Turning of AISI 316L Stainless Steel by Taguchi Method

Fırat KAFKAS<sup>1,\*</sup> Hüseyin GÜRBÜZ<sup>2</sup> Ulvi ŞEKER<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar/ANKARA

<sup>2</sup>Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 72100, BATMAN

### Abstract

In this study, the Taguchi method has been applied to evaluate the surface integrity features of AISI 316L by using CVD TiAlN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN coated carbide inserts with three different tool geometry under dry turning conditions. Experiments were conducted using the L<sub>18</sub> (2<sup>1</sup>×3<sup>3</sup>), an experimental design with an orthogonal array, on a CNC turning. Analysis of variance (ANOVA) was used to determine the effects of the machining parameters on average surface roughness, circumferential and axial surface residual stresses and degree of strain hardening. The depth of cut, cutting tool geometry, cutting speed and feed rate were selected as machining parameters. It was observed that the processing parameters had different effects on the quality properties. The depth of cut was a relatively efficient parameter on the average surface roughness and had no significant effect on other quality properties. Tool geometry did not affect the average surface roughness, but it had a greater effect on the degree of hardening, and the circumferential and axial surface residual stresses, respectively. Cutting speed was found to have a more significant effect on the axial and circumferential surface residual stresses and the degree of strain hardening, respectively. Feed rate was the most effective parameter on the average surface roughness. However, feed rate also had a significant effect on the circumferential and axial surface residual stresses and the degree of strain hardening, respectively.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 27.07.2022  
Düzeltilme: 06.08.2022  
Kabul: 09.08.2022

### Keywords

Stainless Steel  
Cutting Tools  
Surface Roughness  
Surface Residual Stresse  
Strain Hardening  
Taguchi Method

### Anahtar Kelimeler

Paslanmaz Çelik  
Kesici Takımlar  
Yüzey Pürüzlülüğü  
Yüzey Kalıntı Gerilmeleri  
Pekleşme  
Taguchi Metodu

## AISI 316L Paslanmaz Çeliğin Tornalanmasında Takım Geometrisi ve İşleme Parametrelerinin Yüzey Bütünlüğü Özelliklerine Etkisinin Taguchi Yöntemi ile Analizi

### Öz

Bu çalışmada, kuru tornalama koşullarında üç farklı takım geometrisine sahip CVD TiAlN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN kaplı karbür uçlar kullanılarak AISI 316L'nin yüzey bütünlük özelliklerini değerlendirmek için Taguchi yöntemi uygulanmıştır. Bir CNC tornada ortogonal dizili bir deneysel tasarım olan L<sub>18</sub> (2<sup>1</sup>×3<sup>3</sup>) kullanılarak deneyler yapılmıştır. İşleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü, çevresel ve eksenel yüzey kalıntı gerilmeleri ve pekleşme derecesi üzerindeki etkilerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. İşleme parametreleri olarak kesme derinliği, kesici takım geometrisi, kesme hızı ve ilerleme oranı seçilmiştir. İşleme parametrelerinin kalite özellikleri üzerinde farklı etkileri olduğu görülmüştür. Kesme derinliği, ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde nispeten etkili bir parametredir ve diğer kalite özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır. Takım geometrisi ortalama yüzey pürüzlülüğünü etkilememiştir, ancak sırasıyla sertleşme derecesi ve çevresel ve eksenel yüzey kalıntı gerilmeleri üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olmuştur. Kesme hızının sırasıyla eksenel ve çevresel yüzey kalıntı gerilmeleri ve pekleşme derecesi üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre ilerleme hızıdır. Bununla birlikte, besleme hızı sırasıyla çevresel ve eksenel yüzey kalıntı gerilmeleri ve sertleşme derecesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Östenitik paslanmaz çelikler, yüksek işleme sertleştirmeleri, yüksek süneklikleri ve toklukları, düşük ısı iletkenlikleri ve yığılmaya meyilli olmaları nedeniyle işlenmesi en zor malzemelerden biridir. Ayrıca sertlik seviyesi, karbon içeriği ve nikel içeriği gibi faktörler de işleme zorluğunu etkileyen diğer faktörler olarak kabul edilebilir [1, 2]. Bir östenitik paslanmaz çelik işlenirken, talaşları kırmak için talaş kırıcı geometrisine sahip kesici ucun seçimi ve kesici takımında yığıma kenar oluşumunu (BUE) önlemek için kaplanmış kaliteler gibi çeşitli faktörler dikkate alınmalıdır. Talaş kaldırmada talaş kırıcı geometrisi ve yüksek ilerleme oranı talaşın kırılması için önemlidir. Ayrıca, muhtemel tırlamaların üstesinden gelmek için kesici takımın yeterince rijit olması gerekir [3].

Kesme işleminde talaş oluşumu, talaş kırıcı geometrisine göre değişiklikler gösteren birincil deformasyon bölgesinde oluşan ısı ve gerilme ile meydana geldiğinden, talaş kırıcı geometrisi talaşlı imalatla talaş oluşumunu etkileyen önemli bir faktördür. Uygun talaş kırıcı geometrisine sahip kesici takımlar, metalin plastik deformasyonunun daha kısa bir kesme düzleminde gerçekleşmesine yardımcı olur. Bu nedenle, takım/talaş temas alanı ne kadar kısa olursa, deformasyon nedeniyle kesme alanında oluşan ısı ve gerilim o kadar düşük olur. Bu nedenle, talaş kırıcı geometrisi plastik deformasyondan kaynaklanan kalıntı gerilmeler, mikrosertlik ve mikroyapısal değişiklikler gibi özellikler üzerinde önemli etkiye sahip olan termal ve mekanik etkilerin azaltılmasına yardımcı olduğu için, işlenen iş parçalarının yüzey bütünlüğü üzerinde olumlu bir etki sağlar [4, 5]. Yüzey bütünlüğü işlemeden sonra ürüne ait yüzey pürüzlülüğü, boyut ve biçim doğruluğu, mikrosertlik ve mikroyapısal değişiklikler ve kalıntı gerilmeler gibi bileşenleri içerir [6, 7]. Talaş oluşumu sırasında genellikle iş parçası ile kısa etkileşim süresi (~0,1 ms) içinde ortaya çıkan yüksek gerilmeler, yüksek gerinim hızları ve yüksek sıcaklıklar, işleme sürecini belirgin bir şekilde karakterize eder ve yüzey bütünlüğü ile ilgili özellikler üzerinde önemli değişikliklere neden olur. Bu etkileşimlerin bir sonucu olarak yüzey bütünlüğü, özellikle ürün performansı ve ürün kalitesi açısından son bitirme işlemlerinde kritik bir öneme sahiptir [8, 9].

Tornalama işleminde, bitmiş bileşenin performansını ve kalitesini belirleyen yüzey bütünlüğü özellikleri, işleme sırasında dikkate alınan parametrelere (süreç, iş parçası ve takım ile ilgili) büyük ölçüde bağlıdır. Kesme hızı, ilerleme oranı, kesme derinliği ve takım geometrisi, yüzey bütünlüğü ile ilgili performans özelliklerini önemli ölçüde etkileyen tornalama parametreleridir [10–13]. Proses parametreleri genellikle üreticilerin deneyimine veya önerilen yönergelere göre seçilir. Bu seçim prosedüründe, makinelerin optimal ve ekonomik olarak etkin kullanımı ve üretilen yüzeyin kalitesi dikkate alınmaz. Bu durumda Taguchi ortogonal dizisine dayalı bilimsel yöntemlerin kullanılması faydalı olabilir. Taguchi yöntemi, belirli bir bağımsız parametre seti ve bir yanıt değişkeni için optimum parametreleri analiz edebilir ve belirleyebilir. Taguchi yönteminde, aynı bağımsız parametre seti birden fazla yanıt değişkenine sahipse, metodoloji her bir yanıt değişkeni için ayrı bir optimum çalışma koşulları kombinasyonu sağlar. Örneğin, yüzey kalıntı gerilmelerini en aza indirmek için optimum koşulun, yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmek için gerekli optimum koşulla aynı olması gerekmez. Bu gibi durumlarda, mümkün olan en düşük yüzey kalıntı gerilmelerinde mümkün olan en iyi yüzey kalitesini sağlayabilecek bir çözüm elde etmek gerekir.

Östenitik paslanmaz çelik, savunma ve havacılık, nükleer güç, kimyasal ve petrokimya, ısıl işlem, sıfır altı ve denizcilik bileşenlerinde kullanılan nikel esaslı yüksek mukavemetli bir alaşımdır. Daha yüksek pekleşme eğilimi, daha yüksek tokluk ve süneklik, zayıf termal yayılım gibi özellikler, bu alaşımın işlenmesindeki zorluğun ana nedenidir. Bunlar, daha yüksek kesme kuvvetleri, yüksek oranda pekleşme, uzun-süreklilik formda talaşlar ve aşırı takım aşınması üretir, sonuç olarak da yüzeyden yüzey altı seviyelere uzanan yüzey hasarlarına neden olur. Ayrıca, farklı işleme operasyonları, kesici takım ve iş malzemesi ile ilgili parametreler işleme sırasında karmaşık etkileşimlere sahiptir. Genel olarak, tüm bu etkiler bu alaşımın işlenebilirliğini zorlaştırır. Bu nedenle, girdi değişkenleri (işleme koşulları/parametreleri) ile çıktı değişkenleri (yanıtlar/kalite özellikleri) arasında karmaşık bir ilişki vardır ve işleme sırasında en iyi yüzey bütünlüğünü sağlayan en uygun işleme koşullarını seçmek gerçekten zor bir iştir [3, 10–17].

Bu makale, ortalama yüzey pürüzlülüğünü, çevresel ve eksenel yüzey kalıntı gerilmelerini ve pekleşme derecesini en aza indirmek için Taguchi yaklaşımını kullanarak AISI 316L paslanmaz çeliğin tornalama işleminin optimizasyonunu sunar. En iyi parametre kombinasyonunu belirlemek için Taguchi ortogonal dizisine göre oluşturulan on sekiz deney yapılmıştır. Parametre seviyeleri ortalama yüzey pürüzlülüğü,

çevresel ve aksel yüzey kalıntı gerilmeleri ve pekleşme derecesi olmak üzere dört tepki değişkenine göre değerlendirilmiştir. İşleme parametrelerinin bu tepki değişkenleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

## 2. İŞLEME PARAMETRELERİ VE TAGUCHI ANALİZİ (MACHINING PARAMETERS AND TAGUCHI ANALYSIS)

Ortogonal dizinin tasarımı, işleme parametrelerinin en iyi seviyelerini belirlemek için kullanılmıştır. Yanıt değişkenlerinin seçimi, bağımsız değişkenlerin seçimi ve ortogonal dizinin seçimi, ortogonal tasarımın ana adımlarıdır. Ayrıca, en önemli değişkenleri belirlemek için varyans analizi kullanılır. İşleme parametreleri, literatürdeki açıklayıcı–tamamlayıcı bilgilerden ve yazarların geçmiş deneyimlerine dayanarak seçilmiştir [4, 5]. Mevcut çalışmada, talaş kaldırma deneyleri farklı talaş kırıcı geometrilerine ve dolayısıyla farklı talaş açlarına ve kesme kenarı özelliklerine sahip kesici takımlar (MM, QM ve MM olarak kodlanmıştır) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece, talaş kırıcı geometrilerinin etkisini net bir şekilde belirlemek mümkün olur. Tornalama işlemlerinde kesme işlemlerinin performansı, kontrol edilebilir faktörler olarak kabul edilen kesme hızı (V), ilerleme oranı (f), talaş kırıcı geometrisi (TG) ve kesme derinliği (DOC) gibi kesme parametreleri ile yakından ilişkilidir. Seçilen çalışma parametreleri ve bunların seviye değerleri Tablo 1’de listelenmiştir.

**Tablo 1.** Deneysel parametreler ve seviyeleri

Sembol	Parametre	Seviye		
		1	2	3
DOC	Kesme Derinliği (mm)	1.25*	2.5	–
TG	Takım Geometrisi	MR*	QM	MM
V	Kesme Hızı (m/dak)	150*	175	200
f	İlerleme Oranı (mm/dev)	0.1*	0.2	0.3

\*başlangıç kesme şartları

Seçilebilecek ortogonal dizi için serbestlik derecesi (DOF), çalışma parametrelerinin toplam DOF’inden büyük veya ona eşit olmalıdır [18]. Bu çalışmada 2 seviyeli 1 parametre ve 3 seviyeli 3 parametre bulunmaktadır. Parametreler arasındaki etkileşim ihmal edilirse toplam serbestlik derecesi 7’dir. Bu nedenle, bu çalışma için bir L18 (2<sup>1</sup>×3<sup>3</sup>) ortogonal dizi planlaması düşünülmüştür. Deneysel düzen Tablo 2’de gösterilmektedir.

**Tablo 2.** Deneysel çalışmaların L<sub>18</sub> (2<sup>1</sup>×3<sup>3</sup>) ortogonal dizisi

No	Kodlu değerler				No	Kodsuz değerler			
	DOC	TG	V	f		DOC	TG	V	f
1	1	1	1	1	1	1.25	MR	150	0.1
2	1	1	2	2	2	1.25	MR	175	0.2
3	1	1	3	3	3	1.25	MR	200	0.3
4	1	2	1	1	4	1.25	QM	150	0.1
5	1	2	2	2	5	1.25	QM	175	0.2
6	1	2	3	3	6	1.25	QM	200	0.3
7	1	3	1	2	7	1.25	MM	150	0.2
8	1	3	2	3	8	1.25	MM	175	0.3
9	1	3	3	1	9	1.25	MM	200	0.1
10	2	1	1	3	10	2.50	MR	150	0.3
11	2	1	2	1	11	2.50	MR	175	0.1
12	2	1	3	2	12	2.50	MR	200	0.2
13	2	2	1	2	13	2.50	QM	150	0.2
14	2	2	2	3	14	2.50	QM	175	0.3
15	2	2	3	1	15	2.50	QM	200	0.1
16	2	3	1	3	16	2.50	MM	150	0.3
17	2	3	2	1	17	2.50	MM	175	0.1
18	2	3	3	2	18	2.50	MM	200	0.2

Bu çalışmada, yüzey bütünlüğünün bir ölçüsü olarak birçok araştırmacı tarafından yaygın olarak kullanılan dört yanıt değişkeni dikkate alınmıştır. Bu amaçla, yanıt değişkenleri olarak yüzey pürüzlülüğü (Ra), çevresel ve eksenel çekme yüzey kalıntı gerilme bileşenleri ( $\sigma_c$  ve  $\sigma_a$ ) ve pekleşme derecesi (%PD) seçilmiştir. Tipik olarak, AISI 316L'nin tornalama işlemlerinde tüm yanıt değişkenlerinin en düşük değerleri arzu edilir. Bu nedenle, dikkate alınan yanıt değişkenlerinin analizinde, denklem (1) ile tanımlanan amacımıza en uygun özelliği ifade eden “ne kadar düşük–o kadar iyi” kalite karakteristik terimi kullanılmıştır.

Parametre tasarımı ve deneysel planlama için kullanılan Taguchi yöntemi basit ve etkili çözümler sunar [18]. Minimum çabayla maksimum bilgiyi elde etmek için, ortogonal dizilere dayalı deneyler tasarlamak için Taguchi yöntemi kullanılır [19]. Taguchi yönteminde kalite (performans) özelliğini temsil eden S/N oranı etkili bir analitik araçtır ve S/N oranının maksimum değeri, proses parametrelerinin tercih edilen seviyesini sembolize eder [20]. Amaca bağlı olarak Taguchi yönteminde S/N oranını hesaplamak için üç farklı yöntem kullanılabilir. Bu çalışmada, ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), çevresel ve eksenel çekme yüzey kalıntı gerilmeleri ( $\sigma_c$  ve  $\sigma_a$ ) ve pekleşme derecesi (%PD) gibi yüzey bütünlüğünü karakterize eden özelliklerin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, dikkate alınan kalite özelliklerinin S/N oranını hesaplamak için aşağıda denklem (1)'de gösterildiği gibi daha düşük–daha iyi kalite karakteristiği kullanılmıştır:

$$SN_{ij} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right) \quad 1$$

burada  $y_{ij}$ , i. deneysel çalışma için gözlemlenen j. kalite karakteristiğinin ölçülen değeridir ve  $n$ , tekrarlanan deney sayısıdır [21].

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

#### 3.1. Malzeme (Material)

AISI 316L östenitik paslanmaz çelik, endüstride oldukça yaygın olarak kullanılan yüksek nitelikli bir malzemedir. AISI 316L'nin kimyasal bileşimi ağırlıkça %0.023 C, %16.17 Cr, %10.10 Ni, %2.13 Mo, %1.27 Mn, %0.45 Cu, %0.44 Si, %0.16 Co, %0.043N, %0.021S ve %0.034 P elementlerinden oluşur. AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğin akma gerilimi 509 MPa, kopma uzaması %50 ve sertliği  $202 \pm 3$  HV<sub>0.5</sub> (~190–195 BSD) tir. Deneylerde iş parçası malzemesi olarak  $\emptyset 25 \times 125$  mm boyutlarında AISI 316L östenitik paslanmaz çelik silindirik çubuk kullanılmıştır.

#### 3.2. Deney Tezgâhı ve Kesici Takımlar (Machine Tool and Cutting Tools)

Deneysel çalışmalar, FANUC kontrol ünitesine, 10 kW güce ve maksimum 4000 dev/dak devir hızına sahip TC-35 JOHNFORD CNC torna tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Kesici takımlar, iş parçası malzemesine uygun ISO M25 kalitesine eşdeğer, CVD kullanılarak üç katmanlı olarak kaplanmış (TiN–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiCN) kalitesinde SNMG 120408 MR/QM/MM formunda üç farklı talaş kırıcı geometrisine sahip değiştirilebilir uç kesici takım olarak belirlenmiştir. Bu kesici uçlar için 75° yaklaşma açılı PSBNR 2525 M12 kodlu takım tutucu kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan farklı talaş kırıcı geometrisine ve takım tutucuya sahip kesici takımların özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

**Tablo 3.** Deneylerde kullanılan kesici takım ve takım tutucu. Onların geometrik özellikleri

		Talaş Kırıcı Geometrik Özellikler					
		Esas kesici kenarda			Kesici kenar ucunda		
Kesici Takım	Takım Geometrisi	$\alpha_1$ (°)	$\alpha_2$ (°)	$L_1$ (mm)	$\alpha_1$ (°)	$\alpha_2$ (°)	$L_1$ (mm)
SNMG 120408	MR	6	22	0.33	8	22	0.32
	QM	0	15	0.23	9	15	0.20
	MM	9	20	0.30	12	22	0.29

Takım Tutucu Geometrik Özellikleri			
Takım Tutucu	$\lambda_s$ (°)	$\gamma$ (°)	$\kappa_r$ (°)
PSBNR 2525 M12	-6	-6	75

$\alpha_1$ : Kesici uç talaş açısı,  $\alpha_2$ : Talaş kırıcı açısı,  $L_1$ : Talaş yüzeyinin uzunluğu

$\lambda_s$ : Eğim açısı,  $\gamma$ : Talaş açısı,  $\kappa_r$ : Yaklaşma açısı

### 3.3. Yüzey Bütünlüğü Ölçümleri (Measurements of Surface Integrity)

İşlenen iş parçalarının yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için 9633 seri numaralı Mahr Perthometer M1 yüzey profilometresi kullanılmıştır. İşlenmiş iş parçasının yüzeyinde rastgele çevresel olarak seçilen farklı noktalardan örnekleme uzunluğu 5.6 mm olacak şekilde yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiş ve aritmetik ortalamaları alınmıştır. Hem çevresel hem de eksenel doğrultuda yüzey kalıntı gerilmeleri  $\sin^2 \psi$  yöntemi kullanılarak X-ışını kırınımı tekniği yardımıyla ölçülmüştür. İşlenen iş parçalarının yüzeyinden 5  $\mu\text{m}$  derinliğe kadar oluşan yüzey kalıntı gerilmelerini ölçmek için Cr-K $\alpha$  radyasyon kaynağına sahip X-ışını kırınım ölçüm cihazı (SEIFERT XRD 3003 PTS) kullanılmıştır. Tornalama işleminden sonra numunelerde meydana gelen yüzey sertliğindeki değişimleri belirlemek için SHIMADZU HMV2 model mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Mikrosertlik deneyleri, Vickers sertlik ölçüm yöntemi ile 0.5 kgf (4.903 N) yük altında ve 5 sn bekletilerek yapılmıştır. Talaşlı imalat sonrası çalışma yüzeylerinde ve alt yüzeylerde sertleşmeye neden olan süreç pekleşme olarak bilinir ve sertleşmedeki değişimin oranı yüzde pekleşme derecesi (%PD) ile tanımlanabilir [10]. %PD, iş malzemesinin işlenerek sertleşme davranışını temsil eder ve işlenmiş yüzeylerin nicel bir bütünlük ölçüsünü tanımlamak için kullanılır ve %PD, Liu ve Barash tarafından şu şekilde tanımlanır [22]:

$$\%PD = \frac{MH_s - MH_b}{MH_b} \times 100 \quad 2$$

burada, MH<sub>s</sub> ve MH<sub>b</sub>, sırasıyla işlenmiş yüzey ve ham malzemenin mikrosertliğidir.

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

Taguchi deney tasarımı yoluyla elde edilen deneysel veriler üzerinde çeşitli istatistiksel analizler yapılmıştır. Çalışma parametrelerinin yanıt değişkenleri üzerindeki etkisini belirlemek için Varyans Analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Bu çalışmanın ana odak noktası, proses parametrelerinin her bir kalite karakteristiği üzerindeki etkisini detaylı olarak analiz etmektir.

### 4.1. Yüzey Bütünlüğü İçin Sinyal/Gürültü (S/N) Oranı Yaklaşımı (Signal/Noise (S/N) Ratio Approach for Surface Integrity)

Talaşlı imalat deneyleri yukarıda Tablo 2’de verilen Taguchi L<sub>18</sub> ortogonal dizisine göre yapılmıştır. Takım geometrisi (TG), kesme hızı (V), ilerleme oranı (f) ve kesme derinliği (DOC) parametreleri, yüzey bütünlüğü araştırması için işleme parametreleri olarak kabul edilir. Bu parametrelerin seviyeleri Tablo 1’de listelenmiştir. Taguchi yöntemine göre, sinyal gürültü (S/N) oranı hesaplanarak optimum işleme parametreleri tahmin edilebilir [23]. Bu analizin amacı, yüzey pürüzlülüğü, yüzey kalıntı gerilme bileşenleri



ve pekleşme derecesi gibi yüzey bütünlüğü özelliklerini minimumda tutmaktır. Sonuç olarak, tüm kalite karakteristikleri için sinyal-gürültü (S/N) oranını hesaplamak için *daha düşük-daha iyi kalite karakteristiği* kullanılır.

Tablo 4, ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), çevresel ( $\sigma_c$ ) ve eksenel ( $\sigma_a$ ) yüzey kalıntı gerilmeleri ve pekleşme derecesi (%PD) özellikleri için elde edilen deneysel sonuçların değerlerini ve hesaplanmış S/N oranlarını listeler. AISI 316L paslanmaz çelik üzerinde yapılan 18 tornalama testinden Ra,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_a$  ve %PD için elde edilen sonuçlarının ortalama değerleri, sırasıyla 1.565  $\mu\text{m}$ , 637.22 MPa, 215.13 MPa ve %15.46 olarak belirlenmiştir. Bu arada, Ra,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_a$  ve %PD için hesaplanan S/N oranlarının ortalama değerleri, sırasıyla -2.899 dB, -56.07 dB, -46.59 ve -23.16 dB olarak hesaplanmıştır. Her bir işleme parametresinin (DOC, TG, V, f) Ra,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_a$  ve %PD gibi yüzey bütünlüğü özellikleri üzerindeki etkisinin analizine ait "S/N yanıt tablosu" ise Tablo 5'te gösterilmiştir.

Taguchi yaklaşımına göre Ra,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_a$  ve %PD'yi minimize edecek işleme parametrelerinin optimal seviyeleri Tablo 5'den ve Şekil 1'deki grafiklerden kolaylıkla belirlenebilir. En büyük S/N oranına sahip işleme parametresi seviyesi, ilgili işleme parametresi için en iyi seviyeyi gösterir. Bu açıklamaya istinaden, en iyi Ra değeri için işleme parametrelerinin seviyeleri ve S/N oranları DOC (Seviye 1, S/N=-1.152), TG (Seviye 2, S/N=-2.187), V (Seviye 3, S/N=-1,965) ve f (Seviye 1, S/N= 1.815) olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde;  $\sigma_c$  için optimal işleme parametreleri kombinasyonu DOC (Seviye 1, S/N=-55.96), TG (Seviye 2, S/N=-55.76), V (Seviye 3, S/N=-55.79) ve f (Seviye 1, S/N=-55.76) olur,  $\sigma_a$  için optimal işleme parametreleri kombinasyonu DOC (Seviye 1, S/N=-46.33), TG (Seviye 2, S/N=-45.93), V (Seviye 3, S/N=-45.91) ve f (Seviye 1, S/N=-45.95) şeklinde tanımlanır, %PD için ise optimal işleme parametreleri kombinasyonu DOC (Seviye 1, S/N=-22.37), TG (Seviye 2, S/N=-20.22), V (Seviye 3, S/N=-21.21) ve f (Seviye 1, S/N=-21.00) dir.

**Tablo 4.** Deneysel sonuçlar ve S/N oranlarının değerleri

Deneysel Sonuçlar					S/N Oranları				
No	Ra ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)	%PD (%)	No	Ra (dB)	$\sigma_c$ (dB)	$\sigma_a$ (dB)	%PD (dB)
1	0.698	651.90	228.10	17.99	1	3.123	-56.28	-47.16	-25.10
2	1.320	656.37	223.07	18.15	2	-2.411	-56.34	-46.97	-25.18
3	2.092	658.44	228.02	18.98	3	-6.411	-56.37	-47.16	-25.56
4	0.519	604.20	193.00	8.91	4	5.697	-55.62	-45.71	-19.00
5	1.202	612.66	192.14	8.91	5	-1.598	-55.74	-45.67	-19.00
6	1.910	603.82	190.27	9.41	6	-5.621	-55.62	-45.59	-19.47
7	1.452	644.18	223.37	17.33	7	-3.239	-56.18	-46.98	-24.77
8	2.123	645.81	218.82	17.33	8	-6.539	-56.20	-46.80	-24.77
9	0.466	581.40	176.10	8.42	9	6.632	-55.29	-44.92	-18.50
10	2.880	724.00	289.00	29.21	10	-9.188	-57.19	-49.22	-29.31
11	1.399	646.13	222.25	17.82	11	-2.916	-56.21	-46.94	-25.02
12	1.540	649.56	220.95	17.82	12	-3.750	-56.25	-46.89	-25.02
13	1.694	638.85	224.15	16.34	13	-4.578	-56.11	-47.01	-24.26
14	2.390	643.40	216.30	14.85	14	-7.568	-56.17	-46.70	-23.44
15	0.939	582.05	175.23	6.44	15	0.547	-55.30	-44.87	-16.17
16	2.812	683.20	249.20	24.09	16	-8.980	-56.69	-47.93	-27.64
17	1.287	620.81	201.68	12.87	17	-2.192	-55.86	-46.09	-22.19
18	1.443	623.19	200.69	13.37	18	-3.185	-55.89	-46.05	-22.52
<b>Ortalama</b>	1.565	637.22	215.13	15.46		-2.899	-56.07	-46.59	-23.16

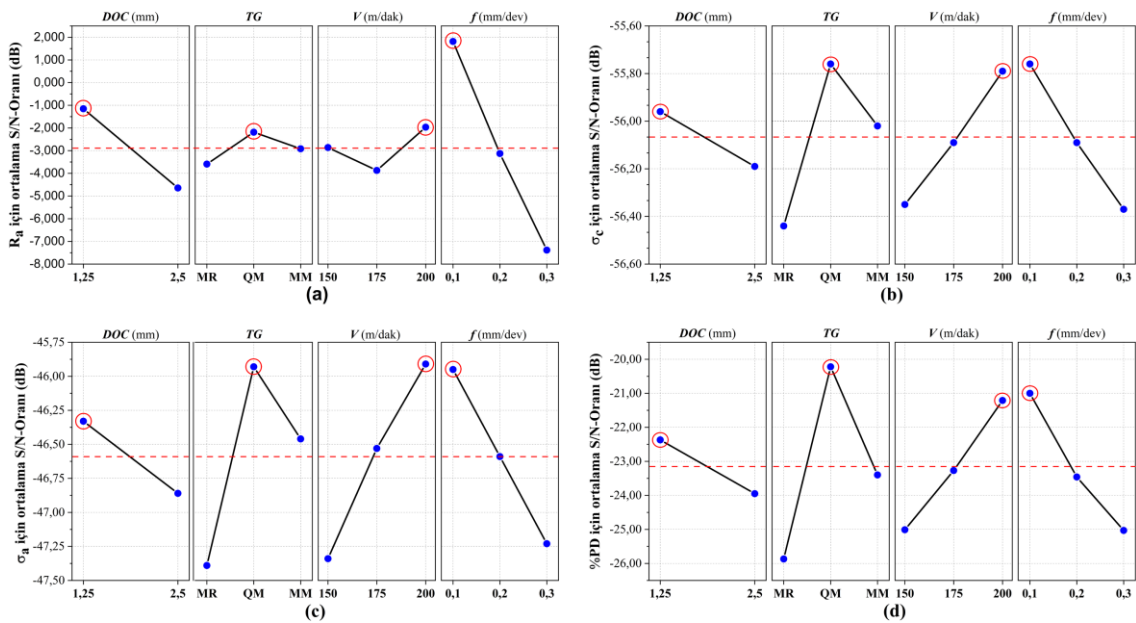
Tablo 5 ve Şekil 1'de verilen S/N yanıt tablosundan ve ana etki grafiklerinden, Ra,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_a$  ve %PD için optimum bir değer için 1.25 mm kesme derinliğinde (DOC1), QM tip takım geometrisine sahip kesici takımla (TG2), 200 m/dak'lık kesme hızında (V3) ve 0.1 mm/dev ilerleme oranında (f1) elde edilebileceği net olarak

görülmektedir.  $R_a$ ,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_a$  ve %PD için söylenen bu optimum değerler Şekil 1’de kırmızı renkle işaretlenerek gösterilmiştir.

**Tablo 5.**  $R_a$ ,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_a$  ve %PD gibi yüzey bütünlüğü özellikleri için S/N yanıt tablosu

İşleme Parametreleri	Seviye			Mak–Min	Sıra
	1	2	3		
<b><math>R_a</math></b>					
DOC	<b>-1.152</b>	-4.646		3.494	2
TG	-3.592	<b>-2.187</b>	-2.917	1.405	4
V	-2.861	-3.871	<b>-1.965</b>	1.906	3
f	<b>1.815</b>	-3.127	-7.385	9.2	1
<b><math>\sigma_c</math></b>					
DOC	<b>-55.96</b>	-56.19		0.22	4
TG	-56.44	<b>-55.76</b>	-56.02	0.68	1
V	-56.35	-56.09	<b>-55.79</b>	0.56	3
f	<b>-55.76</b>	-56.09	-56.37	0.61	2
<b><math>\sigma_a</math></b>					
DOC	<b>-46.33</b>	-46.86		0.53	4
TG	-47.39	<b>-45.93</b>	-46.46	1.46	1
V	-47.34	-46.53	<b>-45.91</b>	1.42	2
f	<b>-45.95</b>	-46.59	-47.23	1.28	3
<b>%PD</b>					
DOC	<b>-22.37</b>	-23.95		1.58	4
TG	-25.87	<b>-20.22</b>	-23.40	5.64	1
V	-25.01	-23.27	<b>-21.21</b>	3.81	3
f	<b>-21.00</b>	-23.46	-25.03	4.03	2

*Koyu renk işaretlenmiş değerler işleme parametrelerinin optimal seviyelerini gösterir*



**Şekil 1.** SN oranının ana etki grafiği: (a) yüzey pürüzlülüğü,  $R_a$ ; (b) çevresel yüzey kalıntı gerilime,  $\sigma_c$ ; (c) aksel yüzey kalıntı gerilime;  $\sigma_a$ ; (d) pekleşme derecesi, %PD

#### 4.2. Varyans Analizi (ANOVA) (Analysis of Variance (ANOVA))

Takım geometrisi, kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme oranının  $R_a$ ,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_a$  ve %PD üzerindeki etkilerini analiz etmek için bu çalışmada ANOVA kullanılmıştır. Bu analiz, farklı parametrelerin göreceli etkisini açıklamak için daha objektif bir karar yöntemi sağlar. Analizler %5 anlamlılık düzeyinde ve %95 güven aralığında gerçekleştirilmiştir. Tablo 6–8, sırasıyla,  $R_a$ ,  $\sigma_c$  ve  $\sigma_a$ , ve %PD için ANOVA sonuçlarını göstermektedir. ANOVA sonuç tablolarında yer alan katkı oranları değerlerine göre, kesme derinliği ( $DOC$ ), takım geometrisi ( $TG$ ), kesme hızı ( $V$ ) ve ilerleme oranının ( $f$ ) tüm performans özelliklerini etkileyen ana süreç parametreleri olduğu açıktır. Ancak bu parametrelerin kalite özellikleri üzerindeki etki dereceleri farklıdır ve aşağıdaki ilgili alt bölümlerde ele alınmıştır.

#### 4.3. İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkileri (Effects of Machining Parameters on Surface Roughness)

Tablo 6'ya göre, işleme parametrelerinin yüzde katkı oranları incelendiğinde  $DOC$ ,  $TG$ ,  $V$  ve  $f$  parametrelerinin  $R_a$  üzerine olan yüzde katkı oranlarının, sırasıyla, %13.91, %1.71, %3.06 ve %79.60 olduğu görülmektedir. %79.60 katkı oranıyla  $f$ ,  $R_a$ 'yı etkileyen en önemli parametredir ve bunu %13.91 katkıyla  $DOC$  takip eder.  $TG$  ve  $V$ 'nin  $R_a$ 'ya katkısı önem açısından düşüktür.

**Tablo 6.** Ortalama yüzey pürüzlülüğü,  $R_a$ , için ANOVA sonuç tablosu

Parametre	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F – Oranı	P – Değeri	Katkı Oranı (%)
$DOC$	1	1.177	1.177	81.42	0.0000	13.91
$TG$	2	0.145	0.072	5.01	0.0310	1.71
$V$	2	0.259	0.129	8.95	0.0060	3.06
$f$	2	6.735	3.368	233.05	0.0000	79.60
Hata	10	0.145	0.014			1.71
Toplam	17	8.461				100.00

F-Oranı tablo değeri:  $F_{0.05;1;10} = 4.96$ ,  $F_{0.05;2;10} = 4.10$

Şekil 1a'daki grafik ve Tablo 5'te  $R_a$  için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, kesme derinliği ve ilerleme oranı azaldıkça yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği görülmektedir. Kesme hızının artmasının da BUE oluşumunu azaltarak yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği iyi bilinmektedir [24, 25]. Ana etki grafiğinden (Şekil 1a) talaş derinliğindeki artışa bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiği görülmektedir. Bunun nedeni, kesme derinliğindeki artışa bağlı olarak artan talaş kesimine bağlanmaktadır. Tornalama işleminde ilerleme oranı değerlerindeki artışın yüzey pürüzlülüğünü kötüleştirdiği iyi bilinmektedir. Tornalama sırasında, ilerleme oranının artmasıyla kesici takım aşınmasına neden olan ısı üretimi miktarı artar [26, 27]. Ayrıca, ilerleme oranındaki bir artış tırlama etkisini de artırır. Sonuç olarak, yüksek ilerleme oranı ile artan tırlama ve takım aşınması olasılığı kötü bir yüzey pürüzlülüğüne yol açar [26]. En iyi yüzey pürüzlülük değerleri QM formuna sahip kesici takım ile en kötü yüzey pürüzlülüğü ise MR formuna sahip kesici takım ile elde edilmiştir. QM tipi takım geometrisi, negatif bir etkin talaş açısına ve daha küçük bir talaş temas uzunluğuna sahiptir (bkz. Tablo 3). Bu, QM tipi takım geometrisinin takım aşınmasına karşı daha güçlü bir kenar geometrisine sahip olduğu ve tırlamaya karşı daha dirençli olduğu anlamına gelir. Ayrıca, oluşan talaşların kesme bölgesinden hızla uzaklaştırılması, takım sıcaklığını ve BUE oluşumunu önemli ölçüde azaltacaktır. Sonuç olarak daha iyi yüzey pürüzlülük değerleri veren QM tipi kesici takım geometrisinin daha etkin talaş kırma kabiliyetine sahip olduğu söylenebilir.

#### 4.4. İşleme Parametrelerinin Yüzey Kalıntı Gerilmeleri Üzerine Etkisi (Effect of Machining Parameters on Surface Residual Stresses)

Tablo 7, çevresel ve eksenel yüzey kalıntı gerilmelerine ( $\sigma_c$  ve  $\sigma_a$ ) ait ANOVA sonuçlarını göstermektedir. Tablo çevresel yüzey kalıntı gerilmeler ( $\sigma_c$ ) için incelendiğinde,  $DOC$ ,  $TG$ ,  $V$  ve  $f$  parametrelerinin çevresel

yüzey kalıntı gerilmesine yüzde katkı oranları, sırasıyla %6.29, %37.67, %24.97 ve %30.11 olarak belirlenmiştir. % 37.67 katkı oranına sahip *TG*, çevresel yüzey kalıntı gerilmesini etkileyen en önemli parametredir ve bunu, sırasıyla *f* ve *V* parametreleri izlemektedir. Diğer yandan, *DOC*'nin çevresel yüzey kalıntı gerilmesi üzerinde düşük bir etkisi vardır. *DOC*, *TG*, *V* ve *f* faktörlerinin eksenel yüzey kalıntı gerilmesi ( $\sigma_a$ ) üzerine yüzde katkı oranları ise, sırasıyla %7.17, %33.48, %31.77 ve %25.69 olarak bulunmuştur. Eksenel yüzey kalıntı gerilmeyi etkileyen en önemli parametre %33.48 katkı oranı ile *TG*'dir ve bunu sırasıyla *V* ve *f* parametreleri izlemektedir. Benzer şekilde, *DOC*'nin eksenel yüzey kalıntı gerilmesi üzerindeki etkisi düşük seviyededir.

Şekil 1b ve c, işleme parametrelerinin, sırasıyla çevresel ve eksenel yüzey kalıntı gerilmeleri üzerindeki etkisini gösterir. Şekil 1b ve c'deki grafikler incelendiğinde, hem çevresel hem de eksenel yüzey kalıntı gerilmelerindeki eğilimlerin aynı olmasına rağmen büyüklük değerleri farklıdır. Ayrıca her iki grafikten de çevresel yüzey kalıntı gerilme değerlerinin büyüklüğünün eksenel yüzey kalıntı gerilme değerlerinden daha büyük olduğu görülebilir.

**Tablo 7.** Çevresel ve eksenel yüzey kalıntı gerilmeler,  $\sigma_c$  ve  $\sigma_a$ , için ANOVA sonuç tablosu

Parametre	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F – Oranı	P – Değeri	Katkı Oranı (%)
<b>Çevresel yüzey kalıntı gerilme, <math>\sigma_c</math></b>						
<i>DOC</i>	1	1290.49	1290.49	65.33	0.0000	6.29
<i>TG</i>	2	7724.10	3862.05	195.52	0.0000	37.67
<i>V</i>	2	5120.82	2560.41	129.62	0.0000	24.97
<i>f</i>	2	6174.05	3087.02	156.28	0.0000	30.11
Hata	10	197.53	19.75			0.96
Toplam	17	20506.99				100.00
<b>Eksenel yüzey kalıntı gerilme, <math>\sigma_a</math></b>						
<i>DOC</i>	1	889.86	889.86	38.08	0.0000	7.17
<i>TG</i>	2	4153.75	2076.88	88.88	0.0000	33.48
<i>V</i>	2	3940.40	1970.20	84.32	0.0000	31.77
<i>f</i>	2	3187.15	1593.58	68.20	0.0000	25.69
Hata	10	233.67	23.37			1.88
Toplam	17	12404.83				100.00

F-Oranı tablo değeri:  $F_{0.05;1;10} = 4.96$ ,  $F_{0.05;2;10} = 4.10$

Grafiklerden gözlemlenen etkiler, zayıf termal iletkenliğe sahip AISI 316L paslanmaz çeliğin işlenmesinde deformasyonun karakterini belirleyen ısı yayılım miktarının anlaşılmasıyla açıklanabilir [10, 28]. Düşük kesme hızlarında, hacimsel talaş kaldırma hızı azalır ve talaş tarafından yayılan ısı oranı da azalır. Aksine, yüksek kesme hızlarında, hacimsel talaş kaldırma hızı ve talaş tarafından karşılık gelen ısı yayma hızı artar. Bu nedenle, düşük kesme hızlarında talaşlar, yüksek kesme hızına göre nispeten daha uzun bir süre kesme bölgesinde kalır. Bunun karşılığında düşük hızlar, işlenmiş yüzeyde yüzey çekme kalıntı gerilmelerinin daha yüksek değerlerde meydana gelmesine yol açar [28]. 150 m/dak kesme hızında hacimsel talaş kaldırma hızı daha düşük olduğundan, talaşta biriken ısı daha fazla ve ısıyı dağıtma yetenekleri daha azdır, çekme yüzey kalıntı gerilmelerinin değeri yükselir. Tersine, 200 m/dak kesme hızında, talaşta biriken ısı daha az olmakla birlikte, hacimsel talaş kaldırma hızı yüksek olduğu için ısıyı dağıtma yetenekleri de yüksektir ve çekme yüzey kalıntı gerilme değerleri düşüktür. İlerleme oranı 0.1 den 0.3 mm/dev aralığına doğru arttırıldığında, çekme yüzey kalıntı gerilmelerinin büyüklüğünde bir artış olur. İlerleme oranının yanı sıra kesme hızındaki bir artış, hacimsel talaş kaldırma hızında bir artışa neden olur. Bu nedenle, ilerleme oranındaki bir azalma, talaşın ısıyı işleme bölgesinden uzaklaştırma yeteneğini arttırmada daha etkilidir. Kesme derinliği 1.25 mm'den 2.5 mm'ye değiştiğinde, yüzey kalıntı gerilmelerinin büyüklüğü çekme yönünde değişir ve kesme derinliğinin 2,50 mm'ye artmasıyla artar. Kesme derinliğinin en yüksek olması koşulu, talaşla ısı dağılımının nispeten daha yüksek olduğunu gösterir. Talaş kaldırma işlemi sırasında ısı oluşumunu etkileyen en önemli faktörlerden biri takım/talaş temas uzunluğudur. Kısa takım/talaş temas

uzunluğunun sürtünme kuvvetini ve dolayısıyla ısı oluşumunu azalttığı bilinmektedir. Bu nedenle, iş parçasının yüzeyi ısıdan daha az etkilenir ve yüzeyde oluşabilecek çekme yüzey kalıntı gerilmelerinin büyüklüğü azalır [29–34]. En düşük çekme yüzey kalıntı gerilmeleri, sırasıyla QM–MM–MR tipi takım geometrilerine sahip kesici takımlarla işlenen iş parçasının yüzeylerinde meydana gelmiştir (Şekil 1b, c).

#### 4.5. İşleme Parametrelerinin Pekleşme Derecesi Üzerine Etkisi (Effect of Machining Parameters on Degree of Strain Hardening)

Araştırmacılar, en yüksek sertliğin işlenen yüzeye en yakın bölgede oluşmasının nedeninin talaşlı imalat sonrası plastik deformasyona bağlı pekleşme olduğunu vurgulamışlar ve işlenen yüzeydeki deformasyona yanıt olarak işleme ile pekleşmiş bir tabakanın kolayca oluşturulabileceğini bildirmişlerdir [17, 35]. Çalışmada kullanılan AISI 316L östenitik paslanmaz çelik malzemenin sertliği yaklaşık  $202 \pm 3 \text{ HV}_{0.5}$ 'dir ve %PD denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır. %PD, işlem görmüş yüzeyin mikrosertliğinde ana malzemenin mikrosertliğine kıyasla bir değişiklik olup olmadığını ifade eder. Tablo 8'e göre *DOC*, *TG*, *V* ve *f* parametrelerinin %PD üzerine yüzde katkıları sırasıyla %7.27, %44.17, %22.95 ve %24.96 olarak bulunmuştur. %44.17 katkı oranı ile *TG*, %PD'ni etkileyen en önemli parametre olup, bunu sırasıyla *f* ve *V* parametreleri izlemektedir. Bunun yanında, *DOC*'nin %PD üzerindeki etkisi düşüktür.

**Tablo 8.** Pekleşme Derecesi, %PD, için ANOVA sonuç tablosu

Parametre	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F – Oranı	P – Değeri	Katkı Oranı (%)
<i>DOC</i>	1	41.69	41.69	112.47	0.0000	7.27
<i>TG</i>	2	253.25	126.63	341.64	0.0000	44.17
<i>V</i>	2	131.59	65.79	177.51	0.0000	22.95
<i>f</i>	2	143.13	71.57	193.09	0.0000	24.96
Hata	10	3.71	0.37			0.65
Toplam	17	573.37				100.00

F– Oranı tablo değeri:  $F_{0.05;1;10} = 4.96$ ,  $F_{0.05;2;10} = 4.10$

Şekil 1d'deki grafikten genel olarak *DOC* ve *f* arttığında %PD'nin arttığı; ancak, *V*'nin artışla %PD'nin azaldığı görülür. Talaşlı imalat sırasında ısı oluşumunda kesme hızının önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir [35]. Kesme hızı, talaşı uzaklaştırmak için gerekli enerjiyi tanımladığı için, kesme işlemi sırasında oluşan ısı miktarı ile doğrudan ilişkilidir. İşlemede yüksek kesme hızları kullanıldığında, iş parçasına aktarılan ısı miktarı azalır [4, 5], bu da yüzey katmanında düşük mikrosertlik değişimlerine ve dolayısıyla düşük %PD'ne yol açabilir. En yüksek %PD, MR tip takım geometrisi ile elde edilirken, en düşük %PD, QM tip takım geometrisi ile elde edilmiştir. QM tip takım geometrisi, talaş yüzeyinin en küçük düzlüğüne sahip olduğundan (bkz. tablo 3), QM tipi en düşük %PD değerleriyle sonuçlanmıştır. Talaş yüzünün düz kısmının daha büyük uzunluğu takım/talaş temas alanını artırırken, talaş yüzünün düz kısmının daha küçük uzunluğu takım/talaş temas alanını azaltır. Bu nedenle, takım/talaş temas uzunluğundaki bir azalma, kesme kuvvetlerinin ve ısı oluşumunun azaltılmasına yardımcı olur. Bunun bir sonucu olarak, talaş yüzünün düz kısmının daha küçük uzunluğu, deformasyondan etkilenen alanın ve iş parçası yüzeyindeki termo–mekanik etkilerin azalmasına yol açar.

Ana etki grafiklerini ve ANOVA'dan elde edilen sonuçları kalite özelliklerine göre genel olarak değerlendirdiğimizde, proses parametrelerinin kalite özellikleri üzerinde farklı seviyelerde etkileri olduğunu açıkça görebiliriz. Bu açıdan *DOC*, *Ra* üzerinde nispeten verimli bir parametredir ve diğer kalite özellikleri üzerinde önemli bir etkisi yoktur. *TG* *Ra*'yı etkilemez, ancak sırasıyla %PD,  $\sigma_c$  ve  $\sigma_a$  üzerinde daha etkilidir. *V* sırasıyla  $\sigma_a$ ,  $\sigma_c$  ve %PD üzerinde daha önemli bir etkiye sahiptir. *f* *Ra* üzerinde çok yüksek bir etkiye sahipken, sırasıyla  $\sigma_c$ ,  $\sigma_a$  ve %PD üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir.

#### 4.6. Doğrulama Testleri (Confirmation Tests)

Taguchi optimizasyon tekniğinde optimize edilmiş koşulun doğrulanması için bir doğrulama deneyi yapılması gerekmektedir [21]. Ayrıca optimum kalite özelliklerinin tahmininde doğrulama testinden elde

edilen değerlerin güven aralığında olup olmadığı da belirlenmelidir. Sistemin optimizasyonu yeterince doğru bir şekilde gerçekleştirip gerçekleştirmediğinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, istatistiksel yaklaşımla tanımlanan referans denklemler (denklem (3) ve (4)) kullanılarak tahmini kalite özellikleri için güven aralığının belirlenmesi yapılabilir [19, 36].

Yanıt değişkenlerin optimum değeri, kesme derinliği (*DOC*), Takım Geometrisi (*TG*), Kesme hızı (*V*) ve İlerleme oranı (*f*) olarak halihazırda seçilmiş olan önemli parametrelerin optimal seviyelerinde tahmin edilir. Optimal koşulda bir cevap karakteristiğinin tahmini ortalaması şu şekilde belirlenebilir [23, 37]

$$\eta_{opt} = \eta_m + \sum_{i=1}^k (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad 3$$

burada  $\eta_m$  ilgili cevap karakteristiği için elde edilen değerlerin ortalaması,  $k$  ilgili parametre,  $\eta_i$  her bir  $i$  parametrenin optimal seviyedeki sonuçlarının ortalamasıdır.

Sistemin optimal şartların yeterince doğru gerçekleştirip gerçekleştirmediğinin değerlendirilmesi gerekir. Bu amaçla, tahmini cevap değişkeni için güven aralığının ( $CI_{CE}$ ) belirlenmesinde aşağıdaki denklemler kullanılmıştır [19, 23, 37]:

$$CI_{CE} = \sqrt{F_{(\alpha, 1, f_e)} V_e \left[ \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]}$$

ve

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + T_{DOF}}$$

burada  $F_{(\alpha, 1, f_e)}$  %95 güvenle F- oranıdır,  $\alpha$  anlamlılık düzeyidir,  $f_e$  hata serbestlik derecesidir,  $V_e$  hata varyansdır,  $n_{eff}$  etkin tekrar sayısıdır,  $R$  doğrulama deneyleri için tekrar sayısı,  $N$  toplam deney sayısıdır ve  $T_{DOF}$  toplam ana faktör serbestlik derecesidir.

Tablo 9, tüm kalite özellikleri için ortalama yanıt sonuçlarını göstermektedir. Bu tabloya göre “*DOC1, TG2, V3, f1*” kombinasyonu tüm kalite özelliklerinin optimum ortalama değerlerini temsil etmektedir ve Tablo 9’da verilen ortalama tepki sonuçları, Tablo 5’te verilen S/N tepki sonuçları ile tutarlıdır.

Bu çalışmada, optimal koşullar dikkate alınarak parametre etkilerinin tekrarlanabilirliğini doğrulamak için üç doğrulama deneyi yapılmıştır. Tablo 6–8’de verilen ANOVA sonuçları ve Tablo 9’da gösterilen deneysel çalışmadan elde edilen değerlerin ortalama sonuçları dikkate alındığında, optimal koşullar altında gerçekleştirilen doğrulama deneylerinden beklenen değerlerin %95 güven aralığında olduğu söylenebilir. Optimal koşullar altında tahmin edilen sonuçlar ile, optimal koşulun %95 güven aralığı ve doğrulama testleri ile elde edilen sonuçlar Tablo 10’da gösterilmiştir. Tüm kalite karakteristikleri için optimum işleme koşullarında doğrulama amacıyla yapılan üç test sonucunda  $R_a$ ,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_a$  ve %PD’nin ortalama değerleri, sırasıyla 0.371  $\mu\text{m}$ , 570.4 MPa 165.4 MPa ve %2.97 olarak elde edilmiştir. Doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar, parametre etkilerinin güven aralığı sınırları içinde kaldığını ve tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu göstermiştir. Üstelik bu sonuçlar, deney sonuçlarının da güvenilmeye değer olduğu anlamına gelir. Böylece  $R_a$ ,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_a$  ve %PD için sistem optimizasyonu Taguchi yöntemi kullanılarak %95 güven aralığında gerçekleştirilebilir.

Optimal koşullar için yapılan doğrulama testinin sonuçları, deneysel çalışmada en iyi sonucu veren rastgele bir kombinasyon ile karşılaştırılmıştır. Tablo 11, Taguchi yöntemiyle elde edilen tahmin edilen değerlerin doğrulama testi sonuçlarıyla karşılaştırmasını göstermektedir. Tahmin edilen değerler ile deneysel değerler arasındaki hatanın %10’dan az olması yapılan istatistiksel analizin güvenilirliğinin bir göstergesidir ve bu değerler kabul edilebilir sınırlar içindedir [37, 38]. Dolayısıyla doğrulama testi sonuçlarından başarılı bir optimizasyon yapıldığı söylenebilir. Optimum koşullar altında  $R_a$  ve %PD sırasıyla %20.39 ve %53.90’lık bir iyileşmeye sahiptir.  $\sigma_a$ ’daki iyileşme %5.61 iken,  $\sigma_c$  için elde edilen iyileşme ise sadece %1.89’dur.

**Tablo 9.** Kalite özellikleri için ortalama yanıt tablosu

İşleme Parametreleri	Seviye			Mak–Min	Sıra
	1	2	3		
<b>Ra (µm)</b>					
DOC	<b>1.309</b>	1.82		0.511	2
TG	1.655	<b>1.442</b>	1.597	0.213	4
V	1.676	1.62	<b>1.398</b>	0.278	3
f	<b>0.885</b>	1.442	2.368	1.483	1
<b>σ<sub>c</sub> (MPa)</b>					
DOC	<b>628.75</b>	645.69		16.93	4
TG	664.4	<b>614.16</b>	633.1	50.24	1
V	657.72	637.53	<b>616.41</b>	41.31	3
f	<b>614.42</b>	637.47	659.78	45.36	2
<b>σ<sub>a</sub> (MPa)</b>					
DOC	<b>208.1</b>	222.16		14.06	4
TG	235.23	<b>198.51</b>	211.64	36.72	1
V	234.47	212.38	<b>198.54</b>	35.93	2
f	<b>199.39</b>	214.06	231.94	32.54	3
<b>%PD</b>					
DOC	<b>13.93</b>	16.98		3.04	4
TG	19.99	<b>10.81</b>	15.57	9.19	1
V	18.98	14.99	<b>12.4</b>	6.57	3
f	<b>12.07</b>	15.32	18.98	6.9	2

*Koyu renk işaretli değerler işleme parametresinin optimal seviyesidir*

$\eta_{Ra} = 1.565 \mu\text{m}$   $\eta_{\sigma_c} = 637.22 \text{ MPa}$   $\eta_{\sigma_a} = 215.13 \text{ MPa}$   $\eta_{\%PD} = 15.46\%$

**Tablo 10.** Doğrulama testinin sonuçları

	Cevap değişkeni				
	Ra (µm)	σ <sub>c</sub> (MPa)	σ <sub>a</sub> (MPa)	%PD	
Optimal şartlar altında Tahmin edilen değer	0.34	562.08	159.15	2.84	
Hata varyansı	0.014	19.75	23.37	0.371	
% 95 güven aralığı	± 0.236	± 8.73	± 9.5	± 1.2	
% 95 güven aralığının	alt sınırı	<b>0.104</b>	<b>553.349</b>	<b>149.658</b>	<b>1.645</b>
	üst sınırı	<b>0.576</b>	<b>570.806</b>	<b>168.648</b>	<b>4.037</b>
Doğrulama test sonuçları	1	0.409	575.11	173.23	2.99
	2	0.33	567.37	141.99	3.11
	3	0.374	568.72	180.98	2.8
Doğrulama testlerinin ortalaması		<b>0.371</b>	<b>570.4</b>	<b>165.4</b>	<b>2.97</b>
Hata oranı (%)		8.33	1.46	3.77	3.89

**Tablo 11.** Tahmin değerleri ve doğrulama testi sonuçlarının karşılaştırılması

Parametre ve Seviyeleri	Taguchi Metodu için			İyileşme (%)
	DeneySEL Veriler	Tahmin Verileri	Hata (%)	
<b>Ra (µm)</b>				
DOC1TG2V3F1 (optimal)	0.371	0.340	8.33	20.39
DOC1TG3V3f1 (deneysel)*	0.466	0.495	6.22	
<b>σ<sub>c</sub> (Mpa)</b>				
DOC1TG2V3F1 (optimal)	570.40	562.08	1.46	1.89
DOC1TG3V3f1 (deneysel)*	581.40	597.95	2.85	
<b>σ<sub>a</sub> (Mpa)</b>				
DOC1TG2V3F1 (optimal)	165.40	159.15	3.78	5.61
DOC2TG2V3F1 (deneysel)*	175.23	173.22	1.15	
<b>%PD</b>				
DOC1TG2V3F1 (optimal)	2.97	2.84	4.24	53.90
DOC2TG2V3F1 (deneysel)*	6.44	5.89	8.48	

\*Deneylerden elde edilen en iyi sonuçların kombinasyonu seçilmiştir.

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makale, yüzey pürüzlülüğünü, çevresel ve eksenel yüzey kalıntı gerilmelerini ve pekleşme derecesini en aza indirmek için Taguchi yaklaşımını kullanarak AISI 316L tornalama işleminin optimizasyonunu sunar. En iyi parametre kombinasyonunu belirlemek için Taguchi ortogonal dizisine göre oluşturulan deneyler yapılmıştır. İşleme parametrelerinin bu tepki değişkenleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmış ve bazı önerilerde bulunulmuştur:

1. Varyans analizi (ANOVA), ilerleme oranının %79.60 oranında ortalama yüzey pürüzlülüğünü en çok etkileyen parametredir. Düşük ilerleme oranları ortalama yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmiştir.
2. Çevresel yüzey kalıntı gerilmeleri üzerinde en etkili parametreler, sırasıyla %37.67 oranla takım geometrisi, % 30.11 oranla ilerleme oranı ve %24.97 kesme hızıdır. QM formülü takım, düşük ilerleme oranı ve yüksek kesme hızları kombinasyonu çevresel yüzey kalıntı gerilmelerinin daha düşük oluşmasını sağlamıştır.
3. Eksenel yüzey kalıntı gerilmeleri üzerinde en etkili parametreler, sırasıyla %33.48 oranla takım geometrisi, %31.77 kesme hızı ve % 25.69 oranla ilerleme oranı etkili olur. Eksenel yüzey kalıntı gerilmelerinin azaltılmasında QM formülü takım, düşük ilerleme oranı ve yüksek kesme hızları kombinasyonu daha etkili olmuştur.
4. Pekleşme derecesi üzerine %44.17 oranla takım geometrisi, %24.96 oranla ilerleme oranı ve %22.95 ile kesme hızı etkilidir. QM formülü takım, düşük ilerleme oranı ve yüksek kesme hızları kombinasyonu pekleşme derecesinin daha düşük elde edilmesini sağlamıştır.
5. Kesme derinliği, dikkate alınan cevap değişkenleri için düşük bir etkiye sahip olmasına rağmen, daha düşük kesme derinliği tüm cevap değişkenlerini olumlu etkilemiştir.
6. Takım temas uzunluğunu etkileyen tüm parametreler yüzey bütünlüğünü de etkiler. Özellikle, yüzey kalıntı gerilme bileşenleri ve pekleşme derecesi takım temas uzunluğunu etkileyen takım geometrisi, ilerleme ve kesme hızı gibi parametrelerden daha çok etkilenmiştir.
7. Çalışmadan elde edilen en iyi kombinasyon dikkate alınarak yapılan doğrulama test sonuçları, çalışmanın güvenilirliğini ortaya koymuş ve %95 güven aralığı içerisinde en iyi kombinasyon şartının pekleşme derecesinde %53.90, ortalama yüzey pürüzlülüğünde % 20.39, eksenel yüzey kalıntı gerilmesinde %5.61 ve çevresel yüzey kalıntı gerilmesinde % 1.89 iyileşme sağladığını teyit etmiştir.



8. Daha düşük çevresel ve aksenal yüzey kalıntı gerilmeleri ve pekleşme derecesi elde etmek için takım talaş temas uzunluğu kısa takım geometrileri seçilmeli, bununla beraber, düşük ilerleme oranları ve yüksek kesme hızları tercih edilmelidir.
9. İşleme performansını ve yüzey bütünlüğünü etkileyen başka faktörler dikkate alınarak çalışmanın devamı sağlanabilir.

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, “Gazi Üniversitesi – Bilimsel Araştırma Projeleri” kapsamında 07/2009–33 numaralı proje ile desteklenmiştir. Yazarlar, destekleri için Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri’ ne teşekkürlerini sunar.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kaladhar, M., Subbaiah, K. V. & Rao C. H. S. (2012). Machining of austenitic stainless steels – a review. *Int. J. Machining and Machinability of Materials*, 12 (1/2), 178–192. <https://doi.org/10.1504/IJMMM.2012.048564>.
- [2] Gandarias, A., De Lacalle, L. N. L., Aizpitarte, X. & Lamikiz, A. (2008). Study of the performance of the turning and drilling of austenitic stainless steels using two coolant techniques. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 3 (1–2), 1–17. <https://doi.org/10.1504/IJMMM.2008.017621>.
- [3] Youssef, H. A. (2016). *Machining of stainless steels and super alloys traditional and non-traditional techniques*. UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- [4] Gürbüz, H. (2012). *AISI 316L Çeliğin İşlenmesinde Kesici Takım Geometrisi Ve Kaplama Tiplerinin Yüzey Bütünlüğü Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması*. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [5] Gürbüz, H., Şeker, U. & Kafkas, F. (2017). Investigation of effects of cutting insert rake face forms on surface integrity. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 90, 3507–3522. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9652-7>.
- [6] Arunachalam, R. M., Manan, M. A. & Spowage, A. C. (2004). Surface integrity when machining age hardened Inconel 718 with coated carbide cutting tools. *Int. J. Mach. Tools. Manuf.*, 44, 1481–1491. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.05.005>.
- [7] Lucca, D. A, Brinksmeier, E. & Goch, G. (1998). Progress in assessing surface and subsurface integrity. *Annals of the CIRP*, 47 (2), 669–693. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63248-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63248-X).
- [8] Saini, S., Ahuja, I. S. & Sharma, V. S. (2012). The effect of cutting parameters on surface integrity in hard turning. *Applied Mechanics and Materials*, 110 (116), 751–757. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.751>.
- [9] Chou, Y. K. (2002). Surface hardening of AISI 4340 steel by machining: a preliminary investigation. *J. Mater. Process. Technol.*, 124, 171–177. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00132-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00132-2).
- [10] Pawade, R. S. & Joshi, S. S. (2011). Multi-objective optimization of surface roughness and cutting forces in high-speed turning of Inconel 718 using Taguchi grey relational analysis (TGRA). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 56, 47–62 <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3183-z>.
- [11] Memiş, F. & Turgut, Y. (2020). AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin cnc torna tezgahında işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerinin deneysel araştırılması. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1 (1), 22–33. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca/issue/54121/724337>.

- [12] Şirin, E & Şirin, Ş. (2021). Investigation of the performance of ecological cooling/lubrication methods in the milling of AISI 316L stainless steel. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 2 (1), 75–84. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca/issue/62181/901460>.
- [13] Günay, M. (2014). AISI 316L çeliğinin işlenmesinde takım radyüsü ve kesme parametrelerinin taguchi yöntemiyle optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28 (3), <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6704/89106>.
- [14] Günay, M. (2022). Modeling and multiple optimization in face milling of hardfacing welding applied steel: force, roughness, power. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.*, 236 (12), 6652–6664, <https://doi.org/10.1177/09544062211065998>.
- [15] Yücel, A. & Yıldırım, Ç. V. (2020). AA2024 Alaşımının Tornalanmasında Nanoakışkan Konsantrasyon Oranı ve MMY Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Sıcaklığı Üzerindeki Etkisi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1 (3), 18–32, <https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca/issue/58430/824996>.
- [16] Kacal, A. & Yıldırım, F. (2013). Application of grey relational analysis in high-speed machining of hardened AISI D6 steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 227 (7), pp. 1566–1576. <https://doi.org/10.1177/0954406212466792>.
- [17] Pawade, R. S., Joshi, S. S. & Brahmanekar, P. K. (2008). Effect of cutting edge geometry and machining parameters on surface integrity of high-speed turned Inconel 718. *Int J Mach Tools Manuf*, 48 (1), 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.08.004>.
- [18] Lu, H. S., Chang, C. K., Hwang, N. C., & Chung, C. T. (2009). Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimization design of the cutting parameters in high-speed end milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (8), 3808–3817. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.08.030>.
- [19] Kıvık, T. (2014). Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Measurement*, 50, pp.19–28. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.12.017>.
- [20] Gupta, A., Singh, H. & Aggarwal, A. (2011). Taguchi-fuzzy multi output optimization (MOO) in high speed CNC turning of AISI P-20 tool steel, *Expert Systems with Applications*, 38 (6), pp. 6822–6828. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.12.057>.
- [21] Mandal, N., Doloi, B., Mondal, B. & Das, R. (2011). Optimization of flank wear using Zirconia Toughened Alumina (ZTA) cutting tool: Taguchi method and Regression analysis. *Measurement*, 44 (10), 2149–2155. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.07.022>.
- [22] Liu, C. R. & Barash, M. M. (1976). The mechanical state of the sub layer of a surface generated by chip-removal process Part 1: Cutting with a sharp tool. *Transactions of ASME, Journal of Engineering for Industry*, 98(4), 1192–1201. <https://doi.org/10.1115/1.3439081>.
- [23] Roy, K. R. (1990). *A Primer on the Taguchi Method*, Competitive Manufacturing Series, New York: Van Nostrand Reinhold.
- [24] Çiftçi, İ. (2006). Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools. *Tribol Int*, 39, 565–569. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.05.005>.
- [25] De Garmo, E. P., Black, J. T. & Kohser, R. A. (1997). *Materials and processes in manufacturing*. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 214–652.

- [26] Gupta, M. & Kumar, S. (2015). Investigation of surface roughness and MRR for turning of UD–GFRP using PCA and Taguchi method. *Eng. Sci. Technol. & Int. J.*, 18, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2014.09.006>.
- [27] Suresh, R. & Basavarajappa, S. (2014). Effect of process parameters on tool wear and surface roughness during turning of hardened steel with coated ceramic tool. *Procedia Mater Sci.*, 5, 1450–1459. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.464>.
- [28] Halverstadt, R. D. (1959). How to minimize and control residual machining stresses. *American Machinist*, 103 (22) 138.
- [29] Outeiro, J. C., Dias, A. M., Lebrun, J. L. & Astakhov, V. (2002). Machining residual stresses in AISI 316L steel and their correlation with the cutting parameters. *Mach. Sci. Technol.*, 6 (2), 251–270. <https://doi.org/10.1081/MST-120005959>.
- [30] Shih, A. J. (1996). Finite element analysis of the rake angle effects in orthogonal cutting. *Int. J. Mech. Sci.*, 38(1), 1–17. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(95\)00036-W](https://doi.org/10.1016/0020-7403(95)00036-W).
- [31] Moufki, A., Molinari, A. & Dudzinski, D. (1998). Modelling of orthogonal cutting with a temperature dependent friction law. *J. Mech. Phys. Solids*, 46 (10), 2103–2138. [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(98\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(98)00032-5).
- [32] Sağlam, H., Ünsaçar, F. & Yaldiz, S. (2006). Investigation of the effect of rake angle and approaching angle on main cutting force and tool tip temperature. *Int. J. Mach. Tools Manufac.*, 46, 132–141. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.002>.
- [33] Outeiro, J. C., Umbrello, D. & M'Saoubi, R. (2006). Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel. *Int. J. Mach. Tools Manufac.* 46 (14), 1786–1794. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.11.013>.
- [34] Günay, M., Korkut, İ., Aslan, E. & Şeker, U. (2005). Experimental investigation of the effect of cutting tool rake angle on main cutting force. *J. Mater. Process. Technol.*, 166, 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.07.092>.
- [35] Ulutan, D. & Ozel, T. (2011), Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: a review. *Int. J. Mach. Tools Manufac.*, 51, 250–280. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.11.003>.
- [36] Dvivedi, A. & Kumar, P. (2007). Surface quality evaluation in ultrasonic drilling through the Taguchi technique. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 34, 131–140. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0586-3>.
- [37] Sudhakara, D. & Prasanthi, G. (2014). Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in wire electric discharge machining of P/M cold worked tool steel (Vanadis-4E). *Procedia Engineering*, 97, 1565–1576. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.440>.
- [38] Çetin, M. H., Özçelik, B., Kuram, E. & Demirbas, E. (2011). Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method. *J. Cleaner Prod.*, 19, 2049–2056. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.013>.

## Mechanical Properties of PET Fiber Reinforced Cement Mortars with Different Pozzolanic Substitutes

Ahmet FİLAZİ<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup>Kırıkkale University, Kırıkkale Vocational School, Department of Construction Technology, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
Received: 04.07.2022  
Revision: 08.08.2022  
Accepted: 15.08.2022

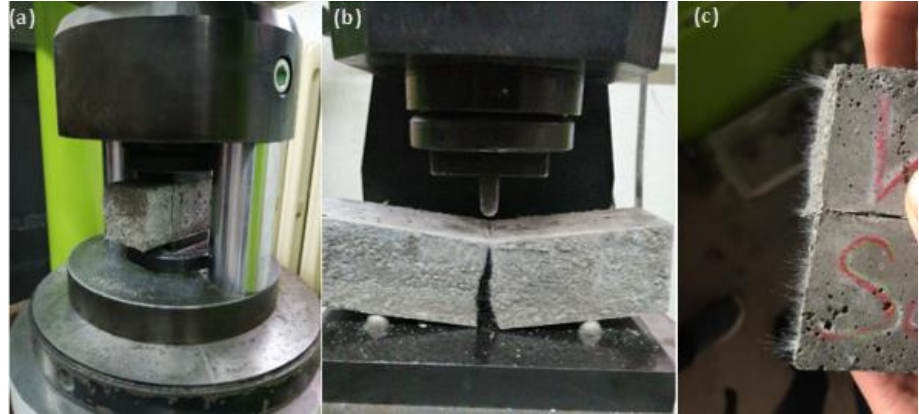
#### Highlights

- PET Fiber
- Pozzolanic
- Mechanical Properties.

#### Keywords

Fly ash  
Blast Furnace Slag  
PET Fiber  
Flexural and Compressive Strength  
Ultrasonic Pulse Velocity

In this study, 7, 28 and 90 days bending and compression values of 1% PET fiber reinforced pozzolanic cement mortar were obtained. (Figure A.)



**Figure A.** a. Compressive Strength b. Flexural Strength c. Pet Fiber Reinforced Sample

**Purpose:** In this study, mechanical and physical properties of cement mortars were investigated by using fiber reinforcement of Fly ash, Blast Furnace Slag and Polyethylene terephthalate (PET). In the first stage of this study, the effects of PET fiber reinforcement on the cured mortar properties were investigated.

**Theory and Methods:** In this study, 0.5% 1%, 1.5% 2% and 3% PET fiber was added to the cement in order to increase the flexural and compressive strengths of the cement mortar. Composite samples were produced by substituting 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30%, and flexural strength, compressive strength and ultrasonic sound velocity measurements of these sample composite samples were carried out.

**Results:** It was observed that the highest flexural strength was 1% PET fiber reinforced, 10% FA and BFS substituted cement mortar mixtures. Flexural, compressive strength and ultrasonic pulse velocity measurements were carried out on the mortar samples..

**Conclusion:** The use of PET fibers in the evaluation of PET bottle wastes and the use of industrial waste UK and YFC in the cement industry will both prevent the reduction of natural resources and provide energy savings. Therefore, wastes that will reduce costs and reduce carbon dioxide released into the nature will benefit economically and environmentally.



## Mechanical Properties of PET Fiber Reinforced Cement Mortars with Different Pozzolanic Substitutes

Ahmet FİLİZİ<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

### Abstract

In this study, mechanical and physical properties of cement mortars were investigated by using fiber reinforcement of Fly ash (FA), Blast Furnace Slag (BFS) and Polyethylene terephthalate (PET). In the first stage of this study, the effects of PET fiber reinforcement on the cured mortar properties were investigated. For this, 0.5% 1%, 1.5% 2% and 3% PET fiber were added by weight of the binder ratio and the fiber reinforcement giving the highest strength was determined as 1%. It was observed that flexural strength increased by 25.79% when 1% PET fiber was added. Then, by keeping 1% PET fiber constant, composite samples were produced by substituting 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30% FA and BFS into cement by weight.

At the end of the study; It was observed that the highest flexural strength was 1% PET fiber reinforced, 10% FA and BFS substituted cement mortar mixtures. Flexural, compressive strength and ultrasonic pulse velocity measurements were carried out on the mortar samples.

### PET Lif Takviyeli Farklı Pozzolanik İkameli Çimento Harçlarının Mekanik Özellikleri

### Öz

Bu çalışmada, çimento harçlarında, Uçucu kül (UK), Yüksek Fırın Cürufu (YFC) ve Polietilen tereftalat (PET) lif takviyesi kullanarak mekanik ve fiziksel özellikler incelenmiştir. Bu çalışmanın ilk aşamasında PET lif takviyesinin sertleşmiş harç özelliklerine etkileri incelenmiştir. Bunun için ilk olarak bağlayıcı oran ağırlığının %0.5 %1, %1.5 %2 ve %3 PET lif ilave edilmiş ve en yüksek dayanımını veren lif takviyesi %1 olarak belirlenmiştir. %1 PET lif ilave edildiğinde eğilme dayanımının %25,79 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Daha sonra %1 PET lif sabit tutularak çimento içerisine ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 UK ve YFC ikame edilerek kompozit numuneler üretilmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda, en yüksek eğilme dayanımının %1 PET lif takviyeli, %10 UK ve YFC ikameli çimento harç karışımlarında elde edildiği görülmüştür. Harç numuneleri üzerinde, eğilme, basınç dayanımı ve ultrasonik ses hızı ölçümü deneyleri gerçekleştirilmiştir.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
 Başvuru: 04.07.2022  
 Düzeltme: 08.08.2022  
 Kabul: 15.08.2022

### Keywords

*Fly ash*  
*Blast Furnace Slag*  
*PET Fiber*  
*Flexural and Compressive Strength*  
*Ultrasonic Pulse Velocity*

### Anahtar Kelimeler

*Uçucu Kül*  
*Yüksek Fırın Cürufu*  
*PET Lif*  
*Eğilme ve Basınç Dayanımı*  
*Ultra Ses Geçiş Hızı*

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Betonun çekme dayanımının düşük olması, çimento hamuru, agrega ve çimento hamuru-agrega arasında kalan bağlanma fazı, betonu oluşturan bileşenlerin birbirlerine bağlanma eksikliği etki eden belli başlıca faktörlerdir [1-3]. Özellikle yüksek dayanımlı betondaki bu kusurlara rağmen, bu malzemeye olan talep artmaya devam etmektedir. Yüksek pozzolanik aktiviteden dolayı silis dumanının, UK ve YFC gibi endüstriyel atıkların, yüksek dayanımlı beton üretiminde kaçınılmaz bir malzeme olduğu yapılan çalışmalarda görülmüştür, ancak bu durum betonun kırılma bir yapıda olmasına neden olmaktadır [4-5]. Bu nedenle, sünekliği iyileştirme, beton biliminde araştırmacılar tarafından dikkate alınması gereken hayati bir konudur.

Beton ve çimento harçlarının içerisine lif ilave edilmesi, beton yapıların sünekliğini, darbe, yorulma ve deprem gibi dinamik yüklere karşı geliştirmek için olası bir çözümdür [6-7].

Lif takviyeli beton üzerine yapılan çalışmalarda, lifli beton üzerine uygulanan yük etkisi ile oluşan çatlaklardan sonra betonun yük taşıma özelliğinin devam etmesi istenir. Bu durum lif türüne ve özelliğine göre değişecektir. Beton içerisindeki lif takviyelerinin en olumlu yönü, beton içerisindeki çatlakların ilk oluştuğu andan itibaren, çatlak oluşumunun bittiği ana kadar oluşan gerilmeleri engellemesi ve oluşan gerilmeleri sağlam bölgelere taşımalarıdır [8-10].

Lifli olarak üretilen betonların eğilme dayanımı yanında, aşınma, oyulma (kavitasyon) direncinde iyileşme olduğu görülmüştür. Buna ilaveten aderansı iyi ise, donatının aderansını arttırdığı, çatlakları engellediği, sünekliği artırdığı, patlama ve kabarıp dökülmeleri iyileştirici rolü olduğu yapılan çalışmalarda görülmektedir [11-14].

Sentetik, karbon, polipropilen, polyester ve cam lifleri, beton içerisine takviye etmek betonun durabilitesini geliştirecektir. Beton içerisine çelik ve sentetik liflerin, betonda kullanımı hacimce %1-2 arasında konulması, eğilme ve aşınma dayanımını geliştirdiği yapılan çalışmada görülmüştür [15-16]. Beton içerisine polyester, sentetik ve polietilen lif takviyesi, çelik liflere oranla daha azdır [17]. Ayrıca doğal (selüloz, karbon, pamuk, hindistan cevizi, jüt vb.) veya sentetik (çelik, polipropilen, polietilen, polyester, naylon, Kevlar vb.) takviye edici lifler beton içerisine literatürde yapılan çalışmalara göre daha sık kullanıldığı görülmektedir. Plastik liflerin daha geleneksel çelik liflere göre, düşük nakliye maliyeti, daha yüksek korozyon direnci, büyük sızdırmazlık, elyaf takviyeli betonun, katkı maddeleri ile gelişmiş uyumluluk, daha düşük termal iletkenlik; daha yüksek işlenebilirlik; malzeme dökme için makine ve teçhizatın daha az aşınması ve yıpranmasında çeşitli avantajlar sunduğu görülmektedir.

PET lif takviyeli betonun temel özelliği, işlenmesinin kolay olmasıdır. Ochi, T., vd. [9] yaptıkları geri dönüştürülmüş PET elyafın geliştirilmesi ve beton takviye elyafı olarak uygulanma çalışmasında, PET lifli betonu ilk uyguladıkları Hishikari Madeni'nde betonun kolay işlenebilir olduğunu yaptıkları çalışmada ifade etmişlerdir. PET elyafın geliştirilmesinde en çok endişe duyulan konu her zaman alkali direnci olduğunu, ancak dikkatli bir inceleme sonucunda normal betonda kullanıldığında herhangi bir sorun olmadığı bildirmişlerdir.

Yüksek dayanımlı beton üretiminde, klinker, curuf, silis duman karışımı çimento kullanımı ve lif takviyeli sertleşmiş betonların, darbelere ve aşınmalara karşı dayanıklılığını, aşınma, yorulma, kimyasallara, parçalanmaya karşı dirençlerinin arttığını yaptıkları çalışmada belirtmişlerdir [18-19].

Farklı lif takviyeli yapılan çalışmalarda, polipropilen lifli betonun basınç dayanımını, liffsiz betona göre %0.4- 0.5 düşürdüğünü, fakat eğilme dayanımını ise %12 ila %14 arasında arttığını belirtmişlerdir. Çelik lif takviyeli betonların basınç dayanımını %1 civarında arttırırken, çekme dayanımını ise %35 kadar arttığını belirtmişlerdir [20-22].

Cam ve çelik lif katkılı beton özellikleri üzerine yapılan çalışmada, puzolanik malzemelerin kullanım miktarının artırılması ile durabilite özelliklerinin iyileştiğini belirtmişlerdir [23].

UK gibi puzolanik malzemelerin betonda kullanımı, kimyasal katkı maddesi olarak son zamanlarda artmıştır. Endüstriyel atık olan UK'nın çimento endüstrisinde kullanımı doğal kaynakların azalmasını önlemede, enerji tasarrufu sağlamada, dolayısıyla maliyetlerin düşmesine neden olacaktır [24-25].

Bu çalışmada, çimento harcının eğilme ve basınç dayanımlarını arttırmak amacı ile çimentonun ağırlıkça %0.5 %1, %1.5 %2 ve %3 oranında PET lif ilave edilmiş, ayrıca en yüksek dayanımı veren lif takviyesi belirlendikten sonra PET lif katkılı UK ve YFC %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame edilerek kompozit numuneler üretilmiş ve üretilen bu örnek kompozit numunelerin, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve ultrasonik ses hızı ölçümü deneyleri gerçekleştirilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

### 2.1. Kullanılan Malzemeler (Used materials)

Yapılan bu çalışmada; CEM I 42.5 R tipi Portland Çimentosu, TS EN 197-1 [26] standartlara uygun bağlayıcı kullanılmıştır. Çayırhan termik santralinde üretilen UK kullanılmıştır. Çalışmada Ereğli Demir Çelik fabrikasında üretilen yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin, kimyasal ve fiziksel

özellikler Tablo1'de sunulmuştur. Bu çalışma için TS EN 196-1'e uygun olarak standart kum, Trakya bölgesinden temin edilen edilmiştir. Üretilen numunelerin çimentonun ağırlıkça %0.5 %1, %1.5 %2 ve %3 oranında PET lif ilave edilmiştir. Bütün numunelere PET lifin boy uzunluğu 3mm sabit olacak şekilde numunelere ikame edilmiştir.

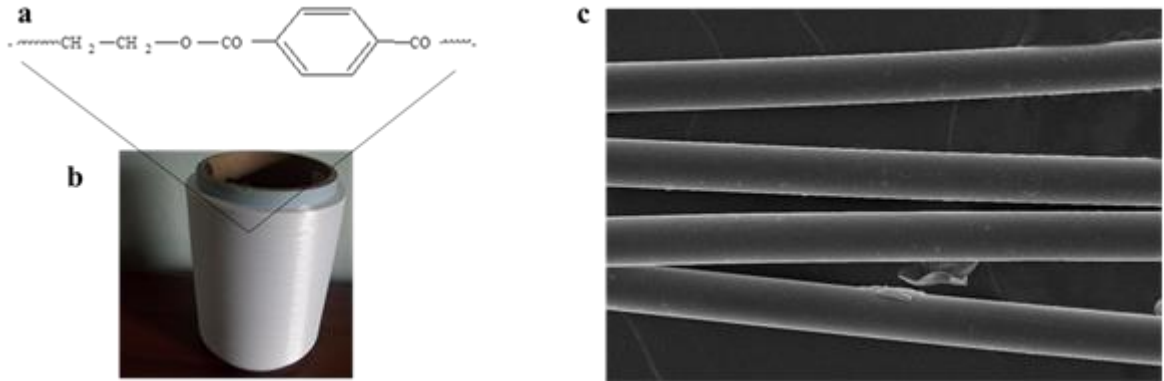
**Tablo 1.** Kullanılan Malzemelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Oksitler (%)	CEM I 42.5 R	UK	YFC
SiO <sub>2</sub>	21.01	46.59	35.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.39	12.42	17.51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.23	9.74	0.68
CaO	62.11	14.50	37.7
MgO	1.97	7.23	5.51
SO <sub>3</sub>	3.10	5.52	0.69
Na <sub>2</sub> O	0.39	1.01	0.42
K <sub>2</sub> O	0.82	2.28	1.71
Fiziksel Özellikler			
Blaine inceliği (cm <sup>2</sup> /g)	3355	2830	3940
Kızdırma Kaybı (%)	2.36	2.28	1.84
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	3.12	2.47	2.89

## 2.2. PET Lif (PET Fiber)

Molekül yapısı Şekil 1'de gösterilen PET, termoplastik bir eriyiktir. Isıtıldığında yumuşayan, soğutulduğunda tekrar sertleşen zincir içinde kovalent, zincirler arasında van der Waals bağlarına sahiptir [27]

PET, amorf yapıya sahiptir. PET lifler, ağırlıkça en az %85 dihidroksi alkol ve bir tereftalik asit esteri içeren polimerlerden elde edilen lifler olarak tanımlanır. İyi fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir, bakteri ve güvelere karşı dayanıklıdır, ışığın etkisiyle bozulmaz ve ayrıca kaynama sıcaklığında bile asitlere karşı dayanıklıdır.



**Şekil 1. a. PET'in kimyasal yapısı b. PET lif c. PET lifin orijinal SEM görüntüsü**

Günümüzde plastik atıkların miktarı oldukça artmıştır. PET atıkların yeni ürünlere dönüşebilmesi için atık polimerlerin kimyasal geri dönüşümü önemli hale gelmiştir [38]. PET lifler Kırıkkale Üniversitesi Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü laboratuvarından temin edilmiştir [39].

### 2.3. Karışım Oranı (Mixing Ratio)

Üretilen çimento harçları TS EN 196-1 [28] standardındaki deney metoduna göre yapılmıştır. Eğilme ve basınç dayanımı deneyi için kullanılacak malzeme karışım oranları Tablo 2’de verilmiştir.

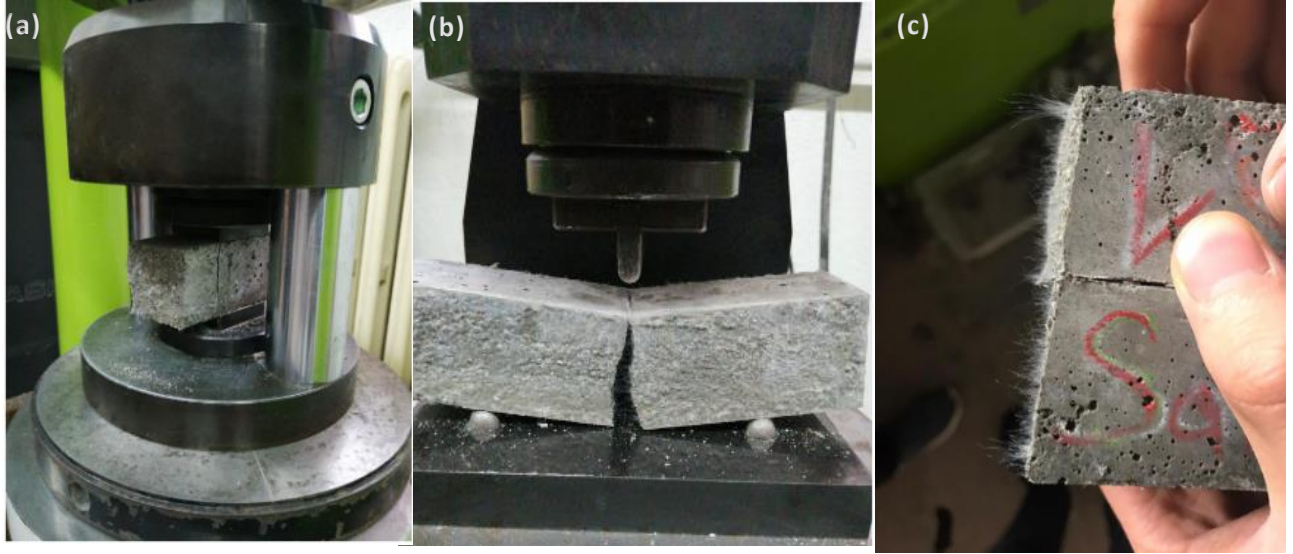
**Tablo 2.** Pet Lif Takviyeli YFC ve UK esaslı çimento esaslı kompozit numunelerin kodları ve karışım oranları

Karışım Kodları	Çimento (g)	YFC (g)	UK (g)	PET Lif (%)	Kum (g)	Su (g)
Kontrol (K0)	450	-	-	-	1350	225
P0.5	450	-	-	0.5	1350	225
P1	450	-	-	1	1350	225
P1.5	450	-	-	1.5	1350	225
P2	450	-	-	2	1350	225
P3	450	-	-	3	1350	225
P1C5	422.5	22,5	-	1	1350	225
P1C10	405	45	-	1	1350	225
P1C15	382,5	67,5	-	1	1350	225
P1C20	360	90	-	1	1350	225
P1C25	337,5	112,5	-	1	1350	225
P1C30	315	135	-	1	1350	225
P1F5	422.5	-	22,5	1	1350	225
P1F10	405	-	45	1	1350	225
P1F15	382,5	-	67,5	1	1350	225
P1F20	360	-	90	1	1350	225
P1F25	337,5	-	112,5	1	1350	225
P1F30	315	-	135	1	1350	225

### 2.4. PET Lif Takviyeli UK ve YFC İkameli Çimento Harcının Eğilme ve Basınç Dayanımının Belirlenmesi (Determination of Flexural and Compressive Strength of PET Fiber Reinforced UK and YFC Substituted Cement Mortar)

7, 28 ve 90 gün normal suda bekletilen çimento harçları kür havuzundan çıkarılarak, TS 196-1’e [28] uygun eğilme ve basınç deneyine (Şekil 2) tabi tutulmuştur. 40×40×160 mm prizmatik numune önce deney presinde eğilme deneyi yapılarak 2 ayrı parçaya ayrılır. Böylece 3 prizma numunesinden 6 adet basınç numunesi elde edilir. Her yarım numunenin alt ve üst yüzeylerine 4 × 4 cm boyutlarında metal kırma başlığı yerleştirilerek deney presinde basınç deneyine tabi tutulmuştur.





**Şekil 2. a. Basınç Dayanımı b. Eğilme Dayanımı c. Pet Lif Takviyeli Örnek Numune**

### 2.5. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi (Ultrasonic Pulse Velocity Experiment)

PET lif takviyeli UK ve YFC ikameli çimento harç numuneleri 0,1  $\mu$ s duyarlıklı ultrases aleti ile t,  $\mu$ s ses geçiş süreleri ASTM C 597 [29] uygun bir şekilde ölçülmüştür. Hesaplanan ses dalga hızı Tablo 3’de görüldüğü gibi ultrases geçiş hızlarının pratik değerlendirilmesine göre değerlendirilmiştir.

**Tablo 3. Ultrases geçiş hızlarının pratik değerlendirilmesi[40]**

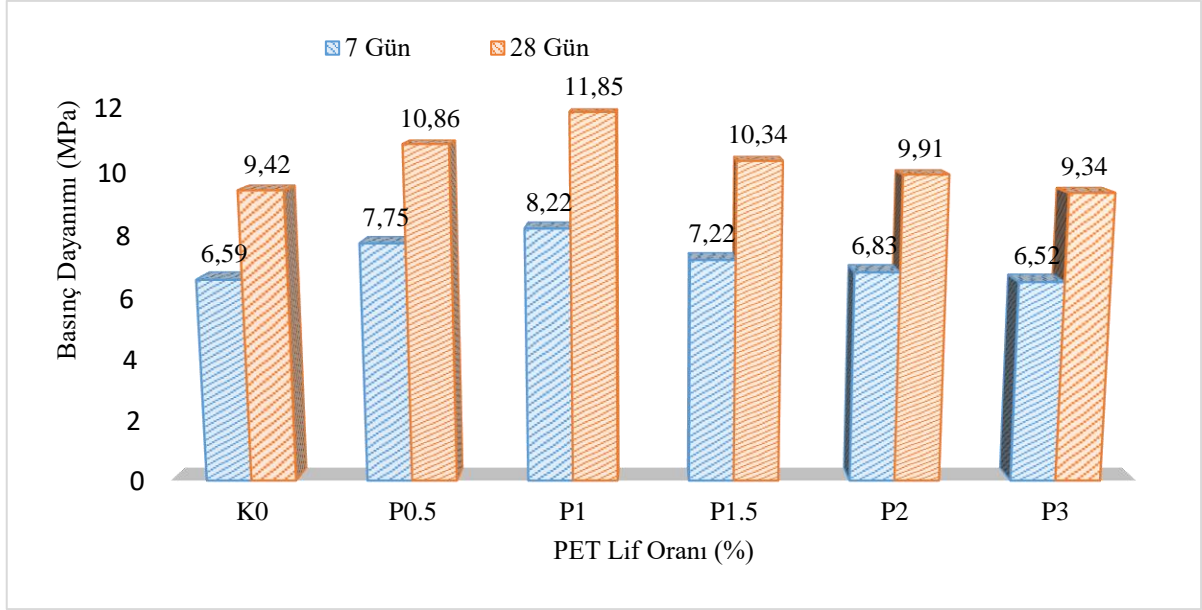
Hız (km/s)	$\geq 4.5$	3.5-4.5	3.0-3.5	2.0-3.0	$\leq 2.0$
Beton kalitesi	Çok İyi	İyi	Orta	Zayıf	Çok Zayıf

## 3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA (RESEARCH FINDINGS AND DISCUSSION)

PET lif takviyeli, UK ve YFC ikameli çimento harçları arasındaki ilişki, 7,28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanım testleri ve ultrases geçiş hızı deneyi verileri değerlendirilmiştir.

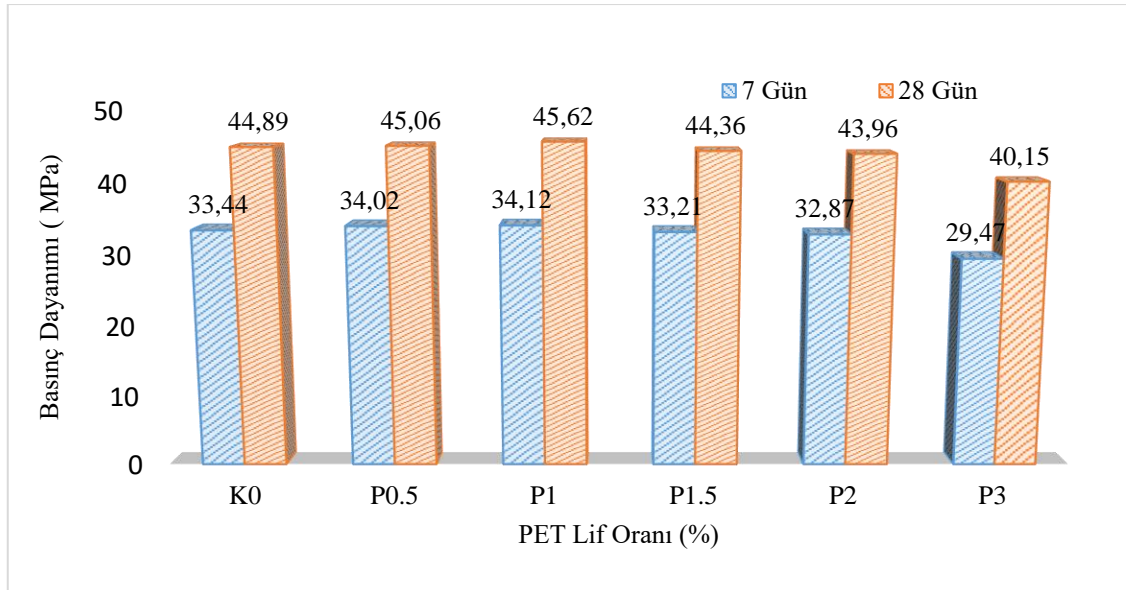
### 3.1. PET Lif Oranının Belirlenmesi (Determination of PET Fiber Ratio)

En uygun lif oranını belirleyebilmek amacı ile puzolanik katkısız bağlayıcı oranın ağırlığını %0.5 %1, %1.5 %2 ve %3 PET lif ilave edilmiş Şekil 3 ve Şekil 4’te gösterilmiştir.



**Şekil 3.** PET lif takviyeli çimento harç numunelerinin eğilme dayanımı

Şekil 3’de PET lif takviyelerinin çimento harç numune örneklerinin eğilme dayanımları incelendiğinde, PET lif yüzdesinin artmasıyla eğilme dayanımında önemli derecede bir artış gerçekleşmiştir. 7 günlük PET lif ilaveli çimento harç numunelerinin eğilme dayanımlarının; kontrol numunesi (K0) ile karşılaştırıldığında P0.5 numunesinde %17,60, P1 numune örneğinde %24,73, P1.5 numunesinde %9,56 ve P2 numunesinde %3,64 eğilme dayanımında artış meydana gelmiştir. P3 numune örneğinde ise %1,06 eğilme dayanımında düşüş gözlemlenmiştir. 28 günlük PET lif ilaveli çimento harç numunelerinin eğilme dayanımlarının; katkısız kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında P0.5 numunesinde %15,29 P1 numune örneğinde %25,79, P1.5 numunesinde %9,77 ve P2 numunesinde %5,20 eğilme dayanımında artış meydana gelmiştir. P3 numune örneğinde ise %0,85 eğilme dayanımında düşüş gözlemlenmiştir. Yapılan bir çalışmada PET liflerin, %1 ve %1,5 lif katkısının eğilme dayanımı arttırdığını ifade etmişlerdir[9]. Bunun sebebi lif dozajının artması sonucu eğilme dayanımını ve tokluğunun arttırmasıdır.



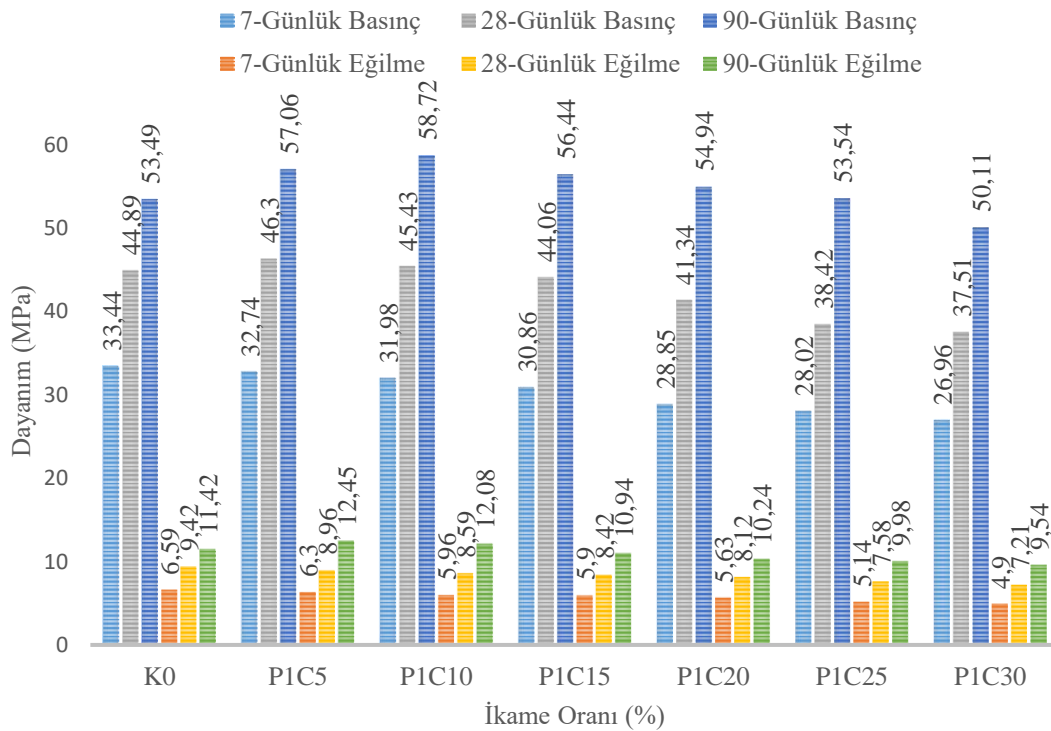
**Şekil 4.** PET lif takviyeli çimento harç numunelerinin basınç dayanımı

Şekil 4’de PET lif takviyelerinin çimento harç numune örneklerinin basınç dayanımları incelendiğinde, 7 günlük PET lif ilaveli çimento harç numunelerinin basınç dayanımlarının; kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında P0.5 numunesinde %1,73, P1 numune örneğinde %2,03 basınç dayanımında artış meydana gelmiştir. 28 günlük PET lif ilaveli çimento harç numunelerinin basınç dayanımlarının; kontrol

numunesi ile karşılaştırıldığında P0.5 numunesinde %0,38, P1 numune örneğinde ise %1,63 basınç dayanımında artış meydana gelmiştir. Kim vd. [24], %0, 0,5, 1, 1,5 oranında harç karışımına PET liflerin takviyesinin basınç dayanımlarına etkisini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda PET lifli örnekler %0,75 PET lif takviyesine kadar basınç dayanımında belirgin bir değişime neden olmadığını, %1 lif PET lif takviyesinde ise bir miktar düştüğünü gözlemlemişlerdir. Ochi vd., [9] betona %1 lif PET lif ilavesinin basınç dayanımı artarken %1 den sonra basınç PET lif ilavesinin beton dayanımında azaldığı söylemişlerdir. Lif dozajı arttıkça taze betonun yerleşebilirliğinin azalması ve sıkıştırılmadaki zorluklar nedeniyle basınç dayanımında düşüş meydana gelmektedir[9]. %1 PET lif ikamesinden sonra basınç dayanımında olumsuz etkiler yaratmıştır. Bunun nedeni numunelere ilave edilen PET liflerin harcın kıvamını düşürdüğü ve çimento harcı içerisinde boşluklara neden olduğundan olumsuz etkide bulunmuştur [30-32]. Ayrıca lif miktarının artması ile toplaşmanın fazlaşması ve çimento harçlarını oluşturan bileşenlerin hareket kabiliyetlerinin azalarak işlenebilirliğin azalması ve numuneler içerisinde bir miktar boşlukların oluşturmasıdır [9,24]. Yapılan çalışmada sonuçların literatürle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Tüm numunelere %1 PET lif ikamesi yapılarak, PET lif katkılı UK ve YFC ikameli kompozit çimento harçlarının dökümü yapılmıştır.

### 3.2. Basınç Dayanım Sonuçları (Compressive Strength Results)

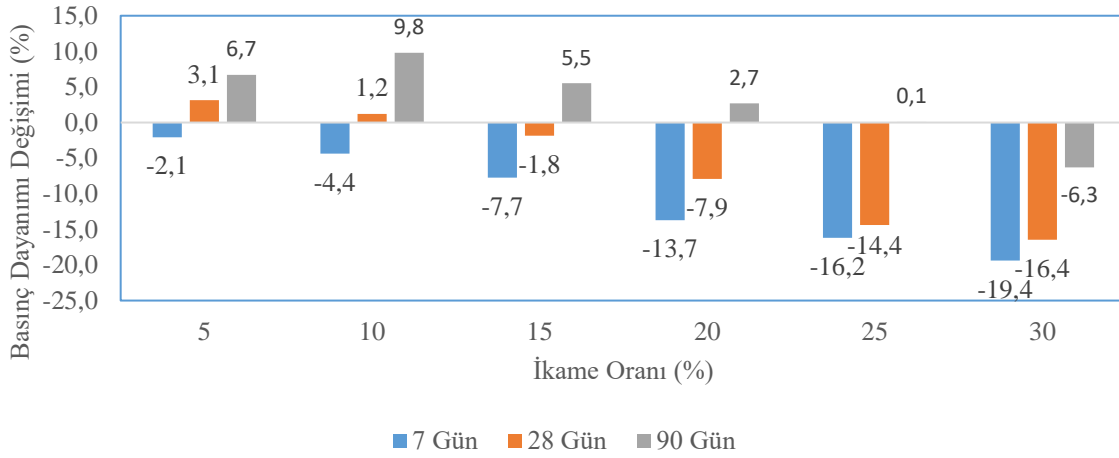
En uygun PET lif %1 oranı bulunduktan sonra, endüstriyel atıkları kullanmak ve daha ekonomik katkı çimento üretmek amacı puzolanik malzeme olarak, UK ve YFC %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 ikame oranlarında çimento içerisine ikame edildi. %1 PET lif takviyeli puzolanik çimento harcının 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç değerleri elde edildi.



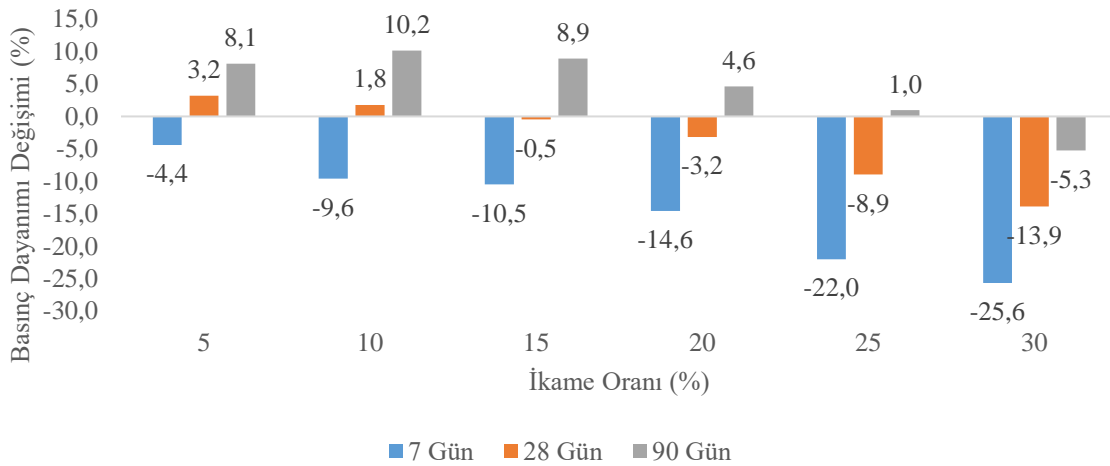
**Şekil 5.** %1 Lif katkılı, YFC ikameli çimento harçlarının 7,28 ve 90 günlük ortalama basınç ve eğilme dayanımları

Şekil 5’de görüldüğü gibi 7 günlük YFC ikameli çimento harçlarının basınç ve eğilme dayanımları lif katkısız kontrol numuneyi geçememiştir. YFC’nin ilk günlerde puzolanik aktivitelerinin düşük olmasıdır. YFC ikame oranı arttıkça eğilme ve basınç dayanım değerlerinde azalma görülmüştür. 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları incelendiğinde YFC’nin %5 ve %10 ikame oranlarında kontrol numuneyi geçtiği görülmüştür. 28 günlük basınç dayanım değişimleri incelendiğinde, %5 ikame oranında %3.1 artarken, %10 ikame oranında %1.2 artış gözlemlenmiştir. 90 günlük basınç dayanım değişimlerine baktığımız zaman %5 ikame oranında %6.7 artarken, %10 ikame oranında %9.8, %15 ikame oranında %5.5, %20

ikame oranında %2.7 ve %25 ikame oranında ise %0.1 basınç dayanımı artışı gözlemlenmiştir. Bütün ikame oranlarındaki basınç dayanımı artışları ve azalmaları Şekil 6'da görülmektedir.

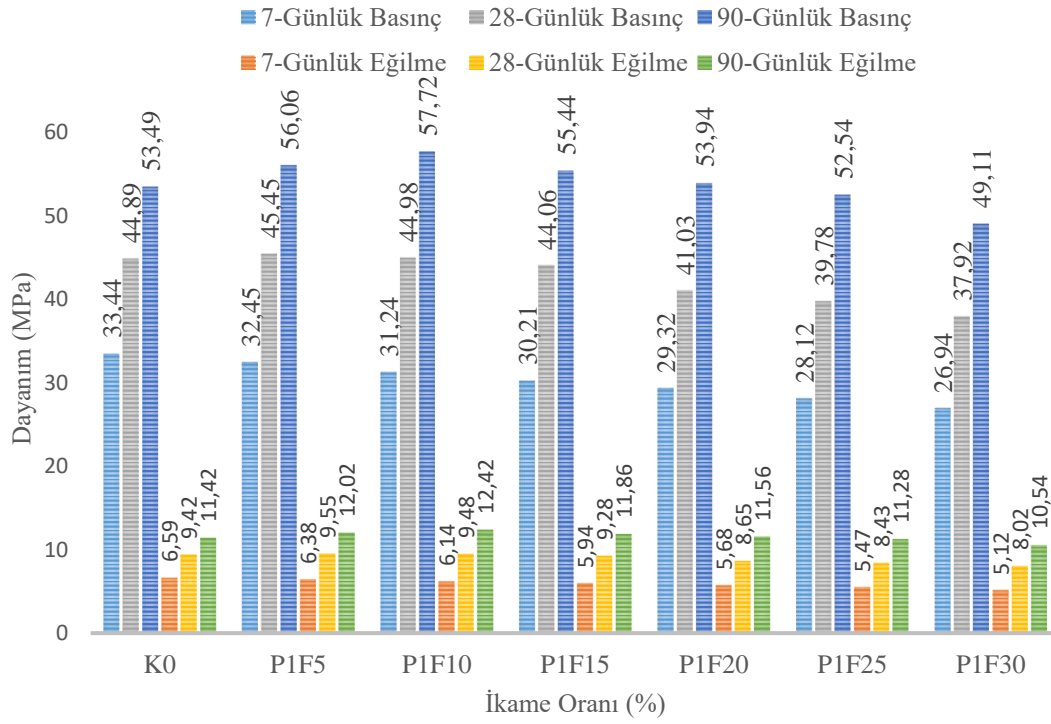


**Şekil 6.** 7,28 ve 90 günlük lif katkılı, YFC ikameli çimento harçlarının basınç dayanımlarının yüzde değişimi



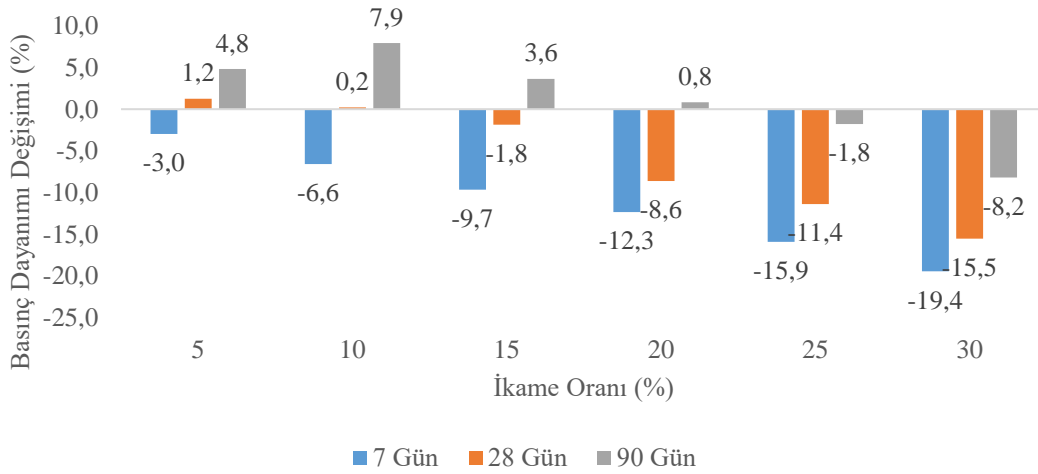
**Şekil 7.** 7,28 ve 90 günlük lif katkılı, YFC ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımlarının yüzde değişimi

28 günlük eğilme dayanım değişimleri, kontrol numuneye göre %5 ikame oranında %3.2, %10 ikame oranında %1.8 arttığı gözlemlenmiştir. 90 günlük eğilme dayanım değişimleri ise %5 ikame oranında %8.1 artarken, %10 ikame oranında %10.2, %15 ikame oranında %8.9 %20 ikame oranında %4.6 ve %25 ikame oranında ise %1 eğilme dayanımının artışı gözlemlenmiştir. Bütün ikame oranlarındaki eğilme dayanım artışları ve azalmaları Şekil 7'de görülmektedir.

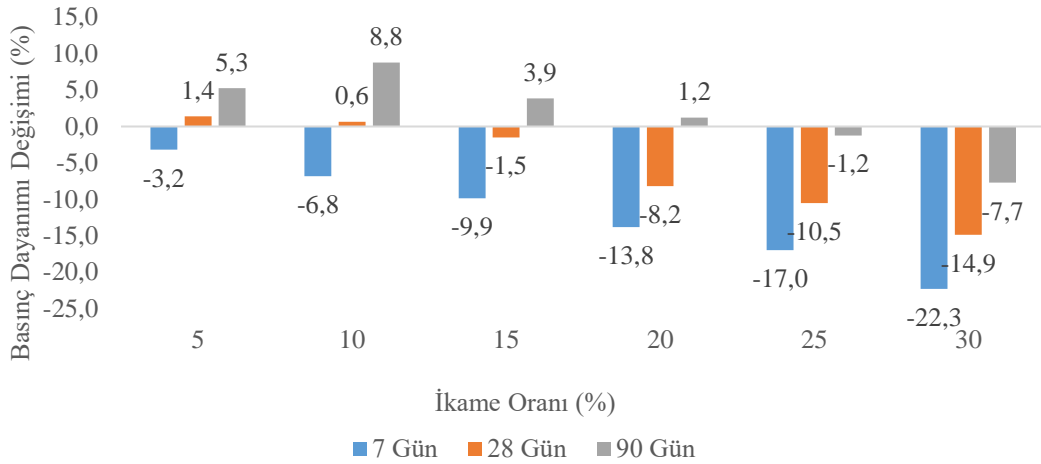


**Şekil 8.** %1 Lif katkılı UK ikameli çimento harçlarının 7,28 ve 90 günlük ortalama basınç ve eğilme dayanımları

Şekil 8’de görüldüğü gibi 7 günlük UK ikameli farklı tip çimento harçlarının basınç ve eğilme dayanımları kontrol numuneyi geçememiştir. Bunun sebebi, UK’ün erken yaşlarda puzolanik aktivitesinin düşük olmasıdır. UK oranı arttıkça, eğilme ve basınç dayanım değerinde azalmalar görülmektedir. 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları, kontrol numuneye karşılaştırıldığında, UK’nın %5 ve %10 ikame oranlarında kontrol numunesine göre yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. 28 günlük basınç dayanım değişimleri ise, %5 ikame oranında %1.2 artarken, %10 ikame oranında %0.2 artış gözlemlenmiştir. 90 günlük basınç dayanımında ise, %5 ikame oranında %4.8 artarken, %10 ikame oranında %7.9, %15 ikame oranında %3.6, %20 ikame oranında %0.8 basınç dayanımı artışı gözlemlenmiştir. Bütün ikame oranlarındaki artış ve azalmalar Şekil 9’de görülmektedir.



**Şekil 9.** 7,28 ve 90 günlük lif katkılı, UK ikameli çimento harcının basınç dayanımlarının yüzde değişimi



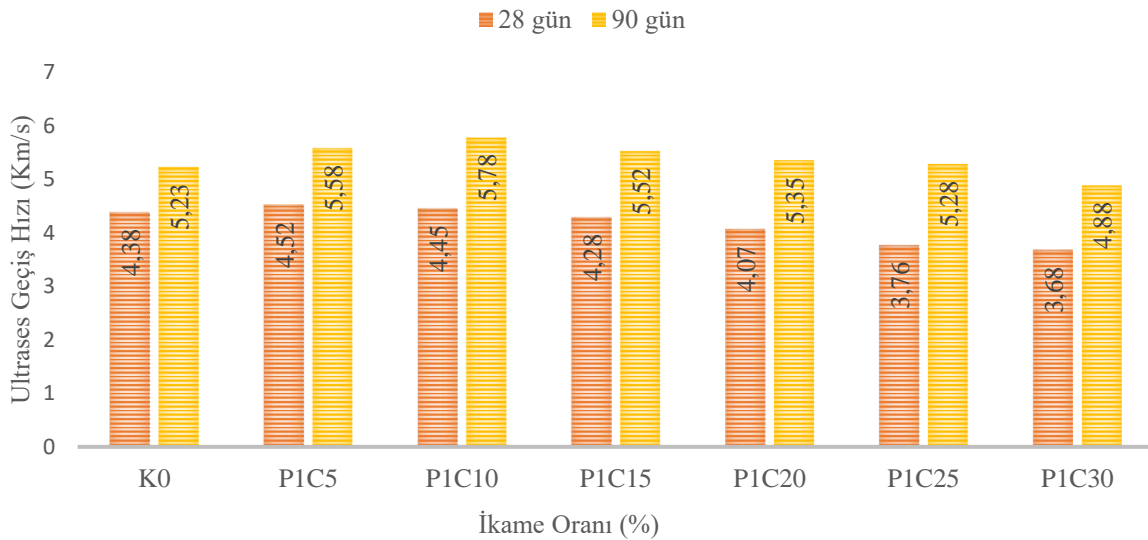
**Şekil 10.** 7,28 ve 90 günlük lif katkılı, UK ikameli Çimento harcının eğilme dayanımlarının yüzde değişimi

28 günlük eğilme dayanım değişimleri kontrol numuneyle karşılaştırıldığında; %5 ikame oranında %1.4 artarken, %10 ikame oranında %0.6 arttığı gözlemlenmiştir. 90 günlük eğilme dayanım değişimlerinde ise, %5 ikame oranında %5.3 artarken, %10 ikame oranında %8.8, %15 ikame oranında %3.9 ve %20 ikame oranında %1.2 eğilme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Bütün ikame oranlarındaki artış ve azalmalar Şekil 10'da görülmektedir.

### 3.3. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları (Ultrasonic Pulse Velocity Experiment Results)

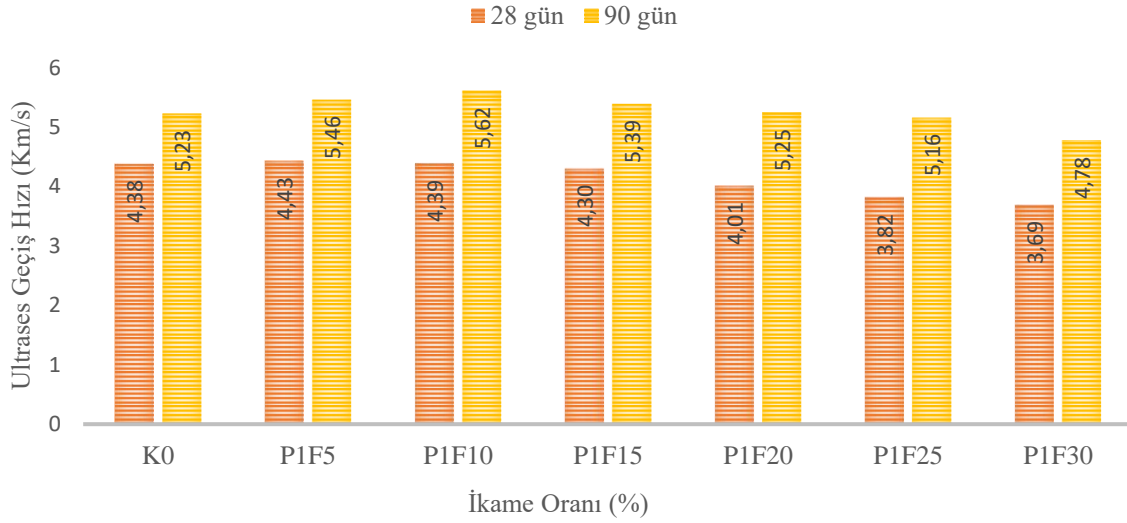
Çimento harç numunelerinde ölçüm esnasında sismik dalga hızları harç numunesinin kompasitesi hakkında bilgi verir. Ses geçiş hızının düşük değerde olması çimento harç numunelerinde bir miktar boşluk içerdiğini, ses geçiş hızını yüksek olduğu çimento harçlarında ise kompasitenin yüksek olduğunu gösterir. PET lif katkılı çimento harçlarının ses geçiş hızları UK ve YFC ikame miktarının artması ile birlikte kontrol harcına göre dahayüksek değerler almıştır.

%1 PET lif takviyeli UK ve YFC ikameli harç numunelerin 28 ve 90 günlük ultrases geçiş hızları sırasıyla, Şekil 11 ve Şekil 12' de verilmiştir. 28 ve 90 günlük üretilen örnek numunelerin ultrases geçiş süreleri sırasıyla, kontrol numunesinde 4.38 km/sn ve 5.23 km/sn olarak ölçülmüştür.



**Şekil 11.** 28 ve 90 günlük lif katkılı, YFC ikameli çimento harcının ultrases geçiş hızı

Şekil 11 incelendiğinde; YFC ikameli çimentoların Ultrases geçiş hızları farklı olsa da 28. günde %5 ve %10 ikame oranlarında ultrases geçiş hızları, kontrol numuneye göre daha hızlı olmuştur. 90 günde ise, %20 ikame oranına kadar ultrases geçiş hızlarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



**Şekil 12.** 28 ve 90 günlük lif katkılı, UK ikameli çimento harcının ultrases geçiş hızı

Şekil 12 incelendiğinde; UK ikameli çimentoların Ultrases geçiş hızları farklı olsa da 28. günde %5 ve %10 ikame oranlarında ultrases geçiş hızları, kontrol numuneye göre daha hızlı olmuştur. 90 günde ise, %20 ikame oranına kadar ultrases geçiş hızlarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

90 günlük, Lif katkılı puzolanik numunelerin ultrases geçiş hızları ise en fazla %1 lif takviyeli, %10 YFC ikameli üretilen kompozit harç numunelerinde 5.78 km/sn ölçülürken, %1 lif takviyeli, %10 UK ikameli üretilen kompozit harç numunelerinde ise 5.62 km/sn olarak ölçülmüştür. Ayrıca, ölçülen ultrases geçiş hızları 4 km/sn değerinden daha büyük olduğundan bütün lif takviyeli kompozit harç numune örnekleri, kaliteli harç sınıfında yer almaktadırlar [33] Bunun sebebi; UK ve YFC ikameli çimento harçlarının ileriki yaşlarda basınç dayanımlarının daha da artmasıdır [36,37]. UK ve YFC ikameli çimento harçlarının, çimento ile su arasındaki reaksiyonlar sonucu dayanım kazandıran C-S-H jellerini oluşturarak, ultrases hızlarının da yüksek çıkmasına sebep olur.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

PET lif katkılı, UK ve YFC ikameli çimento harçları için elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Ağırlıkça bağlayıcı oranın %0.5 %1, %1.5 %2 ve %3 PET lifin en yüksek dayanımı veren %1 PET lif olarak ölçülmüştür.
- %1 PET lif takviyeli çimento harcının, lifsiz kontrol numunesine göre eğilme dayanımında %25,79 oranında artış gerçekleşmiştir.
- Pet lif ikamesini kontrol numuneye göre karşılaştırıldığında, basınç dayanımında %1, eğilme dayanımında ise %2'den sonra bir düşüş görülmüştür.
- 7 günlük %1 PET lif takviyeli UK ve YFC ikameli çimento harçlarının basınç ve eğilme değerlerinin ilk günlerde kontrol numuneye göre düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebin puzolanik reaksiyonların ilk günlerde yavaş olduğundan kaynaklanmaktadır.
- 28 günlük PET lif takviyeli UK ve YFC ikameli çimento harçlarının eğilme ve basınç dayanımları incelendiğinde, UK ve YFC'nin %5 ve %10 ikame oranlarında kontrol numuneye göre yüksek çıkmıştır. En yüksek ikame oranı %5 olarak tespit edilmiştir.

- 90 günlük PET lif takviyeli UK ve YFC ikameli çimento harçlarının basınç dayanımları incelendiğinde, %20 ikame oranına kadar kontrol numuneyi geçtiği ve en iyi ikame oranının UK ve YFC için %10 ikameli çimentolarda olduğu ölçülmüştür.
- 90 günlük PET lif takviyeli UK ve YFC ikameli çimento harçlarının eğilme dayanım verileri incelendiğinde; %20 ikame oranına kadar kontrol numuneyi geçtiği ve en iyi ikame oranının UK ve YFC için %10 ikameli çimentolarda olduğu görülmüştür.
- 28 günlük PET lif takviyeli UK ve YFC ikameli çimento harç numunelerin ultrases geçiş hızı verileri kontrol numuneye göre değerlendirildiğinde %5 ikameli numunenin en yüksek olduğu ve %5 ve %10 UK ve YFC ikameli çimento harçlarının yüksek olduğu ve beton kalitesi “çok iyi” olduğu görülmektedir.
- Basınç dayanım değerleri ile ultrases geçiş hızı veri sonuçlarının birbiriyle örtüştüğü görülmektedir. Lif Katkılı çimento harçlarında, UK ve YFC gibi puzolanik malzemelerin kullanımı liften kaynaklanan boşlukları dolgu etkisi yaratarak daha sıkı bir yapı oluşturmaktadır.
- UK ve YFC ikameli çimento harçları incelendiğinde YFC ikameli çimento harçlarının UK ikameli çimento harçlarının mekanik dayanımlarından daha yüksek çıktığı yapılan çalışmada görülmektedir. Buda YFC ikameli çimento harçlarının UK ikameli çimento harçlarına göre aynı ikame oranında çimento harçları içindeki boşlukları daha iyi doldurduğu yani YFC ikameli numunelerin kompasitesinin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak; PET şişe atıkların değerlendirilmesinde PET liflerin kullanılması, endüstriyel atık olan UK ve YFC'nin çimento endüstrisinde kullanımı ile hem doğal kaynakların azalmasını önlemede, hem de enerji tasarrufu sağlamış olacaktır. Dolayısıyla maliyetlerin düşmesine ve doğaya salınan karbondioksit azalmasına neden olacak atıkların ekonomik ve çevresel açıdan fayda sağlanacaktır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yan, H., Sun, W., & Chen, H. (1999). The effect of silica fume and steel fiber on the dynamic mechanical performance of high-strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 29(3), 423–426.
- [2] Kayali, O., Haque, M. N., & Zhu, B. (2003). Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25(2), 207–213.
- [3] Brandt, A. M. (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures*, 86(1–3), 3–9.
- [4] Köksal, F., Altun, F., Yiğit, I., & Şahin, Y. (2008). Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1874–1880.
- [5] Shannag, M. J. (2000). High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. *Cement and Concrete Composites*, 22(6), 399–406. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00037-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00037-8)
- [6] Banthia, N., Yan, C., & Sakai, K. (1998). Impact resistance of fiber reinforced concrete at subnormal temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 20(5), 393–404. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00015-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00015-8)
- [7] Toutanji, H., McNeil, S., & Bayasi, Z. (1998). Chloride permeability and impact resistance of polypropylene-fiber-reinforced silica fume concrete. *Cement and Concrete Research*, 28(7), 961–968. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00073-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00073-8)
- [8] Borg, R. P., Baldacchino, O., & Ferrara, L. (2016). Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 108, 29–47.



- [9] Ochi, T., Okubo, S., & Fukui, K. (2007). Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*, 29(6), 448–455.
- [10] Fraternali, F., Spadea, S., & Berardi, V. P. (2014). Effects of recycled PET fibres on the mechanical properties and seawater curing of Portland cement-based concretes. *Construction and Building Materials*, 61, 293–302. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.03.019>
- [11] Nili, M., & Afroughsabet, V. (2010). The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 24(6), 927–933. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.11.025>
- [12] Alani, A. M., & Beckett, D. (2013). Mechanical properties of a large scale synthetic fibre reinforced concrete ground slab. *Construction and Building Materials*, 41, 335–344.
- [13] Hsie, M., Tu, C., & Song, P. S. (2008). Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 494(1–2), 153–157.
- [14] Bošnjak, J., Ožbolt, J., & Hahn, R. (2013). Permeability measurement on high strength concrete without and with polypropylene fibers at elevated temperatures using a new test setup. *Cement and Concrete Research*, 53, 104–111. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2013.06.005>
- [15] Rostami, M., & Behfarnia, K. (2017). The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 134, 262–268.
- [16] Afroughsabet, V., & Ozbakkaloglu, T. (2015). Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 94, 73–82.
- [17] Richardson, A.E., Coventry, K., Landless, S. Synthetic and steel fibers in concrete with regard to equal toughness. *Structural Survey*, (2010), 28: p. 355-369.
- [18] Sümer, M. Uçucu kül atıklarının beton üretiminde değerlendirilmesi, I. Ulusal İnşaat & Çevre Sempozyumu, Salihli, Bildiriler Kitabı, (1994), p. 179-185.
- [19] Koca, C. Yüksek performanslı beton üretiminde mikrosilis, curuf, klinker karışımı çimento kullanımı. 4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, (1996), p.381-394.
- [20] Şengül, Ü. Uçucu kül ve çevresel etkileri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, (2001), 7(1): p. 89-104.
- [21] Zhang, P., Li, Q. Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume. *Composites: Part B*, (2013), 45(1): p. 1587–1594.
- [22] Ramezani pour, A.A., Esmaili M., Ghahari S.A., Najafi M.H. Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers. *Construction and Building Materials*, (2013), 44: p. 411-418.
- [23] Yaprak, H., Şimşek, O., Öneş, A. Cam ve çelik liflerin bazı beton özelliklerine etkisi. *Politeknik Dergisi*, (2004), 7(4): p. 353-358.
- [24] Kim, S.B., Yi, N.H., Kim, H.Y., Kim, J.H.J., Song, Y.C. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, (2010), 32(3): p. 232–240.
- [25] Foti, D. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and Building Materials*, (2011), 25(4): p. 1906–1915.

- [26] TS EN 197-1: Cement–Part 1: Composition, specification and conformity criteria for common cements. Turkish Standard Institution, Ankara, (2012).
- [27] Tayyar A. E. & Üstün S. Geri Kazanılmış Pet'in Kullanımı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2010; 16(1): 53-62.
- [28] TS EN 196-1: Methods of testing cement–Part 1: Determination of strength. Turkish Standard Institution, Ankara, (2016).
- [29] ASTM C 597: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, Annual Book of ASTM Standard, (February 2003).
- [30] Fanella D.A. and Naaman A.E., "Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Concrete in Compression", Journal of ACI Materials, 82 (4): 475 – 483, (1985)
- [31] Khaloo A.R. and Afshari M., "Flexural Behavior of Small Steel Fiber Reinforced Concrete Slabs", Cement and Concrete Composites 27: 141–149, (2005).
- [32] Uygunoğlu, T., "Investigation of microstructure and flexural behavior of steel-fiber reinforced concrete", Materials and Structures, 41(8): 1441-1449, (2008).
- [33] Erdoğan T.Y., "Beton", ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayn. ve İletişim Şti, 130-160, Ankara, Mayıs, (2003).
- [34] Felekoğlu, B. (2009). Yüksek performanslı beton tasarımı, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İzmir
- [35] Atahan N.A., Pekmezci B.Y., Tuncel E.Y. 'Behavior of PVA fiber-reinforced cementitious composites under static and impact flexural effects', Journal of Materials in Civil Engineering, 25(10): 1438-1445, (2013).
- [36] Liu J., Qiu Q., Xing F., Pan D. Permeation Properties and Pore Structure of Surface Layer of Fly Ash Concrete. Materials, 7, 4282-4296, 2014.
- [37] Ikram M., 2016. High volume fly ash strength development in concrete: a review. International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering, 5 (2), 52-57.
- [38] Kim J.H., Lee J.J., Yoon J.Y., Lyoo W.S., Kotek R., (2001), "Alkaline Depolymerization of Poly(trimethylene terephthalate)", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 82, 99–107
- [39] Günay, K. (2018). Antibakteriyel Özelliğe Sahip Modifiye Edilmiş Poli(Etilen Teraftalat) Liflerin Sentezi ve Karakterizasyonu
- [40] Indian Standard IS 13311-1, Method of Non-destructive testing of concrete, Part 1: Ultrasonic pulse velocity [CED 2: Cement and Concrete], Bureau of Indian Standards Manak Bhavan, 9 Bahadur Shah Zafar Maro New Delhi 110002, (1992).

# The Investigation of Bi-Ga Partial Replacement Effect on Magnetic, Mechanical and Microstructural Properties of $\text{Bi}_{(1,8-x)}\text{Pb}_{0,2}\text{Ga}_x\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ Superconductor

Şükrü ÇAVDAR<sup>1,\*</sup>  Neslihan TURAN<sup>1</sup>  Selçuk İZMİRLİ<sup>2</sup>  Haluk KORALAY<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Gazi University, Faculty of Science, Department of Physics, 06500, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Advanced Technologies, 06500, Ankara, Türkiye

## Graphical/Tabular Abstract

### Article Info:

Research article  
Received: 8.06.2022  
Revision: 5.07.2022  
Accepted: 12.08.2022

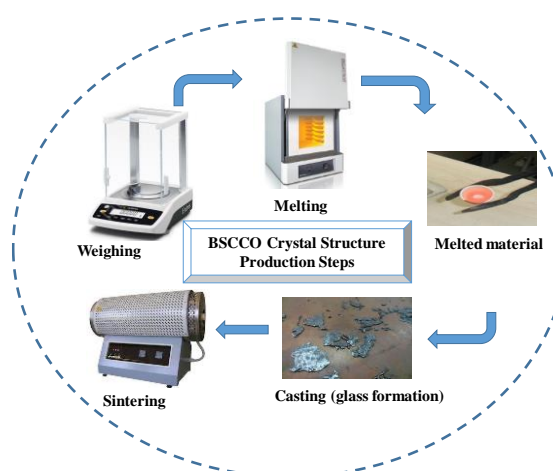
### Highlights

- Vickers Microhardness.
- AC susceptibility

### Keywords

Superconductivity,  
Bi-2212,  
BSCCO,  
Bi-Ga

This article presents the change in the structural, mechanical and magnetic properties of Bi-Ga partial displacement on the crystal structure of the BSCCO 2212 superconducting system. First, the production steps of the BSCCO crystal structure are explained. Then, samples with different Bi-Ga partial displacement ratios were produced. The morphological properties of the materials were examined with SEM images, and the structural properties of the materials were examined with the XRD method. In addition, mechanical properties were determined by Vickers microhardness measurements and magnetic properties were determined by susceptibility measurements.



**Figure A.** Process steps used to produce the  $\text{Bi}_{1,8-x}\text{Ga}_x\text{Pb}_{0,12}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  superconducting system

**Purpose:** The main purpose of this study is to examine the effect of Bi-Ga partial displacement on the morphological, structural, mechanical and magnetic properties of the BSCCO superconductor structure.

**Theory and Methods:** In this study, samples with basic formula  $\text{Bi}_{1,8-x}\text{Ga}_x\text{Pb}_{0,12}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ ,  $x=0, 0,3$  and  $0,8$ , were prepared using the melt casting method, and were named as FGa0, FGa03, FGa08, respectively. In order to investigate the effect of Bi-Ga partial displacement; structural properties with XRD, morphological properties with SEM, mechanical properties with Vickers microhardness measurements, and superconductivity properties with magnetic measurements were investigated.

**Results:** In XRD measurements, impurity peaks were observed in XRD diffractoms with the increase of Ga ratio. When the SEM images were examined, amorphous structures were formed and the porosity increased with the increase in the Ga ratio. In the susceptibility measurement results depending on the temperature;  $T_c$  values of the samples; It was measured as 84,5 K for FGa0, 76,4K for FGa03 and 69,5K for FGa08. In the microhardness measurements of the materials, it was determined that the hardness of the materials decreased due to the increase in the Ga ratio. It was concluded that as the load increased, the hardness values also increased and all samples showed RISE effect.

**Conclusion:** It was observed that with the partial displacement of Bi-Ga in the Bi-2212 phase, impurities appeared in the crystal structure. The decrease in the critical temperature value with the increase of the partial displacement ratio shows that the superconductivity property decreases with the Ga effect. The most suitable models for materials hardness analysis are Hays Kendall and IIC models. However, since the RISE effect was observed in the samples, it was seen that the IIC model was the most successful method in understanding the hardness of the samples.

**Fen Bilimleri Dergisi**  
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

## The Investigation of Bi-Ga Partial Replacement Effect on Magnetic, Mechanical and Microstructural Properties of $\text{Bi}_{(1,8-x)}\text{Pb}_{0,2}\text{Ga}_x\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ Superconductor

Şükrü ÇAVDAR<sup>1,\*</sup>  Neslihan TURAN<sup>1</sup>  Selçuk İZMİRLİ<sup>2</sup>  Haluk KORALAY<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Gazi University, Faculty of Science, Department of Physics, 06500, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Advanced Technologies, 06500, Ankara, Türkiye

### Abstract

Since the BSCCO 2212 superconducting system has an open structure due to the addition and partial replacement methods, many studies have been carried out and the articles have been published. In this study, the effect of Ga on the superconductivity of the structure was investigated by measuring the susceptibility on the samples obtained by increasing the Ga ratio by performing Bi-Ga partial replacement at a certain ratio in the BSCCO 2212 superconductor. Vickers micro hardness measurements were used to examine the mechanical properties of each sample. x-ray diffraction (XRD) analysis results were evaluated in order to determine the structural properties of the samples and crystal structure formations were observed by scanning electron microscope (SEM) images.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
Başvuru: 8.06.2022  
Düzeltilme: 5.07.2022  
Kabul: 12.08.2022

### Keywords

*Superconductivity,  
Bi-2212  
BSCCO  
Bi-Ga*

### Anahtar Kelimeler

*Süperiletkenlik  
Bi-2212  
BSCCO  
Bi-Ga*

### $\text{Bi}_{(1,8-x)}\text{Pb}_{0,2}\text{Ga}_x\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ Süperiletken Yapıda Bi-Ga Kısmi Değişiminin Manyetik, Mekanik ve Mikroyapısal Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

### Öz

BSCCO 2212 süperiletken sistemi, ekleme ve kısmi değiştirme yöntemlerine açık bir yapıya sahip olduğundan, birçok çalışma yapılmış ve makaleler yayınlanmıştır. Bu çalışmada, BSCCO 2212 süperiletkeninde belirli bir oranda Bi-Ga kısmi yer değişimi yapılarak Ga oranının artırılması ile elde edilen numuneler üzerindeki duyarlılığın ölçülmesi ile Ga'nın süperiletken yapı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Her numunenin mekanik özelliklerini incelemek için Vickers mikro sertlik ölçümleri kullanılmıştır. Örneklerin yapısal özelliklerini belirlemek amacıyla x-ışını kırınım (XRD) analiz sonuçları değerlendirilmiş ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ile kristal yapı oluşumları gözlenmiştir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

1986 yılında Cu-O tabakalı süperiletken malzemelerin keşfi, 1987 yılında  $T_c$  değeri 110 K'e kadar ulaşabilen Cu-O tabakalı Tl-Ba-Ca-Cu-O, Hg-Ba-Ca-Cu-O ve Bi-Sr-Ca-Cu-O (BSCCO) gibi yüksek sıcaklık süperiletkenlerin (HTS) bulunması, aynı zamanda bunların sıvı azotla soğutulabilmeleri, çalışmaların bu alanda yoğunlaşmasına sebep olmuştur [1]. İçerisinde nadir element bulunmayan bizmut tabanlı BSCCO süperiletkenleri üzerinde pek çok çalışma yayınlanmıştır [2,3]. Bizmut tabanlı süperiletkenlerin Bi-2201, Bi-2212 ve Bi-2223 gibi farklı fazlarının bulunması ve bunların katkılama ve kısmi yer değişimi uygulamalarına elverişli olması ile geniş bir çalışma yelpazesi oluşturmaktadır [4-8].

Süperiletken yapıların keşfi ve gelişimi deneysel çalışmalar üzerine temellendirilmiştir. Özellikle Cu-O tabakalı yüksek sıcaklık süperiletkenlere katkılama veya kısmi yer değiştirme yöntemleriyle birçok yeni yüksek sıcaklık süperiletken (HTS) form geliştirilmiştir [9-14]. BSCCO malzemelere molibden, vanadyum, selenyum, sodyum, potasyum, kobalt, tungsten, seryum, neodimyum, gadolinyum gibi metal, yarı metal ve ağır metal katkılamaları yapılarak birçok ara form oluşturulmuş bunların elektriksel ve manyetik özellikleri incelenerek kritik sıcaklık veya kritik akım yoğunluklarının değişimleri incelenmiştir [15,16]. Önceki

yıllarda BSCCO yapılara farklı deneysel yöntemlerle Ga katkılaması yapılmış ve malzeme üzerindeki etkisi incelenmiştir [17].

Bu çalışmada, Pb katkılı BSCCO 2212 süperiletkeni;  $x=0, 0,3$  ve  $0,8$  olacak şekilde galyum-bizmut kısmi yer değişimi ile  $\text{Bi}_{(1,8-x)}\text{Pb}_{0,2}\text{Ga}_x\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  stokiyometrik oranına sahip tozlar ile eritme-döküm yöntemi kullanılarak cam malzemeler üretildi. Manyetik alınganlık ölçümleri yapılarak, kritik sıcaklık değerleri belirlenmiş, galyum-bizmut kısmi yer değişiminin süperiletkenlik ve mekanik özelliği üzerindeki etkisi araştırıldı. Vickers mikrosertlik ölçüm sonuçlarından elde edilen verilerle birlikte Meyer, Hays-Kendall ve IIC modeli kullanılarak her bir örneğin mekanik özellikleri incelenmiş, malzemeye en uygun model belirlenmiştir. Örneklerin yapısal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla XRD ölçümleri yapılarak malzemelerde oluşan bileşik türleri ve kristal yapıların özellikleri ile SEM görüntüleriyle de yüzey morfolojisi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada malzeme üretimi için eritme-döküm tekniği kullanılmıştır [18-23]. Bi-Ga kısmi yer değişiminin süperiletkenlik üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi amacıyla, temel formülü  $\text{Bi}_{1,8-x}\text{Pb}_{0,2}\text{Ga}_x\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  olacak şekilde,  $x=0; 0,3$  ve  $0,8$  değerleri verilerek üretilen numuneler sırasıyla FGa0, FGa03, FGa08 olarak adlandırılmıştır.

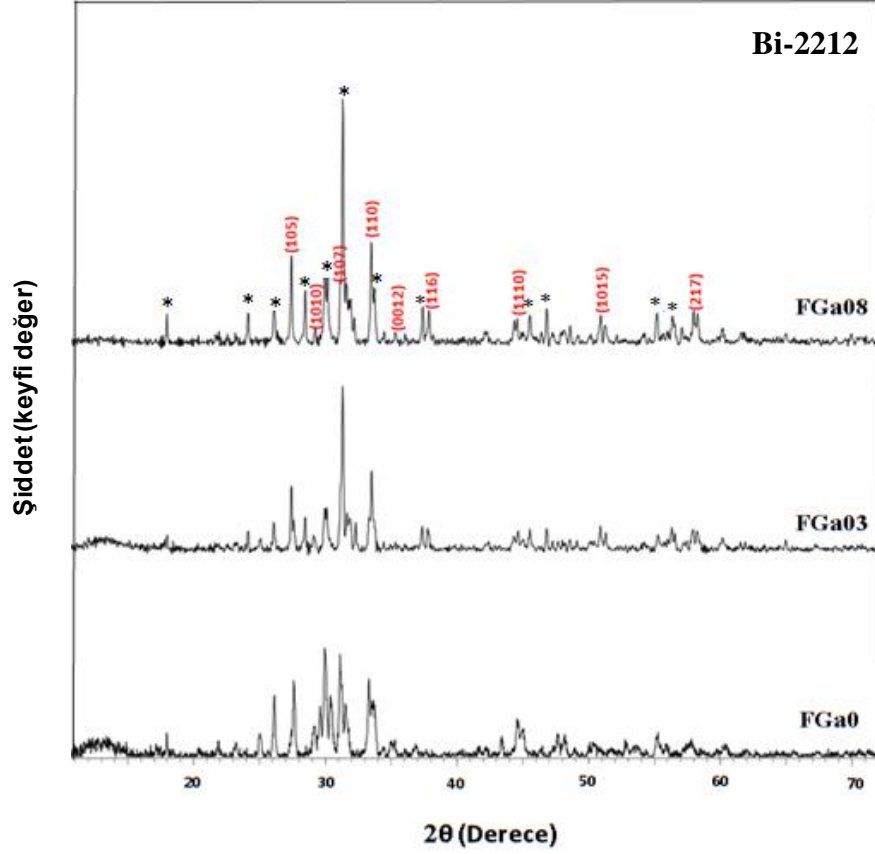
$\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{PbO}$  ve  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  bileşiklerinin %99,9 saflıkta tozları kullanılarak mol kütlelerine göre hesaplamalar yapılarak 10'ar gramlık tozlar hazırlanmıştır. Tozlar Fritsch Pulverise TTE7 marka otomatik karıştırma cihazında 400 rpm hızında 120 dakika saat yönünde, 120 dakika ters yönde olmak üzere toplam dört saat karıştırılmıştır. Cihazın içerisindeki agatların her birine 10 gramlık numune 14 adet bilye ile konularak karıştırılıp homojen bir hal alması sağlanmıştır. Örnekler, kapaklı kaplara alınarak eritme işlemi için hazır hale getirilmiştir. Yüksek sıcaklık fırınında 1423 K'de 60 dakika bekletilen numuneler, fırından çıkarılarak önceden soğutulmuş (255 K) bakır levhaların arasında sıkıştırılarak, siyah renkli amorf yapıda 0,6-0,8 mm kalınlığında cam malzemeler elde edilmiştir. Hazırlanan cam numuneler Protherm marka üç bölgeyi yatay tüp fırına konularak 1118 K'de 120 saat boyunca sinterlenmiştir.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS & DISCUSSION)

### 3.1. Yapısal Analiz (Structural Analysis)

Bu çalışmada hazırlanan numunelerin XRD ölçümleri Bruker D8 Advance Difraktometre cihazında,  $\text{Cu-K}\alpha$  ışınması kullanılarak,  $2^\circ\text{dk}^{-1}$  tarama hızıyla  $2\theta=4-70^\circ$  açıları arasında yapılmıştır. Elde edilen veriler EVA Bruker 14.0.0.0 programı yardımıyla ICDD PDF2-2002 kütüphanesinde bulunan kayıtlarla eşleştirilerek kristallerin analizleri yapılmıştır [24].

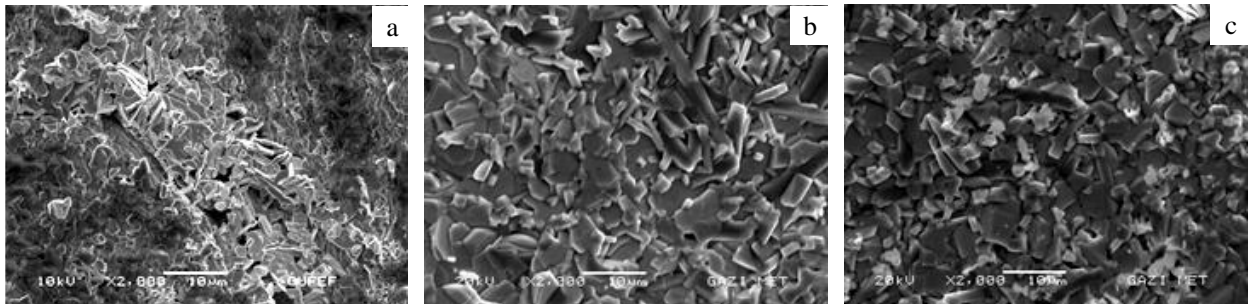
Şekil 1'de FGa0, FGa03 ve FGa08 numunelerine ait XRD desenleri bir arada verilmiştir. Burada eşleşen piklerden ana yapının Bi-2212 (046-4545-ICDD) fazı olduğu, (\*) ile belirtilen safsızlık pikleri olarak,  $\text{Ca}_5\text{Sr}_9\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$  (048-1501-ICDD) ve  $\text{Pb}_{0,4}\text{Sr}_{1,7}\text{Bi}_{1,9}\text{CuO}_{6+x}$  (047-0737-ICDD) yapı içerisinde olduğu analiz edilmiştir [25].



Şekil 1. FGa0, FGa03 ve FGa08 numunelerine ait XRD desenleri

### 3.2. Micro Yapısal Özellikler (Micro Structural Properties)

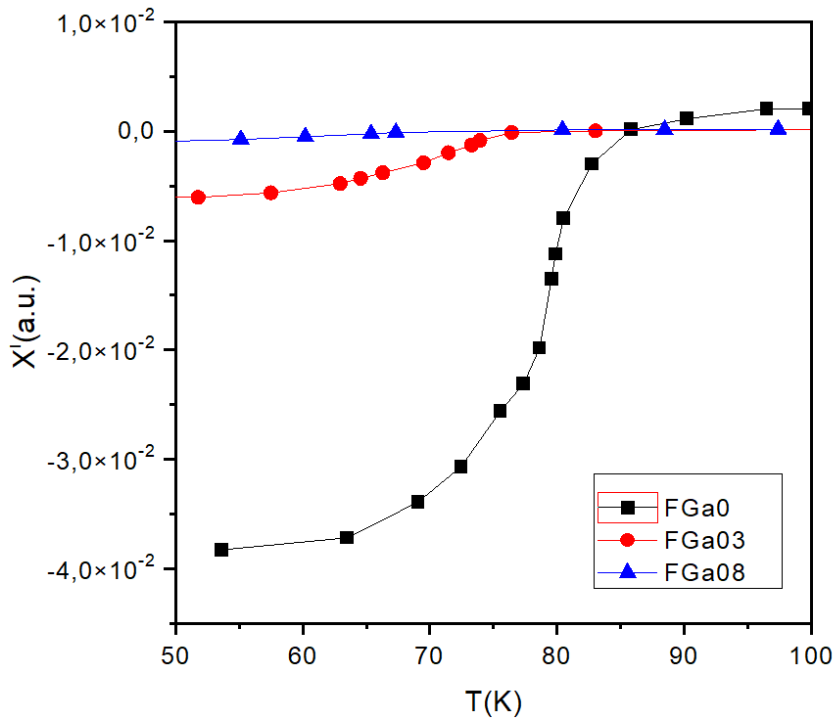
Şekil 2’de verilen SEM görüntülerinde malzemelerin yüzey morfolojileri incelenerek Ga katkısının yapı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 2(a)’da FGa0 numunesinin SEM görüntülerinde parlak yapraklı kümeler malzemeye süperiletkenlik özelliği veren kristal yapılardır [27]. Yapının ince ve geniş yüzeyli kristallerden oluştuğu, etrafında ise kümelenmiş koyu renkli amorf kısımların varlığı görülmektedir. Şekil 2(b)’de FGa03 yapraklı kristal yapılarla birlikte, amorf yapıların da kristal yapıların üzerini kaplamaya başladıkları görülmektedir. Şekil 2(c)’de Ga oranının en fazla olduğu FGa08 numunesinde oldukça düzensiz bir şekilde ortaya çıktığı, amorf yapıların üst üste birikerek malzeme yüzeyinde oldukça fazla yer kapladığı görülmektedir. Belirli bir kurala uymayan, farklı büyüklüklere sahip kristaller, birbiri üzerinde büyümüş amorf yapıları Şekil 2(c)’de görülmektedir.



Şekil 2. (a) FGa0, (b) FGa03, (c) FGa08 numunelerinin 2000 büyütmeli SEM görüntüleri

### 3.3. Magnetik Karakterizasyon (Magnetic Characterization)

Malzemelerin süperiletken özelliklerinin belirlenebilmesi için “Lake Shore 7300 AC Susceptometer” cihazı ile 125 Hz, AC:160 A/m manyetik alan altında alınganlık ölçümleri yapılmış ve sonuçlar Şekil 3’de verilmiştir. Burada, FGa0 numunesinin süperiletkenliğe geçişinin 85 K’de başladığı görülmektedir. Bu, Bi-2212 fazı için literatüre uyumlu bir kritik sıcaklık değeridir [28,29]. SEM sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde,  $\text{Bi}_{1,8}\text{Pb}_{0,2}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  formülüne göre elde edilen katkısız malzemede amorf yapılar bulunmasına rağmen, malzeme genel olarak ideal bir Bi-2212 fazı olarak değerlendirilebilir. Yine sıcaklığa bağlı manyetik karakterizasyon grafiğinde FGa03 ve FGa08 numunelerinin kritik sıcaklık değerleri sırasıyla 76,4 K ve 69,5 K olarak belirlenmiştir. Kritik sıcaklık değerindeki bu azalma, kısmi yer değişimi oranının artmasına bağlı olarak, amorf yapıların ortaya çıkması ve taneciklerin arasındaki porozite artışının kritik sıcaklık değerine olumsuz yönde etkilediği sonucunu ortaya çıkmaktadır. Aynı nedenlerden dolayı Ga oranının artmasına bağlı olarak FGa08 numunesinde, diğer örneklerle nispetle, sıcaklığa bağlı olarak manyetik alınganlıkta belirgin bir artış görülmektedir.



Şekil 3. Manyetik alınganlık ölçüm sonuçları

### 3.4 Mekanik Özellikler (Mechanical Properties)

Bu çalışmada, eritme-döküm yöntemi kullanılarak elde edilen cam malzemelerde, Bi-Ga kısmi yer değişimi ile mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Her bir numuneye, oda sıcaklığında 0,245 N; 0,490 N; 0,980 N; 1,960 N ve 2,940 N’luk yükler uygulanarak yüzeyde oluşan çentik boyutuna göre;

$$Y \approx \frac{H_v}{3} \quad (1)$$

$$E = 81.9635H_v \quad (2)$$



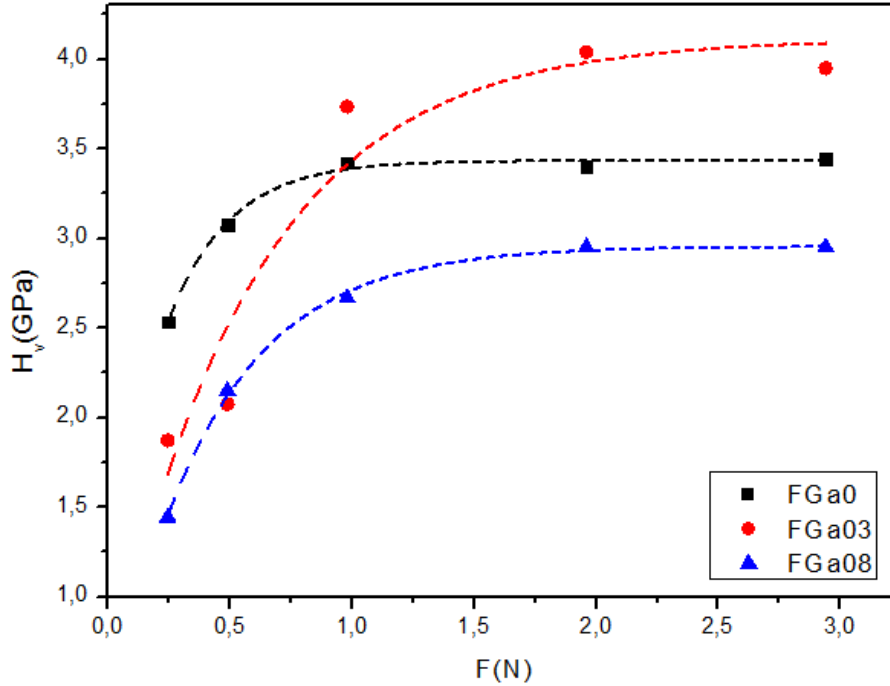
$$K_{IC} = \sqrt{2Ea} \quad (\alpha, \text{ yüzey enerjisi}) \quad (3)$$

eşitlikleri kullanılarak farklı yükler altındaki Vickers mikrosertlik ( $H_v$ ), elastik modülü ( $E$ ), gerilme ( $Y$ ) ve kırılma dayanımı ( $K_{ic}$ ) değerleri hesaplanıp Çizelge 1’de verilmiştir [30].

**Çizelge 1.** Numunelere uygulanan yüke bağlı olarak  $H_v$ ,  $E$ ,  $Y$  ve  $K_{ic}$  değerleri

Numune	F (N)	d (µm)	$H_v$ (GPa)	E (GPa)	Y (GPa)	$K_{ic}$ (Pa/m <sup>1/2</sup> )
FGa0	0,245	13,392	2,533	207,614	0,844	-176,236
	0,490	17,183	3,077	252,202	1,026	-194,241
	0,980	23,042	3,423	280,561	1,141	-204,871
	1,960	32,705	3,398	278,512	1,133	-204,121
	2,940	39,785	3,444	282,282	1,148	-205,498
FGa03	0,245	15,580	1,872	153,436	0,624	-308,432
	0,490	20,928	2,075	170,074	0,692	-324,725
	0,980	22,055	3,736	306,216	1,245	-435,722
	1,960	29,998	4,039	331,051	1,346	-453,047
	2,940	37,153	3,95	323,756	1,317	-448,027
FGa08	0,245	17,747	1,443	118,273	0,481	-217,507
	0,490	20,563	2,149	176,140	0,716	-265,435
	0,980	26,105	2,667	218,597	0,889	-295,700
	1,960	35,095	2,951	241,874	0,984	-311,046
	2,940	42,980	2,951	241,874	0,984	-311,046

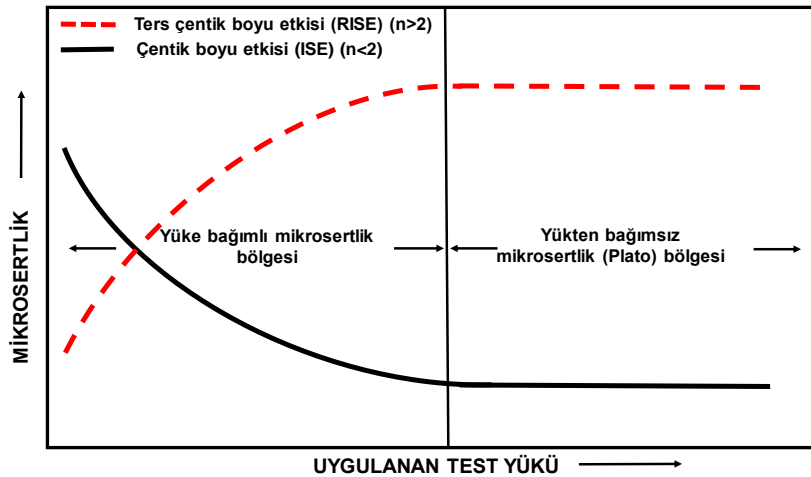
Çizelge 1’de örnekler ayrı ayrı değerlendirildiğinde; mikrosertlik değerleri, uygulanan yük ile birlikte artış göstermektedir. Kuvvetin artmasıyla şekil değişiminin ölçüsü olan elastik modülü değerlerinin, gerilme ve kırılma dayanım değerlerinin artması beklenen bir sonuçtur. Elastik modül değerleri incelendiğinde yüke bağlı olarak arttığı, benzer olarak gerilme değerlerinde de görülmektedir. Mikrosertliğe bağlı olarak hesaplanan bu iki değer, uygulanan kuvvete göre fit edilen grafikleri,  $H_v$ -F grafiği ile örtüşmektedir. Bu nedenle, bütün numunelerde gerilim ve elastik modülü, sertlik ile orantılı olarak uygulanan kuvvetle birlikte artış göstermiştir. Ga oranının artması ile E ve Y değerlerindeki azalmalar dikkate alındığında, esneklik ve elastikiyetin azalması, numunelerin giderek daha yumuşak olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Uygulanan yüke bağlı numunelerdeki mikrosertlik değişimi

Bütün numunelerde uygulanan yüke bağlı olarak mikrosertlik değerinin artması, ters çentik boyutu etkisi (RISE) davranışının bir göstergesidir [31-33]. Şekil 4'de malzemelerin tamamının yaklaşık 2 N'da doyum bölgesi olan platoya yani yükten bağımsız bölge ulaştığı görülmektedir. Elde edilen bu mekanik özellikler farklı teorik yaklaşımlar kullanılarak malzemelerin bu teorilere uygunlukları incelenmiştir.

Mikrosertlik ölçüm sonuçları değerlendirilirken “çentik boyutu etkisi” (ISE) adı verilen çentici boyutunun malzeme üzerindeki etkisi dikkate alınmıştır. Yükün uygulanması ile malzemede çentik oluşumu sırasında yüzeyde bir miktar gevşeme olmakta ve sertliği azaltmaktadır. ISE davranışında, uygulanan yükün artmasıyla beraber, sertlikte bir azalma beklenmektedir. Aynı zamanda ISE, çentme sırasında esneme, bölgede yığılma ile sertleşme, çentici ile sürtünme gibi birçok etkenden de etkilenebilmektedir. Eğer malzeme sertliği, uygulanan yükün artmasıyla birlikte artıyorsa, “ters çentik boyutu etkisi” (RISE) davranışı gösteriyor demektir. Şekil 5'de “ISE” ve “RISE” davranışı gösteren malzemelerin yüke bağlı sertlik grafikleri verilmiştir. Malzemelerin uygulanan yüke bağlı gösterdikleri bu tepkiler Meyer, Hays-Kendall, IIC teorik modelleri kullanılarak incelenmiştir.



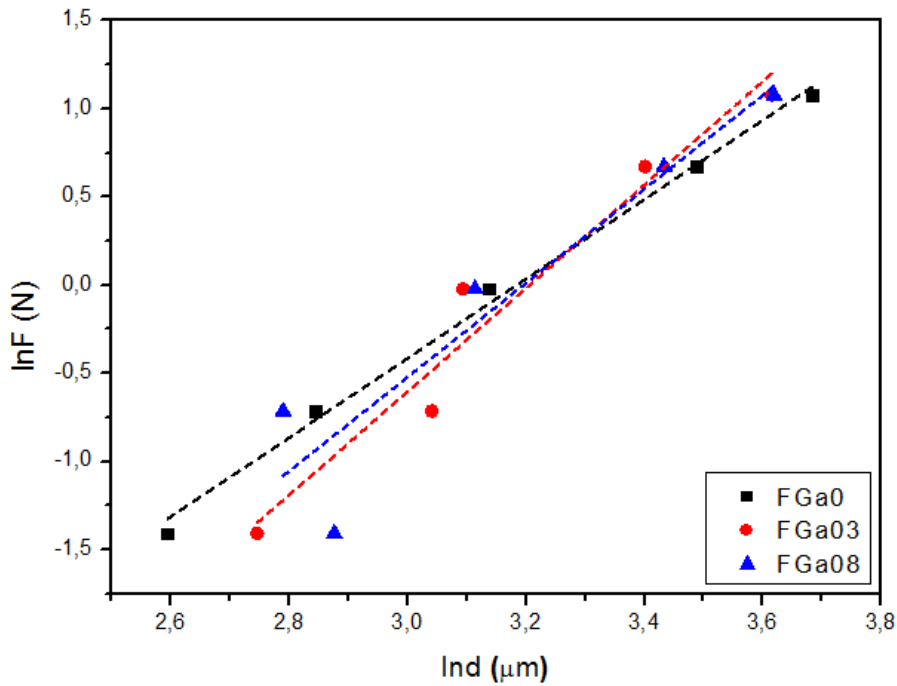
Şekil 5. ISE ve RISE davranışlarının yük-sertlik ilişkisi

### Meyer Modeli (Meyer Model)

Temelde çentik boyutu etkisi (ISE) özelliği gösteren malzemelerin davranışlarını anlatmada kullanılan bu yöntem, ters çentik boyutu etkisi (RISE) davranışının anlaşılmasında da fikir verebilmektedir. Meyer üssü olarak adlandırılan  $n_k$ , ISE/RISE davranışı hakkında fikir veren bir değer olup “Eş.4” kullanılarak çizilen mikrosertlik grafiğinde fit edilen eğrilerin eğiminden hesaplanmaktadır.

$$F = Ad^{n_k} \quad (4)$$

Doğruların düşey eksenini kestiği nokta ise  $A_{1k}$  değerini verir. Şekil 6’da bütün numunelerin  $\ln F - \ln d$  grafikleri fit edilerek  $n_k$  ve  $A_{1k}$  değerleri hesaplanmıştır.



**Şekil 6.** Numunelerin Meyer modeline göre  $\ln F - \ln d$  grafiği

Ölçümü yapılan numuneler için Meyer üssünün 2’den küçük çıkması, yüke bağlı karakterinin ISE davranışı gösterdiğini, 2’den büyük çıkması ise sertliğin uygulanan yüklerle arttığını yani numunenin RISE davranışı eğiliminde olduğunu açıklamaktadır. Çizelge 2’de hesaplanan veriler değerlendirildiğinde, Meyer üssü olarak nitelendirilen  $n_k$  değeri tüm numuneler için 2’den büyük çıkmıştır. Bu verilere göre numunelerin tamamı RISE davranışı göstermektedir [34,35].

**Çizelge 2.** Meyer modeline göre deneysel verilerden elde edilen  $n_k$ ,  $\ln A_{1k}$  ve  $H_v$  değerleri

Numuneler	Eğim $n_k$	$\ln A_{1k}$ (GPa)	$H_v$ (GPa)
FGa0	2,250	-7,164	3,423 - 3,444
FGa03	2,932	-9,399	3,950 - 4,039
FGa08	2,671	-8,518	2,667 - 2,951

Ayrıca  $n_k > 1,6$  olan malzemeler yumuşak olarak adlandırılmaktadır. FGa0, FGa03 ve FGa08 numunelerinin  $n_k$  değerleri 2,250-2,671 arasında hesaplanmıştır. BSCCO malzemelerinin genel özelliği olan tel ve şerit halinde kullanılabilmelerini sağlayan yumuşaklık bu malzemelerde görülmektedir.

### Hays-Kendall Modeli (Hays-Kendall Model)

Hays ve Kendall tarafından geliştirilen bu modele göre, kalıcı deformasyonun olabilmesi için “W” minimum bir yük değerinin olması gerekmektedir. Modele göre bu “W” değerinin altında malzemede elastik deformasyon, üzerinde ise plastik deformasyonun gözlenebileceği savunulmuştur [36]. Gane ve Bowden değişik malzemelerle yaptıkları deneylerde kritik yük değerine ulaşına kadar çentigin malzemede iz bırakmadığı, bu değer üzerinde ise çentik büyüklüğünde artış gözlendiğini fark etmişlerdir [37].

Bu modele göre, uygulanan yükün yüzeyde bıraktığı çentik büyüklüğünün, numunelere uygulanan yük olan “F” ile değil;

$$F_{etkin} = F - W_{HK} \quad (5)$$

eşitliğiyle hesaplanan etkin yük “ $F_{etkin}$ ” ile orantılı olduğu anlaşılmıştır. “Eşitlik 6” bu etkiyi göstermektedir.

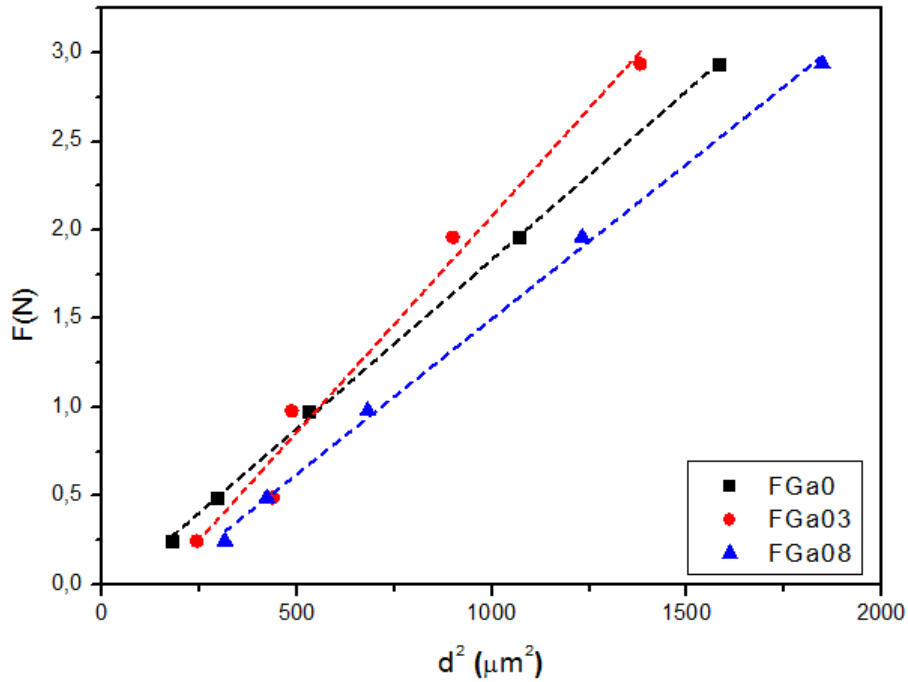
$$F - W_{HK} = A_{1HK}d^2 \quad (6)$$

Burada  $A_{1HK}$  uygulanan yükten bağımsız bir sabittir.  $W_{HK}$  ve  $A_{1HK}$  değerleri  $F-d^2$  grafiğinden hesaplanır. Bu modelde yükten bağımsız sertlik değeri ( $H_{HK}$ ):

$$H_{HK} = 1854,4 A_{1HK} \quad (7)$$

ile hesaplanmaktadır.  $W_{HK}$  değerinin pozitif çıkması durumunda, malzemeye uygulanan yükün hem plastik hem de elastik deformasyon oluşturabildiğini göstermektedir [38].

Bu yaklaşımda, malzemelerin sertlik özelliklerinin anlaşılabilmesi için  $F-d^2$  grafiği kullanılarak  $A_{1HK}$  ve yükten bağımsız sertlik değeri  $W_{HK}$  hesaplanmaktadır.



Şekil 7 Hays ve Kendall modeline göre numunelerin  $F-d^2$  grafiği

Şekil 7’de verilen grafikten yola çıkarak, hazırlanan numunelerin tamamının  $W_{HK}$  değerleri hesaplanmış, Çizelge 3’te görüldüğü gibi negatif çıkmıştır. Bu da plastik deformasyonun oluştuğunu, elastik

deformasyonun oluşmadığını belirtmektedir. Hesaplanan  $H_{HK}$  değerleri, plato bölgesi içerisinde olmasa da, bu değerlere yakın çıkmıştır

**Çizelge 3.** Numunelerin Hays ve Kendall modeline göre elde edilen sonuçları

Numuneler	$A_{IHK} \times 10^{-3}$ (GPa)	$W_{HK}$ (N)	$H_{HK}$ (GPa)	$H_y$ (GPa)
FGa0	1,91	-0,071	3,542	3,398 - 3,444
FGa03	2,44	-0,357	4,524	3,95 - 4,039
FGa08	1,75	-0,252	3,245	2,667 - 2,951

### IIC Modeli (IIC Model)

Malzemelerin RISE davranışını açıklamada etkili olan IIC modeli, Li ve Bradt tarafından geliştirilmiştir [39]. Bu modelde, maksimum derinlikte uygulanan test yükünü dengeleyen toplam numune direnci, dört ana unsurdan oluşur. Bunlar; Elastik deformasyon, plastik deformasyon, numune yarıkları ve ara yüzeylerde uç ya da numune kaymasıdır.

Bu teoriye göre ISE davranışına, elastik etkiler ve sürtünme neden olurken, RISE davranışına ise çentik yarıkları neden olmaktadır. Bradt, PSR modelinde de sürtünme ve elastikiyetin numune üzerindeki etkisine değinmiştir. IIC modelinde sertlik değeri;

$$H_v = \lambda_1 K_1 \left( \frac{F}{d^2} \right) + K_2 \left( \frac{F^{\frac{5}{3}}}{d^3} \right) \quad (8)$$

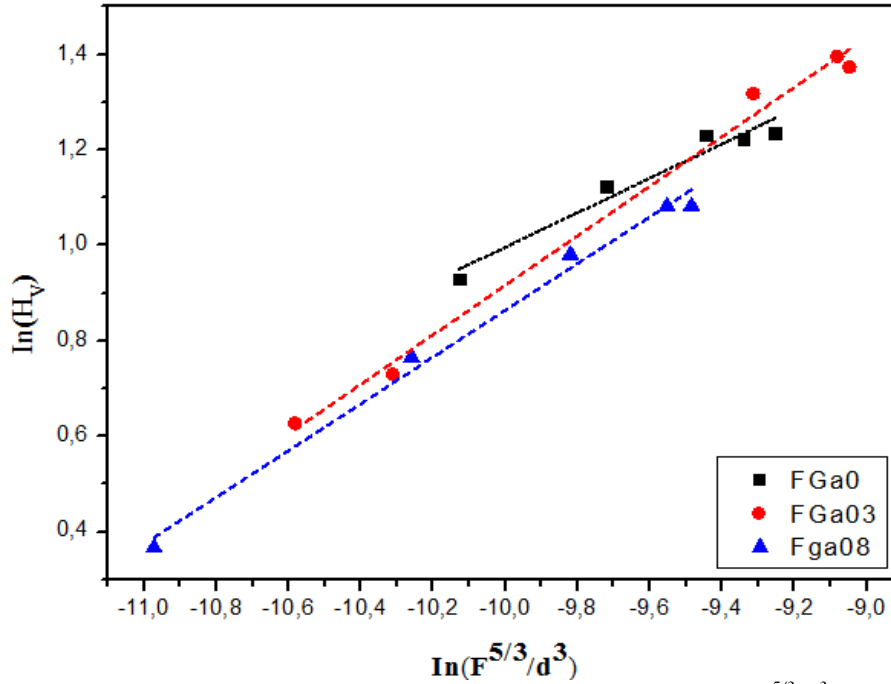
eşitliğiyle hesaplanır.

Eşitlikte gösterilen  $d$  izin çapı,  $\lambda_1$ ,  $K_1$  ve  $K_2$  sabitlerdir.  $K_1$  çentici şekline bağlı bir değerken,  $K_2$  uygulanan yüke bağlıdır.

Plastik malzemelerin ideal formunda  $H_v = K_1(F/d^2)$ ,  $\lambda_1 = 1$  ve  $K_2(F^{5/3}/d^3) = 0$  iken, kırılğan katılar için  $H_v = K_2(F^{5/3}/d^3)$  ve  $\lambda_1 = 0$ 'dır. Burada  $d = 7h$  olarak alınabilir. Bu eşitlikte,  $h$ , çentici yüzeyde oluşturduğu izin derinliğidir. Eğer numune kırılğan bir malzeme ise Eşitlik 9'da belirtildiği gibi eşitliğin ikinci kısmı kullanılarak sertlik değeri hesaplanır.

$$H_v = K \left( \frac{F^{\frac{5}{3}}}{d^3} \right)^m \quad (9)$$

“Eş. 9” da  $K$  ve  $m$  değerleri yükten bağımsız sabitlerdir ve  $\ln(H_v) - \ln(F^{5/3}/d^3)$  grafiği çizilerek elde edilir. Grafikteki her bir numune için çizilen doğrunun eğimi olan  $m$  değeri,  $m > 0,6$  iken numune normal ISE davranışı gösterirken,  $m < 0,6$  olduğunda ise RISE davranışı gösterir. Bu davranışı gösteren malzemelerin sertliklerini açıklamada kullanılan en uyumlu sonuçları veren bu yöntemde,  $\ln(H_v) - \ln(F^{5/3}/d^3)$  grafiğinin eğim ve kesim noktalarından yararlanarak yükten bağımsız  $m$  ve  $K$  sabitleri hesaplanmıştır.



Şekil 8. Numunelerin IIC modeline göre  $\ln(H_v)$ - $\ln(F^{5/3}/d^3)$  grafiği

IIC modeline göre çizilen grafiğin eğimi olan  $m$  değeri, 0,6'dan büyük olduğu durumlarda iken numuneler ISE davranışı gösterirken,  $m < 0,6$  olması durumunda ise RISE davranışı göstermektedir. Şekil 8'deki grafiğe göre yapılan ölçümler sonucunda bütün numuneler için  $m$  üssü 0,6'dan küçük çıkmıştır. Bu da malzemelerin RISE davranışı gösterdiklerini ifade etmektedir. Yapılan hesaplamalarla elde edilen sonuçlar Çizelge 4.de verilmiştir.

Çizelge 4. IIC modeline göre numunelerin en uygun sonuçları

Numuneler	$m$	$K \times 10^4$	$H_{IIC}$ (GPa)	$H_V$ (GPa)
FGa0	0,361	9,995	3,174	3,398 - 3,444
FGa03	0,519	4,470	3,133	3,736 - 4,039
FGa08	0,490	3,182	2,432	2,667 - 2,951

IIC modeline göre hesaplanan sertlik değerleri, plato bölgesi içerisinde olmasa da, bu değerlere çok yakın çıkmıştır.

Vickers mikrosertlik ölçüm sonuçları ile birlikte, bütün modellere göre hesaplanan sertlik değerleri, Çizelge 5'de beraber verilmiştir. Yapılan mikrosertlik hesaplamalarının tamamında numunelerin RISE davranışı gösterdiği sonucu çıkmaktadır. Fakat PSR modelinde hesaplanan sertlik değerleri plato bölgesinden oldukça uzaktır. Bu nedenle bu modeller numuneler için uygun değildir. Hays-Kendall ve IIC modellerinde ise elde edilen sertlik değerleri plato bölgesine çok yakın çıkmıştır. IIC, RISE davranışı gösteren malzemeler için daha çok tercih edildiğinden, numuneler için en uygun model olduğu söylenebilir.

**Çizelge 5.** PSR, Hays-Kendall ve IIC modelleri ile hesaplanan yükten bağımsız sertlik değerleri

Numuneler	$H_{psr}$ (GPa)	$H_{HK}$ (GPa)	$H_{IIC}$ (GPa)	$H_V$ (GPa)
FGa0	3,900	<b>3,542</b>	<b>3,174</b>	3,398 - 3,444
FGa03	5,711	<b>4,524</b>	<b>3,133</b>	3,736 - 4,039
FGa08	3,949	<b>3,245</b>	<b>2,432</b>	2,667 - 2,951

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada Bi-2212 fazının  $Bi_{(1,8-x)}Pb_{0,2}Ga_xSr_2CaCu_2O_y$  formülünde,  $x=0; 0,3; ve 0,8$  değerlerine göre hazırlanmış örneklerin manyetik, mekanik ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. XRD ölçümlerinde Ga oranının artmasıyla Bi-2212 fazının kristallerin değişimi ve malzeme içerisinde safsızlık pikleri incelenmiştir.

Yapılan sıcaklığa bağlı alınganlık ölçüm sonuçlarında; numunelerin  $T_c$  değerleri; FGa0 için 84,5 K, FGa03 için 76,4 K, FGa08 için 69,5K olarak ölçülmüştür. Bi-Ga kısmi yer değişiminde Bi'nin azalarak Ga'nın yapı içerisindeki oranının artması Bi-2212 fazında  $T_c$  değerinin giderek azalmasına ve yapının bozulmasına neden olmuştur. Bu değişimler SEM görüntüleri incelendiğinde de, Ga'nın yapıdaki artışı, amorf yapıların ortaya çıkması ve poroziteyi artırması ile malzemelerin yapısında görülmüştür.

Malzemelerin mikrosertlik ölçümlerinde Ga oranının artmasına bağlı olarak malzemelerin sertliklerinin azaldığı belirlenmiştir. Yük arttıkça sertlik değerlerinin de arttığı ve bütün numunelerin RISE etkisi gösterdikleri sonucuna ulaşılmıştır.

DeneySEL ölçüm sonuçları, Meyer, Hays-Kendall ve IIC modellerine göre değerlendirilmiştir. Hazırlanan cam seramik malzemeler için en kullanışlı analiz modellerinin Hays Kendall ve IIC modelleri olduğu, hesaplanan sertlik değerleri plato bölgesi ile oldukça uyumlu çıkmıştır. Ancak RISE etkisini anlamada en yaygın olarak kullanılan IIC modeli bütün numunelerde, plato bölgesine, Hays Kendall'dan daha yakın sonuçlar verdiği için, bu modelin, örneklerin sertliklerini anlamada en başarılı yöntem olduğu görülmüştür.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma 05/2016-05 no'lu proje ile Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından desteklenmiştir.

## 5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Bednorz, J. G., Müller, K. A.: Possible high T<sub>c</sub> superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. *Condensed Matter*. 64, 189-193 (1986)
2. Maeda, H., Tanaka, Y., Fukutomi, M., Asano, T.: A new high-T<sub>c</sub> oxide superconductor without a rare earth element. *Jpn. J. Appl. Phys.* 27(2), 209-210 (1988)
3. Michel, C., Hervieu, M., Borel, M. M., Grandin, A., Deslands, F., Provost, J., Ravenau, B.: Superconductivity in the Bi-Sr-Cu-O system. *Zeitschrift Physik B.* (68), 421 (1987)
4. Saritekin, N. K., Uzumcu, A. T.: Improving Superconductivity, Microstructure, and Mechanical Properties by Substituting Different Ionic Pb Elements to Bi and Ca Elements in Bi-2223 Superconductors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* (2022)
5. Sedky, A., Salah, A.: Comparative Study of the Effects of La-Substituted Ca in (Bi, Pb):2212 and (Bi, Pb):2223 Superconductors. *Journal of Electronic Materials* (2022) 51:3042–3058 (2022)
6. Ummarino, G. A.: Standard Behaviour of Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+δ</sub> Overdoped. *Condens. Matter* 2021, 6, 13 (2021)
7. Gayathri V., Santanu, B., Amaladass, E. P., Kumary, G. T., Pandian, R., Mani, A.: Effects of Pb assisted cation chemistry on the superconductivity of BSCCO thin films. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2021, 23, 12822–12833 (2021)
8. Zhao, X., Wang, D., Wang, T., Hong, S., Jiang, L., Dai, Y., Qi, Y.: Preparation of Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+d</sub>(Bi2212) superconductor by Pechini sol–gel method: thermal decomposition and phase formation kinetics of the precursors. *J Mater Sci: Mater Electron* (2020)
9. Kır, E., Özkurt, B., Aytakin, M., The effect of K-Na Co-doping on the formation and particle size of Bi-2212 phase *Physica B.* 490, 79–85 (2016)
10. Asghari, R., Colakerol Arslan, L., Sedghi, H., Naghshara, H.: Synthesis and Characterization of Nb Substitution on (Bi-Pb)-2223 Superconductors. *J Low Temp Phys.*189:15–26 (2017)
11. Asghari, R., Naghshara, H., Arsalan, L., Sedghi, H.: Comparing the Effects of Nb, Pb, Y, and La Replacement on the Structural, Electrical, and Magnetic Characteristics of Bi-Based Superconductors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism.* 31:3889–3898 (2018)
12. Boussouf, N., Mosbah, M. F., Kalkoul, N., Benhamideche, C.: Effect of Zr Addition on Bi<sub>1.8</sub>Pb<sub>0.4</sub>Sr<sub>2.0</sub>Ca<sub>1.1</sub>Cu<sub>2.1</sub>O<sub>y</sub> Superconductor. *J Supercond. Nov. Magn.* 30:365–370 (2017)
13. Gül, E., Ozkurt, B., Aytakin, M. E., Ocağolu, K.: Structural, electrical and magnetic properties of Au doped Bi-2212 superconductors. *Pamukkale Uni. Muh. Bilim Derg.* 27(1), 70-77 (2021)
14. Ozkurt, B.: Structural, Electric and Magnetic Properties of Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ag<sub>0.03</sub>Ca<sub>1</sub>Cu<sub>2</sub>O<sub>y</sub> Ceramics Modified by Post-annealing” *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* (2018) 31:2459–2464
15. Khaled, J., Sato, R., Komatsu, T.: Effect of addition on the glass forming ability and superconducting properties of Bi-Sr-Ca-Cu-O System. *Journal of the Ceramic Society of Japan.* 105 [3], 265-268 (1997)
16. Kazin, P. E., Poltavets, V. V., Poltavets, O. N., Kovalevsky, A. A., Tretyakov, Y.D., Jansen, M.: Formation of Bi-2212 phase and phase assemblage in Ga-doped BSCCO system. *Physica C,* 324, 30–38 (1999)



17. Kannan, Y., Bansal, C., Rajaram, G. "Effect Of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Substitution in Bi-2212 Superconductor" Solid State Communications. 81, 1, 109-113, 1992.
18. Çavdar S., Bulut D., İzmirli S., Turan N., Koralay H., GU J Sci, Part C, 10(1): 86-102(2022)
19. Dongqi, L., Hui, Z., Xiang, G., Shengan, Y., Qingming, C.: "Effect of the fabrication process on the electrical properties of polycrystalline Bi<sub>1.7</sub>Pb<sub>0.3</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub>. Ceramics International. 42 1728–1732 (2016)
20. Bock, J., Bestgen, H., Elsbner, S., Preisler, E.: Large shaped parts of melt cast BSCCO for applications in electrical engineering. Transactions on applied superconductivity. 3-1 (1993)
21. Z. Ozhanli, E., Yakinci, M. E., Balci, Y., Aksan, M. A.: Crystallization activation energy and hole concentration properties of the Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaxCdxCu<sub>2</sub>O<sub>8+y</sub> Glass-Ceramic Superconductor Rods. Journal of Superconductivity: Incorporating Novel Magnetism. 15, 6 (2002)
22. Yanmaz, E., Harris, I. R., Abell, J. S.: Direct current zoning (DCZ) and direct current annealing (DCA) of melt-cast Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O rods. Journal of AUoys and Compounds. 185, 311-320 (1992)
23. Tsukamoto, T., Inada, R., Inagaki, N., Andoh, H., Sugiura, T., Oota, .: Alternating-current transport losses of melt-cast processed Bi-2212 bulk superconductor bars. Supercond. Sci. Technol. 16 1246–1251 (2003)
24. Dongqi, L., Hui, Z., Xiang, G., Shengan, Y., Qingming, C.: Effect of the fabrication process on the electrical properties of polycrystalline Bi<sub>1.7</sub>Pb<sub>0.3</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub>" Ceramics International 42(2016)1728–1732
25. Kayed, T. S., Cahınlı, N., Aksu, E., Koralay, H., Günen, A., Ercan, İ., Aktürk, S., Çavdar, Ş.: Microstructural, thermal, and electrical properties of Bi<sub>1.7</sub>V<sub>0.3</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> glass-ceramic superconductor. Cryst. Res. Technol. 39, 12, 1063 – 1069 (2004)
26. Hanjin, L., Byrne, J. G.: Effect of precursor history on synthesis of high-T BPSCCO superconductor Journal of Materials Science 31, 234.9-2352 (1996)
27. Koralay, H., Çavdar, Ş., Arslan, A., Ozturk, O., Tasci, A.T., Tugluoglu, N.: Experimental and theoretical approaches for magnetic, superconducting and structural characterization of Bi<sub>1.75</sub>Pb<sub>0.25</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3-x</sub>Sn<sub>x</sub>O<sub>10+y</sub> glass ceramics. Cryogenics. 88 17–21(2017)
28. Semenenkol, B., Camargo, B. C., Setzer, A., Bohlmann, W., Kopelevich, Y., Esquinazi, P. D.: Magnetization of Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+δ</sub> micrometer thin ring and its depinning line. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 33:2669–2678 (2020)
29. Francesca, I.V., Hannah, B., Carlo, A., Roland, S.: Effect of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the grain connectivity and superconducting behavior of Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2-x</sub>In<sub>x</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+d</sub>. SN Applied Sciences 1:96 (2019)
30. Ozturk, O., Asikuzun, E., Tasci, A.T., Gokcen, T., Ada, H., Koralay, H. Cavdar, S.: Comparison of Vickers microhardness of undoped and Ru doped BSCCO glass ceramic materials. Journal of Materials Science: Materials in Electronics 29:3957–3966 (2018)
31. Ozturk, O., Gokcen, T., Cavdar, S., Koralay, H., Tasci, A. T.: A study on nucleation, crystallization kinetics, microstructure and mechanical properties of Ru–Bi partial substituted BSCCO glass ceramics. J Therm Anal Calorim 123:1073–1082 (2016)
32. Awad, R., Abou-Aly, A.I., Kamal, M., Anas, M.: Mechanical properties of (Cu<sub>0.5</sub>Tl<sub>0.5</sub>)-1223. Supercond Nov Magn. 24:1947–56 (2011)

33. Sangwal K.: On the reverse indentation size effect and microhardness measurement of solids. *Mater Chem Phys.* 63:145–52 (2000)
34. Khalil, S. M.: Influence of isothermal hot pressing-doping treatment on the electrical and mechanical properties of bulk Bi-Sr-Ca-Cu-O” *AIP Advances* 2, 042183 (2012)
35. Sangwal, K., Surowska, B.: Study of indentation size effect and microhardness of SrLaAlO<sub>4</sub> and SrLaGaO<sub>4</sub> single crystals. *Materials Research Innovations*, 7:2, 91-104 (2003)
36. Hays, C., Kendall, E. G.: An Analysis of Knoop Microhardness. *Metallography*, 6, 275-282 ( 1973).
37. Gane, N., Bowden, F. P.: Microdeformation of Solids. *Journal of Applied Physics*, 39, 1432-1435 (1968)
- 38 Awad, R., Abou-Aly, A. I., Kamal, M., Anas, M.: Mechanical Properties of (Cu<sub>0.5</sub>Tl<sub>0.5</sub>)-1223 Substituted by Pr. *J. Supercond. Nov. Magn.*, 24: 1947-1956 (2011).
39. Li, H., R. Bradt, C.: The Microhardness indentation load/size effect in rutile and cassiterite single crystals. *Journal of Materials Science*, 28, 917-926 (1993)



## Impactor Diameter and Ply Number Effects on the Impact Behavior of Carbon Fiber Composite Laminates

Mehmet İskender ÖZSOY<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Sakarya University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, Sakarya, Turkey

### Abstract

As it is known, impact damage is a major mechanical phenomena for composite materials especially used in the aerospace structures. The factors affecting the impact behaviour of the composites depend on the impactor systems as well as the target material. In this study ply number and impactor geometry effects of carbon fiber reinforced epoxy composites were investigated by low velocity impact tests. In this context, drop weight impact tests were carried out at 6J, 12J and 24J energy levels by using hemispherical impactors with 10 mm and 20 mm diameters. Laminated composites were manufactured in 6, 10 and 14 plies with vacuum infusion method. The effects of laminate thickness, impactor diameter and impact energy on the contact force, velocity, absorbed energy and damage surfaces were investigated and evaluated. It is observed that impactor geometries and velocities caused the different damage mechanisms in composites and impactors played an important role in determining the penetration and perforation behaviours of composites. Increasing impactor diameter increased the penetration and perforation thresholds.

### Article Info

Research article

Received: 27.05.2022

Revision: 5.07.2022

Accepted: 21.07.2022

### Keywords

Carbon fiber laminated

composites

Composite thickness

Drop weight impact test

Impactor shape

Impact behavior

Penetration

Perforation

## 1. INTRODUCTION

Composite materials are widely used in the automotive and aerospace industries [1,2]. However, damage caused by parts, tool falls on the components during maintenance, bird strikes on the landings and takeoffs of aircrafts, hail often result in delamination, matrix cracking and fiber breakage damage to the internal surfaces of composite materials.[3, 4-8]. These damages generally occur as a result of low velocity impacts which defined in the velocity range between 1 m/s and 10 m/s [9]. Drop weight impact tests are a type of low velocity impact tests and based on the principle that a mass hits the specimen as a result of vertical free fall from a certain height. [10,11]. The damage resistance, impact behavior, threshold values for penetration and perforation, impact resistance, absorbed energy, contact forces and damage areas of composite materials are determined with the drop weight impact tests [9, 11-14].

The parameters studied for the low-velocity impact tests are generally consist of the target material related factors such as material thickness/number of layers, material type, specimen geometry and impact test systems factors such as impactor geometry and specimen fixation [2,16]. In this context, Liu et al. [17], investigated the maximum load, maximum displacement, contact time and damage area for one energy level on the impactor geometry. They used the hemispherical and flat tip same diameter impactors. The flat impactor has a higher maximum force, whereas the hemispherical impactor has a larger damage area, longer contact time and greater maximum displacement. They also supported the study with the finite element method. Evcı and Uyanan [18] studied the damage behavior of the carbon fiber composites with hemispherical tip impactor at different temperature ranges. The maximum force and delamination area increased with the increase of the impactor diameter. Zhou et al. [19] studied the effects of impact angle, impactor geometry and diameter, and layer arrangement of unidirectional carbon fiber composites. Seifoori et al. [20] studied the low velocity impact behavior of unidirectional glass fiber and carbon fiber composites with spherical, hemispherical and cylinder impactors at two different energy levels. They observed that the largest damage area was caused by spherical impactors, and the damage area increased with increasing impact energy. Guerrero et al. [21] investigated the impactor weight effect on the damage behavior of the

carbon fiber woven epoxy composites. İçten et al. [22] studied the glass fiber woven epoxy composites at different impactor diameters and different energy levels. The maximum force, and penetration threshold values increased with the increase of the impactor diameter. Reddy et al. [23] studied the effect of different composite thicknesses and different energy levels on low velocity impact behavior of glass fiber laminated composites. As the impact energy and thickness increased, the maximum force and contact time increased. Liao et al. [24] investigated the effects of laminate thickness and different impact energy levels on the impact behavior of z-pinned composites. Fiber breakage turned into the delamination with the increase of laminate thickness. Belingardi et al. [25] investigated the effects of fiber arrangement, composite ply number and different energy levels on the impact behavior of unidirectional carbon fiber composites. Li et al. [26] studied the effect of impact energy levels on the pultruded glass fiber rove polyester composites. Qiu et al. [27] investigated the effects of carbon-graphite epoxy composites at different energy levels on the fiber arrangement, sample geometry, ply numbers and impactor geometry such as flat and hemispherical by experimental and finite element method. The maximum force is greater with the flat impactor and the contact time is shorter. The damage of the hemispherical impactor is more than the flat type. Riccio et al. [28] investigated the effect of fiber sequence at different energy levels according to the finite element method. Quaresimin et al. [29] investigated the effects of different layer numbers and different fiber sequences of carbon fiber woven epoxy composites on the contact load, absorbed energy and delamination. They stated that the onset damage of delamination and maximum load depended on the laminate thickness. Minak and Ghelli [30] tested unidirectional carbon fiber composites according to the quasi-isotropic fiber sequence at three different energy levels, using two different diameters of circular impactors by experimental and finite element method. The maximum force was estimated by the finite element method and compared with the delamination threshold. The delamination area increased with energy and it has a significant effect on impact behaviour because diameter and boundary conditions affect the stiffness of the target material. Farooq and Myler [31] modeled the effect of 8, 16 and 24 layers of unidirectional carbon fiber composites on the impactor geometry by finite element method. Soto et al. [32] studied the fiber composites at two different impact energies (20J, 30J) by experimentally and finite element method. Wang et al. [33] modeled the delamination behavior of unidirectional carbon fiber composites according to different fiber sequence and different energy levels by finite element method. Gliszczynski et al. [34] carried out impact tests of glass fiber composites according to fiber sequence and different energy levels. Caminero et al. [35] studied the effects of laminate thickness and fiber sequence on different impact energies of unidirectional carbon fiber composites. As the impact energy increased, the damage resistance decreased. Zhou et al. [36] studied the impact behavior of carbon fiber composites at different energy levels by experimental and finite element method. Maximum force, displacement, absorbed energy, delamination area were investigated in simulation. Rio et al. [37] studied the low-velocity impact behavior of unidirectional and woven carbon fiber composites with different fiber sequences and composite thicknesses. Kurşun et al. [38] investigated the low-velocity impact behavior at different energy levels by experimental and finite element method using conical, ogival, hemispherical and flat impactors with a diameter of 12 mm.

Lamina thicknesses which used in aircraft generally vary between 2 and 6 mm, and even their main structures can be under 2 mm thickness [39]. Therefore, in this study different thicknesses carbon fiber laminated composites were manufactured in 6, 10 and 14 plies with vacuum infusion method. It is seen in the literature that impactor geometry played a determining role in the damage mechanisms of the composite materials. For this purpose, effects of ply number and impactor geometry on the low velocity impact behavior of composites were studied and test results investigated with the macroscopic failure images. 6, 12 and 24J energy levels were carried out by using hemispherical impactor tips with 10 mm and 20 mm diameters. Impact energy and impactor shape effects were evaluated together with laminate thickness on the energy abilities of the composites.

## **2.EXPERIMENTAL STUDIES**

### **2.1. Materials and Manufacturing of the Composites**

Plain weave type carbon fiber reinforcements (200gr/m<sup>2</sup>) supplied by Dost Kimya Company in Turkey and Biresin Sika CR80 epoxy were used as the materials. The epoxy and Sika CH 80-2 hardener mixing ratio was 100:30 by weight. Laminate composites were manufactured in 6, 10 and 14 plies by vacuum infusion

method. After the vacuum infusion process, the composites were kept in vacuum for 24 hours. Then the composites were kept in the oven for post-curing at 60 °C for 4 hours. Composite plates were cut according to the specimen size. Figure 1 shows the vacuum infusion process setup of composites.



*Figure 1. Vacuum infusion process setup*

## 2.2 Impact Tests

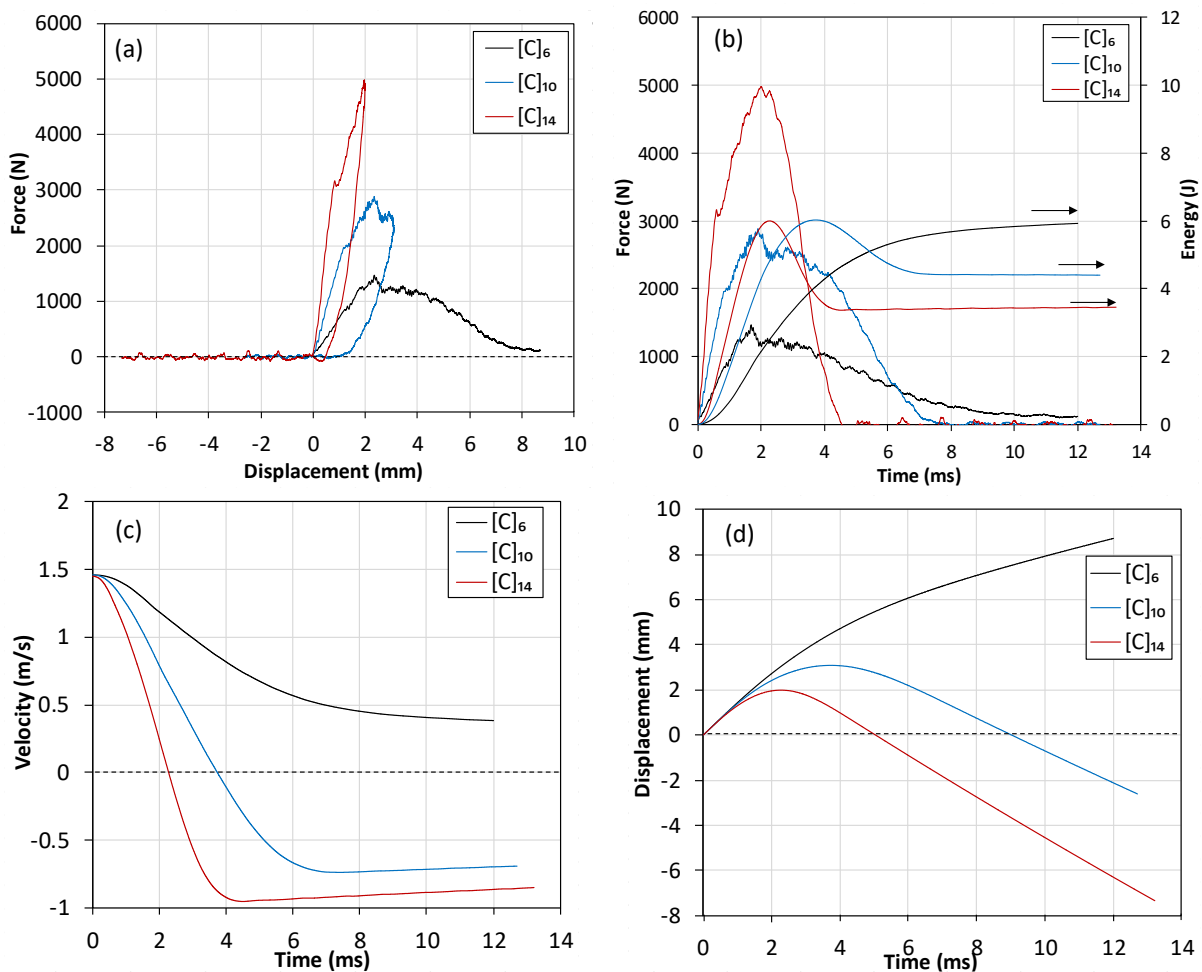
Drop weight impact tests were carried out with an Instron Ceast 9350 testing machine as the specimen dimensions were 100 mm X 100 mm. The fixture inner diameter is 40 mm and outer diameter is 60 mm. Force, displacement, energy and velocity data are obtained respect to time at the end of the tests. According to the ASTM 7136 standard [40], the level of impact energy that should be applied to the specimen is  $E = CE \cdot h$ , where the CE is 6.7 J/mm and h is the specimen thickness. The impact energies corresponding to 6 ply (1.2 mm), 10 ply (2.17 mm) and 14 ply (3.07 mm) used in this study are 8.04J, 14.54J and 20.57 J respectively. In this purpose, 6J, 12J and 24 J impact energies were applied to each composite sample using the 10 mm and 20 mm diameter hemispherical impactors. Impactors masses are 5.5 kg for both of the impactors. Anti-rebounding system was activated in the tests. Figure 2 illustrates the drop weight test system, impactors and clamping fixture.



*Figure 2. Drop weight test system: (a) Testing machine, (b) Impactors, (c) Clamping fixture*

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Figure 3-5 show the force-displacement, force-time, energy-time, velocity-time and displacement-time graphics of composites with 10 mm impactor diameter at impact energy levels 6, 12 and 24J, respectively. In the low velocity impact, three situations occur: rebound, penetration and perforation. In the case of rebound, the sample cannot absorb all of the impact energy and this energy spent by the rebound of the impactor from the sample surface. In the case of penetration, all of the impact energy is transferred to the sample when the penetration level is reached and the impactor is stuck in such a way as to cause damage to the sample. In the case of perforation or complete penetration, the impactor pierces the sample through its thickness and exits from the back surface of the sample. The absorbed energy remains constant although the impact energy increases at the perforation level [41-44]. In Figure 3a, the force-displacement curves increase linearly to their maximum value up to the onset of damage with layer thickness which depending on stiffness. Closed curves in the force-displacement graphics show that the composite is not completely penetrated, while open curves have complete penetration of the impactor tip into the specimen [45]. As it is seen from the force-displacement curves in Figure 3a, [C]6 composite is open-ended at 10 mm impactor tip diameter and 6J impact energy. This indicates that the impactor has perforated the composite. In the [C]6 composite, the load carrying capacity of the composite is lost and the sample is perforated. [C]10 and [C]14 composites show a closed curve. In other words, the damage on the composite that will not cause a penetration by the impactor. As the ply numbers increases, the slope of the curves increases depending on the increase in bending stiffness as it is seen from the force-displacement curves.

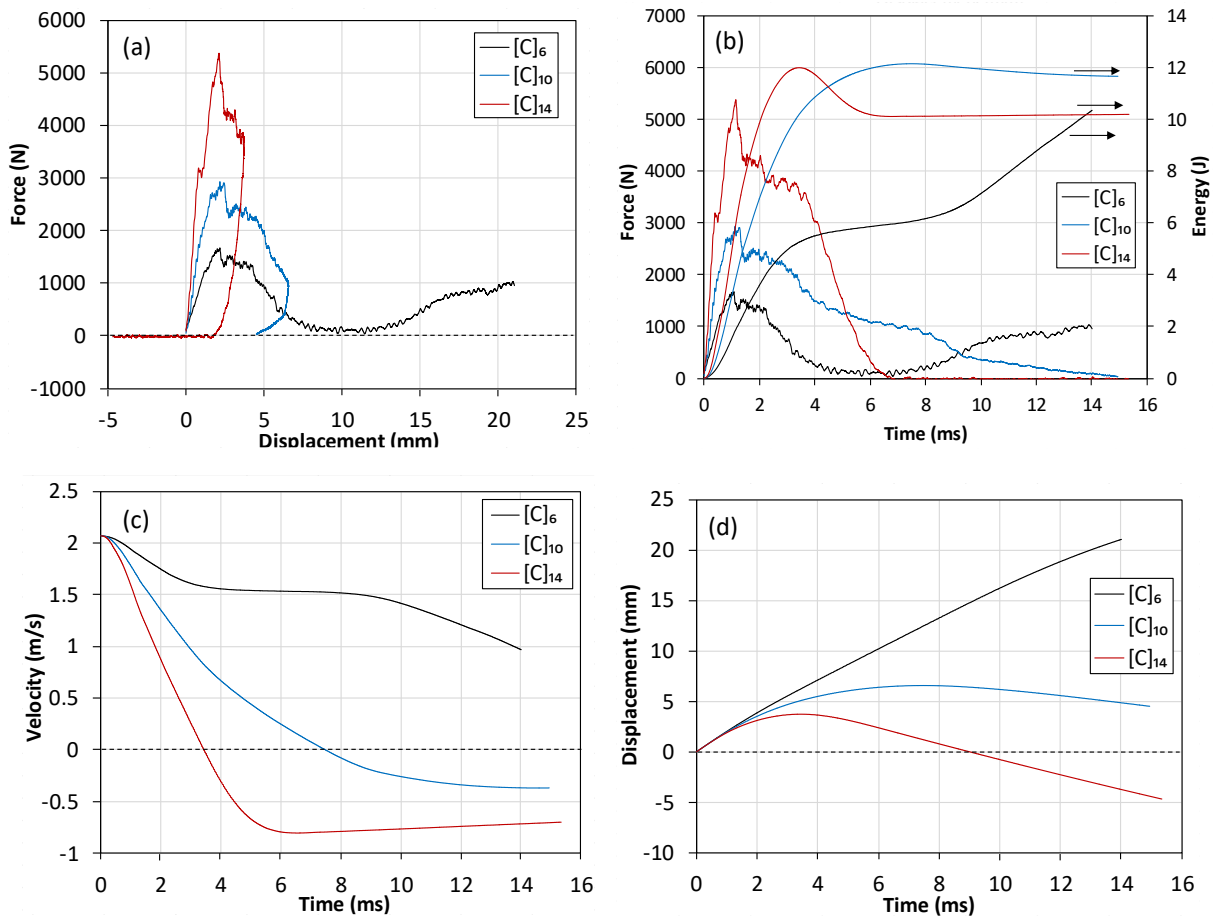


**Figure 3.** a) Force vs. displacement, b) Force vs. time and energy vs. time, c) velocity vs. time d) displacement vs. time graphics of composites with 10 mm impactor diameter at 6J impact energy

In full penetration mode when the 10 mm diameter impactor tip is used, the force decreases in minimum level and then increases again with a (Figures 4a and 5a). In the literature, it has been stated that this

situation is caused by the friction between the impactor tip and the composite sample [46]. This friction effect is also reflected in the velocity-time graphs (Figures 4c and 5c). It is seen that the [C]10 composite's energy level goes forward parallel to the horizontal axis (Figure 4b). This shows that the impactor penetrated into the composite. Therefore, the rebound elastic energy of the composite is very low. A closed curve is formed in the force displacement curve of the [C]14 composite, and the impact energy can be absorbed by the composite. By increasing the impact energy to 24J, complete penetration occurred in all samples (Figure 5).

Increasing the composite thickness and impact energy increases the contact time. This is also consistent with the literature [17,23].

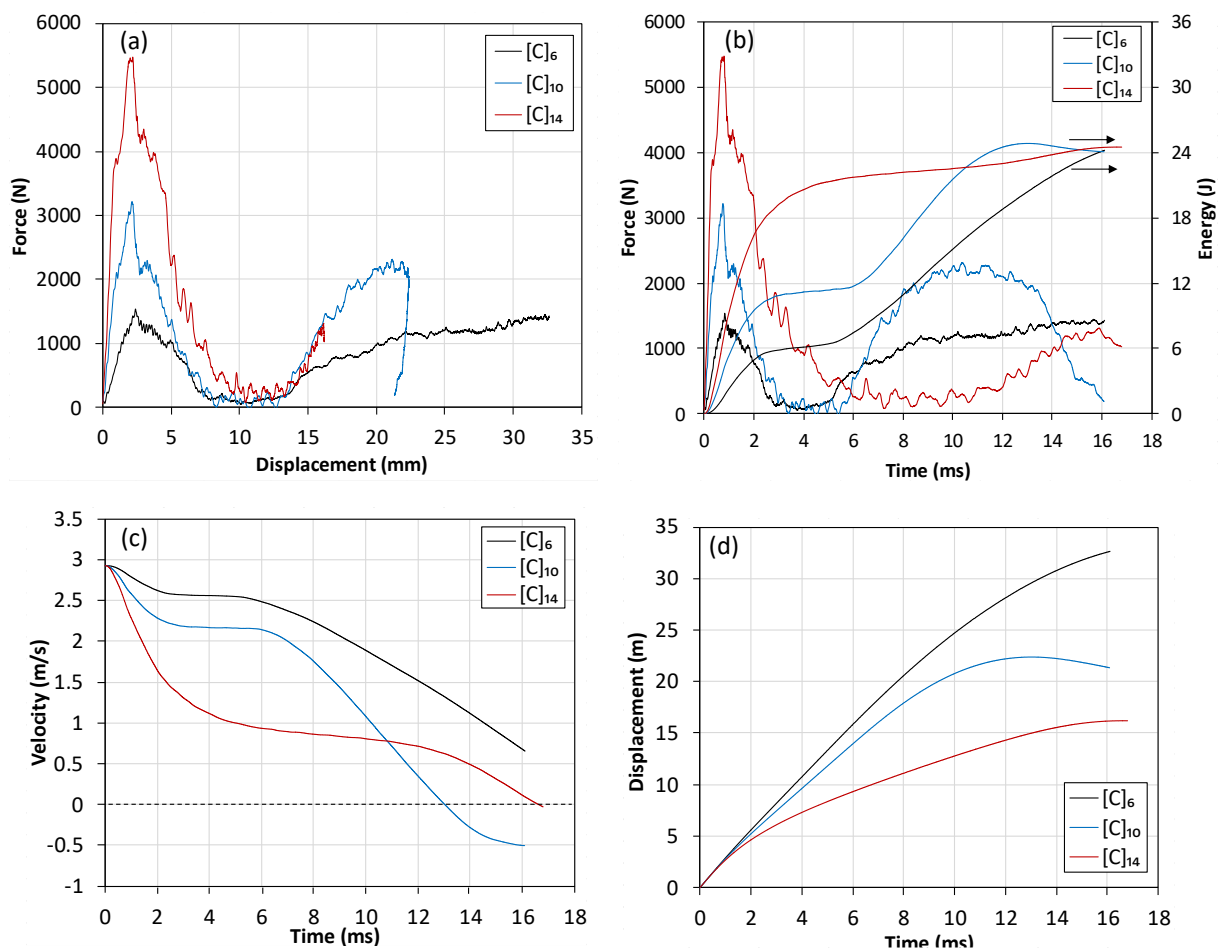


**Figure 4.** a) Force vs. displacement, b) Force vs. time and energy vs. time, c) velocity vs. time d) displacement vs. time graphics of composites with 10 mm impactor diameter at 12J impact energy

When the energy-time graphics of the composites are examined, [C]6 composite shows an increasing trend depending on the time (Figure 3b-5b). The impact energy is equal to the sum of the elastic energy which the sample is not damaged and the energy absorption level when it is damaged. [47]. As a result of the fibers breaking, the energy absorption capacity of the composite is lost. Kinetic energy increases linearly until the impactor completely penetrates (perforation) the specimen and then energy curve continues with a lower trend of increase after the impactor perforates the sample. If the impactor perforates the specimen, the curve is directed upwards because the region between the impactor and the specimen is subject to friction [48,49]. If the impactor could not complete penetrate the composites, the curves increased to a maximum level up to the impact energy level and then decreased to a constant level by absorbing a certain amount of energy which depending on the rigidity of the composites. As the impact energy increases, the impact duration, maximum force and energy absorption rate increased. This situation is also suitable with the literature. [50]. The perforation energy in composite materials is taken as the energy value when it corresponds to the perforation point where the force values decrease to the minimum level in the open type curves of force-time graph. Then, the energy value continues to increase with the effect of friction

between the impactor and the composite [51,52]. In the perforation mode, the energy of the impactor is sufficient to complete penetrate the composite, and some energy is lost due to friction between the composite and the impactor [53]. In other words, perforation occurs in the composites if the impact energy exceeds the penetration threshold [54].

At the velocity-time and displacement-time graphics (Figure 3-5), the velocity approaches the constant value after a certain time due to the perforation of the sample. And also, the displacement increment continues depending on the time. Since there is a rebound at 6J impact energy in [C]10 and [C]14 composites, most of the applied energy is absorbed. As the number of carbon fiber layers increased, their stiffness increased and the amount of absorbed energy decreased. This shows that thinner composites suffer most of the damage under the same impact energy. Besides, it is seen from the damage photographs that (Figure 9), perforation occurred in the [C]6 composite. As the impact energy increases, the oscillations in the force-displacement curves increase. These oscillations indicate damage formation and propagation, matrix cracking, fiber breakage and delamination [55,56]. In case of rebound of the impactor hitting the composite sample, the velocity of the impactor takes a negative value because it's direction is opposite to the direction of the impact. If the impactor does not rebound, it indicates that the impactor is stuck in the sample, and after hitting the sample, its speed decreases and continues at a constant horizontal velocity for a certain period of time. Once the maximum displacement is reached, the impactor velocity becomes zero [57]. In Figure 5, it is shown that all the curves continue at the horizontal axis and then they reached to the negative values as the conical part of the impactor.



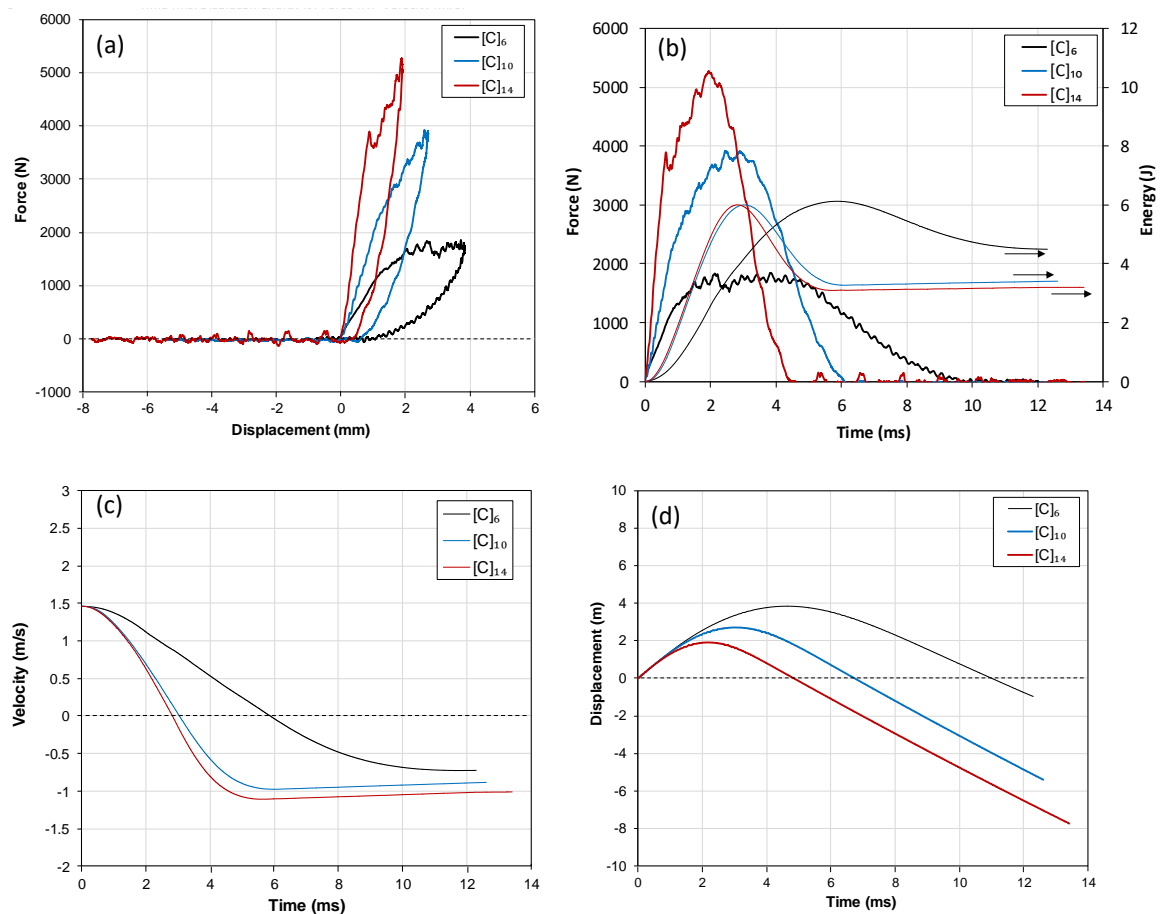
**Figure 5.** a) Force vs. displacement, b) Force vs. time and energy vs. time, c) velocity vs. time d) displacement vs. time graphics of composites with 10 mm impactor diameter at 24J impact energy

In Figures 3d-5d, displacement curves increase to maximum values due to the ability of the composites to absorb energy in rebound situations and move in the negative direction during the rebound of impactor



from the specimen. With the increase of impact energy, the curves become steeper from rebound to penetration and perforation modes, respectively. In addition, displacement increases with the increase of impact energy.

As it is seen from the force-displacement and force-time curves (Figure 5), the impactor tip perforated all the composites at 24J impact energy with 10 mm impactor diameter. Because of the 12J impact energy level was over the penetration threshold of the [C]6 composite, maximum strength of the [C]6 composite decreased at the 24J impact energy as the load carrying ability of the fibers was lost. Depending on the thickness of the composite, impactor tip continued to perforate the composite in the conical part of the impactor tip at high energy value. When the force dropped to minimum level, 10 mm diameter region of the impactor penetrated the composite. Then there was a force increase again as the second stage and the conical region of the impactor continued the perforation process. (Figure 5). In the literature, it has been stated that this second force rise is due to the friction between the impactor and broken fibers [58].

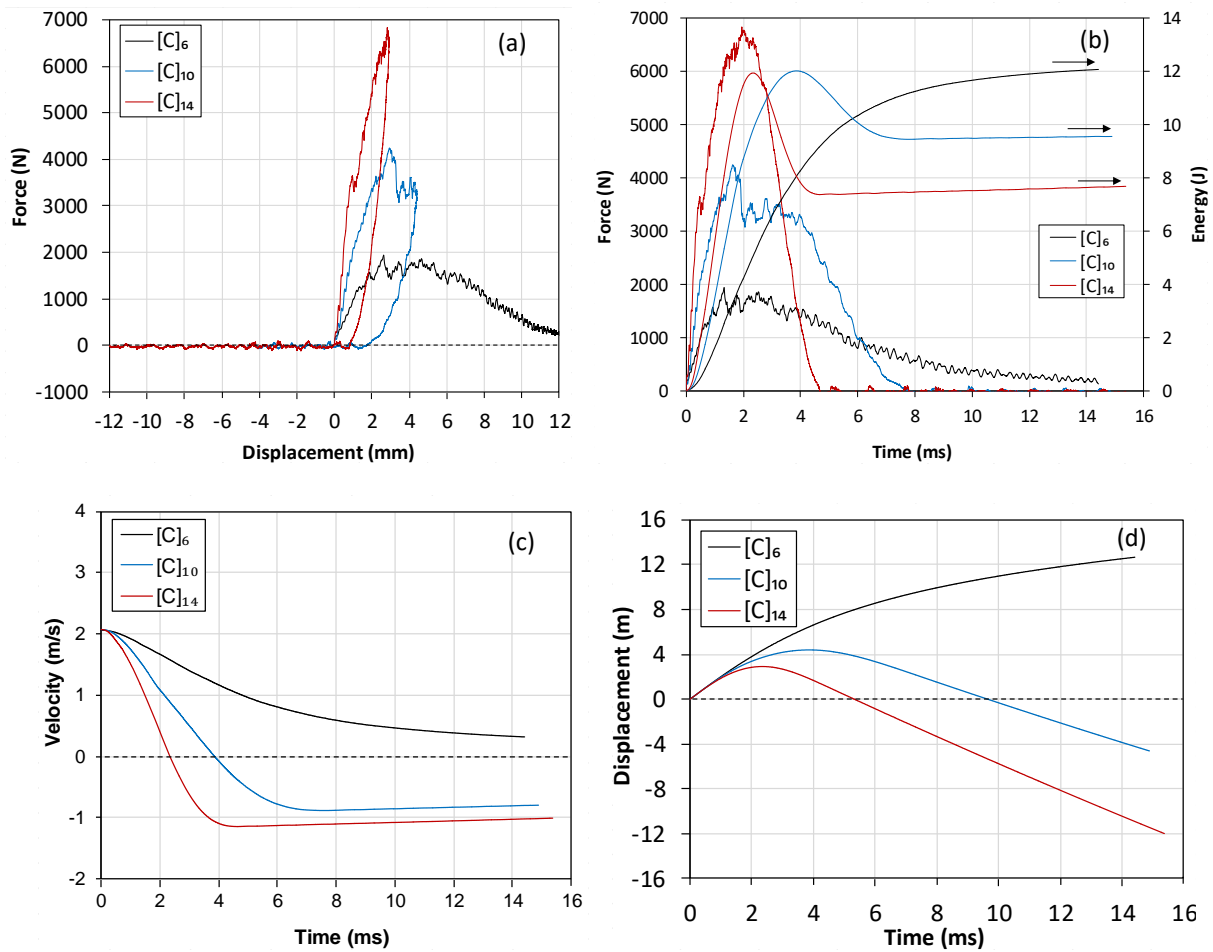


**Figure 6.** a) Force vs. displacement, b) Force vs. time and energy vs. time, c) velocity vs. time d) displacement vs. time graphics of composites with 20 mm impactor diameter at 6J impact energy

Figure 6-8 show the force-displacement, force-time, impact energy-time, velocity-time and displacement-time graphics of carbon fiber composites with 20 mm impactor diameter at impact energy levels 6, 12 and 24J, respectively. The maximum force values increase with the increase of the impactor diameter. It is consistent with the literature [18,22,23]. Therefore, as can be seen from the graphics, the energy absorbing ability of the composites is higher with of 20 mm diameter as the 10 mm diameter impactor exposed to perforation modes at the low energy levels. All the composites showed the rebound behaviour at 6J impact energy.

In Figure 7a, the force-displacement curve in the [C]6 composite shows an open curve and the energy curve tends to increase. It is seen in the energy curve in figure 7b that, [C]6 is in the penetration threshold. Closed

curve formation and rebound elastic energy are observed in the force-displacement curves of [C]<sub>10</sub> and [C]<sub>14</sub> composites. Increasing of impactor diameter decreased the displacement.

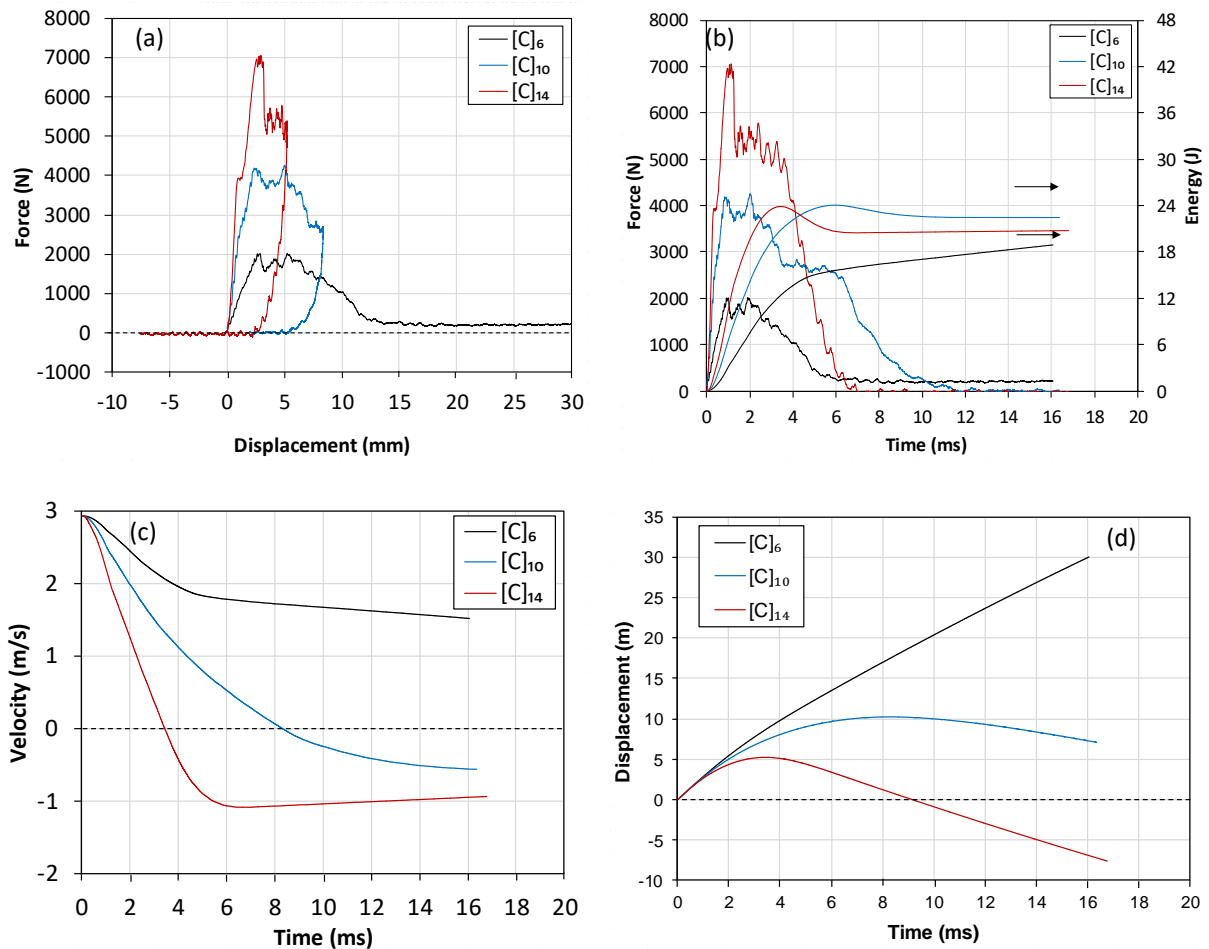


**Figure 7.** a) Force vs. displacement, b) Force vs. time and energy vs. time, c) velocity vs. time d) displacement vs. time graphics of composites with 20 mm impactor diameter at 12J impact energy

In Figure 8, contact force increased with increasing impact energy. Besides in the energy curves, [C]<sub>6</sub> was in the perforation mode and [C]<sub>10</sub> was in the penetration mode. Rebound elastic energy is observed in the [C]<sub>14</sub>. These results consistent with the literatur. Topkaya and Solmaz [59], stated that composite thickness determined the impact performance of carbon fiber composites. Increasing composite sheet thickness increased the contact force and impact strength by decreasing the deformation of composites and so decreased the absorbed energy.

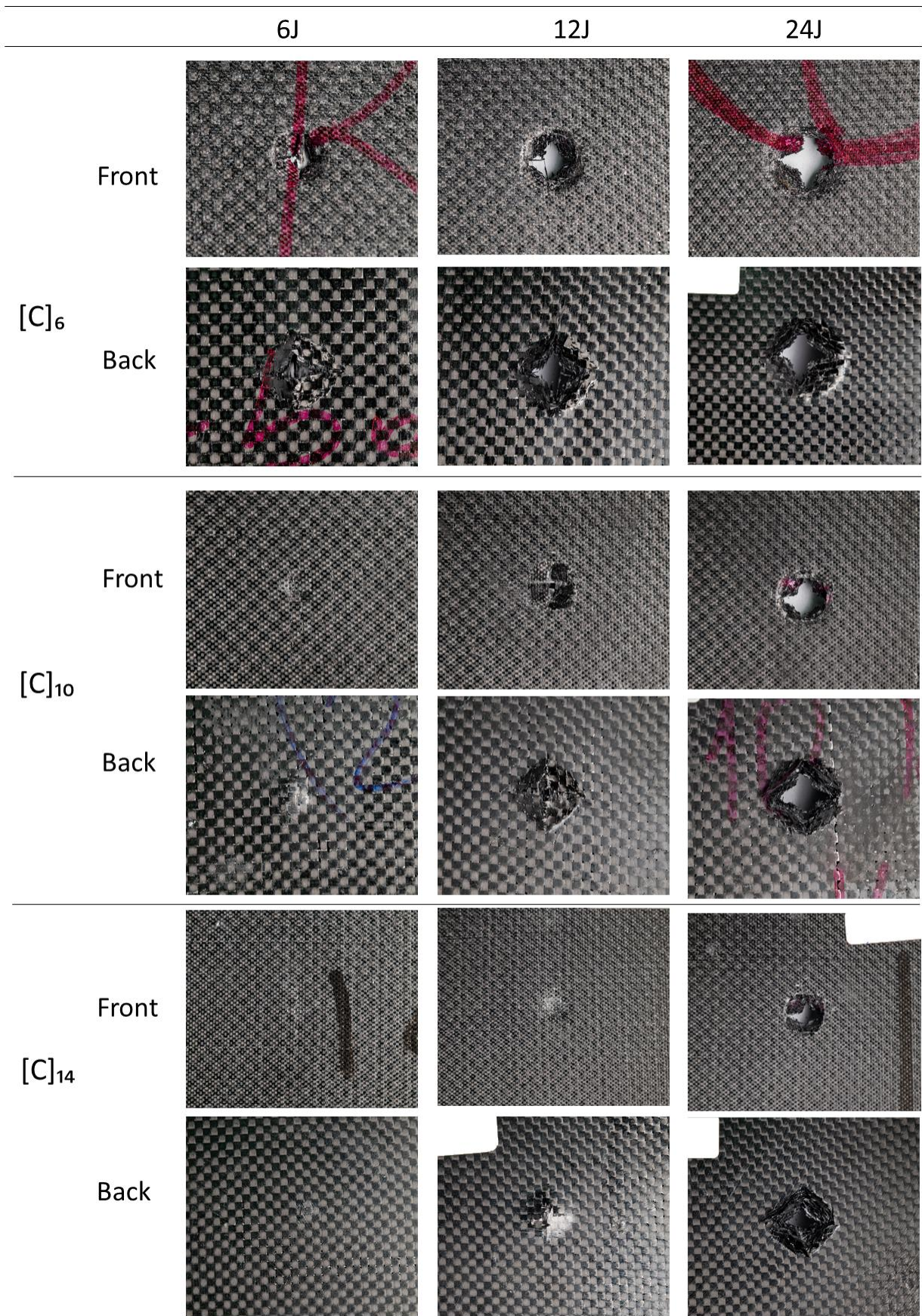
Increasing impact energy increased the displacement. The geometry of the impactor also affects the residual velocity. Rebound velocity of the larger impactor is higher because of the showing less penetration effect than the smaller impactor in rebound modes.

In the [C]<sub>6</sub> composite, the impactor displacement goes on linearly due to the perforation. In [C]<sub>10</sub> and [C]<sub>14</sub> composites, impactor reaches the maximum displacement at the impact time and then moves to the opposite direction because of rebounding.



**Figure 8.** a) Force vs. displacement, b) Force vs. time and energy vs. time, c) velocity vs. time d) displacement vs. time graphics of composites with 20 mm impactor diameter at 24J impact energy

Impact damage photographs of the samples according to 10 and 20 mm impactor diameter are given in Figures 9 and 10 respectively. The damage area on the impacted front surfaces is smaller than the back surfaces. As the number of composite layer increases, the damage formation on the composite surfaces also decreases. As can be seen from Figure 9 and 10, the hole width enlarged in the [C]<sub>6</sub> composite with the increase of the impact energy. In [C]<sub>10</sub> composites indented area occurred on the front surfaces and fiber breaks occurred, a dome-shaped bulge formation occurred on the back surface of the [C]<sub>14</sub> composite. The bulges formed on this back surface are the result of matrix cracking and pull out of the fibers [60]. Increasing composite thickness decreased the fiber breaks. Matrix cracking occurred in thermoset composites due to the brittle matrix structure [61]. As the impact energy increased, the penetration damage areas in the composites also increased. Due to the brittle structure of the matrix and fiber, matrix cracking is followed by fiber fractures in the face of impact load with penetration and perforation. It is seen that the interlayers separating increases with increasing impact energies. When compared in terms of impactor diameters, the damage on the composite is greater at small-diameter impactors, because the impact load is concentrated in a smaller area in [56]. On the other hand, the fibers form an outward bulge in the 20 mm diameter impactor, and the splittings which occurred between the fibers are less in the composites where the 20 mm diameter impactor is applied. In the literature, it is stated that this splitting was caused by the brittle fracture of carbon fibers [60]. As it is seen in the damage photographs that the penetration effect of the impactor tip is greater due to the local effect of the low-diameter impactor on the impact area at the same energy levels and this situation made the destructive damage to the fibers.



*Figure 9. Impact damage photographs of the composites with 10 mm impactor diameter*

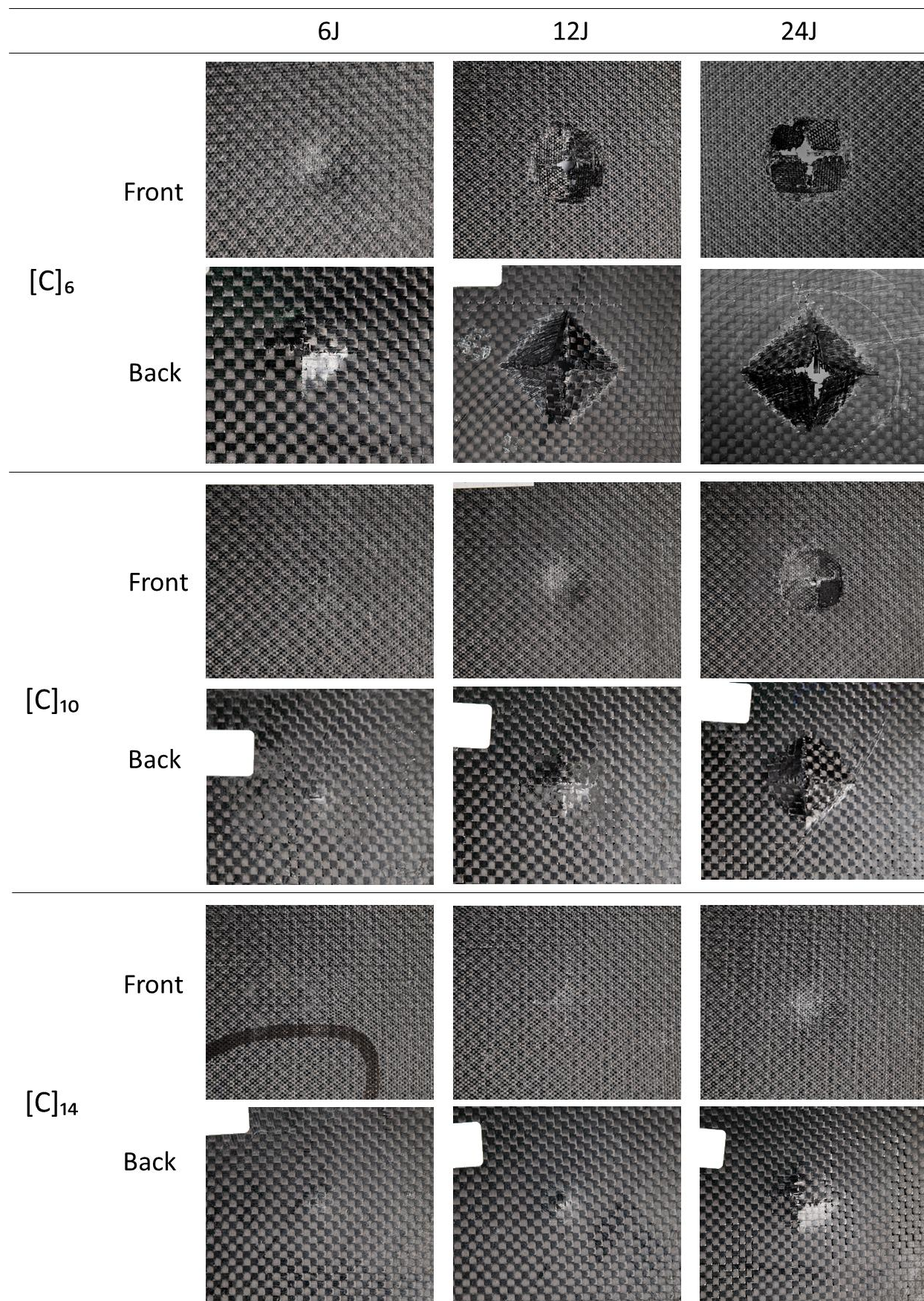


Figure 10. Impact damage photographs of the composites with 20 mm impactor diameter

The perforation and absorbed energy values of composites and the residual velocities of the impactors are given in Figures 11 and 12 respectively. When the energy values are examined, the effect of the damage caused by the 10 mm diameter-impactor is seen. Depending on the increase in composite thickness and impact energy, the energies absorbed in the composites also increased. As can be seen from the graphics, different impactor geometry could increase the damage leading to penetration and perforation modes. It is seen in the Figure 9 that, above the penetration energy thresholds, the energy absorption of the composites remains at the same level and perforation energies were lower than impact energies as in the literature [18]. When the impact energies increase, the residual velocities of the impactor also increased. As the composite thickness increased, the residual velocity decreased. In other words, higher the residual velocity, higher the damage to the composite.

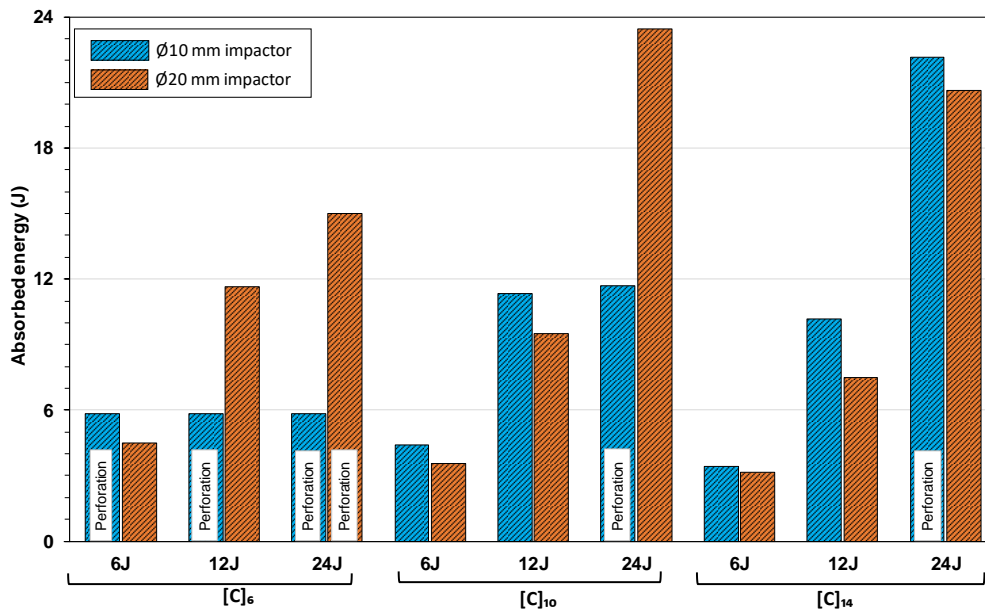


Figure 11. Absorbed energy values of composites at 10 mm and 20 mm impactor diameters

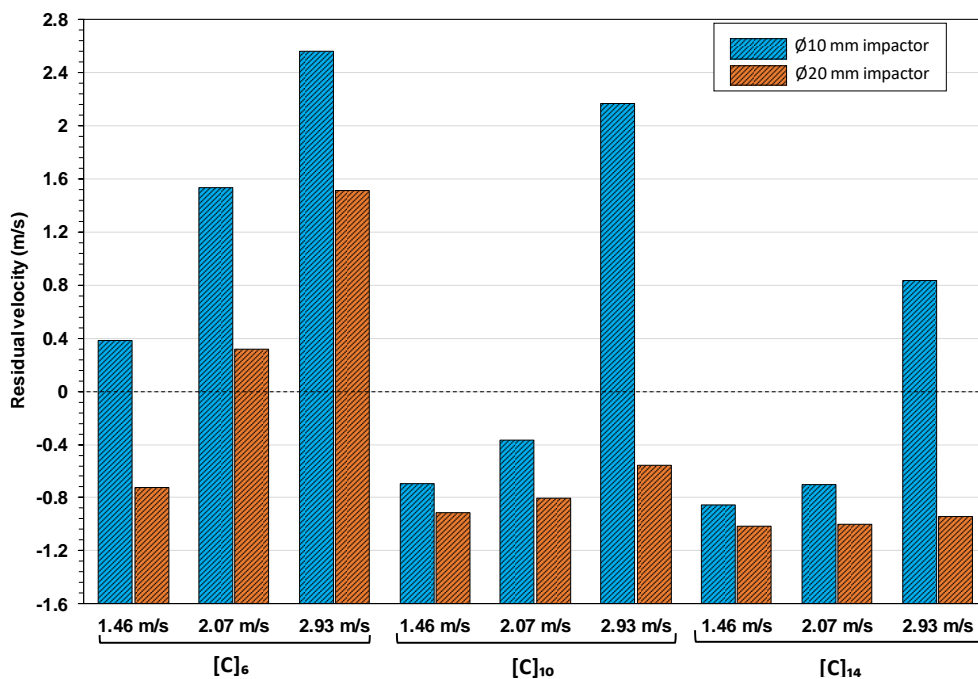


Figure 12. Residual velocities of impactors at 10 mm and 20 mm diameters

#### 4.CONCLUSIONS

Effects of the ply number and impactor geometry on the low-velocity impact behavior of carbon fiber laminated composites were investigated in this study and following results are obtained: Increasing brittle fiber ply made the composites more rigid against to energy absorption capabilities. Increasing impactor diameter decreased the displacements. Maximum forces increased with increasing composite thickness and increasing impactor diameter. Increasing impact energy increased the damage areas. Due to the increase in the diameter of the impactor, the damage sizes of the composites decreased and increasing impactor diameter increased the damage threshold of the composites. It has been seen that impactor geometries determine the failure mechanisms. In future studies, the effect of temperature and the effects of layer thickness and impactor geometry on pure or hybrid composites would be investigated with using more ductile fibers than carbon fiber.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Scientific Research Projects Unit of Sakarya University under project No. 2018-3-12-239.

#### REFERENCES

- [1] D.K. Rajak, D.D. Pagar, P.L. Menezes, E. Linul, Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications, *Polymers* 11 (2019) 11 1-37.
- [2] K.Kaware, M.Kotambkar, Low velocity impact response and influence of parameters to improve the damage resistance of composite structures/materials: a critical review, *International Journal of Crashworthiness*, (2021) 1-25.
- [3] R. Bogenfeld, J. Kreikemeier, T. Wille, Review and benchmark study on the analysis of low-velocity impact on composite laminates, *Engineering Failure Analysis*, 86 (2018) 72-99.
- [4] A.Katunin, A.W. Katunin, W. Danek, M. Wylezol, Modeling of a realistic barely visible impact damage in composite structures based on NDT techniques and numerical simulations, *Composite Structures* 267 (2021) 1-16.
- [5] A.H. Balucha, O. Falcóa, J.L. Jiménez, B.H.A.H. Tijs, C.S. Lopes, An efficient numerical approach to the prediction of laminate tolerance to Barely Visible Impact Damage, *Composite Structures* 225 (2019) 1-13.
- [6] M. Saedifar, M.A Najafabadi, D. Zarouchas, H.H. Toudeshky, M. Jalalvand, Barely visible impact damage assessment in laminated composites using acoustic emission, *Composites Part B* 152 (2018) 180–192.
- [7] S. Goossens, F. Berghmans, K. Muñoz, M. Jiménez, E. Karachalios, D.S. Castillo, T. Geernaert, A global assessment of barely visible impact damage for CFRP sub-components with FBG-based sensors, *Composite Structures* 272 (2021) 1-12.
- [8] M.Y. Solmaz, T. Topkaya, The Flexural Fatigue Behavior of Honeycomb Sandwich Composites Following Low Velocity Impacts, *Applied Sciences* 10(20) (2020) 1-14.
- [9] A.G Castellanos, Md.S. Islam, E. Tarango, Y Lin, P Prabhakar, Interlaminar reinforcement for enhancing low-velocity impact response of woven composites, *Textile Research Journal* 88(15) (2018) 1710–1720.
- [10] A.S. Al Omari, K.S. Al-Athel, A.F.M. Arif, F.A. Al-Sulaiman, Experimental and Computational Analysis of Low-Velocity Impact on Carbon- Glass- and Mixed-Fiber Composite Plates, *Journal of Composites Science*, 4 (2020) 1-19.

- [11] C. Fragassa, A. Pavlovic, C. Santulli, Mechanical and impact characterisation of flax and basalt fibre vinylester composites and their hybrids, *Composites Part B: Engineering*, 137, (2018) 247-259.
- [12] M.A.Caminero, I.G. Moreno, G.P. Rodríguez, Damage resistance of carbon fibre reinforced epoxy laminates subjected to low velocity impact: Effects of laminate thickness and ply-stacking sequence, *Polymer Testing*, 63 (2017) 530-541.
- [13] E.M. Soliman, M.P. Sheyka, M.R. Taha, Low-velocity impact of thin woven carbon fabric composites incorporating multi-walled carbon nanotubes, *International Journal of Impact Engineering*, 47 (2012) 39-47.
- [14] H. Ku, Y. M. Cheng, C. Snook, D. Baddeley, Drop Weight Impact Test Fracture of Vinyl Ester Composites: Micrographs of Pilot Study, *Journal of Composite Materials*, 39 (2005) 1607-1620.
- [15] B. S. Sugun, R.M.V.G.K. Rao, Low-velocity Impact Characterization of Glass, Carbon and Kevlar Composites Using Repeated Drop Tests, *Journal of Reinforced Plastics And Composites*, 23 (2004) 1583-1599.
- [16] J.J. Andrew, S.M. Srinivasan, A. Arockiarajan, H.N. Dhakal, Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical, *Composite Structures* 224 (2019) 1-26.
- [17] H. Liu, J. Liu, Y. Ding, J. Zhou, X. Kong, B.R.K. Blackman, A.J. Kinloch, B.G. Falzon, J.P. Dear, Effects of Impactor Geometry on the Low-Velocity, Impact Behaviour of Fibre-Reinforced Composites: An Experimental and Theoretical Investigation, *Applied Composite Materials*, 27 (2020) 533-553.
- [18] C. Evci1, İ. Uyandıran, The Effect of the Impactor Diameter and Temperature on Low Velocity Impact Behavior of CFRP Laminates, *Proceedings of the 6th International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress & Exhibition, AIP Conference Proceedings*, (2017) 1-10.
- [19] J. Zhou, B. Liao, Y. Shi, Y. Zuo, H. Tuo, L. Jia, Low-velocity impact behavior and residual tensile strength of CFRP laminates, *Composites Part B* 161 (2019) 300-313.
- [20] S. Seifoori, R. Izadi, G.H. Liaghat, A. M. Parrany, An experimental study on damage intensity in composite plates subjected to low-velocity impacts, *Polymer Testing*, 93 (2001) 1-14.
- [21] J.A.A. Guerrero, J.P. Sánchez, J.L. Puente, D. Varas, Experimental study of the impactor mass effect on the low velocity impact of carbon/epoxy woven laminates, *Composite Structures*, 133 (2015) 774-781.
- [22] B.M. Icten, B.G. Kıral, M.E. Deniz, Impactor diameter effect on low velocity impact response of woven glass epoxy composite plates, *Composites Part B: Engineering*, 50 (2013) 325-332.
- [23] T.S. Reddy, K. Mogulanna, K.G. Reddy, P.R.S. Reddy, V. Madhu, Effect of thickness on behaviour of E-glass/epoxy composite laminates under low velocity impact, *procedia structural integrity*, 14 (2019) 265-272.
- [24] B. Liao, J. Zhouc, S. Ai, Y. Line, L. Xi, Y. Cao, D. Xiao, Comparison of laminate thickness on the low velocity impact behaviors for Z-pinned composite laminates, *International journal of mechanical sciences* 204 (2021) 1-11.
- [25] G. Belingardi, R. Vadori, Influence of the laminate thickness in low velocity impact behavior of composite material plate, *Composite structures* 61 (2003) 27-38.
- [26] Z. Li, A. Khennane, P.J. Hazell, A. D. Brown, Impact behaviour of pultruded GFRP composites under low-velocity impact loading, 168 (2017) 360-371.



- [27] A. Qiu, K. Fu, W. Lin, C. Zhao, Y. Tang, Modelling low-speed drop-weight impact on composite laminates, *Materials and design* 60 (2014) 520-531.
- [28] A. Riccio, G. D. Felice, S. Saputo, F. Scaramuzzino, Stacking Sequence Effects on Damage Onset in Composite Laminate Subjected to Low Velocity Impact, *Procedia engineering* 88 (2014) 222-229.
- [29] M. Quaresimin, M. Ricotta, L. Martello, S. Mian, Energy absorption in composite laminates under impact loading, *Composites Part B* 44 (2013) 133-140.
- [30] G. Minak, D. Ghelli, Influence of diameter and boundary conditions on low velocity impact response of CFRP circular laminated plates, *Composite Part B* 39 (2008) 962-972.
- [31] U. Farooq, P. Myler, Finite element simulation of carbonfibre-reinforced compositelaminates subjected to low velocity impact using damage inducedstatic load-deflection methodology, *Thin – walled structures* 97 (2015) 63-73.
- [32] A.Soto, E.V.González, P.Maimí, F.M. Escalera, J.R.S. Aja, E.Alvarez, Low velocity impact and compression after impact simulation of thin ply laminates, *Composite Part A* 109 (2018) 413-427.
- [33] H.R. Wang, S.C. Long, X.Q. Zhang, X.H. Yao, Study on the delamination behavior of thick composite laminates under low-energy impact, *Composite structures* 184 (2018) 461-473.
- [34] A. Gliszczynski, T. Kubiak, P. Rozylo, P. Jakubczak, J. Bieniaś, The response of laminated composite plates and profiles under low-velocity impact load, *Composite structures* 207 (2019) 1-12.
- [35] M.A. Caminero, I.García-Moreno, G.P. Rodríguez, Damage resistance of carbon fibre reinforced epoxy laminates subjected to low velocity impact: Effects of laminate thickness and ply-stacking sequence, *polymer testing* 63 (2017) 530-541.
- [36] J. Zhou, P. Wen, S. Wang, Finite element analysis of a modified progressive damage model for composite laminates under low-velocity impact, *Composite structures* 225 (2019) 1-13.
- [37] T.G. Río, R. Zaera, E.Barbero, C.Navarro, Damage in CFRPs due to low velocity impact at low temperature, *Composites Part B: Engineering* 36 (2005) 41-50.
- [38] A. Kurşun, M. Şenel, H.M. Enginsoy, E. Bayraktar, Effect of impactor shapes on the low velocity impact damage of sandwich composite plate: Experimental study and modelling, *composites Part B: 86* (2016) 143-151.
- [39] I.G.Moreno, M.Á. Caminero, G. P. Rodríguez, J. J. L.Cela, Effect of Thermal Ageing on the Impact Damage Resistance and Tolerance of Carbon-Fibre-Reinforced Epoxy Laminates, *Polymers* 11 (160) (2019) 1-15.
- [40] ASTM D7136/D7136M-20 standard test method for measuring the damage resistance of a fiber reinforced polymer matrix composite to a drop weight impact event.
- [41] R. Karakuzu, İ.C. Çalık, M.E. Deniz, Tabakalı Kompozit Plakların Darbe Davranışı Üzerine Deniz Suyu Etkisinin Araştırılması, *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 7(2/2) (2017) 1-12.
- [42] K.R. Ramakrishnan, S. Corn, N. L. Moigne, P. Ienny, P. Slangen, Experimental assessment of low velocity impact damage in flax fabrics reinforced biocomposites by coupled high-speed imaging and DIC analysis, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 140 (2021) 1-14.
- [43] N. Razali, M.T.H Sultan, F. Mustapha, N. Yidris, M.R. Ishak, Impact damage on composite structures – a review, *The International Journal Of Engineering And Science*, 3(7) (2014) 8-20.
- [44] H. Çallıoğlu, M Sayer, E Demir, Impact behavior of particles filled-glass/polyester composite plates, *Polymer Composites*, 32(7) (2011) 1125-1133.

- [45] K.I. Ismail, M.T.H. Sultan, A.U.M. Shah, M. Jawaaid, S.N.A. Safri, Low velocity impact and compression after impact properties of hybrid bio-composites modified with multi-walled carbon nanotubes, *Composites Part B*, 163 (2019), 455–463.
- [46] T.S. Reddy, P.R.S. Reddy, V. Madhu, Response of E-glass/Epoxy and Dyneema® Composite Laminates Subjected to low and High Velocity Impact, *Procedia Engineering*, 173 (2017) 278-285.
- [47] C. Atas, O. Sayman, An overall view on impact response of woven fabric composite plate, *Composite Structures* 82 (2008) 336–345.
- [48] Sayer M. (2009). Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- [49] Ü. Esendemir, A.Y. Caner, Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi, *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*, 22 (1) 2018 207-215.
- [50] H. Tuo, Z. Lu, X. Ma, C. Zhang, S. Chen, An experimental and numerical investigation on low-velocity impact damage and compression-after-impact behavior of composite laminates, *Composites Part B: Engineering*, 167 (2019) 329-341.
- [51] S. Zike, K. Kalnins, O. Ozolins, M. Knite, An Experimental and Numerical Study of Low Velocity Impact of Unsaturated Polyester/Glass Fibre Composite, *Materials Science*, Vol. 17, No. 4. 2011.
- [52] T. Shyr, Impact Resistance and Damage Characteristics of Composite Laminates *Composite Structures* 62 (11) 2003: pp. 193 – 203.
- [53] A. Pandian, M.T.H. Sultan, U. Marimuthu, A .U.M. Shah, Low Velocity Impact Studies on Fibre-Reinforced Polymer Composites and Their Hybrids -Review, *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, 5 (2020) 119-130.
- [54] C. Evcı, Thickness-dependent energy dissipation characteristics of laminated composites subjected to low velocity impact, *Composite Structures*, 133 (2015) 508-521.
- [55] Y. Zhong, S. C. Joshi, Improved impact response of hygrothermally conditioned carbon/epoxy woven composites, *Science and Engineering of Composite Materials*, 23(6) (2016) 699–710.
- [56] H. Cao, M. Ma, M. Jiang, L. Sun, L. Zhang, L. Jia, A. Tian, J. Liang, Experimental Investigation of Impactor Diameter Effect on Low-Velocity Impact Response of CFRP Laminates in a Drop-Weight Impact Event, *Materials*, 13(18) (2020) 1-16.
- [57] B. Yang, Z. Wang, L. Zhou, J. Zhang, W. Liang, Experimental and numerical investigation of interply hybrid composites based on woven fabrics and PCBT resin subjected to low-velocity impact, *Composite Structures*, 32 (2015) 464-476.
- [58] Y. Wan, C. Diao, B. Yang, L. Zhang, S. Chen, GF/epoxy laminates embedded with wire nets: A way to improve the low-velocity impact resistance and energy absorption ability, *Composite Structures*, 202 (2018) 818-835.
- [59] T.Topkaya, M.Y. Solmaz, Investigation of low velocity impact behaviors of honeycomb sandwich composites, *Journal of Mechanical Science and Technology* 32 (7) (2018) 3161-3167.
- [60] F. Sarasini, J. Tirillò, L. Ferrante, M. Valente, T. Valente, L. Lampani, P. Gaudenzi, S. Cioffi S. Iannace, L. Sorrentino, Drop-weight impact behaviour of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites, *Composites: Part B* 59 (2014) 204–220.
- [61] F. Bensadoun, D. Depuydt, J. Baets, I. Verpoest, A.W. Vuure, Low velocity impact properties of flax composites, *Composite Structures*, 176 (2017) 933-944.



## Improving the Mechanical Properties of GPLs-SiAlON Composites by Microfluidization Technique as a New Approach to Dispersion of GPLs

Sinem BAŞKUT<sup>1\*</sup> Servet TURAN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Eskisehir Technical University, Faculty of Engineering, Department of Materials Science and Engineering, 26555, ESKİŞEHİR

<sup>2</sup>MDA Advanced Ceramics, Organize Sanayi Bolgesi Teknoloji Bulvarı, 26250, ESKİŞEHİR

### Article Info

Research article

Received: 12.05.2022

Revision: 13.06.2022

Accepted: 29.06.2022

### Keywords

Graphene platelets (GPLs)

Microfluidization

Thickness of GPLs

Fracture toughness

### Abstract

Graphene platelets (GPLs) are frequently preferred as reinforcement material to improve the mechanical properties of many advanced technology ceramics, thanks to their superior properties. However, their reinforcement levels vary depending on whether they are homogeneously distributed in the matrix microstructure. This is generally controlled by the thickness (number of layers) of the GPLs. In general, single- or few-layer GPLs show high performance as reinforcement but are commercially expensive. This limits their large-scale use. This study aims to achieve the performance of the GPLs (GPL<sub>Ref</sub>), which is determined to have a high mechanical reinforcement level but is quite expensive, by economically thinning other GPLs (C0-GPL) with similar platelet size but thicker structure and cheaper. For this purpose, the microfluidization technique, a new approach to the dispersion of GPLs, was applied. C0-GPL was exposed to 1, 2, 4 and 8 cycles of microfluidization process. Microfluidized GPLs were added to the SiAlON matrix at a ratio of 1.5 wt %, and the GPLs-SiAlON composites were sintered using the spark plasma sintering (SPS) technique. The platelet size of C0-GPL decreased as the number of applied microfluidization cycles increased. However, while this reduction in platelet size was not significant up to 2 cycles, it was very pronounced at 4 and 8 cycles. Raman analyses revealed that GPLs could be dispersed effectively for up to 4 cycles. After this point, the GPLs fragmented rather than thin as the number of cycles increased. GPLs, slightly thinner than GPL<sub>Ref</sub> could be obtained with 2 cycles of microfluidization (C2-GPL). Therefore, C2-GPL were more homogeneously dispersed in SiAlON matrix microstructure compared to GPL<sub>Ref</sub>. As a result, both the through-plane and in-plane direction fracture toughness values of SiAlON matrix containing C2-GPL, which partially preserved the platelet size, were higher than those of GPL<sub>Ref</sub>-SiAlON. The fracture toughness of SiAlON matrix composites containing 4 and 8 cycles of microfluidized GPLs were lower than that of GPL<sub>Ref</sub>-SiAlON as an adverse effect of decreasing platelet size. It has been determined that the mechanical reinforcement performance of commercially expensive GPL<sub>Ref</sub> can be achieved economically by applying 2 cycles of microfluidization to cost-effective C0-GPL.

## 1. INTRODUCTION

GPLs are frequently used as reinforcement material in recent years due to their high surface area and superior mechanical properties (high fracture strength (~125 GPa) and Young's modulus (~1TPa)) [1-3]. It has been determined that the mechanical properties of many advanced technology ceramics, such as fracture toughness and flexural strength, are improved with the addition of GPLs. Study [4] in which 0.2, 0.5, 1, 2, 5 and 10 wt % GPLs were added to Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, the fracture toughness and strength of the matrix increased by approximately 9 and 3 %, respectively, at 0.2 wt % GPLs content. In another study [5], the fracture toughness of zirconia increased by about 30 % with the addition of 4 vol % graphene oxide. The fracture toughness and flexural strength of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matrix improved by 27 and 30 %, respectively, at 0.38 vol % GPLs content in a study conducted on GPLs-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites [6]. SiAlON, an alloy of silicon nitride (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), is included in the advanced technology ceramics group. It has industrial applications such as metal forming tools, milling media, blast nozzles, cutting tools, thermocouple protection tubes, riser, and heater tubes [7-9]. On the other hand, when its mechanical properties improve, its usage areas will increase and diversify.

For this purpose, the addition of GPLs to SiAlON as a reinforcement material is one of the appropriate strategies.

This study is a continuation of the study [10] investigating the effects of adding four GPLs with different properties such as size, thickness, and aspect ratio on the mechanical and tribological properties of the SiAlON matrix. In that study, the largest and thinnest GPLs (called GPL4) among the added GPLs provided the highest fracture toughness and tribological properties to SiAlON. However, the fact that the commercial price of these GPLs (GPL4) with good exfoliation is quite high compared to the others has limited its high-scale use. In that study, GPLs (called GPL3) with almost the same platelet size as GPL4 but thicker and cheaper exhibited a second higher mechanical reinforcement effect following the GPL4. The reason for the higher mechanical and tribological contribution of GPL4 to SiAlON compared to GPL3 was their more homogeneous dispersion in the matrix microstructure caused by their thinner structure. Therefore, the motivation of this study was to investigate whether the reinforcement level of GPL4 could be reached in economical ways by making GPL3 thinner/few-layered. The literature survey revealed that sonication, ball milling and centrifuge techniques are generally applied alone or in combination for the dispersing or thinning the GPL agglomerates [11-14]. However, the implementation of these techniques requires time.

In this study, the microfluidization technique, a new approach for the dispersing or thinning GPLs, was applied as an alternative to traditional techniques. Microfluidization is a technique that provides homogenization of particles under the influence of cavitation, shear and impact forces [15]. In the microfluidization process, the product loaded into the inlet reservoir is pumped into the interaction chamber, including fixed or different geometry microchannels, with the help of constant high pressure [16]. Particles exposed to processing in microchannels under the influence of various forces are collected in the outlet reservoir. The exfoliation process with microfluidization takes place faster than the sonication, ball milling and centrifuge techniques [17]. For the purpose of this study, commercially cheap GPL3 used in the previous study [10] were exposed to 1, 2, 4 and 8 cycles of microfluidization processes. All GPLs were added to the SiAlON matrix in the same amount and GPLs-SiAlON composites were produced using the SPS technique. Scanning electron microscopy (SEM), Raman analyses and the density, hardness, and fracture toughness measurements were performed.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. PRODUCTION OF THE MATERIALS

The GPLs (called GPL4 in the previous study) whose few-layered structure is desired to be reached in the study are called as GPL<sub>Ref</sub> (Graph. Chem. Ind. Comp.), and the cheap GPLs (called GPL3 in the previous study) to be microfluidized are named as C0-GPL (Graph. Chem. Ind. Comp.) during the study. Table 1 shows the properties of these two GPLs. C0-GPL was firstly dispersed for 1 h using the probe-sonication technique (Sonics, 750 Vef). Then, they were exposed to 1, 2, 4 and 8 cycles of microfluidization (Microfluidics Corp.) under constant pressure (1590 bar). GPLs prepared in 1, 2, 4 and 8 cycles are named as C1-GPL, C2-GPL, C4-GPL and C8-GPL, respectively. Platelet sizes and surface areas of the C0-GPL and microfluidized GPLs were measured. Isopropanol was removed from the microfluidized GPLs using a rotary evaporator (Heidolph).

**Table 1.** The properties of the GPL<sub>Ref</sub> and C0-GPL [18, 19, 25].

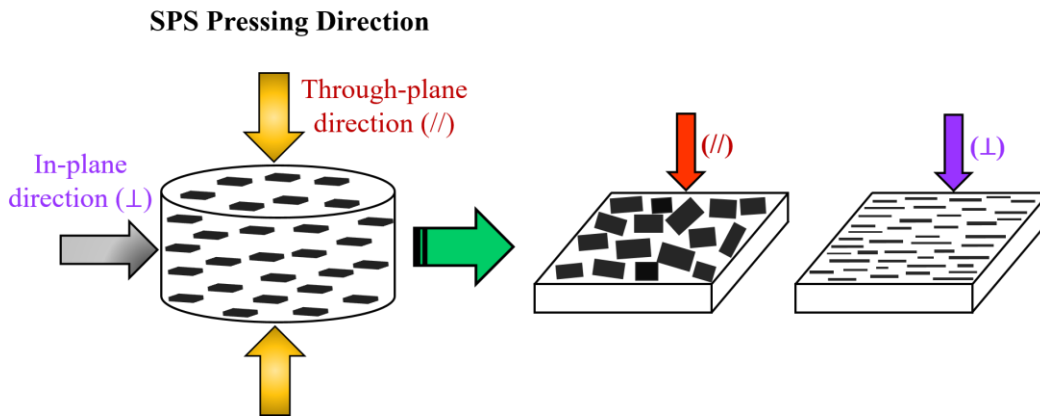
GPLs	Average Size (µm)	Thickness (nm)	Aspect Ratios	Purity (%)
GPL <sub>Ref</sub>	12.62 (5.40-30.45)	0.8-1.2	6,550-25,000	99.8
C0-GPL	12.22 (5.40-30.15)	5-8	675-3,770	99.9

The  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (UBE Industries Ltd., Japan), AlN (Tokuyama, H type, d50: 2-2.4 µm, Japan), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Alcoa-A16SG), Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99,9 % purity, H.C. Starck Berlin, Germany), CaCO<sub>3</sub> (Reidel-de Haen, Germany), Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

(99.9 % purity, Stanford Materials Corp., USA), were the powders forming the SiAlON matrix. SiAlON matrix composition was composed of 91 %  $\text{Si}_3\text{N}_4$  powder and 9 % sintering additives. GPL<sub>Ref</sub>, C0-GPL and microfluidized GPLs were added to SiAlON matrix powder at a ratio of 1.5 wt %. Powder mixtures were blended with 3 h probe-sonication in an isopropanol medium followed by planetary ball milling (Fritsch, Pulverisette) for 1.5 h at 300 rpm. The isopropanol removed from the slurries in a rotary evaporator. The SiAlON matrix and GPLs-SiAlON's powders were sintered using SPS (HP 25D, FCT GmbH) at 1800 °C with a uniaxial pressure of 50 MPa for 15 min under a vacuum atmosphere following the sieving process [18]. The produced samples had a diameter of 20 mm and a thickness of 6 mm.

## 2.2. CHARACTERIZATION OF THE MATERIALS

Due to the uniaxial pressure applied in the SPS causing the most of GPLs to be oriented in the matrix microstructure, samples were cut in the direction parallel and perpendicular to the SPS pressing axis. Measurements were carried out in the directions through-plane ( $\parallel$ , parallel to the SPS pressing axis) and in-plane ( $\perp$ , perpendicular to the SPS pressing axis). Figure 1 explains measurement directions.



**Figure 1.** Measurement directions depending on the SPS pressing axis.

The samples were molded with Bakelite and mechanically polished for investigations. The morphological secondary electron (SE-SEM) images of GPL<sub>Ref</sub>, C0-GPL and microfluidized GPLs, in-plane direction backscatter electron (BSE-SEM) images of the produced samples were obtained in the SEM (Zeiss, SUPRA 50 VP). In addition, the Raman (WITec, alpha 300) analyses were performed on GPL<sub>Ref</sub>, C0-, C1-, C2, C4- and C8-GPLs.

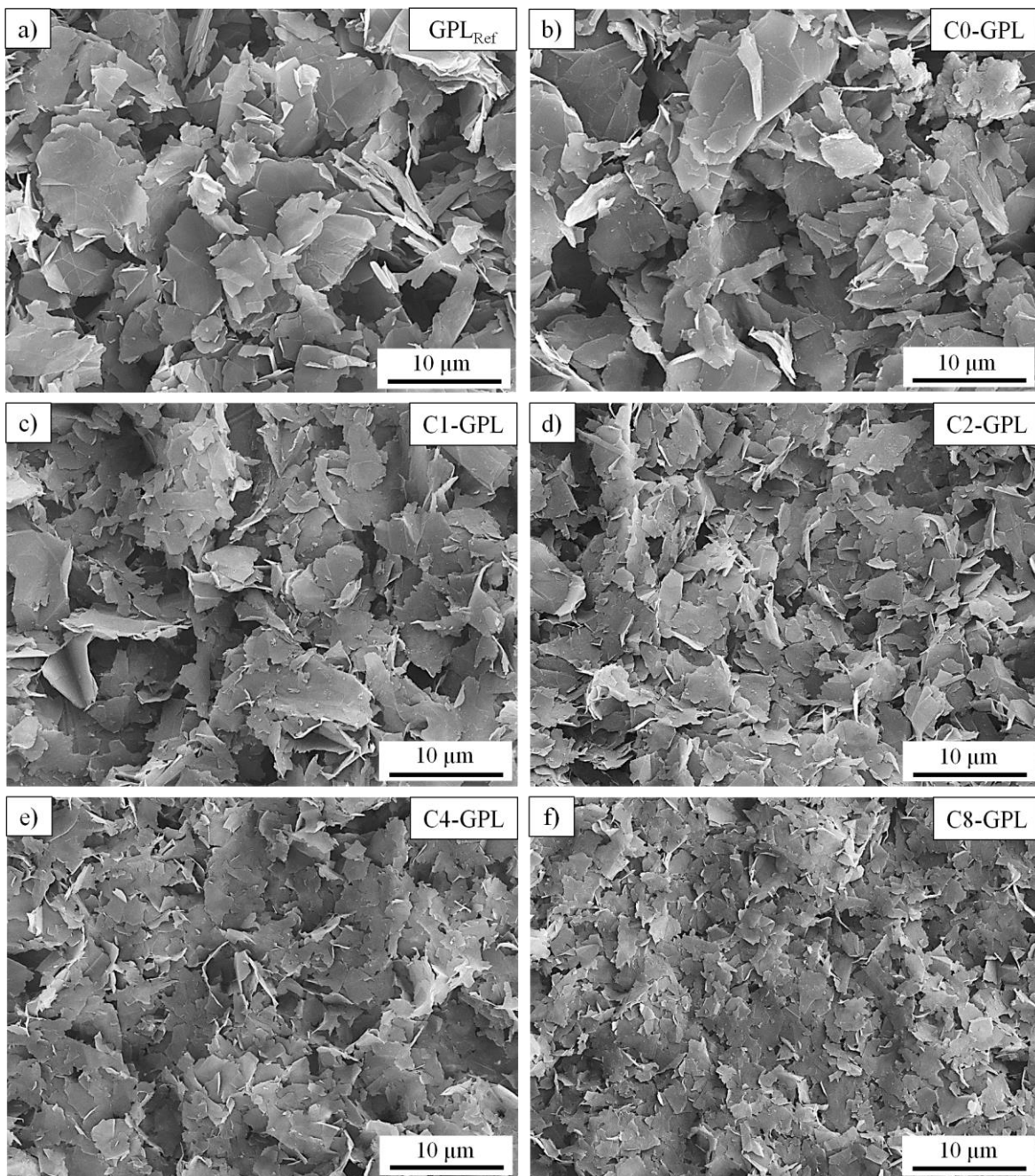
The bulk density values were measured by using the Archimedes method. Additionally, relative density values were calculated based on the volume-based rule of mixtures. For this, the bulk density of SiAlON and GPLs used as 3.23 and 2.26  $\text{gcm}^{-3}$ , respectively.

At least ten hardness measurements (Emco-Test) were made on the mechanically polished samples in the through-plane and in-plane directions under the conditions of 3 kg load for 10 s dwell time, and their average values were used in the study. The fracture toughness values were calculated using the Niihara equation [20].

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. MICROSTRUCTURE AND DENSITY INVESTIGATIONS

Figure 2 presents morphological SE-SEM images of  $GPL_{Ref}$ , non-microfluidized C0-GPL and 1, 2, 4 and 8 cycles of microfluidized GPLs. Platelet size measurements given elsewhere [19] and morphological images were compatible with each other. It was determined that the platelet sizes of  $GPL_{Ref}$  (Fig. 2 a) and C0-GPL (Fig. 2 b) were close to each other, and the platelet size of C0-GPL decreased in the range of ~13-65 % as the number of microfluidization cycles increased [19]. This revealed that cavitation, shear and impact forces in the interaction chamber led to the fragmentation of the GPLs. On the other hand, the surface area values of the C0-GPL increased as the applied microfluidization cycles increased (Table 2). Surface area values



**Figure 2.** Morphological SE-SEM images of the (a)  $GPL_{Ref}$ , (b) non-microfluidized C0-GPL and (c) 1, (d) 2, (e) 4 and (f) 8 cycle of microfluidized GPLs [18].

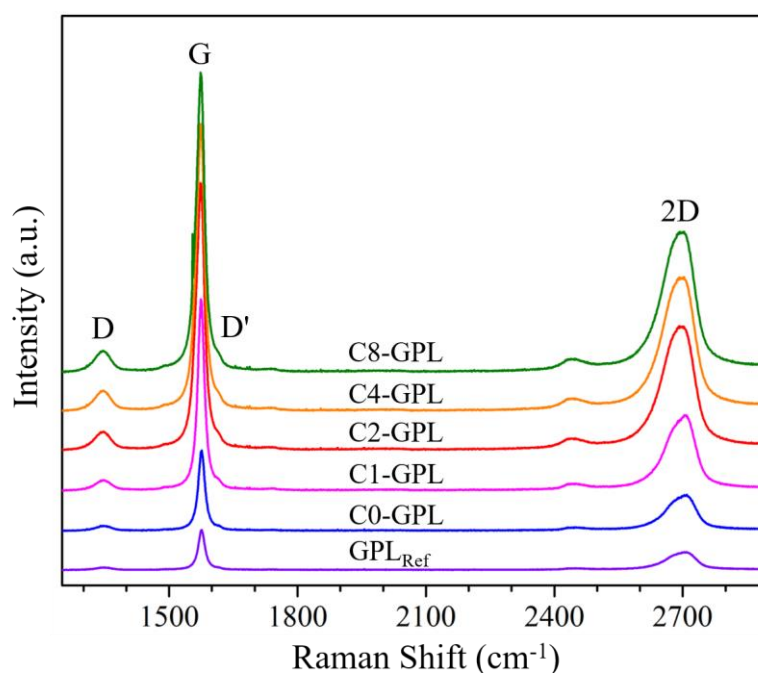
**Table 2.** The surface area values of the  $GPL_{Ref}$ , C0-GPL and microfluidized GPLs [18].

GPLs	Surface Area ( $m^2g^{-1}$ )
$GPL_{Ref}$	141.20
C0-GPL	90.15
C1-GPL	120.30
C2-GPL	180.95
C4-GPL	230.25
C8-GPL	260.67

higher than that of the  $GPL_{Ref}$  were obtained after 2 cycles of microfluidization (Table 2). Moreover, it has been observed that the microfluidized GPLs have a more uniform size distribution compared to  $GPL_{Ref}$  and C0-GPLs, which have significant size differences.

Figure 3 and Table 3 present the Raman spectra and the  $I_D/I_G$  ratios of the GPLs, respectively.  $I_D/I_G$  ratios were calculated based on the D- and G-band intensities in Raman spectra. In this study, at least ten Raman analyses were performed on each GPL, and the average values are used in Table 3. As the number of microfluidization cycles increased, the increasing  $I_D/I_G$  ratio (Table 3) showed that the microfluidization process led to degradation in the structure of the GPLs [21, 22]. This pointed out that it would be ideal for applying a small number of microfluidization cycles to the C0-GPL to achieve the reinforcement level of  $GPL_{Ref}$ .

The average  $I_{2D}/I_G$  ratio of the  $GPL_{Ref}$  (0.950), as well as the lowest (0.840) and highest (1.000) ratio indicated that it contains both multi-layered and few-layered structures [18]. The  $I_{2D}/I_G$  ratios obtained using the Raman spectra of the GPLs were presented in the previous study [19]. According to the average  $I_{2D}/I_G$

**Figure 3.** Raman spectra of the  $GPL_{Ref}$ , non-microfluidized C0-GPL and C1-, C2-, C4- and C8-GPLs [18].

**Table 3.** Average  $I_D/I_G$  values calculated by using at least ten Raman measurements from  $GPL_{Ref}$ , non-microfluidized GPLs and GPLs microfluidized at 1, 2, 4 and 8 cycles. The values in brackets are for the measurements range [18].

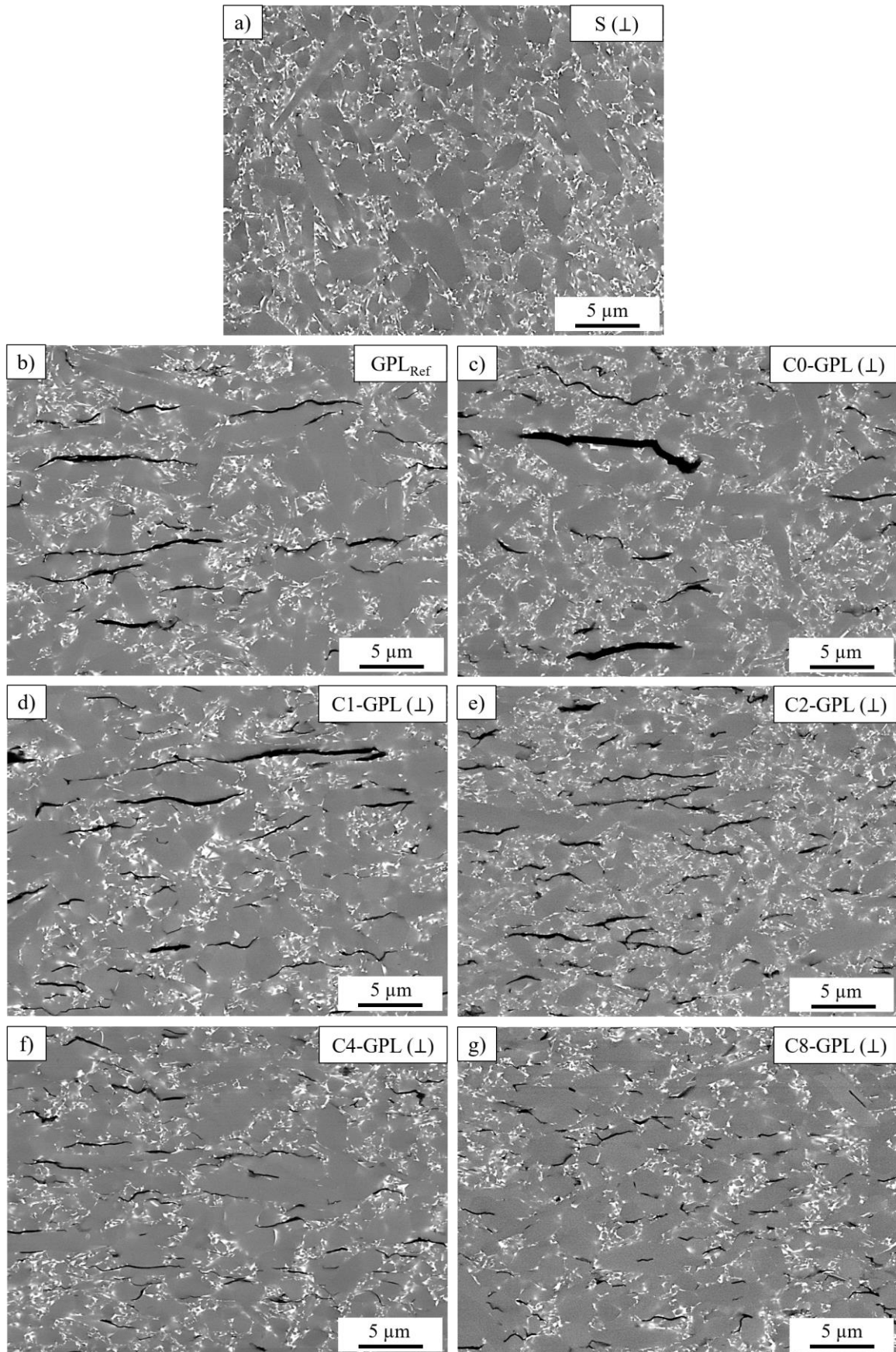
GPLs	Average $I_D/I_G$
$GPL_{Ref}$	0.820 (0.590-0.970)
C0-GPL	0.840 (0.730-0.950)
C1-GPL	0.850 (0.800-0.955)
C2-GPL	0.870 (0.820-0.960)
C4-GPL	0.920 (0.880-0.980)
C8-GPL	0.960 (0.890-0.987)

value (0.870) of the C0-GPL and its lower (0.770) and upper (0.980) ratio limits, it consists of GPLs that are thicker than the  $GPL_{Ref}$  [21,22]. As the number of microfluidization cycles applied to C0-GPL increased, the increase in the average  $I_{2D}/I_G$  ratio showed that the GPL agglomerates dispersed, and a part of them became thinner (few-layered) structures. However, it was determined that the average ratio value of C1-GPL was still lower than the  $GPL_{Ref}$  [18,19]. This showed that applying 1 cycle of microfluidization to C0-GPL was insufficient to achieve the  $GPL_{Ref}$ 's thickness distribution. When 2 cycles of microfluidization were applied to C0-GPL, the  $I_{2D}/I_G$  ratio value (0.960) exceeded that of  $GPL_{Ref}$ . While this increase in  $I_{2D}/I_G$  ratio value was rapid up to 4 cycles of microfluidization, there was no significant difference between the ratios of 4 (0.990) and 8 (0.992) cycles of microfluidized GPLs. When the  $I_{2D}/I_G$  ratios [19] and morphological images (Fig. 2) of the GPLs are evaluated together, it is concluded that the microfluidization applied in more than 4 cycles breaks down the GPLs in x- and y- directions rather than thinning or dispersing.

Since the through-plane and in-plane directions microstructures presented in the previous study [10] explained the distribution and orientation of SiAlON grains and GPLs, only in-plane direction BSE-SEM images of the samples were taken in this study. BSE-SEM images of the SiAlON matrix (a) and SiAlON matrix composites containing 1.5 wt %  $GPL_{Ref}$  (b), C0-GPL (c) and GPLs microfluidized at different cycles (d-g) are given in Figure 4. The predominantly distribution of the  $\alpha$ -SiAlON and basal planes of  $\beta$ -SiAlON grains in the in-plane direction microstructures indicated that some of the elongated surfaces of the  $\beta$ -SiAlON grains were oriented perpendicular to the SPS pressing axis (Fig. 4 a). In addition, it has been observed that  $\alpha$ -,  $\beta$ -SiAlONs and liquid phase are homogeneously dispersed without porosity in the microstructure of SiAlON matrix. Microstructures of composites containing  $GPL_{Ref}$  and C0-GPL also showed that C0-GPL was thicker than  $GPL_{Ref}$ , which supported the Raman analysis. As a result, C0-GPLs (Fig. 4 c) have formed GPL clusters and GPL-poor regions in the matrix microstructure, resulting in less homogeneous distribution than  $GPL_{Ref}$  (Fig. 4 b).

While the platelet size reduction of C0-GPL with the microfluidization process was slightly evident up to 2 cycles, it became very pronounced after 4 cycles. It has been observed that the distribution of C1-GPL in the matrix microstructure was more homogeneous than that of C0-GPL, and became almost similar to the distribution of  $GPL_{Ref}$ . However, microstructures also showed that C1-GPLs still contained thicker GPLs than  $GPL_{Ref}$ , as noted in Raman analyses [19]. The size distributions of C2-GPLs were more uniform than  $GPL_{Ref}$ , C0-GPL, and C1-GPL. Additionally, C2-GPL's distribution in the matrix microstructure was also more homogeneous than those of  $GPL_{Ref}$ , C0-GPL, and C1-GPL. The reduction in the size of the C4-GPL and C8-GPLs was quite distinct when compared to the C2-GPL. However, there was no significant difference between the distributions of the C2-GPL, C4-GPL and C8-GPL in the matrix microstructure. In addition to all these, there was no porosity in the microstructures of all GPL-SiAlON composites as in





**Figure 4.** In-plane direction ( $\perp$ ) BSE-SEM images of the (a) SiAlON matrix and SiAlON matrix composites containing 1.5 wt % (b) GPL<sub>Ref</sub>, (c) C0-, (d) C1-, (e) C2-, (f) C4- and (g) C8-GPLs [10,18].

SiAlON matrix. BSE-SEM images taken in the in-plane direction indicated that the most of GPLs oriented in the SiAlON matrix microstructure with their basal planes perpendicular to the SPS pressing axis.

Table 4 shows the bulk and relative density values of the SiAlON matrix and GPLs-SiAlON composites. The relative density of the SiAlON matrix was accepted as 100 % as no porosity was found in its microstructure (Fig. 4 a). However, the bulk density of the SiAlON matrix decreased slightly by ~ 1 % with the addition of 1.5 wt % GPLs. The porosities caused by elastic modulus/thermal expansion coefficient mismatches between GPLs and SiAlON and the lower density of GPLs compared to the SiAlON matrix may be the reason for this decline. However, the relative densities higher than 99 % and microstructures of GPL-SiAlON composites indicated that they are highly dense materials.

**Table 4.** Bulk and relative density values of the SiAlON matrix and SiAlON matrix composites containing 1.5 wt %  $GPL_{Ref}$ , C0-, C1-, C2-, C4- and C8-GPLs [18].

Materials	Bulk Density ( $gcm^{-3}$ )	Relative Density (%)
SiAlON	3.240	100.00
$GPL_{Ref}/S$	3.200	99.50
C0-GPL/S	3.210	99.50
C1-GPL/S	3.215	99.70
C2-GPL/S	3.218	99.80
C4-GPL/S	3.211	99.56
C8-GPL/S	3.195	99.10

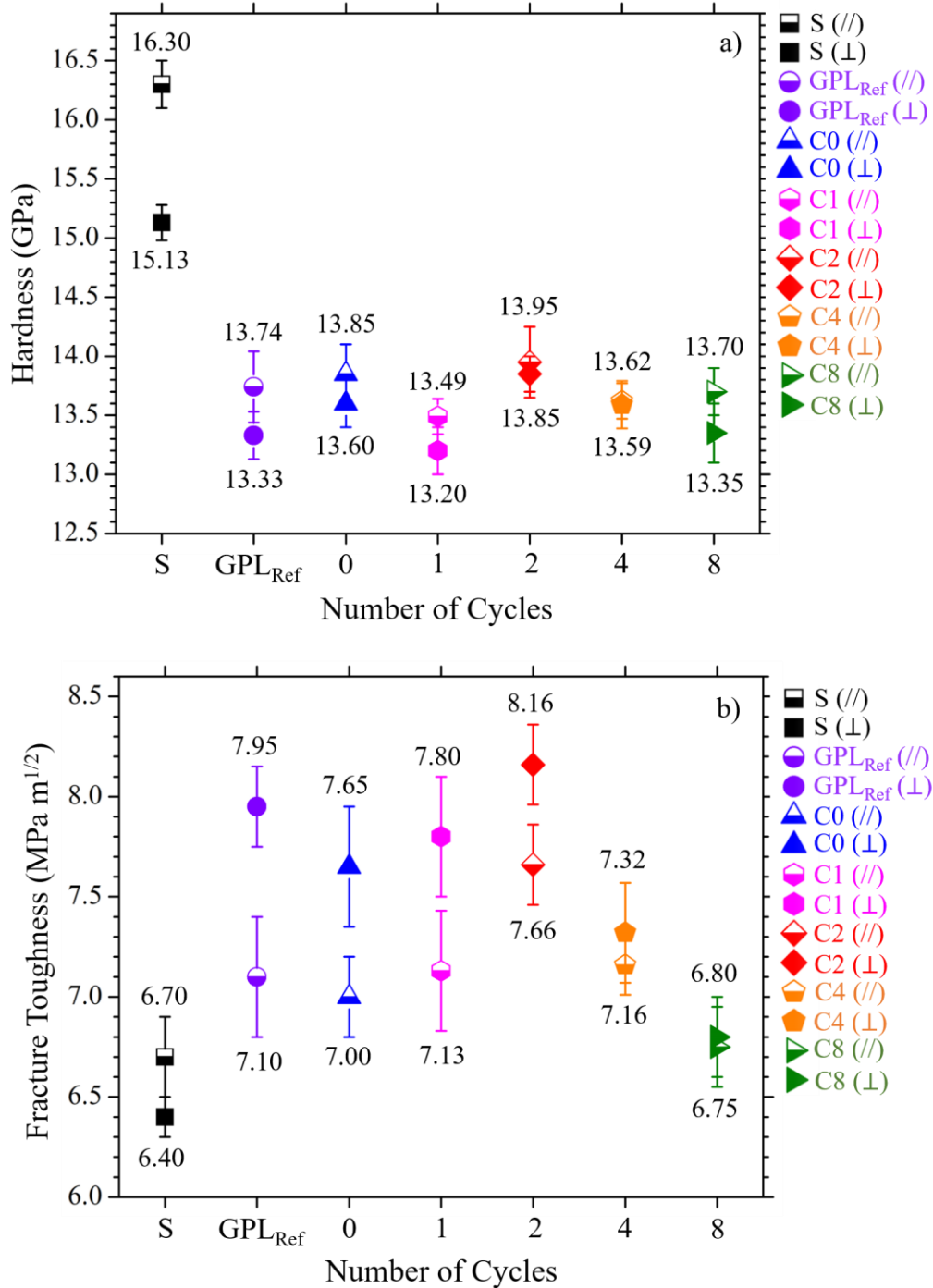
### 3.2. MECHANICAL PROPERTIES

Figure 5 shows the (a) hardness and (b) fracture toughness values of SiAlON matrix and SiAlON matrix composites containing  $GPL_{Ref}$ , C0-, C1-, C2-, C4- and C8-GPL in the through-plane and in-plane directions. The hardness value of SiAlON matrix in the through-plane direction was ~ 8 % higher than the in-plane direction hardness value. This result is consistent with the results obtained by Santos et al. [23], who measured the hardness values of hot pressed  $Si_3N_4$  ceramics. The authors [23], who achieved weak orientation in their studies, found the hardness value of 16.30 GPa on the surface (c-axis) parallel to the elongated surfaces of the  $\beta$ - $Si_3N_4$  grains, while it has found 15.90 GPa on the perpendicular surface (a, b axis). On the other hand, the fact that the hardness value in the through-plane direction of GPLs-SiAlON composites was slightly higher than the values in the in-plane direction and this difference was lower than that of the SiAlON matrix indicated almost isotropic hardness behavior.

The hardness of the SiAlON matrix decreased by about 15 % with the addition of 1.5 wt % GPLs. One of the main reasons for this decrease in hardness is that GPLs have a lower hardness value than SiAlON. In addition, the tendency of GPLs to agglomerate and, in this case, the weak interfacial bonds with SiAlON grains are the parameters that negatively affect the hardness values.

The fracture toughness of the SiAlON matrix in the through-plane direction was ~ 5 % higher than in the in-plane direction. This can be attributed to the lying of the elongated surfaces of  $\beta$ -SiAlON grains in this plane perpendicular to the through-plane direction. On the other hand, with the addition of  $GPL_{Ref}$ , the fracture toughness values of the SiAlON matrix in the in-plane and through-plane directions improved by about 24 and 6 %, respectively. Further, the addition of C0-GPL improved the fracture toughness values of the SiAlON matrix by ~20 and 4 % in the in-plane and through-plane directions, respectively. It was observed that the in-plane and through-plane directions toughness values of SiAlON matrix increased by ~

22, 28, 14 and 6 %, and by ~ 6, 14, 7 and 0.7 % with the addition of C1-, C2-, C4- and C8-GPLs, respectively. Among the microfluidized GPLs, C2-GPL increased the fracture toughness of the SiAlON matrix the most in both directions. In the composites containing microfluidized GPLs, the fracture toughness increased up to 2 cycles and decreased as cycle numbers increased (Fig. 5 b). Since C2-GPL is

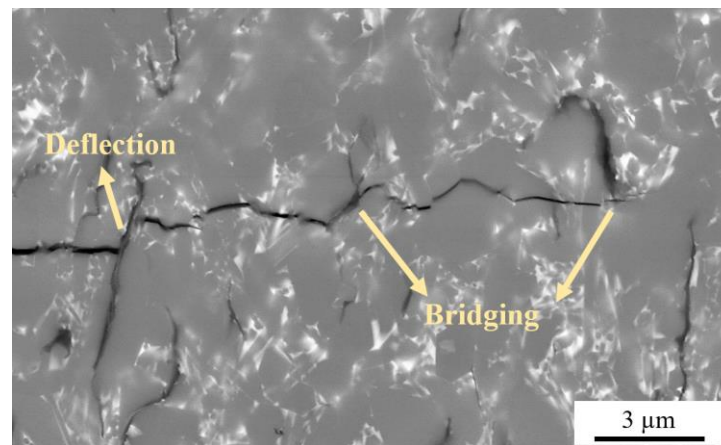


**Figure 5.** (a) Hardness and (b) fracture toughness values of the SiAlON matrix and SiAlON matrix composites containing 1.5 wt % GPL<sub>Ref</sub>, C0-, C1-, C2-, C4-, C8-GPLs in the through-plane (//) and in-plane (⊥) directions [18].

thinner than C0-GPL and C1-GPL, their more homogeneous distribution in the matrix microstructure ensures that the fracture toughness of the composite containing C2-GPL is higher than the others. When

GPLs are homogeneously dispersed in the matrix, the crack encounters more GPLs as it progresses. The realization of more toughening mechanisms such as crack deflection and bridging (Fig. 6) positively affects fracture toughness [14]. On the other hand, although the dispersion levels of C2-GPL, C4-GPL, and C8-GPL were almost similar in the SiAlON matrix, C2-GPL had the highest fracture toughness performance, indicating the positive effect of large platelet size. Larger GPLs delay crack propagation more than smaller ones [10, 24].

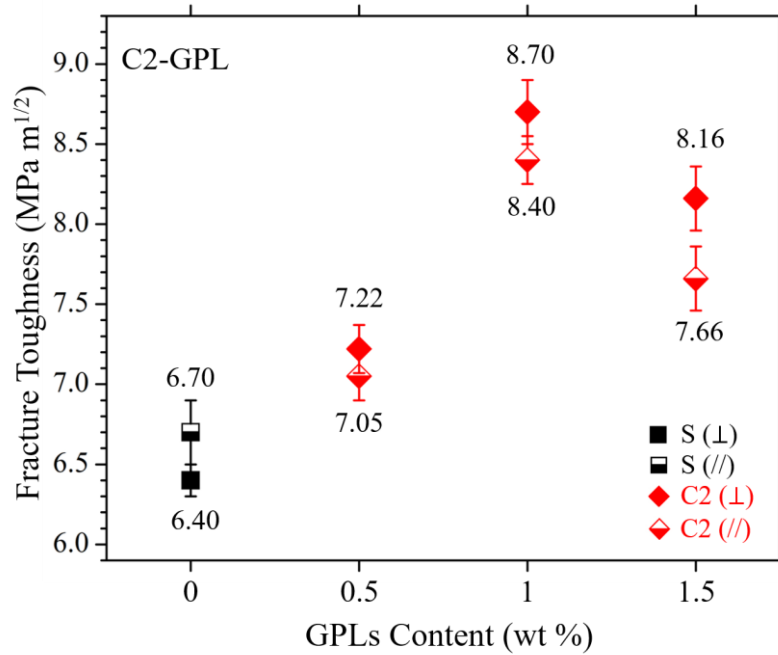
It was also observed that the fracture toughness of the composite containing C2-GPL was higher than those containing GPL<sub>Ref</sub> in both directions. The most obvious reason for this was that C2-GPLs were more homogeneously dispersed in the matrix microstructure, due to the fact that they contained thinner GPLs than GPL<sub>Ref</sub>. Although the size of C2-GPL is ~ 25 % smaller than GPL<sub>Ref</sub>, this difference in platelet size did not adversely affect the fracture toughness performance it provides to SiAlON. Another reason why the fracture toughness of SiAlON containing C2-GPL was higher than that containing GPL<sub>Ref</sub> was that it had a more uniform platelet size distribution.



**Figure 6.** Toughening mechanisms took place along a portion of a representative crack in the SiAlON matrix composite containing C2-GPL in the in-plane ( $\perp$ ) direction.

Following the determination that SiAlON containing 1.5 wt % C2-GPL has the highest fracture toughness, SiAlON matrix composites containing 0.5 and 1 wt % C2-GPL were produced to investigate whether the fracture toughness could be further increased without affecting the hardness of SiAlON. Figure 7 shows the fracture toughness behavior of SiAlON composites containing 0.5, 1 and 1.5 wt % C2-GPL. The fracture toughness values of SiAlON in the in-plane and through-plane directions increased by ~13, 36 % and ~ 5 , 25 %, with the addition of 0.5 and 1 wt % C2-GPLs, respectively. C2-GPL/SiAlON composites had the highest fracture toughness value among themselves at 1 wt % C2-GPL content. In the previous study [10], when 1 wt % GPL<sub>Ref</sub> was added to SiAlON, the highest toughness value was reached, and a toughness increase of ~33 and 21 % in the in-plane and through-plane directions, respectively. The addition of C2-GPL increased the toughness value of SiAlON more than GPL<sub>Ref</sub> in both directions.

The fracture toughness values of all GPL-SiAlON composites were higher in the in-plane direction than in the through-plane direction due to the orientation of the GPLs in the matrix microstructures (Fig. 5 b). However, this difference has decreased as the platelet sizes of the GPLs have decreased. This can be explained by the decreasing tendency of the GPLs to orient in the matrix microstructure as the platelet sizes get smaller [10].



**Figure 7.** Through-plane and in-plane directions fracture toughness values of SiAlON matrix composites containing 0.5, 1 and 1.5 wt % C2-GPL [18].

#### 4. CONCLUSION

In this study, it was investigated whether the mechanical reinforcement performance of GPL<sub>Ref</sub>, which is commercially expensive as a result of its good exfoliation and has been found to improve the fracture toughness of SiAlON significantly, can be achieved economically. For this, it was aimed to thin the C0-GPL, which has the same platelet size as GPL<sub>Ref</sub> but is thicker and cheaper, to provide homogeneous dispersion at the same level as GPL<sub>Ref</sub> in the matrix microstructure. A new approach, the microfluidization technique, was used for the thinning/dispersion of C0-GPL. Among the SiAlON matrix composites containing 1 (C1-GPL), 2 (C2-GPL), 4 (C4-GPL) and 8 (C8-GPL) cycles of microfluidized GPLs, the fracture toughness values of the SiAlON containing C2-GPL were found to be higher than those containing GPL<sub>Ref</sub>. This was because, by applying 2 cycles of microfluidization to C0-GPL, GPLs thinner than GPL<sub>Ref</sub> could be obtained, resulting in a more homogeneous distribution in the matrix microstructure. Another reason for this was partially preserving the platelet size of the C0-GPL with 2 cycles of microfluidization.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The Eskisehir Technical University Scientific Research Projects under the project numbers of 1606F570 and 19ADP019 supported this work. Authors would like to thank to MDA Advanced Ceramics Ltd. for providing all the raw materials and to Prof. Dr. A. Tuğrul Seyhan for providing the microfluidization device.

#### REFERENCES

- [1] Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S.I., Seal, S. (2011). Graphene based materials: past, present and future. *Prog. in Mater. Sci.*, 56, 1178–1271. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.03.003>
- [2] Mas-Balleste, R., Gomez-Navarro, C., Gomez-Herrero, J., Zamora, F. (2011). 2D materials: to graphene and beyond. *Nanoscale*, 3, 20-30. <https://doi.org/110.1039/C0NR00323A>

- [3] Geim, A.K., Novoselov, K.S. (2007). The rise of graphene. *Nat. Mater.*, 6, 183–191. [https://doi.org/10.1142/9789814287005\\_0002](https://doi.org/10.1142/9789814287005_0002)
- [4] Yaping, Y., Bin, L., Changrui, Z., Siqing, W., Kun, L., Bei, Y. (2015). Fabrication and properties of graphene reinforced silicon nitride composite materials. *Mat. Sci. & Eng. A*, 644, 90-95. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.07.062>
- [5] Zeng, Z., Liu, Y., Chen, W., Li, X., Zheng, Q., Li, K., Guo, R. (2018). Fabrication and properties of in situ reduced graphene oxide-toughened zirconia composite ceramics. *J. of Amer. Ceram. Soc.*, 101, 3498. <https://doi.org/10.1111/jace.15483>
- [6] Liu, J., Yan, H., Jiang, K. (2013). Mechanical properties of graphene platelet-reinforced alumina ceramic composites. *Ceram. Inter.*, 39 (6), 6215-6221. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.01.041>
- [7] El-Amir, A.A.M., El-Maddah, A.A., Ewais, E.M.M., El-Sheikh, S.M., Bayoumi, I.M.I., Ahmed, Y.M.Z. (2021). Sialon from synthesis to applications: an overview. *J. of Asian Ceram. Soc.*, 9 (4), 1390-1418. <https://doi.org/10.1080/21870764.2021.1987613>
- [8] Hoffmann, M.J. (2011). Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Ceramics, Structure and Properties of, *Encyclopedia of Materials. Sci. and Tech.* <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01513-8>.
- [9] Ekström, T., Nygren, M. (1992). SiAlON ceramics. *J. of Amer. Ceram. Soc.*, 75, 259–276. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1992.tb08175.x>
- [10] Baskut, S, Sert, A., Çelik, O.N., Turan, S. (2021). Anisotropic mechanical and tribological properties of SiAlON matrix composites containing different types of GNPs. *J. of the Europ. Ceram. Soc.*, 41, 1878–1890. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.10.071>
- [11] Taylor, A.C. (2012). Processing of polymer nanocomposites. *Manufac. Tech. for Poly. Mat. Comp. (PMCs)*, 95-119. <https://doi.org/10.1533/9780857096258.1.95>
- [12] Porwal, H., Tatarko, P., Grasso, S., Khaliq, J., Dlouhý, I., Reece, M.J. (2013). Graphene reinforced alumina nano-composites. *Carbon*, 64, 359-369. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.07.086>
- [13] Yun, C., Fenga, Y., Qiu, T., Yang, J., Li, X., Yu, L. (2015). Mechanical, electrical, and thermal properties of graphene nanosheet/aluminum nitride composites. *Ceram. Inter.*, 41(7), 8643-8649. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.03.075>
- [14] Tapasztó, O., Puchy, V., Horváth, Z.E., Fogarassy, Z., Bódis, E., Károly, Z., Balázs, K., Dusza, J., Tapasztó, L. (2019). The effect of graphene nanoplatelet thickness on the fracture toughness of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composites. *Ceram. Inter.*, 45(6), 6858-6862. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.12.180>
- [15] <https://www.beei.com/blog/microfluidization-how-does-it-work>
- [16] <https://www.microfluidics-mpt.com/microfluidics-technology/how-it-works>.
- [17] Yurdakul, H., Göncü, Y., Durukan, O., Akay, A., Seyhan, A.T., Ay, N., Turan, S. (2012). Nanoscopic characterization of two-dimensional (2D) boron nitride nanosheets (BNNSs) produced by Microfluidization. *Ceram. Inter.*, 38, 2187-2193. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.10.064>
- [18] Başkut, S. (2019). The Effect of Different Graphene Nanoplatelets Addition on Mechanical, Thermal and Electrical Properties of SiAlON Ceramics, PhD Thesis, Eskisehir Technical University, Institute of Graduate Programs.
- [19] Başkut, S., Turan, S. (2022). The Effects of Applying Microfluidization at Different Cycles on the Properties of Graphene Platelets. 8th International Istanbul Scientific Research Congress, 505-509. ISBN: 978-605-711167-8-9

- [20] Rangel, E.R. (2011). Fracture Toughness Determinations by Means of Indentation Fracture, Nanocomposites with Unique Properties and Applications in Medicine and Industry. InTech. ISBN:978-953-307-351-4.
- [21] Childres, I., Jaureguib, L.A., Park, W., Cao, H., Chen, Y.P. (2010). Raman spectroscopy of graphene and related materials. 97, 173109.
- [22] Wall, M. The raman spectroscopy of graphene and the determination of layer thickness. Thermo Fisher Scientific, Application Note: 52252.
- [23] Santos, C., Strecker, K., Baldacim, S.A., da Silva, O.M.M., da Silva, C.R.M. (2004). Influence of additive content on the anisotropy in hot-pressed Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics using grain orientation measurements. Ceram. Inter., 30 (5), 653-659. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2003.07.011>
- [24] Chatterjee, S., Nafezarefi, F., Tai, N.H., Schlagenhaut, L., Nüesch, F.A., Chu, B.T.T. (2012). Size and synergy effects of nanofiller hybrids including graphene nanoplatelets and carbon nanotubes in mechanical properties of epoxy composites. Carbon, 50, 35380–5386. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.07.021>
- [25] Başkut, S., Turan, S. (2020). The effect of different GNPs addition on the electrical conductivities and percolation thresholds of the SiAlON matrix composites. J. of the Europ. Ceram. Soc., 40 (4), 1159-1167. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.11.057>

## Design of an Air Source Heat Pump Having a Waste Heat Defrosting Method with Natural Refrigerant

Mustafa GÜLMEZ<sup>1</sup>  Mustafa AKTAŞ<sup>2</sup>  Süleyman ERTEN<sup>3</sup>  Fatma Nur ERDOĞMUŞ<sup>3,\*</sup>  Melis ÖDER<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Gazi University, Naturel and Applied Science Institute, Department of Energy Systems Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

<sup>2</sup>Gazi University, Technology Faculty, Department of Energy Systems Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

<sup>3</sup>Nurdil Refrigeration Inc. 06935, Sincan/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
Received: 25.04.2022  
Revision: 23. 05 2022  
Accepted: 02.06.2022

#### Highlights

- Defrosting
- Waste Heat Recovery
- Energy Efficiency

#### Keywords

Defrost,  
Defrost Efficiency,  
Energy Efficiency,  
Heat Pump,  
Waste Heat

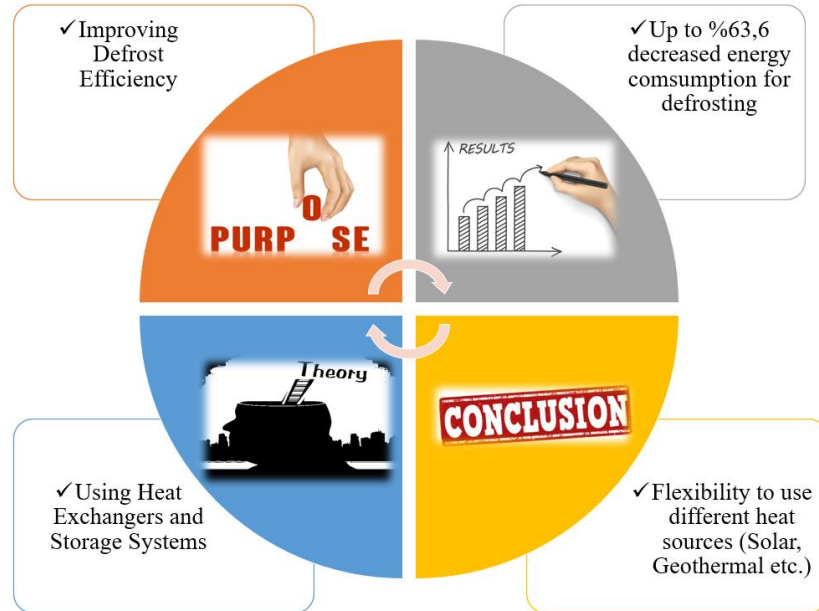


Figure A. Schematical infrastructure of designed system

**Purpose:** In this theoretical study, a heat pump system that works with R290 refrigerant and has heat recovery is designed. In the designed system, it is considered to use the waste heat for the defrosting process. Thus, no additional energy will be used for defrosting. In this case, it is aimed to increase the performance coefficient of the system.

**Theory and Methods:** In the designed heat pump system; gathering waste heat with heat exchangers and by storing that heat with the help of a hot water tank, it is aimed to melting the ice formed in the outdoor unit with the stored hot water when necessary. In addition, the efficiency of the system has been increased by pumping the cold water in the tank to the heat exchanger at the condenser outlet in the system and performing sub-cooling.

**Results:** In the designed system coefficient of performance of heat pump calculated as 2.75. By using this model, the energy consumed for defrost is reduced by 63.6% (1/COP) compared to the electric heater defrost method.

**Conclusion:** By adding different waste heat sources or solar energy to this system, the performance can be increased further and positive contributions can be made to the energy systems. Thus, the designed system includes heating, drying, greenhouse heating and preheating etc. can be used in processes with high performance.





## Design of an Air Source Heat Pump Having a Waste Heat Defrosting Method with Natural Refrigerant

Mustafa GÜLMEZ<sup>1</sup>  Mustafa AKTAŞ<sup>2</sup>  Süleyman ERTEN<sup>3</sup>  Fatma Nur ERDOĞMUŞ<sup>3,\*</sup>  Melis ÖDER<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Gazi University, Naturel and Applied Science Institute, Department of Energy Systems Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

<sup>2</sup>Gazi University, Technology Faculty, Department of Energy Systems Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

<sup>3</sup>Nurdil Refrigeration Inc. 06935, Sincan/ANKARA

### Abstract

Climate change and environmental pollution are among the most important issues facing humanity nowadays. The importance of the selection of refrigerants used in energy systems and the use of eco-friendly refrigerants are increasing day by day. The selection of refrigerants with low global warming potential (GWP) and ozone depletion potential (ODP) imposes an important mission on researchers in terms of environmental awareness.

In this study, efficiency analysis of a heat pump system designed by using hydrocarbon refrigerant propane (R290) was carried out. In this system, which is designed differently from traditional heat pumps; heat of the refrigerant at compressor outlet and evaporator outlet is recovered with the help of sub-cooling and coaxial heat exchangers and stored at the accumulation tank. The efficiency analysis is made for the optimum working case of the system. In the analyzes made, the coefficient of performance (COP) value of the heat pump was calculated as 2.75. In the developed model, the amount of energy consumed during the defrost process has been reduced by 63.6% as compared to the electric heater defrost method. It has been assessed that the efficiency of system can be even more by utilizing solar energy.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 25.04.2022  
Düzeltilme: 23.05.2022  
Kabul: 02.06.2022

### Keywords

Defrost  
Defrost Efficiency  
Energy Efficiency  
Heat Pump  
Waste Heat

### Anahtar Kelimeler

Defrost  
Defrost Verimliliği  
Enerji Verimliliği  
Isı Pompası  
Atık Isı

## Hava Kaynaklı Atık Isı Defrost Yöntemli ve Doğal Soğutucu Akışkanlı Bir Isı Pompası Sisteminin Tasarımı

### Öz

İklim değişikliği ve çevre kirliliği günümüzde insanlığın karşılaştığı en önemli sorunlar arasında yer almaktadır. Enerji sistemlerinde kullanılan soğutucu akışkanların seçimi ve çevre dostu soğutucu akışkanların kullanımının önemi gün geçtikçe artmaktadır. Düşük küresel ısınma potansiyeline (KIP) ve ozon delme potansiyeline (ODP) sahip soğutucu akışkan seçimi çevre duyarlılığı açısından araştırmacılara önemli bir misyon yüklemektedir.

Bu çalışmada, hidrokarbon soğutucu akışkan olan Propan (R290) kullanılarak tasarlanmış bir ısı pompası sisteminin verimlilik analizi gerçekleştirilmiştir. Geleneksel ısı pompalarından farklı olarak tasarlanan bu sistemde; aşırı soğutma ve koaksiyel eşanjör elemanları yardımıyla kompresör ve kondenser çıkışlarındaki soğutucu akışkanın ısıları akümülyasyon tankında depolanmıştır. Sistemin optimum çalışma durumu için verimlilik analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerde, ısı pompasının performans katsayısı (COP) değeri 2,75 olarak hesaplanmıştır. Geliştirilen modelde, defrost süresince harcanan enerji miktarı elektrikli ısıtıcı defrost yöntemine göre %63,6 oranında azaltılabileceği tespit edilmiştir. Güneş enerjisi kullanılarak sistemin verimliliğinin daha da artırılacağı öngörülmüştür.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İçinde bulunduğumuz yüzyılda, yapılan araştırmalara göre iklim değişikliği ile yer kürede 1,3°C ile 4,3°C arasında sıcaklık artışı olacağı ortaya koyulmaktadır [1]. Küresel ısınmanın gün geçtikçe arttığı bu dönemde

ısıtma ve soğutma sistemlerinin bu süreçteki payı önemli ölçülerdedir. Soğutma sistemlerinde soğutucu akışkan olarak Freon, Kloroflorokarbonlar (CFC), Hidrofloroolefin (HFO), Hidrokloroflorokarbonlar (HCFC), Hidroflorokarbonlar (HFC) gibi küresel ısınma potansiyeli ve ozon delme potansiyeli yüksek soğutucu akışkanlar kullanılmaktaydı. Bahsedilen soğutucu akışkanların çevreye olan zararları tespit edildikten sonra Dünyada ve Türkiye’de soğutucu akışkan kullanımına sınırlamalar getirilmiştir. Bu sınırlamalardan bazıları ise 1990 yılında imzalanan Uluslararası Montreal Protokolü, 1998 yılında imzalanan Kyoto protokolü, 2006 yılında Avrupa Birliği tarafından yayınlanıp 1 Ocak 2015 tarihinde yürürlüğe giren Florlu Gazlar Yönetmeliği ve son olarak Türkiye’de ise 4 Ocak 2018’de yayınlanan Florlu Sera Gazları (F-Gaz) Yönetmeliği olarak sıralanabilir [2, 3]. Yürürlüğe giren yönetmelik ve protokoller sayesinde soğutucu akışkan kullanımı ve enerji tüketimi kontrol altına alınmıştır. Yapılan düzenlemeler neticesinde doğal soğutucu akışkanlara (CO<sub>2</sub>, Amonyak, hidrokarbonlar vb.) yönelim artmıştır. Bu durum ısı pompası sistemleri için de geçerlidir. Isı pompası sistemleri mesken ve ticarethanelerde mevsimsel değişimlere göre ısıtma ve soğutma amacıyla kullanılmaktadır. Son kullanıcı için ısı pompalarının enerji tüketimi ve Performans Katsayısı (COP) önem arz etmektedir. Enerji verimliliği çalışmalarında atık ısı depolama tekniğine sıkça rastlanmaktadır.

Mengjie ve ark. (2018), hava kaynaklı ısı pompalarındaki defrost metotlarını incelemişlerdir. 5 adet defrost yöntemini bildirmişlerdir. Bildirilen defrost yöntemleri sırasıyla; sıcak hava akımı ile defrost, elektrik rezistanslı defrost, sıcak su püskürtmeli defrost, hotgas (sıcak gaz) bypass defrost ve ters çevrime sahip defrost yöntemidir. Ters çevrime sahip defrost yöntemi aralarında en verimli olduğu bildirilmiş ve bu defrost yöntemine 6 farklı iyileştirme yöntemi sunulmuştur [4]. Park ve Jung (2007), yılında yapmış oldukları çalışmada; etan ve propan (R170/R290) karışımı ile çalışan sudan suya ısı pompasının performansını analiz etmişlerdir. Kompresör çıkış sıcaklığındaki azalmanın daha az termal stres oluşturduğunu ve kompresör ömrünü artırdığını belirtmişlerdir [5].

Shen ve ark. (2019), yapmış oldukları çalışmada faz değiştiren malzeme (FDM) içeren hava kaynaklı ısı pompalarındaki defrost yöntemini araştırmışlardır. Hotgas bypass defrost ve ters çevrimli defrost yöntemi son zamanlarda yaygın olarak uygulandığını belirtmişlerdir. Faz değiştiren malzeme içeren ısı pompasındaki defrost yöntemi; ters çevrimli ve hotgas bypass defrost yöntemleri ile kıyaslandığında uzun süren defrost işlemi kısaltılmıştır [6].

Moallem vd. (2014) ısı eşanjörleri üzerine yapmış oldukları bir çalışmada evaporatör yüzeyleri üzerine uygulanan kaplamaların oluşabilecek donma etkilerini araştırmışlardır. Buna göre uygulanan hidrofilik ve hidrofobik kaplamaların etkileri gözlemlenmiştir. Yürütülen çalışmanın sonuçlarına göre; hidrofobik yüzeylerin uygulanan kaplama sonrasında 13 dakikada buzlanma gösterdiği, hidrofilik yüzeylerin ise daha uzun sürede buzlanma göstererek 20 dakikada buz ile kaplandığı belirtilmiştir. Hidrofilik yüzeylerin donmayı geciktirme performanslarının hidrofobik yüzeylere oranla %4,5 daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir [7].

Erten ve Uludağ (2019), soğutma sistemlerinde R404a ve R290 soğutucu akışkan kullanımını analiz etmiş ve soğutkan performanslarını karşılaştırmışlardır. Yapılan analiz sonuçlarında R290 kullanılan sistemin R404a kullanılan sisteme göre %12 daha az enerji tükettiği, ayrıca gaz şarj miktarının ise %67,5 daha az olduğunu tespit etmişlerdir [8].

Arslan ve ark (2021), R290 ve R449a soğutucu akışkanlar kullanılan endüstriyel soğutma sisteminin enerji, ekserji ve çevre analizleri yapmışlardır. Yapılan deney sonuçlarında R290 soğutucu akışkanı kullanılan sistemin COP’ si R449a kullanılan sisteme göre %24,12 oranında artmıştır. Çevre analizi sonuçlarında ise R290 kullanılan sistemin atmosfere %26,22 daha az CO<sub>2</sub> yaydığı tespit edilmiştir [9].

Yapılan bu teorik çalışmada, R290 soğutucu akışkanı ile çalışan ve ısı geri kazanımına sahip bir ısı pompası sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemde defrost işlemi için atık ısı kaynağından faydalanılması düşünülmektedir. Böylelikle defrost için ek bir enerji kullanılmayacaktır. Bu durumda sistemin performans katsayısında artış hedeflenmektedir.

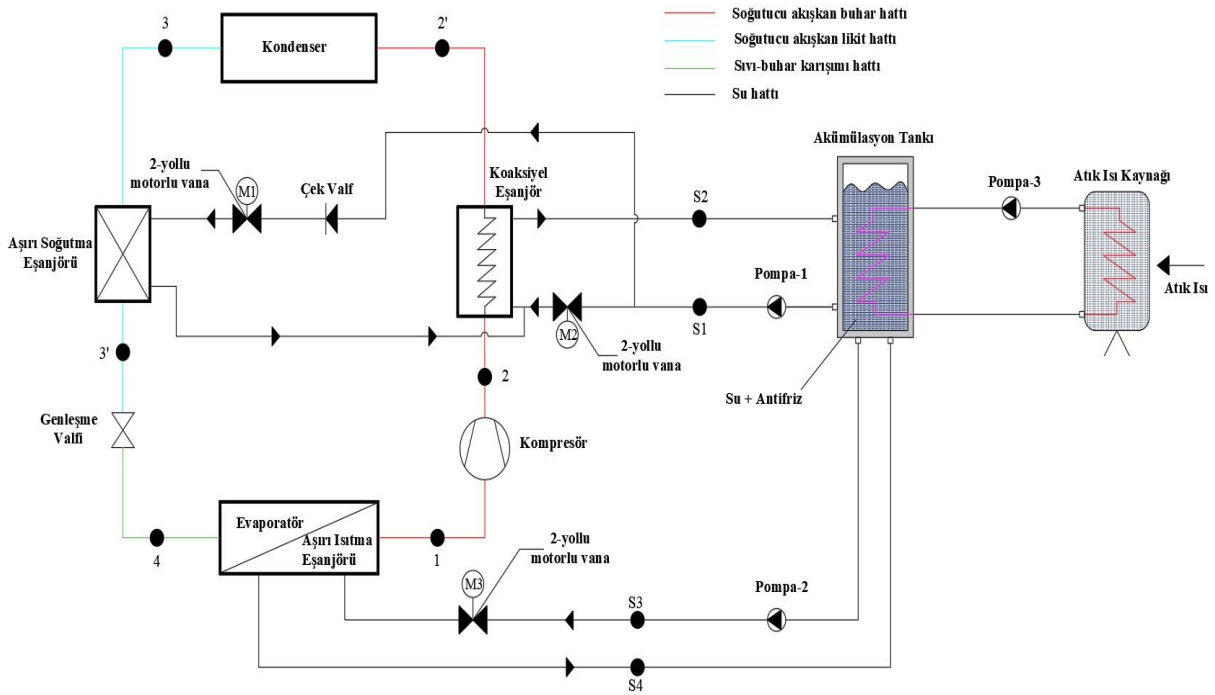
## 2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

Hava kaynaklı ısı pompalarının en büyük problemlerinden bir tanesi soğuk iklim bölgelerinde dış ünitenin ısı değiştiricisi üzerinde fazlaca buz oluşmasıdır ve bu durumun da ısı transferini yavaşlatarak sistem performansını düşmekte ve dolayısıyla enerji maliyetleri de artmaktadır.

Yukarıda bahsedilen problemin çözümü için geleneksel ısı pompalarında literatürde bilinen farklı defrost metotları vardır. Evaporatörde oluşan buzun çözülmesi için sıcak gaz, elektrikli rezistans ve az da olsa ısıtıcısız dış hava (dış havanın evaporatörde sirkülasyonu ile) kullanılarak defrost yapılmaktadır. Bu metotlarda defrost sürecinde ısıtma durmakta, yani iç ünite bu süreçte çalışmamakta ve bu durum konfor seviyesinin düşmesine sebep olmaktadır.

Defrost metotlarından birisi de dış üniteye yerleştirilen elektrikli rezistans yardımıyla dış üniteye buzun çözülmesinin sağlanmasıdır. Bu uygulamada rezistans güç tüketimi yüksek olması sebebiyle sistem gereğinden fazla enerji tüketir ve defrost süresi uzun olabilmektedir. Ayrıca, sistemde kullanılan soğutucu akışkanın yanıcı ve patlayıcı özelliği bulunması halinde sistem tehlike arz etmekte ve ek tedbirler gerektirmektedir.

Yukarıda bahsedilen yöntemlerden farklı olarak tasarımı yapılmış ısı pompasında; ısı bir sıcak su tankı yardımıyla depolanarak ve gerektiğinde dış üniteye oluşan buzun depolanmış sıcak su ile çözülmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca tank içerisindeki soğuk su sistemdeki kondenser çıkışındaki eşanjöre gönderilerek aşırı soğutma (sub-cooling) yapılarak sistemin veriminin artırılması hedeflenmiştir. Tasarlanan sistem Şekil 1’de ve açıklamaları Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Atık ısı geri kazanımına sahip ısı pompası sistemi

Tablo 1. Şekil 1’deki sistemde bulunan kısaltma ve numaraların açıklamaları

Kısaltma ve Numaralar	Açıklama
1	Soğutucu akışkan kompresör giriş
2	Soğutucu akışkan koaksiyel eşanjör giriş
2'	Soğutucu akışkan kondenser giriş
3	Soğutucu akışkan aşırı soğutma eşanjörü giriş

3'	Soğutucu akışkan genleşme valfi giriş
4	Soğutucu akışkan evaporatör giriş
S1	Akümülyasyon tankından koaksiyel ya da aşırı soğutma eşanjörüne soğuk su girişi
S2	Akümülyasyon tankına sıcak su girişi
S3	Akümülyasyon tankından aşırı ısıtma eşanjörüne sıcak su girişi
S4	Aşırı ısıtma eşanjöründen akümülyasyon tankına soğuk su girişi
M1-2-3	2 yollu motorlu vana

## 2.1. Yeni Tasarlanan Sistemin Termodinamik Analizi

Sistemin termodinamik analizlerinde kullanılan parametreler Tablo 2'de verilmiştir:

**Tablo 2.** Sistemin Termodinamik Analizinde Kullanılan Parametreler

Parametre	Değer	Birim
Çevre Sıcaklığı, $T_{\infty}$	0	°C
Buharlaşma Sıcaklığı, $T_b$	-10	°C
Yoğuşma Sıcaklığı, $T_y$	50	°C
Aşırı Kızdırma Sıcaklığı, $T_{sh}$	8	°C
Aşırı Soğutma Sıcaklığı, $T_{sb}$	8	°C
Buharlaşma Basıncı, $P_b$	3425	kPa
Yoğuşma Basıncı, $P_y$	17114	kPa
Soğutucu Akışkanın Kütlesel Debisi, $\dot{m}_r$	0,0151	kg/s
Soğutucu Akışkanın Özgül Isısı, $C_{pr}$	2,015	kJ/kgK
Kullanılan Soğutucu Akışkan	R290	-
Kompresör İzentropik Verimi	75	%
Sirkülasyon Pompası-1 Gücü, $\dot{W}_{p-1}$	0,10	kW
Sirkülasyon Pompası-2 Gücü, $\dot{W}_{p-2}$	0,10	kW
Sirkülasyon Pompası-2 Gücü, $\dot{W}_{p-3}$	0,05	kW
Sistem Eşanjörlerinin Verimi, $e$	85	%

Analizlerde kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir [10,11].

Evaporatör, kompresör ve kondenser kapasiteleri aşağıda verilen eşitlikler ile hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{\text{evap}} = \dot{m}_r(h_1 - h_4) \quad (1)$$

$$\dot{W}_{\text{komp}} = \dot{m}_r(h_2 - h_1) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{\text{kond}} = \dot{m}_r(h_2' - h_3) \quad (3)$$

Sistemde kullanılan koaksiyel eşanjör ve aşırı soğutma eşanjörü kapasiteleri aşağıdaki eşitlikler yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{\text{koaks}} = \dot{m}_r(h_2' - h_2) \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{\text{sub}} = \dot{m}_r(h_{3'} - h_2) \quad (5)$$

Tasarlanan sistem kapalı çevrim olarak çalışmaktadır. Buna göre sisteme dışarıdan herhangi bir kütle girişi olmadığı gibi, sistemden dışarı çıkan herhangi bir kütle çıkışı da olmayacaktır. Buna göre sistemdeki kütle değişimi  $\Delta\dot{m}_{\text{sistem}} = 0$  olacaktır. Eşitlikler aşağıdaki denklemler ile hesaplanmıştır.

$$\sum \dot{m}_{\text{giren}} - \sum \dot{m}_{\text{çıkan}} = \Delta\dot{m}_{\text{sistem}} \quad (6)$$

$$\sum \dot{m}_{\text{giren}} = \sum \dot{m}_{\text{çıkan}} \quad (7)$$

Termodinamiğin birinci yasası gereği sistemdeki toplam enerji değişimi  $\frac{\Delta\dot{E}_{\text{sistem}}}{dt} = 0$  olacaktır. Buna göre sisteme giren enerji çıkan enerjiye eşittir. Sistemdeki zamana bağlı değişen enerji denklıkları aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanmıştır [10,11].

$$\sum \dot{E}_{\text{giren}} - \sum \dot{E}_{\text{çıkan}} = \frac{\Delta\dot{E}_{\text{sistem}}}{dt} = 0 \quad (8)$$

$$\dot{E}_{\text{giren}} = \dot{E}_{\text{çıkan}} \quad (9)$$

Sistemdeki enerji eşitliği aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır:

$$\dot{Q}_{\text{evap}} + \dot{Q}_{\text{komp}} = \dot{Q}_{\text{kond}} + \dot{Q}_{\text{koaks}} + \dot{Q}_{\text{sub}} \quad (10)$$

Isı pompasının performans katsayısı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_{\text{kond}}}{\dot{W}_{\text{komp}}} \quad (11)$$

Elektrik rezistanslı ve hotgas defrost verimini hesaplamak için kullanılan denklemler sırası ile verilmiştir [12].

$$\eta_{d,\text{rezistanslı}} = \frac{Q_{\text{eriyen}}}{Q_{\text{rezistans}}} \quad (12)$$

$$\eta_{d,\text{hotgas}} = \frac{Q_{\text{eriyen}}}{Q_{\text{hotgas}}} \quad (13)$$

$Q_{\text{eriyen}}$  ifadesi buzu eritmek için gereken ısı enerjisini belirtirken,  $Q_{\text{rezistans}}$  ve  $Q_{\text{hotgas}}$  sırasıyla elektrik rezistanslı ve hotgas defrost yönteminde tüketilen enerjinin hesabı aşağıdaki eşitlikler yardımı ile hesaplanır [12].

$$Q_{\text{eriyen}} = m_{\text{buz}} * L_E \quad (14)$$

$$Q_{\text{rezistans}} = \dot{W}_{\text{rezistans}} * t_{\text{rezistans}} \quad (15)$$

$$Q_{\text{hotgas}} = \dot{W}_{\text{komp.}} * t_{\text{komp.,hotgas}} \quad (16)$$

Sistem ısıtma modu ve defrost modu olmak üzere iki farklı modda kullanılabilir. Isıtma modunda M1 ve M2 motorlu vanalarının açık konumda olduğu durumlarda aşırı soğutma ve koaksiyel eşanjörlerde alınan atık ısılar tankta depolanacaktır. Burada depolanan ısı Denklem (4) ve Denklem (5) ile hesaplanabilir. Defrost modunda ise tankta depolanan ısı evaporatör üzerinde oluşan buzun çözülmesi için kullanılacaktır. Buzu çözmek için verilmesi gereken ısı miktarı Denklem (14) ile hesaplanmıştır.

## 2.2. ISITMA MODU

Isıtma modunda ısı pompası sistem rejime girene kadar çalışacaktır. Evaporatörde buharlaşan soğutucu akışkan kompresörde sıkıştırıldıktan sonra kondensere gelerek burada yoğuşacak ve sistem döngüsü devam edecektir. Normal çalışma modu sistem gereksinimine göre içerisinde üçe ayrılmaktadır.

### 2.2.1. MOD-1 (M1 motorlu vanası açık konumda, M2 ve M3 kapalı konumda)

Bu çalışma modunda; dış mahalde bulunan su tankı içerisindeki su 0 °C derece iken sistem çalışmaya başladığı kabul edilecektir. Bu aşamada sistemdeki M1 motorlu vanası açık konumda, M2 vanası kapalı konumda bulunacaktır. M3 vanası aşırı ısıtma sıcaklık ayarlamasına göre oransal olarak açılıp kapanacaktır.

Pompa-1 yardımıyla soğuk su kondenser çıkışındaki aşırı soğutma eşanjörüne gönderilerek, kondenserden çıkan soğutucu akışkanın 8 °C daha soğutulması sağlanacaktır. Daha sonra aşırı soğutma eşanjöründen çıkan su koaksiyel eşanjöre ve oradan tanka gidecektir. Bu döngü devam ederek, 0 °C başlangıç sıcaklığındaki tankın suyu zamanla ısıtılarak, enerji depolanacaktır.

### 2.2.2. MOD-2 (M2 motorlu vanası açık konumda, M1 ve M3 kapalı konumda)

Sistem çalışmaya devam ettikçe tank içerisindeki su sıcaklığı kondenser çıkış sıcaklığını geçecektir. Bu durumda artık aşırı soğutma eşanjörüne suyun gönderilmesine gerek kalmayacak ve bu aşamadan sonra M1 motorlu vanası kapatılarak, M2 motorlu vanası açık konuma getirilecektir. Buradaki amaç yaklaşık 75 °C sıcaklığındaki aşırı kızdırılmış soğutkanın enerjisini depolamak olacaktır. Normal çalışma modu bu döngüde devam edecektir. Bu durumda M3 vanası MOD-1' deki gibi çalışacaktır.

### 2.2.3. MOD-3 (M2 ve M3 motorlu vanası açık konumda, M1 konumda)

Evaporatör yüzeyinde buzlanma olmadığı durumlarda tanktaki sıcak suyun ısısı ile, sistem aşırı kızdırma modunda çalışacaktır. Bu çalışma modunda, M2 ve M3 kodlu motorlu vanalar açık konumda bulunacak ve sistemdeki su Pompa-1 ve Pompa-2 yardımıyla sirküle edecektir.

Kullanılacak çift sıralı (ön sıra sıcak sulu, arka sıra soğutucu akışkan) eşanjör yardımıyla aşırı kızdırma ve gerektiğinde defrost ısısının sağlanması gerçekleştirilecektir. Çift sıra borulu eşanjörün, ön sırasından tankta ısıtılmış su, arka sırasından ise sistemdeki R290 soğutucu akışkanı dolaşacaktır. Bu sayede elde edilmiş olan sıcak su ile defrost işlemi yapılarak enerji verimliliği sağlanabilecektir. Bu yapıdaki ısı değiştirici ile gerektiğinde sistem güneş enerjisi ya da atık ısı destekli ısı pompası gibi de çalışabilecektir. Böylece çok düşük dış hava sıcaklıklarında sistemde ısı çekiminde devamlılıkta sağlanabilecektir.

### 2.2.4. DEFROST MODU

Isı pompası belirli bir süre çalıştıktan sonra nemli dış havanın etkisiyle evaporatör yüzeylerinde buzlanma oluşacaktır. Evaporatör üzerindeki buzlanmanın artması ile birlikte ısı transferi düşerek ve sistemin performansı azalmaktadır. Bu problemin çözümü için evaporatöre yerleştirilecek fark basınç ya da buz kalınlık sensöründen bilgi alınacaktır.

Buzlanmanın arttığı sırada fark basınç ya da bu kalınlığı artacak ve sisteme bilgi gönderecek ve sistemden alınan bilgiye göre M3 motorlu vanası açık konuma getirilerek pompa-2 yardımıyla evaporatöre tankta depolanan sıcak su gönderilecektir. Bu sayede sistem hiçbir şekilde kesintiye uğramadan evaporatör yüzeyindeki buzlanma çözülmüş olacaktır. Bu proses tanktaki su sıcaklığı 0 °C olana kadar devam edecektir. Buzlanma tamamen giderildikten sonra 2-yollu motorlu vana kapatılacak ve pompa-2 çalışmayı durduracaktır.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDING AND CONCLUSION)

Bu çalışmada, hidrokarbon soğutucu akışkan propan (R290) kullanılarak tasarlanmış kondenser gücü 4,32 kW olan bir ısı pompası sisteminin verimlilik analizi gerçekleştirilmiştir. Sisteme ısı geri kazanımı yapılabilmesi için aşırı soğutma ve koaksiyel eşanjörler eklenmiştir. Atık ısının depolanabilmesi için akümülyasyon tankı kullanılmıştır.

Sistemde yapılan termodinamik analizler neticesinde koaksiyel eşanjöründen elde edilen ısı, aşırı soğutma eşanjöründen elde edilen ısı miktarları hesaplanmıştır. Tasarlanan sistemde ısı pompası etkinlik katsayısı 2,75 olarak hesaplanmıştır.

Analiz sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3. Analiz Sonuçları**

Parametre	Değer	Birim
Evaporatör Çıkış Entalpisi, $h_1$	563,04	kJ/kg
Aşırı Kızdırma Entalpisi, $h_1'$	577,19	kJ/kg

Kompresör Çıkış Entalpisi, $h_2$	681,12	kJ/kg
Koaksiyel Eşanjör Çıkış Entalpisi, $h_2'$	620,53	kJ/kg
Kondenser Çıkış Entalpisi, $h_3$	334,38	kJ/kg
Aşırı Soğutma Çıkış Entalpisi, $h_3'$	310,50	kJ/kg
Buharlaştırıcıdan Çekilen Isı, $\dot{Q}_e$	3,81	kW
Yoğuşturucuda Atılan Isı, $\dot{Q}_{kond}$	4,32	kW
Kompresör Gücü, $\dot{W}_{komp.}$	1,57	kW
Koaksiyel Eşanjöründe Kazanılan Enerji, $\dot{Q}_{koaks}$	0,91	kW
Aşırı Soğutma Eşanjöründe Kazanılan Enerji, $\dot{Q}_{sub}$	0,36	kW
Isı Pompası Etkinlik Katsayısı, $COP_{hp}$	2,75	-
Defrost Isısı İçin Harcanan Güç,	0,33	kW
Sistem Eşanjörlerinin Verimi	85	%

Tablo 4. Literatür çalışmalarının karşılaştırılması

Kaynak	Isı Pompası Tipi	Kullanılan Soğutucu Akışkan	Cop Değeri	Sonuç
Aktaş ve ark. (2014) [13]	Su Kaynaklı	R-134a	3,83	Portakal kabuğu kurutulması için ısı pompası sistemi geliştirilmiştir. Portakal kabukları 8 saat 45 dakikada 3 $g_{su}/g_{kuru}$ madde nem miktarından 0,09 $g_{su}/g_{kuru}$ madde nem miktarı değerine kadar kurutulmuştur.
Çavuş ve ark. (2015) [14]	Hava kaynaklı	R404a	2,19	Güneş kolektörü kullanılan ısı pompası sisteminde kış şartlarındaki durumu test edilmiştir. Testler sonucunda kullanılan soğutucu akışkanın kış şartları için uygun, yaz şartlarında ise dezavantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.
Büyükzeren ve ark. (2021) [15]	Hava kaynaklı	-	4,5 - 2,5	Güneş enerjisi destekli hava kaynaklı ısı pompası modellenmiş ve test edilmiştir. Testler toplam 42 dk sürmüş olup COP 4,5'lerden başlayarak 2,5 değerine kadar düşüş gözlemlenmiştir.
Bu çalışma	Hava kaynaklı	R290	2,75	Tasarlanan yeni sistemde defrost süresince harcanan enerji miktarı elektrikli ısıtıcı defrost yöntemine göre %63,6 oranında azaltılabileceği tespit edilmiştir.

Tablo 4'te verilen literatür karşılaştırma tablosu incelendiğinde bu çalışmada elde edilen bulguların çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER (RESULT AND RECOMMENDATIONS)

Genelikle ısı pompalarından farklı olarak tasarlanan bu sistemde; aşırı soğutma ve koaksiyel eşanjör elemanları yardımıyla kompresör ve kondenser çıkışlarındaki soğutucu akışkanın ısıları akümülyasyon tankında depolanmıştır. Sistemin optimum çalışma durumu için verimlilik analizleri yapılmıştır.

Tasarlanan yeni sistem ile birlikte defrost esnasında gerekli olan ısının kompresör basma hattı ve aşırı soğutma ile sağlandığı ve bu ısılar ile aynı zamanda aşırı ısıtma yapıldığı defrost esnasında kesintiye uğramayacağı yeni bir model geliştirilmiştir.

Bu modelde, defrost için harcanan enerji elektrikli ısıtıcı defrost yöntemine göre %63,6 (1/COP) oranında azaltılmıştır. Atık ısının geri kazanımı ile hava kaynaklı ısı pompalarında verimli olabilecek bir model ortaya konmuştur. Bu sisteme farklı atık ısı kaynakları ya da güneş enerjinin eklenmesi ile performans daha da yükseltilecek enerji sistemlerine olumlu katkılar sağlanabilir. Böylece tasarlanan sistem ısıtma, kurutma, sera ısıtma ve ön ısıtma vb. proseslerde yüksek performans sağlanarak kullanılabilir.

## SİMGELER VE KISALTMALAR (NOMENCLATURE AND ABBREVIATION)

### Simgeler

E	Enerji (kJ)
h	Entalpi (kJ/kg)
L	Uzunluk (m)
$m_{buz}$	Buzun kütlesi (kg)
$\dot{m}$	Kütleli debi (kg/s)
$t_{kompresör,hotgas}$	Kompresörün hotgas defrost yönteminde çalıştığı süre (h)
$t_{rezistans}$	Rezistansın çalıştığı süre (h)
$\dot{Q}_e$	Evaporatör gücü (kW)
$Q_{eriyen}$	Defrost sırasında buz eritmek için gerekli enerji (kJ)
$Q_{hotgas}$	Hotgas defrost işlemi sırasında gerekli enerji (kJ)
$\dot{Q}_{koaks}$	Koaksiyel eşanjörün gücü (kW)
$\dot{Q}_{kond}$	Kondenser gücü (kW)



$\dot{Q}_{\text{sub}}$	Aşırı soğutma işlemi sırasında birim zamanda kazanılan enerji (kW)
$Q_{\text{rezistans}}$	Rezistansın defrost işlemi sırasında harcanan enerji (kJ)
$\dot{W}_{\text{komp.}}$	Kompresör gücü (kW)
$\dot{W}_{\text{rezistans}}$	Rezistans gücü (kW)
$\eta_{\text{d,hotgas}}$	Hotgas defrost yönteminin verimi (%)
$\eta_{\text{d,rezistanslı}}$	Elektrik rezistanslı defrost yönteminin verimi (%)

### Kısaltmalar

CFC	Kloroflorokarbonlar
COP <sub>S</sub>	Soğutma performans katsayısı
CO <sub>2</sub>	Karbondiyoksit
FDM	Faz Değiştiren Malzeme
HCFC	Hidrokloroflorokarbonlar
HFC	Hidroflorokarbonlar
HFO	Hidrofloroolefin
KIP	Küresel Isınma Potansiyeli
ODP	Ozon Delme Potansiyeli

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] P. Maison, D. Tapero, Rational Use of Energy in Buildings, ADEME Janvier (2009).
- [2] Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, <https://www.csb.gov.tr/>
- [3] Florlu Sera Gazlarına İlişkin Yönetmelik Birinci Bölüm (2018, 4 Ocak). Resmi Gazete (Sayı: 30291). Erişim Adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/01/20180104-2.htm>
- [4] Mengjie S., Shiming D., Chaobin D., Ning M., Zhihua W., Review on Improvement for Air Source Heat Pump Units During Frosting and Defrosting, Applied Energy, 211 (2018), 1150-1170.
- [5] Park, K.J., Jung, D., Thermodynamic Performance of R502 Alternative Refrigerant Mixtures for Low Temperature and Transport Applications, Energy Conversion and Management, 48 No. 12 (2007), 3084–3089.
- [6] Shen J., Qian Z., Xing Z., Yu Y., Ge M., A Review of the Defrosting Methods of Air Source Heat Pumps Using Heat Exchanger with Phase Change Material, Energy Procedia, 160 (2019), 491-498.
- [7] Moallem, E., Hong, T., Cremaschi, L., Fisher, D.E., Effects of Surface Coating and Water Retention on Frost Formation in Microchannel Evaporators (ASHRAE RP-1589), HVAC&R Research, 19 (2014), 347–362.
- [8] Erten, S., Uludağ, K. Soğutma Sistemlerinde R404a ve R290 Soğutucu Akışkan Kullanımının Termodinamik Analizi: Deneysel Karşılaştırma. VII. Uluslararası Fen, Mühendislik ve Mimarlık Bilimlerinde Akademik Çalışmalar Sempozyumu, (2019), 254-267.
- [9] Arslan E., Kosan M., Aktas M., Erten S., Experimental Assessment of Comparative R290 vs. R449a Refrigerants by Using 3E (Energy, Exergy and Environment) Analysis: A Supermarket Application, Journal of Thermal Engineering, 7 No. 3 (2021), 595-607.
- [10] Çengel, Y. A., Boles, M. A. (2008). Termodinamik, Mühendislik Yaklaşımıyla (Beşinci Baskı). İzmir: Güven Kitabevi, 946.
- [11] Hepbaşlı, A., Kalıncı Y., A Review of Heat Pump Water Heating Systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 No. 6-7 (2009), 1211–1229.
- [12] Liang, J., Sun, L., Li, T., A Novel Defrosting Method in Gasoline Vapor Recovery Application, Energy, 163 (2018), 751-765.
- [13] Aktaş M., Menlik T., Boran K., Aktekeli B., Aktekeli Z., Isı Pompalı Bir Kurutucuda Portakal Kabuğu Kurutulması, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 2 No. 2 (2014), 229–238.
- [14] Çavuş D., Usta H., Evaporatörü Direkt Güneş Destekli Isı Pompasının Tasarımı, İmalatı ve Performans Deneyle, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 3 No. 3 (2015), 535-544.
- [15] Büyükzeren R., Kahraman A., Kaya M. N., Dağ H. İ., Hava Kaynaklı Bir Isı Pompası Modelinin Performans Parametrelerinin Deneysel Validasyonu, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 9 No. 4 (2021), 739-748.



## The Effect of Some Managerial Motivators on Employee Motivation in Furniture Enterprises

Eray KAMIŞLI<sup>1</sup> Kıvanç YILMAZ<sup>2, 3\*</sup> Yasemin ÖZTÜRK<sup>1</sup> Erol BURDURLU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gazi University, Faculty of Technology, Wood Products Industrial Engineering Department, 06560, Ankara/Turkey

<sup>2</sup>Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Wood Products and Industrial Engineering, 06560, Ankara/Turkey

<sup>3</sup>Hacettepe University, School of Vocational Technology, Department of Wood Products and Industrial Engineering, 06532, Ankara/Turkey

### Article Info

Research article

Received: 23.04.2022

Revision: 12.08.2022

Accepted: 18.08.2022

### Keywords

Employee Motivation  
Furniture Industry  
Human Performance  
Productivity

### Abstract

This study determines the effects of some economic, psychological and sociological motivators on the motivation levels of employees in furniture industry companies depending on some socio-demographic characteristics. To measure their motivation levels, a questionnaire was applied to 100 people working in enterprises that employ 10 or more people, which are thought to apply a motivation system in the Furniture Manufacturers Site in Ankara. The obtained data were processed using package programs for statistical analysis and the data were evaluated. According to the results: The type of production was not effective on employee motivation. While increasing occupational health and safety and giving more responsibility provided more motivation for male employees, the openness of career paths was more effective for female employees. The effect of both factors that "job assurance" and "independent work and performance feedback" effects on employee performance increased as the working time of employees in the current workplace increased.

## 1. INTRODUCTION

The execution is one of the five important tasks of business management along with planning, organizing, coordination and control. The execution process of activities includes mobilizing, guiding and motivating employees in line with business goals. Leadership, command and motivation are the main variables in this process. The motivation within these three pillars is the systematic effort made to ensure that the business can achieve its projected goals by managing employees' working behavior and performance. These systematic efforts reveal motivation management. Economic, psychological and sociological factors influence employees' working behavior and performance, and studies on motivation focus on these stimuli.

Financial conditions are more motivating for younger age groups. For single employees, it places more emphasis on financial factors and training and development opportunities. For employees, in the first workplace, the motivational effect of job guarantee stands out as an important factor. As the working time increases, the importance of psychological factors such as the sense of achievement and motivation levels increase. Generally, the motivation of the employees decreases due to the increase in working time [1].

In businesses that produce goods and services; organizational-managerial motivation factors such as the characteristics of the work done, satisfaction with group relations, spatial satisfaction and satisfaction from participatory practices are effective on productivity but not on performance [2].

Differences exist in the motivation perception of employees according to occupational classes, e.g. manager, white-collar and blue-collar. While there are significant differences in motivation perception between genders among blue-collar workers, there is no significant difference between the motivation perceptions of other occupational classes [3].

In the case of Slovakia, attention should be paid to factors such as age, gender, and job position as workers' motivations differ depending on socio-demographic factors. It is recommended that enterprises focus their motivation programs on supporting motivation factors related to financing, mutual relationships, and working conditions [4].

Significant differences exist in the factors such as atmosphere in the workplace, good work team, basic salary and a fair appraisal system affecting the level of motivation of managers, white-collar and blue-collar workers. Blue-collar workers emphasize motivation factors such as the basic salary, supervisor's approach, and a fair appraisal system. Unlike blue-collar workers, managers and white-collar workers prefer similar motivation factors such as an atmosphere in the workplace and a good work team [5].

According to the results of a study conducted on 493 senior managers, base salary, job security and a fair appraisal system are the first, second and third most important motivational factors among 36 factors, respectively [6].

The fairness of the managers among the employees, the good relations of the employees with their colleagues in the workplace, the level of wages(salary and bonuses) they receive, the managers' being with their employees on special days(wedding ceremonies, birthdays, etc.) are listed as factors that affect the motivation of the university staff at a high level [7].

A strong relationship is observed between job satisfaction and dissatisfaction of the employees and their performance. While there are significant differences in job satisfaction and job performances according to some demographic characteristics such as gender, age, education level and seniority, there is no relation with marital status [8].

Work environmental factors such as building design and age, workplace layout, workstation set-up, furniture and equipment design and quality, ergonomically suitable working environment(space, temperature, ventilation, lighting, noise, vibration, radiation and air quality) positively affect job satisfaction [9,10].

Workers' heart rate and body mass index(BMI) harms the feeling of safety and proactive work behavior among older workers, but there is no significant relationship among young workers. However, regardless of the workers' age, the feeling of safety affects job satisfaction, and that work skills and proactive work behaviors affect perceptions regarding team performance [11].

Intrinsic motivation tools are more effective than extrinsic motivation tools on employees' work motivation. The effect of motivator on motivation does not differ according to the age, education level, marital status, average income, and status in the business and work experience of the employees [12].

Employee empowerment, employee training and teamwork applications have significant effects positive on the motivation of employees in the higher education sector [13].

Physical work demands, "interestingness" of work, the usefulness of one's qualification work independence, the content of work, working hours, work safety, company's reputation job security, variability of work are the top 10 factors affecting employee job satisfaction in furniture manufacturing companies in the Slovak Republic [14].

According to a study that analyzed the level of motivation of employees working in a wood products enterprise before and after the world economic crisis in 2012, the world economic crisis does not affect employee motivation [15].

In another study conducted to determine the current situation of motivation of the employees in Croatian wood processing and furniture manufacturing companies in the period of the deepest crisis in Croatian industry in the year 2010, it has been found that the company's management pays the greatest attention to assuring employees' security and their reciprocal relations. Salary and subsequent safety have been identified as the two most important motivating factors [16].

The factors that affect the motivation of employees differ before and after the economic crisis. During the crisis, employees mostly prioritize their psychological needs, and after the crisis, they prioritize their social needs [17].

With this research, it is aimed to determine the effects of some economic, psychological and sociological motivators on motivation levels of employees in furniture industry companies depending on some socio-demographic characteristics.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Sample Number

The universe of the research included employees in businesses that employ 10+ people, who are thought to apply a motivation system in the Furniture Manufacturer Site in Ankara. Approximately 12000 people work in the Ankara Furniture Manufacturer Site, and it is estimated that approximately 20% of them work in enterprises employing 10+ people included in the sample [18,19]. Based on these data, the sample size was calculated as 93 under the conditions of 2400 sampling universe, 5% Type 1 error level( $\alpha$ ) and 0.1 sampling error(d).

### 2.2. Questionnaire and Data Collection

To measure the economic, psychological and sociological motivation levels of employees in furniture industry enterprises according to their socio-demographic characteristics, a questionnaire consisting of 24 questions was prepared with a five-point Likert scale, and this questionnaire was applied to 100 people between Jan.10 and Dec.10 in 2020 by face-to-face interview method. In practice, attention was paid to the balanced distribution of the number in terms of independent variables such as age, gender and education level. The selected socio-demographic characteristics of the individuals subject to the questionnaire are given in Table 1.

**Table 1.** Selected socio-demographic characteristics of the individuals subjected to the questionnaire

<i>Socio-demographic Characteristics</i>	<i>Frequency</i>	<i>(%)</i>	
<i>Gender</i>	<i>Man</i>	78	78.0
	<i>Woman</i>	22	22.0
<i>Age (years)</i>	<i>18-25</i>	15	15.0
	<i>26-35</i>	34	34.0
	<i>36-45</i>	31	31.0
	<i>46-55</i>	16	16.0
	<i>56+</i>	4	4.0
<i>Education Level</i>	<i>Primary education</i>	7	7.0
	<i>High School</i>	43	43.0
	<i>Associate Degree</i>	25	25.0
	<i>Undergraduate</i>	20	20.0
	<i>Graduate</i>	5	5.0
<i>Income Level (\$)</i>	<i>Up to 375</i>	6	6.0
	<i>376-750</i>	31	31.0
	<i>751-1250</i>	40	40.0
	<i>1251-2500</i>	20	20.0
	<i>2501 and Above</i>	3	3.0
<i>Status</i>	<i>Unskilled Worker</i>	17	17.0
	<i>Skilled Worker</i>	30	30.0
	<i>Foreman/Section Chief</i>	21	21.0
	<i>Department Chief</i>	17	17.0
	<i>Manager/Assistant Manager</i>	15	15.0
<i>Working Time At The Current Workplace (Years)</i>	<i>Up to 3</i>	34	34.0
	<i>4-10</i>	43	43.0
	<i>11-20</i>	19	19.0
	<i>21-30</i>	3	3.0
<i>Total Working Time (Years)</i>	<i>Up to 3</i>	12	12.0
	<i>4-10</i>	31	31.0
	<i>11-20</i>	36	36.0
	<i>21-30</i>	15	15.0
	<i>31 and above</i>	6	6.0

### 2.3. Data Analysis

The data collected through questionnaires were analyzed in SPSS 22 program. Independent group t-test and one-way analysis of variance (ANOVA) were used to determine whether some economic, psychological and sociological motivators were effective on motivation levels, depending on the socio-demographic characteristics of employees, such as age, gender, income level, and education level. In testing the reliability of the scales, Cronbach's Alpha Coefficient, which is the most appropriate technique for Likert type scales, was used. According to this method, if  $0.7 \leq \alpha < 0.8$ , the questionnaire is acceptable, if  $0.8 \leq \alpha < 0.9$ , the reliability is considered good, and if  $0.9 \leq \alpha$ , the reliability is considered perfect. The Cronbach's alpha coefficient of the study was calculated as 0.877, and this value showed that the results of the study were "good" reliable.

### 3. RESULTS

Table 2 shows some statistical data on the motivation levels of employees depending on the economic, psychological and sociological factors without considering any socio-demographic characteristics.

As shown in the table, the most motivating factor for furniture industry employees, regardless of any socio-demographic factor, was "Granting economic and financial awards" with a motivation level of 3.09. These were followed by "Communicating with everyone whenever desired" with 3.05, "High occupational health and safety" with 3.04, "Higher wages than other businesses in the sector" with 3.01. The three factors that motivate employees the least were "Bonus fee application" with a motivation level of 2.36, "Organizing regular and systematic social and cultural activities within the business" with 2.50 and "Job assurance" with 2.62.

**Table 2.** Some statistical data on the motivation levels of employees depending on the economic, psychological and sociological factors (Selected motivators)

Motivators	Freq.	Min.	Max.	Mean	Std. Dev.
<i>Higher wages than those of other businesses in the sector</i>	100	0.00	5.00	3.01	1.12
<i>Bonus fee applications</i>	100	0.00	5.00	2.36	1.48
<i>Job assurance</i>	100	0.00	5.00	2.62	1.51
<i>Social benefits (insurance, transportation support, discounted product, lunch and tea and coffee service, etc.)</i>	100	0.00	5.00	2.95	1.43
<i>Granting economic and financial awards</i>	99	0.00	5.00	3.09	1.41
<i>Giving authority and responsibility for the work done</i>	100	0.00	5.00	2.95	1.45
<i>Educational opportunities (external and in-service)</i>	100	0.00	5.00	2.64	1.62
<i>Openness of the promotion routes</i>	100	0.00	5.00	2.90	1.39
<i>Indirect work control (independent work) and performance feedback</i>	100	0.00	5.00	2.81	1.45
<i>Business support for solving individual problems</i>	100	0.00	5.00	2.84	1.39
<i>Participating in management</i>	100	0.00	5.00	2.98	1.47
<i>Working in different jobs within the business</i>	100	0.00	5.00	2.85	1.35
<i>Taking more responsibility</i>	100	0.00	5.00	2.97	1.40
<i>Communicating with everyone whenever desired</i>	100	0.00	5.00	3.05	1.33
<i>High occupational health and safety</i>	100	0.00	5.00	3.04	1.46
<i>Managers' compliance with the rules of rights, law and justice</i>	100	0.00	5.00	2.88	1.29
<i>Organizing regular and systematic social and cultural activities within a business</i>	100	0.00	5.00	2.50	1.55

(Freq.: Frequency, Std. Dev.: Standard Deviation)

### 3.1. Effect of Gender on Motivation Level

Motivation levels based on gender for different motivators are given in Table 3. "Independent group t-test" was applied to determine whether the difference between the motivation levels of male and female employees belonging to each motivator was significant.

Since  $p \leq 0.05$ , the differences between the motivation levels of male and female employees belonging to "Openness of the promotion routes", "Taking more responsibility" and "Organizing regular and systematic social and cultural activities within the business" were found to be significant, while other motivators were found to be insignificant.

While increasing occupational health and safety and giving more responsibility provided more motivation for male employees, the openness of career paths was more effective for female employees. Other motivators were equally effective in the motivation of male and female employees (Table 3).

**Table 3.** Independent group t-test for the motivators to determine the effect of gender on motivation level

Motivators	Gender	Freq.	Mean	Std. Dev.	t	p
<i>Higher wages than those of other businesses in the sector</i>	<i>Male</i>	78	2.97	1.06	-0.595	0.55
	<i>Female</i>	22	3.14	1.36		
<i>Bonus fee applications</i>	<i>Male</i>	78	2.40	1.45	0.474	0.63
	<i>Female</i>	22	2.23	1.60		
<i>Job assurance</i>	<i>Male</i>	78	2.71	1.44	1.063	0.29
	<i>Female</i>	22	2.32	1.73		
<i>Social benefits (insurance, transportation support, discounted product, lunch and tea and coffee service, etc.)</i>	<i>Male</i>	78	2.88	1.45	-0.859	0.39
	<i>Female</i>	22	3.18	1.37		
<i>Granting economic and financial awards</i>	<i>Male</i>	77	3.01	1.44	-1.025	0.30
	<i>Female</i>	22	3.36	1.33		
<i>Giving authority and responsibility for the work done</i>	<i>Male</i>	78	3.08	1.34	1.660	0.10
	<i>Female</i>	22	2.50	1.77		
<i>Educational opportunities (external and in-service)</i>	<i>Male</i>	78	2.60	1.57	-0.432	0.66
	<i>Female</i>	22	2.77	1.85		
<i>The openness of the promotion routes</i>	<i>Male</i>	78	2.76	1.35	-1.975	0.05
	<i>Female</i>	22	3.41	1.44		
<i>Indirect work control (independent work) and performance feedback</i>	<i>Male</i>	78	2.79	1.51	-0.195	0.84
	<i>Female</i>	22	2.86	1.25		
<i>Business support for solving individual problems</i>	<i>Male</i>	78	2.73	1.35	-1.488	0.14
	<i>Female</i>	22	3.23	1.48		
<i>Participating in management</i>	<i>Male</i>	78	2.95	1.45	-0.399	0.69
	<i>Female</i>	22	3.09	1.57		
<i>Working in different jobs within the business</i>	<i>Male</i>	78	2.96	1.24	1.566	0.12
	<i>Female</i>	22	2.45	1.65		
<i>Taking more responsibility</i>	<i>Male</i>	78	3.22	1.35	3.513	0.001
	<i>Female</i>	22	2.09	1.23		
<i>Communicating with everyone whenever desired</i>	<i>Male</i>	78	3.09	1.25	0.561	0.57
	<i>Female</i>	22	2.91	1.60		
<i>High occupational health and safety</i>	<i>Male</i>	78	2.85	1.47	-2.819	0.008
	<i>Female</i>	22	3.73	1.24		
<i>Managers' compliance with the rules of rights, law and justice</i>	<i>Male</i>	78	2.87	1.25	-0.119	0.90
	<i>Female</i>	22	2.91	1.44		
<i>Organizing regular and systematic social and cultural activities within a business</i>	<i>Male</i>	78	2.50	1.48	0.000	1.00
	<i>Female</i>	22	2.50	1.79		
<b>GENERAL</b>	<i>Male</i>	78	2.85	0.78	-0.085	0.933
	<i>Female</i>	22	2.86	1.01		

(t: t-test value, p: probability, Freq.: Frequency, Std. Dev.: Standard Deviation)

### 3.2. Effect of Age on Motivation Level

The results of the ANOVA test was used to compare the differences between motivation levels depending on age groups for different motivators are given in Table 4.

**Table 4.** ANOVA test to compare the differences between motivation levels depending on age groups

Motivators	F	p
<i>Higher wages than those of other businesses in the sector</i>	1.186	0.322
<i>Bonus fee applications</i>	1.235	0.301
<i>Job assurance</i>	1.180	0.325
<i>Social benefits (insurance, transportation support, discounted product, lunch and tea and coffee service, etc.)</i>	0.480	0.750
<i>Granting economic and financial awards</i>	1.483	0.214
<i>Giving authority and responsibility for the work done</i>	1.520	0.203
<i>Educational opportunities (external and in-service)</i>	0.517	0.723
<i>Openness of the promotion routes</i>	0.654	0.625
<i>Indirect work control (independent work) and performance feedback</i>	3.050	0.021
<i>Business support for solving individual problems</i>	0.065	0.992
<i>Participating in management</i>	1.114	0.354
<i>Working in different jobs within the business</i>	1.126	0.349
<i>Taking more responsibility</i>	1.765	0.142
<i>Communicating with everyone whenever desired</i>	2.098	0.087
<i>High occupational health and safety</i>	0.392	0.814
<i>Managers' compliance with the rules of rights, law and justice</i>	2.653	0.038
<i>Organizing regular and systematic social and cultural activities within a business</i>	1.676	0.162
<b>GENERAL</b>	2.242	0.070

(F: Fisher test value, p: Probability)

Since  $P \leq 0.05$ , age group was found to be effective on motivation levels for the motivators of "Indirect work control(independent work) and performance feedback" and "Managers' compliance with the rules of rights, law and justice" and ineffective for all other motivators. The motivation levels for the effective motivators are given in Table 5 depending on the age groups.

**Table 5.** Motivation levels for effective motivators depending on age groups

Motivators	Age Group	Freq.	Mean	Std. Dev.	Std. Err.
<i>Indirect work control (independent work) and performance feedback</i>	18-25	15	2.33	1.45	0.37
	26-35	34	2.35	1.35	0.23
	36-45	31	3.10	1.49	0.27
	46-55	16	3.62	1.36	0.34
	56+	4	3.00	0.82	0.41
	Total	100	2.81	1.45	0.14
<i>Managers' compliance with the rules of rights, law and justice</i>	18-25	15	2.87	1.36	0.35
	26-35	34	2.35	1.25	0.22
	36-45	31	3.32	1.19	0.21
	46-55	16	3.12	1.31	0.33
	56+	4	3.00	0.82	0.41
	Total	100	2.88	1.29	0.13
<b>GENERAL</b>	18-25	15	2.70	0.94	0.24
	26-35	34	2.57	0.86	0.15
	36-45	31	3.05	0.73	0.13
	46-55	16	3.16	0.78	0.19
	56+	4	2.96	0.49	0.25
	Total	100	2.85	0.83	0.08

(Freq.: Frequency, Std. Dev.: Standard Deviation, Std. Err.: Standard Error)

The motivation effect of both "the indirect work control(independent work)" and "performance feedback" motivator and "Managers' compliance with the rules of rights, law and justice" motivator was higher in the age range of 36-55 compared to the 18-35 age range. After the age of 56, the motivation effect of both motivators decreased.

Regardless of motivators, according to the general averages depending on the age group, the motivation level of employees in the 26-35 age group was higher than those in the 18-25 age group. A decrease was seen in the motivation levels of employees aged 56 and over.



### 3.3. Effect of Income Level on Motivation

The results of the ANOVA test performed to compare the differences between motivation levels depending on income groups for different motivators are given in Table 6.

**Table 6.** ANOVA test was used to compare the differences between motivation levels depending on income groups

Motivators	F	p
Higher wages than those of other businesses in the sector	2.33	0.06
Bonus fee applications	1.91	0.11
Job assurance	1.21	0.31
Social benefits (insurance, transportation support, discounted product, lunch and tea and coffee service, etc.)	1.81	0.13
Granting economic and financial awards	2.55	0.04
Giving authority and responsibility for the work done	1.53	0.20
Educational opportunities (external and in-service)	1.88	0.12
Openness of the promotion routes	1.05	0.38
Indirect work control (independent work) and performance feedback	2.26	0.07
Business support for solving individual problems	0.70	0.60
Participating in management	1.80	0.13
Working in different jobs within the business	1.87	0.12
Taking more responsibility	0.76	0.55
Communicating with everyone whenever desired	0.26	0.90
High occupational health and safety	0.23	0.92
Managers' compliance with the rules of rights, law and justice	0.66	0.62
Organizing regular and systematic social and cultural activities within a business	2.61	0.04

(F: Fisher test value, p: Probability)

Since  $p \leq 0.05$ , age group was found to be effective on motivation levels for the motivators of "Granting economic and financial awards" and "Organizing regular and systematic social and cultural activities within the business" and ineffective for all other motivators.

Motivation levels for effective motivators depending on income groups are given in Table 7.

**Table 7.** Motivation levels for effective motivators depending on income groups

Motivators	Income Group	Freq.	Mean	Std. Dev.	Std. Error
Granting economic and financial awards	Up to 375	5	1.80	1.30	0.58
	376-750	31	2.84	1.55	0.28
	751-1250	40	3.13	1.31	0.21
	1251-2500	20	3.55	1.23	0.28
	2501 and Above	3	4.33	1.16	0.67
	Total	99	3.09	1.42	0.14
Organizing regular and systematic social and cultural activities within the business	Up to 375	6	2.83	1.72	0.70
	376-750	31	2.07	1.63	0.29
	751-1250	40	2.73	1.49	0.24
	1251-2500	20	2.30	1.30	0.29
	2501 and Above	3	4.67	0.58	0.33
	Total	100	2.50	1.55	0.16
GENERAL	Up to 375	6	2.81	0.93	0.38
	376-750	31	2.65	0.90	0.16
	751-1250	40	2.79	0.78	0.12
	1251-2500	20	3.19	0.73	0.16
	2501 and Above	3	3.51	0.90	0.52
	Total	100	2.85	0.83	0.08

(Freq.: Frequency, Std. Dev.: Standard Deviation, Std. Err.: Standard Error)

As the income level increased, the influence level of the "Granting economic and financial awards" motivator increased. While the effect level was 1.8 for employees with a monthly income of up to 375 \$, this value increased to 4.33 for employees with a monthly income of 2500 \$ or more.

The level of influence of the "Organizing regular and systematic social and cultural activities within the business" motivator was 2.83 for employees with a monthly income of up to \$ 375 and was higher than

employees with an income of \$ 376-2500. The influence level of this motivator was 4.67 for employees with an income of \$ 2 501 and above, and it was the highest.

Regardless of motivators, according to the general averages depending on the income group, the higher the income level, the higher the average effect levels of all motivators. The average effect of the motivators, which was 2.81 in the lowest income group, increased to 3.51 in the highest income group.

### 3.4. Effects of Education Degrees on Motivation

The results of the ANOVA test performed to compare the differences between motivation levels depending on education degree for different motivators are given in Table 8.

**Table 8.** ANOVA test to compare the differences between motivation levels depending on an education degree

Motivators	F	p
Higher wages than those of other businesses in the sector	3.27	0.01
Bonus fee applications	4.19	0.004
Job assurance	2.32	0.06
Social benefits (insurance, transportation support, discounted product, lunch and tea and coffee service, etc.)	2.37	0.06
Granting economic and financial awards	4.18	0.004
Giving authority and responsibility for the work done	0.25	0.91
Educational opportunities (external and in-service)	4.55	0.002
Openness of the promotion routes	3.74	0.007
Indirect work control (independent work) and performance feedback	1.96	0.11
Business support for solving individual problems	1.39	0.24
Participate in administrative decisions	2.67	0.04
Working in different jobs within the business	1.64	0.17
Taking more responsibility	0.17	0.95
Communicating with everyone whenever desired	2.65	0.04
High occupational health and safety	3.35	0.01
Managers' compliance with the rules of rights, law and justice	3.65	0.008
Organizing regular and systematic social and cultural activities within a business	1.06	0.38

(F: Fisher test value, p: Probability)

Since  $p \leq 0.05$ , education degree has been found as effective on motivation level for the motivators of “Higher wages than those of other businesses in the sector”, “Bonus fee application”, “Granting economic and financial awards”, “Educational opportunities(external and in-service)”, “Openness of the promotion routes”, “Participate in administrative decisions”, “Communicating with everyone whenever desired”, “High occupational health and safety”, and “Managers' compliance with the rules of rights, law and justice” and not for other motivators.

Motivation levels for the effective motivators depending on the education levels are given in Table 9.

**Table 9.** Motivation levels depend on the education level for the effective motivators

Motivators	Education Degree	Freq.	Mean	Std. Dev.	Std. Err.
Higher wages than those of other businesses in the sector	Primary education	7	3.286	1.380	0.522
	High School	43	2.767	1.172	0.179
	Associate Degree	25	2.840	0.898	0.180
	Undergraduate	20	3.300	1.031	0.231
	Graduate	5	4.400	0.548	0.245
	Total	100	3.010	1.124	0.112
Bonus fee applications	Primary education	7	2.000	1.528	0.577
	High School	43	2.093	1.493	0.228
	Associate Degree	25	2.080	1.222	0.244
	Undergraduate	20	2.900	1.447	0.324
	Graduate	5	4.400	0.548	0.245
	Total	100	2.360	1.481	0.148

Table 9 continuous...

<i>Motivators</i>	<i>Education Degree</i>	<i>Freq.</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Dev.</i>	<i>Std. Err.</i>
<i>Granting economic and financial awards</i>	<i>Primary education</i>	6	2.500	1.378	0.563
	<i>High School</i>	43	2.744	1.432	0.218
	<i>Associate Degree</i>	25	2.920	1.470	0.294
	<i>Undergraduate</i>	20	3.900	0.968	0.216
	<i>Graduate</i>	5	4.400	0.548	0.245
	<i>Total</i>	99	3.091	1.415	0.142
<i>Educational opportunities (external and in-service)</i>	<i>Primary education</i>	7	2.429	1.718	0.649
	<i>High School</i>	43	2.279	1.608	0.245
	<i>Associate Degree</i>	25	2.240	1.535	0.307
	<i>Undergraduate</i>	20	3.550	1.356	0.303
	<i>Graduate</i>	5	4.400	0.548	0.245
	<i>Total</i>	100	2.640	1.624	0.162
<i>Openness of the promotion routes</i>	<i>Primary education</i>	7	2.571	1.512	0.571
	<i>High School</i>	43	2.512	1.369	0.209
	<i>Associate Degree</i>	25	2.800	1.190	0.238
	<i>Undergraduate</i>	20	3.750	1.333	0.298
	<i>Graduate</i>	5	3.800	1.095	0.490
	<i>Total</i>	100	2.900	1.389	0.139
<i>Participate in administrative decisions</i>	<i>Primary education</i>	7	3.571	1.134	0.429
	<i>High School</i>	43	2.651	1.646	0.251
	<i>Associate Degree</i>	25	2.720	1.429	0.286
	<i>Undergraduate</i>	20	3.500	0.946	0.212
	<i>Graduate</i>	5	4.200	1.095	0.490
	<i>Total</i>	100	2.980	1.470	0.147
<i>Communicating with everyone whenever desired</i>	<i>Primary education</i>	7	3.429	1.512	0.571
	<i>High School</i>	43	3.000	1.397	0.213
	<i>Associate Degree</i>	25	2.640	1.350	0.270
	<i>Undergraduate</i>	20	3.150	0.933	0.209
	<i>Graduate</i>	5	4.600	0.548	0.245
	<i>Total</i>	100	3.050	1.329	0.133
<i>High occupational health and safety</i>	<i>Primary education</i>	7	3.714	0.951	0.360
	<i>High School</i>	43	2.837	1.396	0.213
	<i>Associate Degree</i>	25	2.520	1.558	0.312
	<i>Undergraduate</i>	20	3.550	1.432	0.320
	<i>Graduate</i>	5	4.400	0.548	0.245
	<i>Total</i>	100	3.040	1.463	0.146
<i>Organizing regular and systematic social and cultural activities within a business</i>	<i>Primary education</i>	7	3.857	0.690	0.261
	<i>High School</i>	43	2.837	1.194	0.182
	<i>Associate Degree</i>	25	2.640	1.221	0.244
	<i>Undergraduate</i>	20	2.550	1.504	0.336
	<i>Graduate</i>	5	4.400	0.548	0.245
	<i>Total</i>	100	2.880	1.289	0.129
<b>GENERAL</b>	<i>Primary education</i>	7	3.155	0.961	0.363
	<i>High School</i>	43	2.666	0.871	0.133
	<i>Associate Degree</i>	25	2.649	0.502	0.100
	<i>Undergraduate</i>	20	3.106	0.806	0.180
	<i>Graduate</i>	5	3.988	0.706	0.316
	<i>Total</i>	100	2.850	0.833	0.083

(Freq.: Frequency, Std. Dev.: Standard Deviation, Std. Err.: Standard Error)

As the degree of education increased, the effect of the motivators of “Bonus fee applications”, “Granting economic and financial awards” and “Openness of the promotion routes” on employee motivation increased. The effect of “Higher wages than those of other businesses in the sector”, “Educational opportunities(external and in-service)”, “Participate in administrative decisions”, “Communicating with everyone whenever desired”, “High occupational health and safety” and “Organizing regular and systematic social and cultural activities within the business” motivators in the motivation level of primarily educated employees were higher compared to high school and associate degree-educated employees.

The group in which all motivators were most effective in motivation increase were graduate educated employees with an average effect level of 3.99 and this group had the highest motivation level among all

motivators. The second group with the highest level of motivation excluding the motivators of “Participate in administrative decisions”, “Communicating with everyone whenever desired”, “High occupational health and safety” and “Organizing regular and systematic social and cultural activities within the business” were the undergraduate educated employees.

Regardless of motivators, according to the general averages depending on the education degree, graduate educated employees had the highest motivation level with 3.99; primarily educated employees with 3.16 followed this group. High school, associate degree and undergraduate educated employees had lower motivation levels compared to primarily educated employees (Table 9).

### 3.5. Effect of Employees' Status in Their Workplace on Their Motivation Level

The results of the ANOVA test performed to compare the differences between motivation levels depending on employees' status in their workplace for different motivators are given in Table 10.

**Table 10.** ANOVA test was used to compare the differences between motivation levels depending on employees' status in their workplace

<i>Motivators</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
<i>Higher wages than those of other businesses in the sector</i>	6.626	0.000
<i>Bonus fee applications</i>	4.867	0.001
<i>Job assurance</i>	2.466	0.05
<i>Social benefits (insurance, transportation support, discounted product, lunch and tea and coffee service, etc.)</i>	4.576	0.002
<i>Granting economic and financial awards</i>	5.459	0.001
<i>Giving authority and responsibility for the work done</i>	2.533	0.05
<i>Educational opportunities (external and in-service)</i>	6.356	0.000
<i>Openness of the promotion routes</i>	10.291	0.000
<i>Indirect work control (independent work) and performance feedback</i>	6.822	0.000
<i>Business support for solving individual problems</i>	0.763	0.60
<i>Participate in administrative decisions</i>	2.869	0.03
<i>Working in different jobs within the business</i>	3.204	0.02
<i>Taking more responsibility</i>	0.932	0.45
<i>Communicating with everyone whenever desired</i>	3.137	0.02
<i>High occupational health and safety</i>	2.210	0.07
<i>Managers' compliance with the rules of rights, law and justice</i>	2.055	0.09
<i>Organizing regular and systematic social and cultural activities within a business</i>	1.630	0.17
<b>GENERAL</b>	9.203	0.000

(*F*: Fisher test value, *p*: Probability)

Since  $P \leq 0.05$ , the status of employees in the workplace has been found as effective on the level of motivation for all motivators other than the motivators of “Business support for solving individual problems”, “Taking more responsibility”, “High occupational health and safety”, “Managers' compliance with the rules of rights, law and justice” and “Organizing regular and systematic social and cultural activities within a business motivators”.

Motivation levels for the effective motivators depending on the “employees' status in their workplace” are given in Table 11.

**Table 11.** Motivation levels for the effective motivators depending on the “Employees' status in their workplace”

Motivators	Status in Workplace	Freq.	Mean	Std. Dev.	Std. Err.
<i>Higher wages than those of other businesses in the sector</i>	<i>Unskilled Worker</i>	17	2.706	1.047	0.254
	<i>Skilled Worker</i>	30	2.367	1.129	0.206
	<i>Foreman/Section Chief</i>	21	3.476	0.602	0.131
	<i>Department Chief</i>	17	3.235	1.251	0.304
	<i>Manager/Assistant Manager</i>	15	3.733	0.884	0.228
	<i>Total</i>	100	3.010	1.124	0.112
	<i>Bonus fee applications</i>	<i>Unskilled Worker</i>	17	1.706	1.047
<i>Skilled Worker</i>		30	1.800	1.400	0.256
<i>Foreman/Section Chief</i>		21	2.667	0.913	0.199
<i>Department Chief</i>		17	2.706	1.687	0.409
<i>Manager/Assistant Manager</i>		15	3.400	1.765	0.456
<i>Total</i>		100	2.360	1.481	0.148
<i>Job assurance</i>		<i>Unskilled Worker</i>	17	2.118	1.269
	<i>Skilled Worker</i>	30	2.200	1.448	0.264
	<i>Foreman/Section Chief</i>	21	2.810	1.721	0.376
	<i>Department Chief</i>	17	2.941	1.478	0.358
	<i>Manager/Assistant Manager</i>	15	3.400	1.298	0.335
	<i>Total</i>	100	2.620	1.509	0.151
	<i>Social benefits (insurance, transportation support, discounted product, lunch and tea and coffee service, etc.)</i>	<i>Unskilled Worker</i>	17	2.706	1.490
<i>Skilled Worker</i>		30	2.367	1.402	0.256
<i>Foreman/Section Chief</i>		21	3.000	1.183	0.258
<i>Department Chief</i>		17	3.118	1.495	0.363
<i>Manager/Assistant Manager</i>		15	4.133	0.990	0.256
<i>Total</i>		100	2.950	1.431	0.143
<i>Granting economic and financial awards</i>		<i>Unskilled Worker</i>	17	2.882	1.453
	<i>Skilled Worker</i>	29	2.310	1.491	0.277
	<i>Foreman/Section Chief</i>	21	3.524	1.167	0.255
	<i>Department Chief</i>	17	3.235	1.200	0.291
	<i>Manager/Assistant Manager</i>	15	4.067	0.961	0.248
	<i>Total</i>	99	3.091	1.415	0.142
	<i>Giving authority and responsibility for the work done</i>	<i>Unskilled Worker</i>	17	2.294	1.572
<i>Skilled Worker</i>		30	2.700	1.442	0.263
<i>Foreman/Section Chief</i>		21	2.952	1.499	0.327
<i>Department Chief</i>		17	3.588	1.004	0.243
<i>Manager/Assistant Manager</i>		15	3.467	1.407	0.363
<i>Total</i>		100	2.950	1.452	0.145
<i>Educational opportunities (external and in-service)</i>		<i>Unskilled Worker</i>	17	2.000	1.541
	<i>Skilled Worker</i>	30	1.900	1.561	0.285
	<i>Foreman/Section Chief</i>	21	3.190	1.327	0.290
	<i>Department Chief</i>	17	2.765	1.715	0.416
	<i>Manager/Assistant Manager</i>	15	3.933	1.033	0.267
	<i>Total</i>	100	2.640	1.624	0.162
	<i>The openness of the promotion routes</i>	<i>Unskilled Worker</i>	17	2.471	1.328
<i>Skilled Worker</i>		30	2.067	1.172	0.214
<i>Foreman/Section Chief</i>		21	4.048	0.805	0.176
<i>Department Chief</i>		17	2.824	1.510	0.366
<i>Manager/Assistant Manager</i>		15	3.533	1.060	0.274
<i>Total</i>		100	2.900	1.389	0.139

Table 11 continuous...

<i>Motivators</i>	<i>Status in Workplace</i>	<i>Freq.</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Dev.</i>	<i>Std. Err.</i>
<i>Indirect work control (independent work) and performance feedback</i>	<i>Unskilled Worker</i>	17	2.118	1.269	0.308
	<i>Skilled Worker</i>	30	2.167	1.416	0.259
	<i>Foreman/Section Chief</i>	21	3.476	1.167	0.255
	<i>Department Chief</i>	17	2.882	1.616	0.392
	<i>Manager/Assistant Manager</i>	15	3.867	0.834	0.215
	<i>Total</i>	100	2.810	1.454	0.145
<i>Participate in administrative decisions</i>	<i>Unskilled Worker</i>	17	2.941	1.391	0.337
	<i>Skilled Worker</i>	30	2.300	1.705	0.311
	<i>Foreman/Section Chief</i>	21	3.238	1.179	0.257
	<i>Department Chief</i>	17	3.412	1.121	0.272
	<i>Manager/Assistant Manager</i>	15	3.533	1.407	0.363
	<i>Total</i>	100	2.980	1.470	0.147
<i>Working in different jobs within the business</i>	<i>Unskilled Worker</i>	17	2.706	1.490	0.361
	<i>Skilled Worker</i>	30	2.767	1.305	0.238
	<i>Foreman/Section Chief</i>	21	2.190	1.436	0.313
	<i>Department Chief</i>	17	3.294	1.105	0.268
	<i>Manager/Assistant Manager</i>	15	3.600	0.986	0.254
	<i>Total</i>	100	2.850	1.351	0.135
<i>Communicating with everyone whenever desired</i>	<i>Unskilled Worker</i>	17	2.765	1.033	0.250
	<i>Skilled Worker</i>	30	2.633	1.474	0.269
	<i>Foreman/Section Chief</i>	21	3.143	1.424	0.311
	<i>Department Chief</i>	17	3.118	1.111	0.270
	<i>Manager/Assistant Manager</i>	15	4.000	1.000	0.258
	<i>Total</i>	100	3.050	1.329	0.133
<b>GENERAL</b>	<i>Unskilled Worker</i>	17	2.512	0.532	0.129
	<i>Skilled Worker</i>	30	2.379	0.744	0.136
	<i>Foreman/Section Chief</i>	21	3.053	0.664	0.145
	<i>Department Chief</i>	17	3.097	0.832	0.202
	<i>Manager/Assistant Manager</i>	15	3.612	0.806	0.208
	<i>Total</i>	100	2.850	0.833	0.083

(*Freq.*: Frequency, *Std. Dev.*: Standard Deviation, *Std. Err.*: Standard Error)

As the status level increased, the effect of “Bonus fee applications” and “Job assurance” motivators on employee motivation increased.

The effect of the motivators of “Higher wages than those of other businesses in the sector”, “Social benefits(insurance, transportation support, discounted product, lunch and tea and coffee service, etc.)”, “Granting economic and financial awards”, “Educational opportunities(external and in-service) The level of influence of the motivators “Openness of the promotion routes”, “Participate in administrative decisions”, and “Communicating with everyone whenever desired” on the skilled workers was lower compared to the unskilled workers.

The effect of the motivators of “Higher wages than those of other businesses in the sector”, “Granting economic and financial awards”, “Educational opportunities(external and in-service) Openness of the promotion routes”, “Indirect work control(independent work) and performance feedback”, and “Communicating with everyone whenever desired” on employees with a status of department chief was lower compared to employees with status of Foreman/Section Chiefs.

Unlike other motivators, the group most influenced by the “Openness of the promotion routes” motivator was the employees with the status of Foreman/Section Chief. Apart from that, the group most affected by all motivators was the employees with the status of Manager/Assistant Manager.

Regardless of motivators, according to the general averages depending on “employees' status in their workplace”, employees with skilled worker status had the lowest motivation level with 2.38, followed by

employees with unskilled worker status with 2.51. Except for those working in these two states, the higher the status level, the higher the level of motivation. The highest motivation level of 3.61 was seen in employees with “Manager/Assistant Manager” status.

### 3.6. Effect of Production Type on Motivation Level

The results of the ANOVA test performed to compare the differences between motivation levels depending on the type of production for different motivators are given in Table 12.

**Table 12.** ANOVA test was used to compare the differences between motivation levels depending on the type of production

<b>Motivators</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
<i>Higher wages than those of other businesses in the sector</i>	0.582	0.628
<i>Bonus fee applications</i>	1.548	0.207
<i>Job assurance</i>	0.524	0.667
<i>Social benefits (insurance, transportation support, discounted product, lunch and tea and coffee service, etc.)</i>	1.857	0.142
<i>Granting economic and financial awards</i>	0.405	0.750
<i>Giving authority and responsibility for the work done</i>	1.094	0.355
<i>Educational opportunities (external and in-service)</i>	0.377	0.769
<i>Openness of the promotion routes</i>	2.546	0.061
<i>Indirect work control (independent work) and performance feedback</i>	1.156	0.331
<i>Business support for solving individual problems</i>	1.475	0.226
<i>Participate in administrative decisions</i>	0.876	0.456
<i>Working in different jobs within the business</i>	1.606	0.193
<i>Taking more responsibility</i>	0.102	0.959
<i>Communicating with everyone whenever desired</i>	0.279	0.840
<i>High occupational health and safety</i>	0.780	0.508
<i>Managers' compliance with the rules of rights, law and justice</i>	1.668	0.179
<i>Organizing regular and systematic social and cultural activities within a business</i>	1.496	0.221
<b>GENERAL</b>	<b>1.474</b>	<b>0.226</b>

(F: Fisher test value, p: Probability)

Since  $p \geq 0.05$  for all motivators, the type of production (furniture, decoration, project works and building elements) was not effective on employee motivation and the differences between motivation levels depending on the type of production were statistically insignificant.

### 3.7. Effects of Working Time at Current Workplace on Motivation Levels

The results of the ANOVA test performed to compare the differences between motivation levels depending on “Working Time at the Current Workplace” for different motivators are given in Table 13.

**Table 13.** ANOVA test was used to compare the differences between motivation levels depending on Working Time at the Current Workplace

<b>Motivators</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
<i>Higher wages than those of other businesses in the sector</i>	0.313	0.816
<i>Bonus fee applications</i>	0.337	0.798
<i>Job assurance</i>	3.274	0.024
<i>Social benefits (insurance, transportation support, discounted product, lunch and tea and coffee service, etc.)</i>	1.258	0.293
<i>Granting economic and financial awards</i>	1.511	0.217
<i>Giving authority and responsibility for the work done</i>	1.556	0.205
<i>Educational opportunities (external and in-service)</i>	1.420	0.242
<i>Openness of the promotion routes</i>	0.345	0.793
<i>Indirect work control (independent work) and performance feedback</i>	2.853	0.041
<i>Business support for solving individual problems</i>	1.729	0.166
<i>Participate in administrative decisions</i>	1.521	0.214
<i>Working in different jobs within the business</i>	1.289	0.283
<i>Taking more responsibility</i>	1.240	0.300
<i>Communicating with everyone whenever desired</i>	0.445	0.721
<i>High occupational health and safety</i>	0.835	0.478
<i>Managers' compliance with the rules of rights, law and justice</i>	0.146	0.932
<i>Organizing regular and systematic social and cultural activities within a business</i>	1.528	0.212

(F: Fisher test value, p: Probability)

Since  $P \leq 0.05$ , the working time in the current workplace is effective on employee motivation for the motivators of “Job assurance” and “Indirect work control(independent work) and performance feedback”.

The motivation levels for the effective motivators are given in Table 14 depending on the “Working time in the current workplace”.

**Table 14.** Motivation levels depending on working time in the current workplace for effective motivators

<i>Motivators</i>	<i>Working Time (Years)</i>	<i>Freq.</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Dev.</i>	<i>Std. Err.</i>
<i>Job assurance</i>	<i>Up to 3</i>	34	2.029	1.605	0.275
	<i>4-10</i>	43	2.837	1.430	0.218
	<i>11-20</i>	19	3.158	1.259	0.289
	<i>21-30</i>	3	3.333	1.155	0.667
	<i>Total</i>	99	2.636	1.508	0.152
<i>Indirect work control (independent work) and performance feedback</i>	<i>Up to 3</i>	34	2.471	1.581	0.271
	<i>4-10</i>	43	2.651	1.378	0.210
	<i>11-20</i>	19	3.526	1.172	0.269
	<i>21-30</i>	3	3.667	0.577	0.333
	<i>Total</i>	99	2.788	1.445	0.145
<i>GENERAL</i>	<i>Up to 3</i>	34	2.688	0.993	0.170
	<i>4-10</i>	43	2.799	0.704	0.107
	<i>11-20</i>	19	3.220	0.712	0.163
	<i>21-30</i>	3	3.353	0.778	0.449
	<i>Total</i>	99	2.858	0.834	0.084

(*Freq.:* Frequency, *Std. Dev.:* Standard Deviation, *Std. Err.:* Standard Error)

The effect of both factors “Job assurance” and “Indirect work control(independent work) and performance feedback” whose effects on employee performance increased as the working time of employees in the current workplace increased.

Regardless of motivators, according to the general averages depending on working time in the current workplace, as the working time of the employees increased in their current workplaces, their motivation levels also increased(Table 14).

#### 4. CONCLUSIONS

This study was aimed to determine the effects of some economic, psychological and sociological motivators on the motivation levels of employees in furniture industry companies depending on some socio-demographic characteristics.

The type of production(furniture, decoration, project works and building elements) was not effective on employee motivation.

While increasing occupational health and safety and giving more responsibility provided more motivation for male employees, the openness of career paths was more effective for female employees. Other motivators were equally effective in the motivation of male and female employees.

The motivation effect of both motivators “Indirect work control(independent work) and performance feedback” and “Managers' compliance with the rules of rights, law and justice” are higher in the age range of 36-55 compared to the 18-35 age range. After the age of 56, the motivation effect of both motivators decreased. The other motivators were equally effective in all age groups.

Regardless of motivators, according to the general averages depending on the income group, the higher the income level, the higher the average effect levels of all motivators. Motivation levels of the employees with a monthly income of up to \$ 375 for the motivators of “Organizing regular and systematic social and cultural activities within a business” were higher than that of employees with an income of \$ 376-2500 and it was the highest for employees with an income of \$ 2 501 and above.

The group in which all motivators were most effective in motivation increase were graduate educated employees with an average effect level of 3.99 and this group had the highest motivation level among all motivators.



According to the general averages depending the employees' status in their workplace, employees with skilled worker status had the lowest motivation level with 2.38, followed by those with unskilled worker status with 2.51. Except for those working in these two states, the higher the status level, the higher the level of motivation. The highest motivation level of 3.61 was seen in employees with “Manager/Assistant Manager” status.

The effect of both factors “Job assurance” and “Indirect work control(independent work) and performance feedback” effects on employee performance increased as the working time of employees in the current workplace increased. Regardless of motivators, according to the general averages depending on working time in the current workplace, as the working time of the employees increased in their current workplaces, their motivation levels also increased.

## ACKNOWLEDGEMENTS

All participants were informed that the information would not be shared with any third parties in accordance with Article 10 of the Law on the Protection of Personal Data No.6698 and universal scientific values, which are the basis of the rules of the institution to which the authors are affiliated, and data were collected from the volunteers after this was provided.

The data sets used in this study can be shared with the mutual approval of the author team, upon request from other researchers. In accordance with the open science approach, in a way, that does not violate the privacy of the survey participants and only; digitized data can be shared.

## REFERENCES

- [1] Ekici, M., “Evaluation of Factors Which Influence Motivation in Managements: Konya Province Sample”, Msc. Thesis, KTO Karatay University, 86-88, 2019.
- [2] Örucü, E., Kanbur, A., “An Empirical Study for Determining the Affects of Organizational- Managerial Motivation Practices on the Performance and Productivity of the Workers: Example of Service and Industry Company”, J. Manag. Econ., 15(1):85–97, (2008), [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/yonveek/issue/13688/165661>.
- [3] Lorincová, S., Štarchoň, P., Weberová, D., Hitka, M. and Lipoldová, M., “Employee Motivation as a Tool to Achieve Sustainability of Business Processes”, Sustainability, 11(13):3509, (2019), doi: 10.3390/su11133509.
- [4] Lorincová, S., Čambál, M., Miklošik, A., Balážová, Ž., Gyurák Babel'ová, Z., Hitka, M., “Sustainability in Business Process Management as an Important Strategic Challenge in Human Resource Management”, Sustainability, 12(15):5941, (2020), doi: 10.3390/su12155941.
- [5] Lorincová, S., Schmidtová, J., Javorčíková, J., “The Impact of the Working Position on the Level of Employee Motivation in Slovak Furniture Companies”, Acta Fac. Xylogologiae, 60(2):211–223, (2018), doi: 10.17423/afx.2018.60.2.20.
- [6] Lorincová, S., Hitka, M., Čambál, M., Szabó, P., Javorčíková, J., “Motivational Factors Influencing Senior Managers in the Forestry and Wood-Processing Sector in Slovakia”, BioResources, 11(4):10339–10348, (2016), doi: 10.15376/biores.11.4.10339-10348.
- [7] Aksoy, Ş. K., “Factors Affecting the Motivation of Employees: An Analysis at Mehmet Akif Ersoy University”, Akdeniz Univ. J. Inst. Soc. Sci., 7:89–111, (2020), [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/aksos/issue/55600/675950>.
- [8] Türkoğlu, T., Yurdakul, Ü., “The Investigation of the Relationship Between the Job Satisfaction and Job Performance of Employees in Furniture Sector”, Artvin Coruh University Journal of Forestry Faculty, 18(1):88–97, (2017), doi: 10.17474/artvinofd.270325.
- [9] Suifan, T. S., “The Effects of Work Environmental Factors on Job Satisfaction: The Mediating Role of Work Motivation”, Business: Theory and Practice, 20:456–466, (2019), doi: 10.3846/btp.2019.42.

- [10] Adem, A., Yılmaz Kaya, B., Dağdeviren, M., “An Ergonomic Investigation of Working Environment with Kano Model and Universal Design Principles”, *Gazi Univ. J. Sci.*, 32(2):582–593, (2019), [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujs/issue/45480/470024>.
- [11] Hashiguchi, N., Cao, J., Lim, Y., Kubota, Y., Kitahara, S., Ishida, S., Kodama, K., “The Effects of Psychological Factors on Perceptions of Productivity in Construction Sites in Japan by Worker Age”, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17(10):3517, (2020), doi: 10.3390/ijerph17103517.
- [12] Gedik, T., Çil, M., Korkut, D. S., Yükselen Kaya, M., Bircan, Ş., “A Research on Work Motivation of Managers of Forest Products Industry in Düzce”, *Turkish Journal of Forestry*, 19(1):91–97, (2018), doi: 10.18182/tjf.320131.
- [13] Hanaysha, J. R., Hussain, S., “An Examination of the Factors Affecting Employee Motivation in the Higher Education Sector”, *Asia-Pacific Journal of Management Research and Innovation*, 14(1-2):22–31, (2018), doi: 10.1177/2319510X18810626.
- [14] Lorincová, S., Schmidtová, J., Javorčíková, J., “Employee Job Satisfaction in Furniture Manufacturing Companies in the Slovak Republic”, *Drvna industrija*, 67(4):351–362, (2016), doi: 10.5552/drind.2016.1614.
- [15] Hitka, M., Hajduková, A., Balážová, Ž., “Impact of Economic Crisis on Changes in Motivation of Employees in Woodworking Industry”, *Drvna industrija*, 65(1):21–26, (2014), doi: 10.5552/drind.2014.1303.
- [16] Jelačić, D., “Motivating of Wood Processing and Furniture Manufacturing Companies Employees in the Time of Economic Crisis”, *Hum. Resour. Manag. Ergon.*, 5(1), (2011), [Online]. Available: <https://frcatel.fri.uniza.sk/hrme/archi.html>.
- [17] Faletar, J., Previšić, M., Jelačić, D., Dučić, A., Drimal, M., “Motivation of Employees in Wood Processing Company Before and After Restructuring”, *BioResources*, 11(1):2504–2515, (2016), [Online]. Available: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/motivating-employees-in-a-wood-processing-company-before-and-after-restructuring/>.
- [18] Internet: Ankara, In Ankara Development Agency Official Website. <http://kutuphane.ankaraka.org.tr/upload/dokumandosya/siteler-mobilya-ve-ankara.pdf>, (2012), Accessed: 22/05/2021.
- [19] Internet: Ankara, In Republic of Turkey Ministry of Industry and Technology Official Website. <https://www.sanayi.gov.tr/plan-program-raporlar-ve-yayinlar/81-il-sanayi-durum-raporlari/mu0603011615>, (2018), Accessed: 22/05/2021.



## The Effect of Layers on the Unidirectional Carbon Fibers of the Reinforced Polyester Resin Matrix Composite Material

Levent URTEKİN<sup>1</sup> , Deniz GÜNEŞ<sup>2</sup> , Faik YILAN<sup>1,\*</sup> , Murat ÇANLI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kırşehir Ahi Evran University, Engineering and Architecture Faculty, Mechanical Engineering Department, 40100, Merkez/KIRŞEHİR,

<sup>2</sup>Bandırma Onyedli Eylül University, Maritime Vocational School, 10010, Bandırma/BALIKESİR,

<sup>3</sup>Kırşehir Ahi Evran University, Mucur Vocational School, Chemistry and Chemical Processing Technologies, 40100, Mucur/KIRŞEHİR

### Abstract

In this study, composite materials are produced, placing unidirectional carbon fiber reinforcements with 12 filament numbers in a polyester matrix to form one, two, and three layers at room temperature through the hand lay-up method. The samples are prepared from composite plates with the help of a mold in line with the fiber direction angle by the standards. Tensile, bending, and falling weight low-speed impact tests are conducted to determine the mechanical properties of the samples. As a result of the tensile test, the highest tensile strength value among layers is obtained in the two-layer unidirectional fiber-reinforced composite materials. In bending tests, the highest elasticity values of unidirectional carbon fiber reinforcements are observed in three-layer composite materials with a fiber direction angle of 0°. 0° unidirectional fiber-reinforced one-layer composite materials are observed in composite materials with the highest deformation values in the falling weight low-velocity impact tests.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
 Başvuru: 19.04.2022  
 Düzeltme: 18.05.2022  
 Kabul: 29.05.2022

### Keywords

*Carbon Fibers*  
*Composite Materials*  
*Mechanical Properties*  
*Polyester Resin*

### Anahtar Kelimeler

*Karbon lifler*  
*Kompozit Malzemeler*  
*Mekanik Özellikler*  
*Polyester Reçine*

### Güçlendirilmiş Polyester Reçine Matrisli Kompozit Malzemelerin Tek Yönlü Karbon Fiberler Üzerinde Katmanların Etkisi

#### Öz

Bu çalışmada, 12 filament numaralı tek yönlü karbon fiber takviyelerin polyester matris içerisine bir, iki ve üç katman oluşturacak şekilde oda sıcaklığında elle yatırma yöntemiyle yerleştirilmesiyle kompozit malzemeler üretilmiştir. Numuneler, standartlara uygun olarak elyaf yön açısı doğrultusunda bir kalıp yardımıyla kompozit plakalardan hazırlanır. Numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme, eğilme ve düşen ağırlık düşük hızlı darbe testleri yapılır. Çekme testi sonucunda katmanlar arasında en yüksek çekme dayanımı değeri iki katmanlı tek yönlü elyaf takviyeli kompozit malzemelerde elde edilmiştir. Eğilme testlerinde tek yönlü karbon elyaf takviyelerin en yüksek elastisite değerleri 0° doğrultusunda üç katmanlı kompozit malzemelerde gözlenmektedir. 0° tek yönlü güçlendirilmiş kompozit malzemelerin düşen ağırlıkta düşük hız darbe testlerinin en yüksek deformasyon değerlerine sahip kompozit malzemelerde görülmektedir.

## 1. INTRODUCTION

Materials formed by combining two or more materials with several methods are called composite materials. Composite materials exhibit different properties from the materials that make them up. The most important purpose of using composite materials is to improve the properties of composite materials such as strength, flexibility, and lightness, which are insufficient when used alone [1-3]. In this context, with the developing technologies, especially in the defense industry, automotive, space, and aviation sectors, composite are frequently used [4]. In addition, recent research on biomedical applications (bone plate, external fixtures, etc.) continues. Hence, composite materials with different reinforcements and matrices are used in today's industry.

The most commonly used reinforcement materials among fiber-reinforced polymer composites are glass, carbon, and (aramid) Kevlar-type fibers [5]. Carbon fiber reinforced polymer composites are widely preferred because of the superior mechanical, environmental stability and a lightness of carbon fibers [6].

The compressive, tensile, and interlayer shear properties of different carbon-reinforced/polyamide composite materials obtained by interface polymerization and hot compression molding techniques are compared. With the increase of carbon fiber content, a slight increase in the composite material's elastic modulus, tensile and compressive strengths are detected [7]. The tensile strengths of composite materials consisting of carbon fiber, hybrid carbon/glass fiber, and hybrid carbon/basalt layers are investigated at different temperatures. The tensile strength values of hybrid composites decreased with increasing temperature values [8]. Composite materials were reinforced with glass fiber in different fiber ratios and their mechanical properties were investigated. Tensile, impact and three-point bending tests were carried out by cutting samples from the obtained plate composite materials in accordance with ASTM standards. Consequence of all these studies, it was observed that the maximum stress, tensile elongation, elastic modulus and impact resistance properties of the composite material increased with the increase in the glass fiber ratio [9]. Higher-strength is determined in the glass fiber layers of carbon fiber layers with a high modulus of epoxy-based glass/carbon fiber layered hybrid composites [10]. Impact tests have been carried out by producing layered composites using carbon and glass fiber. Epoxy and unsaturated polyester are used as the resin. As a result of impact tests, it has been revealed that if the resin is epoxy, its energy absorption is lower than that of unsaturated polyester resin [11]. In another study, it is observed that the impact and strength resistance of composites increased with the addition of nano reinforcement to epoxy matrix [12]. Consequently the tensile tests of biaxial fiber direction  $+45^{\circ}$  composite samples, the best ductility, and the best impact strength value are obtained in the low-speed impact tests of the falling weight [13]. Unidirectional basalt fiberglass fiber-reinforced composites and hybrid composite materials are produced by vacuum bagging technique, then tensile and three-point bending tests are performed to evaluate samples mechanical properties. It has been concluded that the mechanical properties of composites with basalt fiber out layer are better [14]. Buckling and tensile test are performed on carbon fiber reinforced epoxy resin composites, revealing that the mechanical properties mainly depend on the fiber orientation of the laminated composites [15]. In the study conducted by Köseadağ and Ekici [16], aramid reinforced polymer matrix composite materials were produced in equal thicknesses by hot press method. Impact tests were carried out at 15, 30, 45J energy values. The energy absorption capabilities of these materials were examined. As a result, they observed that as the impact energy increased, there was an increase in the maximum contact forces of the composite samples and a decrease in the contact times. Subası et al. investigated the in the deep drawing of thermoplastic composite laminates the effects of different holding pressure, punch speed, specimen temperature and piece depth parameters on the molding force. Bidirectional woven glass fiber reinforced 3 mm polypropylene composite materials were used in the experiments. As a result of the experiments, as the specimen temperature increased the molding force decreased. The molding force increased as the holding pressure increased. Increasing punch speed caused an increase in required molding force [17].

As mentioned so far, the mechanical properties of composite materials with different layers and reinforcement materials have been investigated. In this study, the mechanical properties of the composites produced by hand lay-up method using polyester resin matrix and reinforcement materials consisting of unidirectional  $0^{\circ}$  carbon fiber with different layers types have been investigated. Tensile, three-point bending, and impact tests are performed on the composite specimens. The mechanical properties obtained from the experimental results are explained in detail.

## **2. MATERIALS AND METHODS**

### **2.1. Materials**

In the studies, the composite material is produced at room temperature using the hand lay-up method in the Atelier of Bandırma Onyedi Eylül University. Carbon fiber fabric with two different weaves is used as a reinforcement element, polyester as matrix material. The carbon fiber fabrics we are used supplied ready-to-use, unidirectional CW400 B-Carbon 12K plain weave fabric from Teletext Company. The matrix materials we are used supplied by the company Yücel Kompozit A.Ş. (Turkey). Camelyaf brand

92 N8 general purpose polyester resin is used as one of the most preferred polyester types in matrix material hand lay-up methods. Additives Methyl ethyl ketone peroxide (MEK-P) is used to freeze the matrix material, and cobalt is used for fast freezing. Also, two separators are used to remove the product from the mold easily. First, the solid separator Polivaks SV-6 is used, then the liquid separator Polivaks PVA is used.

Tensile and three-point compression tests are carried out in the test training laboratory of Zwick Avrasya company. The falling weight low-speed impact test is carried out in Dumlupınar University Mechanical Engineering Department Laboratory. Drop height of 1 meter, impact energy of 30.41 J, and velocity of 4.43 is accepted as experiment parameters. For the tensile test, the Zwick/Roell brand Allround Line Z250 SrR test device is used to test the samples produced according to the ISO 527-1 standard. Four samples are tested for each sample group. The Zwick/Roell brand ProLine table-top testing machines Z005 up to Z100 testing devices are used to test the samples produced following the ISO 178 standard for the three-point compression test.

### 3. RESULTS

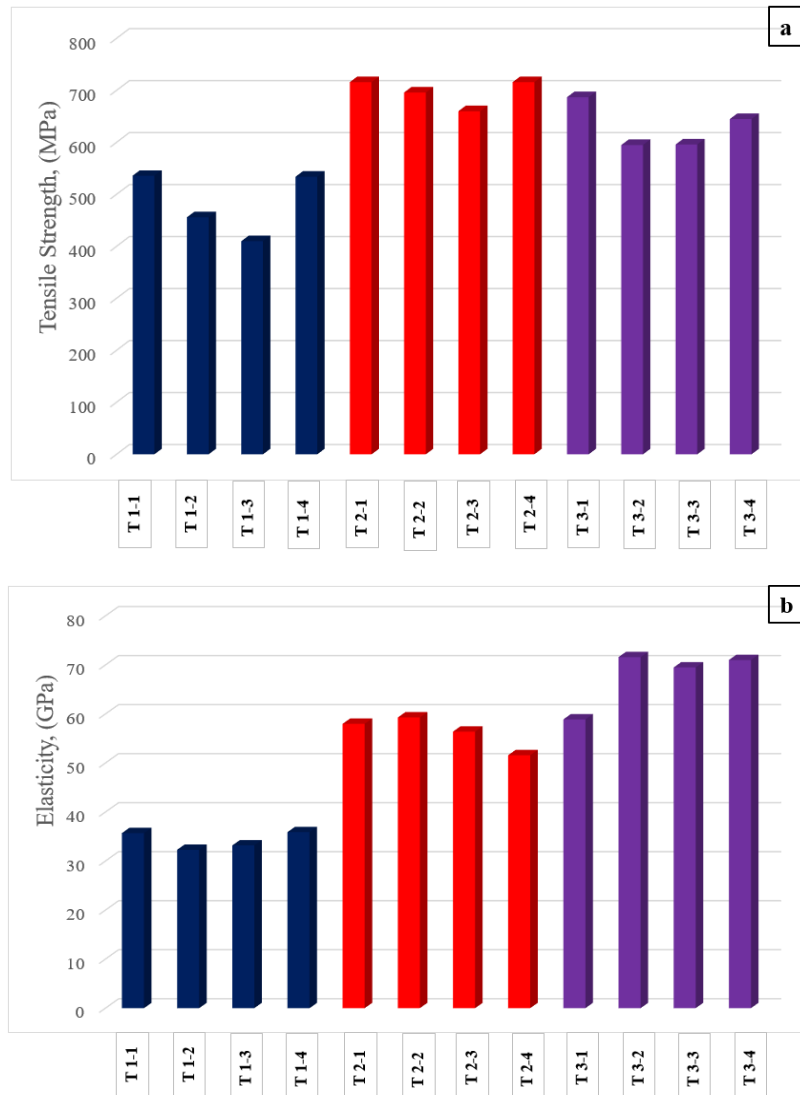
Samples are produced from unidirectional carbon fiber with  $0^0$  fiber directions. According to the experiments, T for the tensile test, B for the bending test, D for the drop test, and 1, 2, 3 for the number of layers, respectively. For this reason, composite samples are prepared and named differently. In total, 12 samples were tested for the tensile and bending test, and 15 samples were tested for the drop test.

#### 3.1. Tensile Tests

Fig. 1. shows the tensile strength and elasticity values of one, two, and three-layer composite materials. The values of the tensile test results of the samples formed from one layer with a unidirectional carbon  $0^0$  fiber orientation angle are close to each other. It is seen that a difference of 10,31% between the highest and lowest values in elasticity value and 23.51% difference in breaking strength value is obtained. After the experiment, the carbon fibers of samples occur a large deformation. From the tensile test results of the samples consisting of two layers with unidirectional carbon  $0^0$  fiber orientation angle, it is seen that there is a 12.98% difference between the highest and lowest values in elasticity value and a 7.82% difference in breaking strength value. When comparing the one-layered and two-layered specimens, it was determined that the difference between the elasticity values was greater, and the difference between the breaking strength values was less. After the tensile test, it was observed that the carbon fibers in the samples broke in the direction of orientation.

On the other hand, it was observed that there is no fragmentation in the two-layered specimens as in the one-layered specimens. When the tensile test results of the unidirectional carbon  $0^0$  fiber orientation angle three-layer composite group are examined, it is seen that there is a 3.77% difference between the highest and lowest values in elasticity value and a 13.99% difference in breaking strength value. It has been determined that the ratio between the ductility of the three-layered samples is lower than that of one and two layers, and the ratio between the breaking strength values is less than one layer and higher than two layers. When the samples were examined after the test, it was seen that there was little deformation in the three layers; also, parts were broken from some samples. The images of unidirectional carbon  $0^0$  fiber-oriented one-layer, two-layer, and three-layer samples before and after the tensile test are shown in Fig 2.

When the results of the tensile tests of the samples are compared, It was determined that the composite material with the best elasticity according to the average and highest values belongs to the unidirectional  $0^0$  three-layer Materials. It was observed that the highest breaking strength value is the two-layer composite material with a unidirectional  $0^0$  fiber orientation angle. The tensile test results showed that the best composite material in the tensile direction belonged to the three-layer composite materials produced according to the unidirectional  $0^0$  fiber orientation angle.



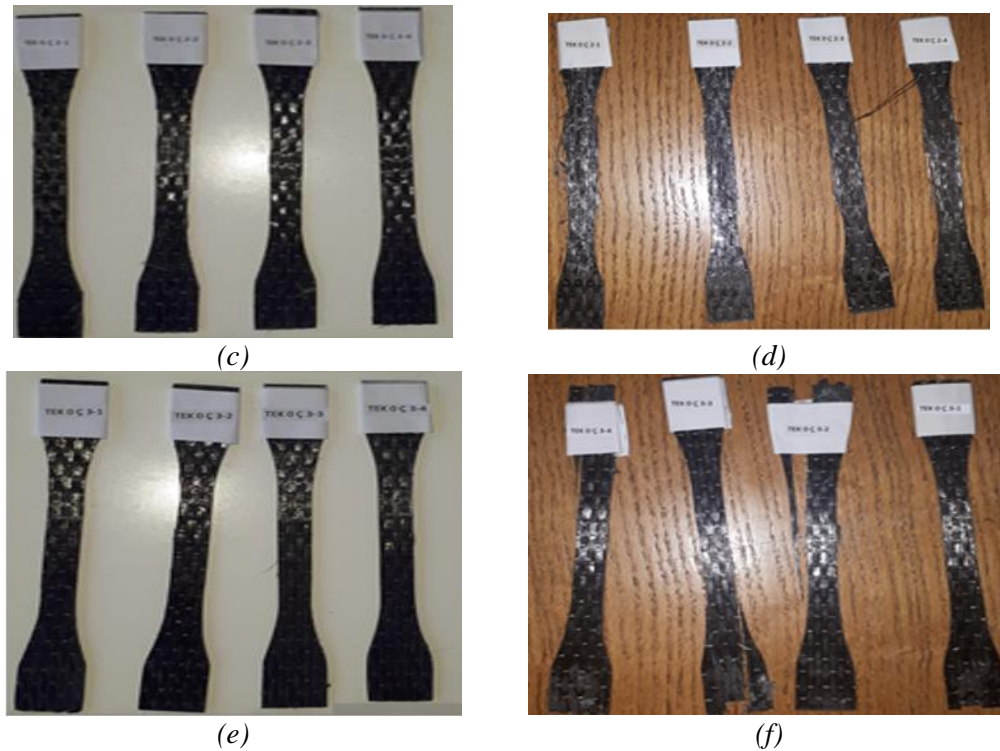
**Figure 1.** The change in the (a) tensile strength (b) elasticity modulus of the samples according to one, two and three layers changes



(a)



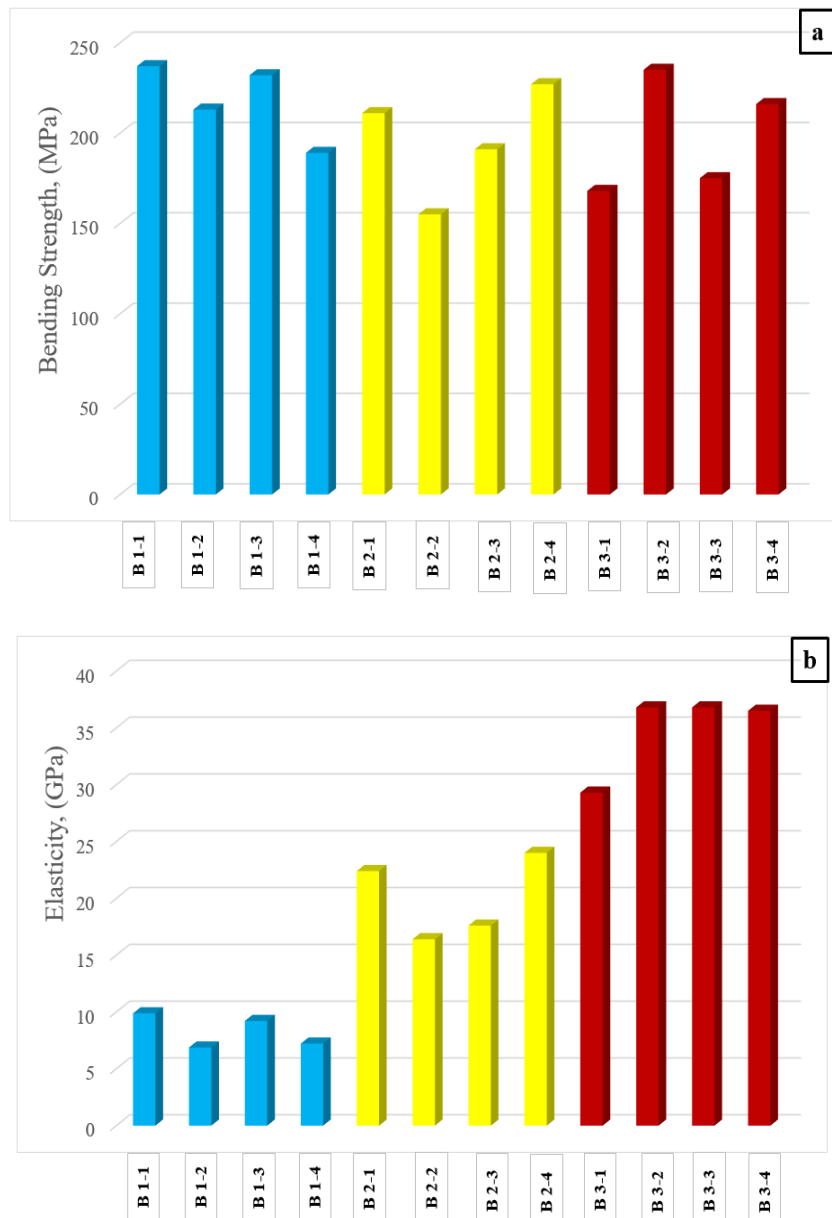
(b)



**Figure 2.** Tensile test images of unidirectional  $0^{\circ}$  carbon fiber samples; (a) T1 group's status before the test, (b) T1 group's status after the test, (c) T2 group's status before the test, (d) T2 group's status before the test, (e) T3 group's status before the test, (f) T3 group's status after the test

### 3.2. Three Point Bend Test

Three point bending test results of the samples are given in Fig 3. The bending test results of the unidirectional carbon  $0^{\circ}$  fiber orientation angle one layer composite group differ. After the test, it was observed that there were fractures in the orientation of the carbon fibers in the samples, but there was no complete rupture. When the three bending test results of the two-layer composite group with unidirectional carbon  $0^{\circ}$  fiber orientation angle are examined, the values of the samples are different from each other. It was concluded that the ratio between flexural strength values of two-layered specimens increased more when compared to one-layered specimens. The three-point bending test results of the three-layer composite group with a unidirectional carbon  $0^{\circ}$  fiber orientation angle showed that the sample values are closer to each other than the other layers. A continuous increase in elasticity and flexural strength values are detected. When the three-point bending test values of the samples consisting of one layer are examined, the best elasticity and flexural strength values are obtained in the one layer composite group samples with unidirectional carbon  $0^{\circ}$  fiber orientation angle. At the same time, with the increase in elasticity and breaking strength values, it was observed that the most brittle material belonged to the same group, unidirectional carbon  $0^{\circ}$  one-layer composite material. The B3-3 samples have 427.32% higher elasticity value, while 330.30% higher values for flexural strength have been obtained. When the average three-point bending test values of the samples consisting of two layers are examined, it is seen that the best elasticity values belong to the two-layer composite group (B2-3) with a unidirectional carbon  $0^{\circ}$  fiber orientation angle, showing similar properties to the samples consisting of one layer. It has been determined that the best average result belongs to the one layer (B1) composite group due to the difference in bending strength values compared to the samples consisting of one layer. Higher elasticity values have been determined in the (B3) group. Likewise, higher values of three-layer composite material with unidirectional  $0^{\circ}$  fiber orientation angle have been obtained in bending strengths.

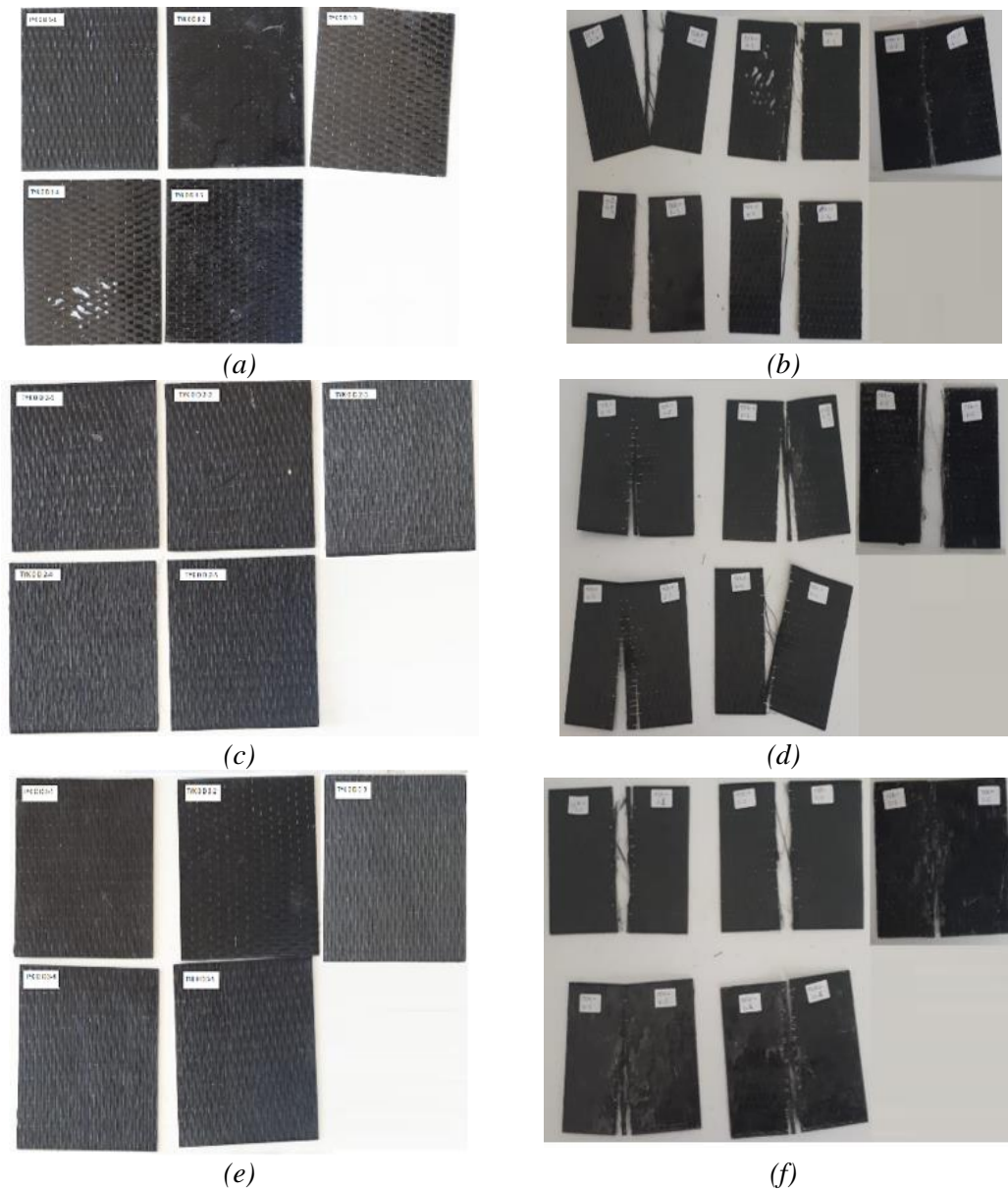


**Figure 3.** The change in (a) bending strength (b) elasticity modulus of the samples according to one, two and three layers changes

### 3.3. Dropped Weight Impact Test at Low Speed

The experiments are carried out as one, two, and three layers. The low-weight, low-speed impact test images of one, two, and three-layer composite materials with unidirectional  $0^{\circ}$  fiber orientation angles are shown in Fig 4.





**Figure 4.** Drop weight low-velocity impact images of unidirectional  $0^{\circ}$  carbon fiber samples; (a) D1 sample condition before the test, (b) D1 sample condition after the test, (c) D2 sample condition before the test, (d) D2 sample condition before the test, (e) D3 sample condition before the test, (f) D3 sample condition after the test

Herewith the weight applied to all samples, a break occurred at the contact point parallel to the orientation angles of the fibers. For this reason, two fragmentation occurred in the samples. When we examine the results of the falling weight low-velocity impact test, all sample groups have been deformed, and values are tabulated in Table 1. All samples showed good strength resistance to impact energy of 30.41J. It has been determined that the deformation on the bottom surface of the sample is caused by the fiber orientation and due to the separation of the fibers.

**Table 1.** Drop weight low speed impact test results of all samples with unidirectional carbon 0° fiber orientation angle

Samples	Average Thickness (mm)	Dimension (mm-mm)
D 1-1	0,82	100,32×99,87
D 1-2	0,87	100,48×100,23
D 1-3	0,88	100,16×100,23
D 1-4	0,77	100,49×99,87
D 1-5	0,83	100,12×99,75
D 2-1	1,33	99,63×99,53
D 2-2	1,37	99,65×99,58
D 2-3	1,32	100,09×99,76
D 2-4	1,28	99,95×99,98
D 2-5	1,26	100,28×99,68
D 3-1	1,68	99,38×99,82
D 3-2	1,84	100,29×99,79
D 3-3	1,75	99,72×99,98
D 3-4	1,64	99,68×99,82
D 3-5	1,73	99,54×99,72

#### 4. CONCLUSIONS

The mechanical test results have shown that the reinforcement element, number of layers, fiber orientation direction, angle, matrix material, and production method of the composite materials are greatly important according to their use and purpose. In the production of carbon fiber composites, the expensiveness of carbon fiber materials has generally led to the selection of matrices with higher mechanical values and the use of more technological methods. However, in this study, we reported that composites with high mechanical values would be produced with polyester resin, the most widely used matrix material of carbon fibers, and the hand lay-up method, which is the simplest method in terms of workmanships. While increasing the number of layers, the most dangerous situation in composite products obtained by the hand lay-up method should be done very carefully. According to the results obtained;

- As a result of the tensile test of unidirectional carbon fiber reinforcements, the tensile strength and modulus of elasticity values increased depending on the number of glass fiber layers. The highest tensile strength value among layers is obtained in the two-layer unidirectional fiber-reinforced composite materials.
- As a result of three-point bending tests of unidirectional carbon fiber reinforcements, flexural strength and breaking force values also increased depending on the number of fiber layers. The highest elasticity values of unidirectional carbon fiber reinforcements are observed in three-layer composite materials with a fiber direction angle of 0°.
- It was observed that the mechanical properties of composite materials improved as the number of fiber layers increased. Since the region between the layers causes the composite strength to be lower than it should be, the desired increase cannot be achieved after a certain number of fiber layers depending on the increase in the number of fiber layers.

- It was observed that the composites with unidirectional carbon fiber reinforced 0° fiber orientation, which had the best elasticity values in the tensile and bending tests, were the composite materials that underwent the most deformation in the falling weight low velocity impact test.

## REFERENCES

- [1] Clyne, Trevor William, and Derek Hull. *An introduction to composite materials*. Cambridge university press, 2019.
- [2] Jones, Robert M. *Mechanics of composite materials*. CRC press, 2018.
- [3] Kollar, Laszlo P., and George S. Springer. *Mechanics of composite structures*. Cambridge university press, 2003.
- [4] Mallick, P. K. "Fiber Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design, Marcel Decker." Inc., New York (1993).
- [5] Zhang, Xiaoqing, et al. "Interfacial microstructure and properties of carbon fiber composites modified with graphene oxide." *ACS applied materials & interfaces* 4.3 (2012): 1543-1552.
- [6] Karnati, Sidharth Reddy, Philip Agbo, and Lifeng Zhang. "Applications of silica nanoparticles in glass/carbon fiber-reinforced epoxy nanocomposite." *Composites Communications* 17 (2020): 32-41.
- [7] Botelho, E. C., M. C. Rezende, and B. Lauke. "Mechanical behavior of carbon fiber reinforced polyamide composites." *Composites Science and Technology* 63.13 (2003): 1843-1855.
- [8] Cao, Shenghu, W. U. Zhis, and Xin Wang. "Tensile properties of CFRP and hybrid FRP composites at elevated temperatures." *Journal of composite materials* 43.4 (2009): 315-330.
- [9] Çakır, Mustafa, and Boran Berberoğlu. "E-cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin elyaf oranındaki artış ile mekanik özelliklerindeki değişimlerin incelenmesi." *El-Cezeri Journal of Science and Engineering* 5.3 (2018): 734-740.
- [10] Murugan, Ramasamy, R. Ramesh, and Krishan Padmanabhan. "Investigation on static and dynamic mechanical properties of epoxy based woven fabric glass/carbon hybrid composite laminates." *Procedia Engineering* 97 (2014): 459-468.
- [11] Sugie, Tomohiko, Asami Nakai, and Hiroyuki Hamada. "Effect of CF/GF fibre hybrid on impact properties of multi-axial warp knitted fabric composite materials." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40.12 (2009): 1982-1990.
- [12] Boumbimba, R. Matadi, et al. "Preparation and mechanical characterisation of laminate composites made of glass fibre/epoxy resin filled with tri bloc copolymers." *Composite structures* 116 (2014): 414-422.
- [13] Güneş, D., Çanlı, M, and Urtekin, L. "Investigation of Mechanical Properties of Carbon Fibre Reinforced Polyester Matrix Composite." *Journal of Scientific Reports-A* 047: 68-78.
- [14] Fiore, V. I. N. C. E. N. Z. O., G. Di Bella, and A. Valenza. "Glass-basalt/epoxy hybrid composites for marine applications." *Materials & Design* 32.4 (2011): 2091-2099.
- [15] Banakar, Prashanth, and H. K. Shivananda. "Preparation and characterization of the carbon fiber reinforced epoxy resin composites." Department of Mechanical Engineering, Atria Institute of Technology, Visvesvaraya University, Bangalore-24, India. Department Of Mechanical Engineering, University Visvesvaraya College of Engineering, Bangalore University Bangalore-01, India ISSN (2012): 2278-1684.
- [16] Köseadağ, Ertan, and Recep Ekici. "Impact Behavior of Aramid Reinforced Polymer Matrix Composites Produced By Hot Press-Prepreg Method." *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 28 (2021): 84-90.
- [17] Özdemir, Abdullah Onur, Mehmet Subaşı, and Çetin Karataş. "Investigating the Effects of Forming Parameters on Molding Force and Springback in Deep Drawing Process of Thermoplastic Composite Laminates." *Gazi University Journal of Science* (2021): 1-1.

## Numerical Analysis of Artificially Square Section Roughened Solar Air Heater Design

Abdülkadir KOÇER<sup>1</sup> \* 

<sup>1</sup>Akdeniz University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Electricity and Energy, 07070, Kampüs/ANTALYA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
Received: 17.03.2022  
Revision: 08.05.2022  
Accepted: 22.05.2022

#### Highlights

- Solar air heater
- Heat transfer
- CFD analysis

#### Keywords

Solar energy  
Air heater  
Heat transfer  
CFD analysis

In this study, a numerical analysis of a solar air heater was designed by creating a square section of artificial roughness on the absorber plate. Numerical simulation has been performed using the finite volume method with the widely used computational fluid dynamics software ANSYS Fluent.

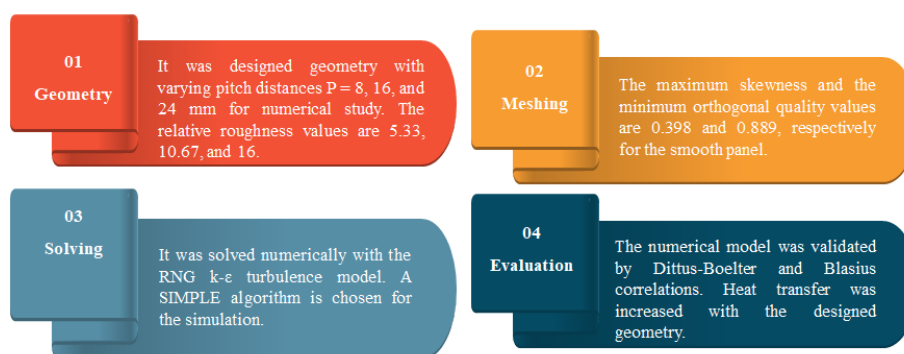


Figure A. The main steps of this computational study

**Purpose:** Numerical analysis of square section artificial rough solar air heater and flat air heater with different dimensions was carried out to examine the effect of different design parameters. Analyzes were performed in 2D in ANSYS Fluent 2019R3, a widely used computational fluid dynamics (CFD) software. The results produced were compared with the literature values.

**Theory and Methods:** For numerical study, geometry with variable pitch distances  $P = 8, 16,$  and  $24$  mm is designed. The relative roughness values are  $5.33, 10.67,$  and  $16$ . Incompressible, No-slip conditions and steady and turbulent flow are designed. The inlet temperature is  $300$  K and inlet velocity changes depending on Reynolds Number. The constant heat flux ( $1000$  W/m<sup>2</sup>) was applied to the top surface. The other walls of the air heater are assumed to be adiabatic. RNG  $k-\epsilon$  turbulent model is employed for the numerical study. A SIMPLE algorithm is chosen for the simulation.

**Results:** The designed artificial roughness heat transfer has been increased and the air outlet temperature has reached around  $314$  K was reached under  $Re=4000$  and  $P/e=5.33$  conditions. The thermal enhancement ratio approaches a maximum value of  $1.20$  for a relative roughness pitch of  $16$  at a Reynolds number of  $8000$ .

**Conclusion:** Artificial roughness applied to increase heat transfer causes friction losses. this results in additional pumping costs. In such applications made to increase heat transfer, pump costs should also be considered.



## Numerical Analysis of Artificially Square Section Roughened Solar Air Heater Design

Abdülkadir KOÇER<sup>1</sup> \*

<sup>1</sup>Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 07070, Kampüs/ANTALYA

### Abstract

It is known that solar air heaters have low heat transfer efficiencies, with widespread use. Various studies are carried out on this subject. In this study, numerical analysis of a solar air heater designed by creating a square section artificial roughness on the absorber plate. Numerical simulation of the continuity, momentum and energy equations has been performed in 2-dimensional for fully developed flow subject to turbulent, forced convection heat transfer using the finite volume method with the widely used computational fluid dynamics software ANSYS Fluent. By applying a constant heat flux of 1000 W.m<sup>-2</sup> on the absorber plate, flow was created at 4 different Reynolds numbers (4000, 8000, 12000 and 16000) and at 3 different roughness rates (5.33, 10.67 and 16.00). Depending on the Reynolds number, the Nusselt number, friction factor change and fluid outlet temperature were examined. In addition, the effect of Reynolds number and roughness ratio on the heat increase rate was investigated. The maximum thermal enhancement ratio (at Re=800 and P/e=16) was calculated as 1.20. By creating artificial roughness on the absorber plate, turbulence was provided in the sub-laminar layer and it was observed that the heat transfer was increased. The fluid inlet and outlet temperature difference were found to be around 4 K.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 17.03.2022*  
*Düzeltilme: 08.05.2022*  
*Kabul: 22.05.2022*

### Keywords

*Solar energy*  
*Air heater*  
*Heat transfer*  
*CFD analysis*

### Anahtar Kelimeler

*Güneş enerjisi*  
*Hava ısıtıcı*  
*Isı transferi*  
*CFD analiz*

### Kare Kesit Yapay Pürüzlü Güneş Destekli Hava Isıtıcı Tasarımının Sayısal Analizi

#### Öz

Güneş destekli hava ısıtıcıların çok yaygın kullanım ile birlikte ısı transferi verimlerinin düşük olduğu bilinmektedir. Bu konuda çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Yapılan bu çalışmada yutucu plaka üzerine kare kesit yapay pürüzlülük oluşturularak tasarlanan bir güneş destekli hava ısıtıcısının sayısal analizi yapılmıştır. Kütle, momentum ve enerji korunumu denklemlerinin sayısal simülasyonu, yaygın kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan ANSYS Fluent ile sonlu hacimler metodunu kullanarak türbülanslı, zorlanmış konveksiyon ısı transferine maruz kalan tam gelişmiş akış için 2-boyutlu olarak yapılmıştır. Yutucu plaka üzerine 1000 W.m<sup>-2</sup> sabit ısı akısı uygulanarak 4 farklı Reynolds sayısında (4000, 8000, 12000 ve 16000) ve 3 farklı pürüzlülük oranında (5,33, 10,67 ve 16,00) akış oluşturulmuştur. Reynolds sayısına bağlı olarak Nusselt sayısı, sürtünme faktörü değişimi ve akışkan çıkış sıcaklığı irdelenmiştir. Ayrıca, Reynolds sayısının ve pürüzlülük oranının ısı arttırma oranına etkisi incelenmiştir. Maksimum ısı arttırma oranı (Re=800 ve P/e=16'de) 1,20 olarak hesaplanmıştır. Yutucu plaka üzerinde yapay pürüzlülükler oluşturularak laminar alt tabakada türbülans sağlanması ile ısı transferinin arttırıldığı görülmüştür. Akışkan giriş ve çıkış sıcaklık farkı 4 K civarında bulunmuştur.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen teknoloji ile enerjiye olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu süreçte enerji tasarrufu ve mevcut enerjinin verimli kullanılması önemli bir unsurdur. Halen üretilen enerjinin büyük bir kısmı fosil yakıtların yakılması, doğalgaz ve nükleer enerji gibi geleneksel enerji kaynaklarından sağlanmaktadır. Bu yakıtların kullanımı da sera gazlarının artmasına neden olmaktadır. Küresel ısınmanın neden olduğu iklim değişikliği; ekosistemi tehdit etmekte, kurağı, orman yangınlarını arttırmakta, su ve gıda tedarikini bozmaktadır. Ayrıca artan nüfus ile birlikte, 2040 yılına kadar enerji talebinin %28 artacağı ön görülmektedir [1].

Güneş destekli hava ısıtıcılar evsel ısıtma uygulamalarında, tarımsal ürünlerin kurutulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür ısıtıcıların tasarımı basit ve üretim maliyetleri düşüktür. Yutucu plaka, ısı enerjisini doğrudan güneşten alır ve akışkana aktarır. Ancak düz yüzeyli bir plakada temas yüzeyi minimum

olduğu için ısı verimi düşüktür. Isı transferini arttırmak için aktif ve pasif olmak üzere iki farklı yöntem kullanılır. Aktif sistemler ek bir enerji uygulanan sistemlerdir. Pasif sistemler ise akış yüzeyinin artırılması ve akışın karmaşılaştırılması olarak ifade edilir. Plaka üzerinde kanal benzeri pasif tekniklerin uygulanmasıyla yapay pürüzlülükler oluşturularak laminer alt tabakada türbülans sağlanır ve termal verimlilik artırılır.

Yapılan çalışmalarda; yutucu plaka ile akışkan arasındaki ısı transfer oranını iyileştirmek için oluklu, kanatlı, gözenekli ve yapay pürüzlendirilmiş plakalar gibi farklı teknikler önerilmiştir. Yapay pürüzlülüğün kullanılması, konvektif ısı transfer oranını iyileştirmek için en ekonomik ve etkili yöntem olduğu belirtilmiştir [2].

Shetty ve ark. [1] tarafından delikli dairesel yutucu plakalı bir güneş destekli hava ısıtıcısının sayısal analizi yapılmıştır. 3000 ile 21000 arasında değişen Reynolds sayılarında yapılan analiz sonucunda %72,8 ile en yüksek termohidrolik verim elde edilmiştir. Isıtıcının termohidrolik veriminin, plaka üzerindeki delik çapındaki artışla doğru orantılı olduğu ifade edilmiştir.

Gill ve ark. [2] tarafından yapılan çalışmada; şaşırtmalı yapay pürüzlülüğün akışkan üzerindeki etkisini, sonlu hacim yöntemine dayalı sayısal yaklaşım kullanılarak gözlemlenmiştir. Önerilen tasarım ile, düz bir kanala kıyasla sürtünme faktörünün 2,57 ve Nusselt sayısının 3,16 kat arttığı belirtilmiştir.

Yadav ve ark. [3] ısı transfer katsayısını artırmak amacıyla düz yüzeyli güneş destekli ısıtıcı üzerine yarı dairesel yapay pürüzlülükler oluşturularak 2D sayısal analizi yapılmıştır. Engel adımı  $P = 15$  mm olan yarı dairesel pürüzlülüğün en iyi Nusselt sayısına ulaşıldığı ve sürtünme faktörünün kademeli olarak azaldığı belirtilmiştir.

Yadav ve Bhagoria [4] tarafından yarı dairesel kesitli enine yapay pürüzlendirilmiş bir güneş destekli hava ısıtıcısının türbülanslı akışları üzerine sayısal bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünün, bağıl pürüzlülük yüksekliğine büyük ölçüde bağlı olduğu belirtilmiştir. Bağıl pürüzlülük yüksekliğinin 0,042 olduğunda maksimum termo-hidrolik performans elde edildiği ifade edilmiştir. Yazarların diğer bir çalışmasında [5] kare kesit enine yapay pürüzlendirilmiş bir yutucu plaka üzerindeki akış sayısal olarak incelenmiştir. En iyi termo-hidrolik performansın 10,71 pürüzlük oranında ve 0,042 bağıl pürüzlülük yüksekliğinde olduğu ifade edilmiştir.

Mahanand ve Senapati [6] tarafından yapılan çalışmada çeyrek dairesel kesitli enine yapay pürüzlendirilmiş bir güneş destekli hava ısıtıcısının termo-hidrolik özellikleri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada çeyrek dairesel pürüzler üç farklı şekilde konumlandırılarak karşılaştırılmıştır. Pürüzlülük oranı 7,14 olan çeyrek dairesel pürüze sahip güneş destekli hava ısıtıcısının, 1,88'lik bir maksimum ısı arttırma oranı sağladığı ifade edilmiştir.

Sharma ve ark. [7] kare kesit pürüzlü yutucu plaka bulunan güneş enerjili hava ısıtıcısının termal verimliliğini araştırmak için sayısal bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada 16 farklı geometrik pürüzlülük düzeni için, 4000 ile 20000 arasında değişen Reynolds sayısı altında RNG k-epsilon yöntemi ile sayısal analiz yapılmıştır. Kare kesit pürüzlülük parametrelerindeki değişimin, düz kanala kıyasla Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü üzerinde büyük etkiye sahip olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca Reynolds sayısının artmasıyla Nusselt sayısının da arttığı belirtilmiştir.

Hans ve ark. [8] yapmış olduğu literatür çalışmasında 11 farklı pürüzlülük için ısı arttırma oranlarını karşılaştırmıştır. Çalışmada ısı arttırma oranlarının Reynolds sayısı ve pürüzlülük parametrelerine bağlı olarak 0,4 ile 2,4 arasında değiştiği raporlanmıştır. Ayrıca ısıtıcı verimini arttırmak için yapılan pürüzlülüklerin sürtünme kayıplarına neden olduğunu vurgulamıştır.

Yadav ve Bhagoria [9], hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak yutucu plaka üzerinde enine dairesel yapay olarak pürüzlendirilmiş bir güneş enerjili hava ısıtıcısındaki ısı transferi ve sıvı akışının 2-boyutlu sayısal analizini yapmışlardır. Çalışmada RNG k-ε modelinin en uygun model olduğu vurgulanmıştır. Sonuçların mevcut deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulandığı ifade edilmiştir. İncelenen parametre

aralığı için termal iyileştirme faktörünün maksimum değeri 1,65 olarak bulunmuştur. Yapay olarak pürüzlendirilmiş güneş enerjili hava ısıtıcısına ilişkin farklı CFD araştırmalarında termal iyileştirme faktörünün maksimum değeri; 10,71 bağıl pürüzlülük adımına karşılık gelen 1,82 olarak bulunduğu yazarların yayınlanmış başka bir inceleme makalesinde tespit edilmiştir [10].

Sing ve Sing [11] tarafından pürüzlülük elemanları olarak kare dalga profilli enine kırıslara sahip güneş enerjili hava ısıtıcı kanalının CFD analizini yapılmıştır. Çalışma sonucunda maksimum termohidrolik performans parametresinin 12000 Reynolds sayısı ve 10 mm bağıl pürüzlülük adımı için 1,43 olarak gözlemlenmiştir.

Yadav ve Bhagoria [12] tarafından kare kesitli enine nervür pürüzlülüğü ile pürüzlendirilmiş bir güneş enerjili hava ısıtıcısından geçen türbülanslı akışın CFD tabanlı bir araştırması gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada; ortalama ısı transferi, ortalama akış sürtünmesi ve termohidrolik performans parametrelerinin, bağıl pürüzlülük yüksekliğine güçlü bir şekilde bağlı olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca araştırılan parametre aralığı için maksimum termohidrolik performans parametre değeri 1,8 olarak rapor edilmiştir.

3-boyutlu model (3D) yerine 2-boyutlu (2D) model seçimi farklı faktörlere bağlıdır, geometrinin karmaşıklığına göre tercih yapılabilir. 2D ve 3D modeller arasındaki bir karşılaştırma sonucunda ortalama %4' ten daha az bir farkla her iki sonuç arasında çok iyi bir uyum gösterildiği literatürde vurgulanmıştır [13].

Güneş destekli hava ısıtıcılar için tasarım şekli ve parametrelerinin değişmesi, ısıtıcının veriminde artışa ya da azalmaya neden olmaktadır. Bu yüzden literatürde benzer geometrik özelliklere sahip birçok çalışma mevcuttur ancak bu çalışmaların tasarım parametreleri farklıdır. Parametrelere bağlı olarak elde edilen sonuçlar farklılık göstermektedir. Yapılan bu çalışmada, farklı tasarım parametrelerinin etkisi incelenmek üzere farklı ölçüler sahip kare kesitli yapay pürüzlü güneş destekli hava ısıtıcı ile düz hava ısıtıcının sayısal analizi yapılmıştır. Analizler yaygın olarak kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımı olan ANSYS Fluent 2019R3 sürümünde 2D olarak yapılmıştır. Üretilen sonuçlar literatür değerleri ile karşılaştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada; akışkan olarak 300 K giriş sıcaklığında hava kullanılmıştır. Zamandan bağımsız, türbülanslı akış göz önüne alınmış olup havanın kanala sabit hızda girdiği varsayılmıştır. Çalışmada dört farklı Reynolds sayısı (4000, 8000, 12000 ve 16000) kullanılmıştır. Akışkan hızları, Denklem 1'e göre hesaplanmıştır. Gupta ve ark. [14] yaptıkları çalışmada; 3800 ile 18000 aralığındaki Reynolds sayısında çalışan güneş enerjili hava ısıtıcı sistemlerin daha iyi termo-hidrolik performans gösterdiğini bildirmiştir.

$$v = \frac{Re\mu}{\rho D_h} \quad (1)$$

Yutucu plaka olarak, 0,8 mm kalınlığında 1000 W.m<sup>-2</sup> sabit ısı akısına maruz kalan alüminyum plaka seçilmiştir. Çevresel etkileşim kaynaklı ısı kayıpları ihmal edilmiştir. Çalışmada kullanılan hava ve yutucu plakanın termofiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Çalışmada kullanılan güneş destekli hava ısıtıcı; giriş (L<sub>1</sub>), test (L<sub>2</sub>) ve çıkış (L<sub>3</sub>) olmak üzere kanal şeklinde 3 bölüm olarak tasarlanmıştır (Şekil 1). Giriş bölümünün amacı, akışın test bölüme girmeden önce tamamen gelişmesine izin vermektir. ASHRAE Standard 93 GA30329'a göre giriş ve çıkış uzunluklarının olması gereken minimum değerler Denklem 2 ve 3 yardımıyla hesaplanmıştır [15]. Kanalın hidrolik çapı ise Denklem 4 yardımıyla hesaplanmıştır.

**Tablo 1.** Hava ve yutucu plakanın termofiziksel özellikleri

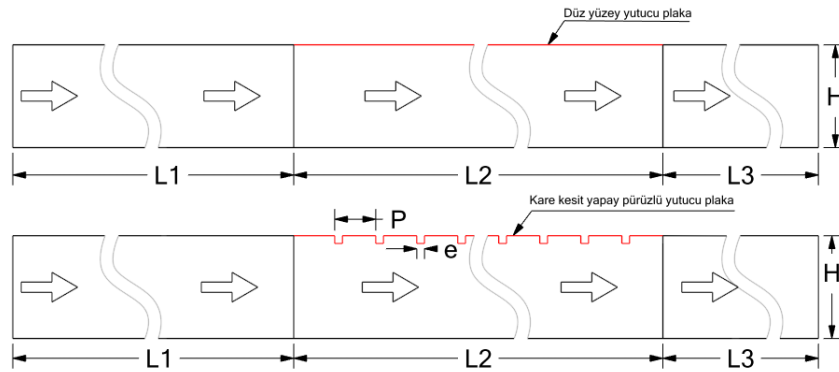
	Hava	Yutucu plaka (Alüminyum)
Yoğunluk (kg.m <sup>-3</sup> )	1,225	2719
Özgül ısı (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	1006,43	871
Isıl iletkenlik (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	0,0242	202.4
Vizkozite (kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	1,7894 10 <sup>-5</sup>	-
Prandtl Sayısı	0,7291	-

Isı transferinin artırılması amacıyla kanal üzerinde 8, 16 ve 24 mm aralıklarla kare kesit pürüzlülük oluşturulmuştur. Bağıl pürüzlülük yüksekliği için  $e/D_h=0,045$  değeri sabit tutularak pürüzlülük oranları 5,33, 10,67 ve 16,00 mm olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan güneş destekli hava ısıtıcının geometrik değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

$$L_1 = 5\sqrt{HW} \quad (2)$$

$$L_3 = 2.5\sqrt{HW} \quad (3)$$

$$D_h = \frac{4A}{P_w} \quad (4)$$

**Şekil 1.** Sayısal analizi yapılan hava ısıtıcının geometrik modeli

Sayısal analizde Nusselt sayısının ve sürtünme faktörünün belirlenmesi, ısı artırma oranının (thermal enhancement rate) değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Kare kesit pürüzlü hava ısıtıcı için ortalama Nusselt sayısı ve ortalama sürtünme faktörü Denklem 5 ve 6 yardımıyla hesaplanır. Isı artırma oranı, eşit bir pompalama gücünde pürüzlü bir yüzeyin ısı transfer katsayısının pürüzsüz bir yüzeye oranı olarak tanımlanır [4]. Nusselt iyileştirme oranı, sürtünme faktörü iyileştirme oranı ve ısı artırma oranı sırasıyla Denklem 7, 8 ve 9 yardımıyla hesaplanır.

**Tablo 2.** Çalışmada kullanılan güneş hava ısıtıcının geometrik değerleri

Parametre	Sembölü	Değeri
-----------	---------	--------



Giriş uzunluğu (mm)	$L_1$	230
Test uzunluğu (mm)	$L_2$	450
Çıkış uzunluğu (mm)	$L_3$	120
Kanal genişliği (mm)	$W$	100
Kanal derinliği (mm)	$H$	20
Hidrolik çap (mm)	$D_h$	33,33
Engel adımı (mm)	$P$	8; 16; 24
Engel yüksekliği (mm)	$e$	1,5
Pürüzlülük oranı	$P/e$	5,33; 10,67; 16
Bağıl pürüzlülük yüksekliği (mm)	$e/D_h$	0,045

$$Nu_r = h \frac{D_h}{k} \quad (5)$$

$$f_r = \frac{(\Delta P / L_2) D_h}{2 \rho v^2} \quad (6)$$

$$NER = \frac{Nu_r}{Nu_s} \quad (7)$$

$$FFER = \frac{f_r}{f_s} \quad (8)$$

$$TER = \frac{(NER)}{(FFER)^{\frac{1}{3}}} \quad (9)$$

Düz yüzey yutucu plakaya sahip güneş destekli hava ısıtıcı için yapılan sayısal analiz sonuçları; yaygın olarak kullanılan ampirik korelasyonlar ile doğrulanmıştır. Karşılaştırmada Nusselt sayısı için Denklem 10'de verilen Dittus-Boelter eşitliği ve sürtünme faktörü için Denklem 11 'de verilen Blasius eşitliği kullanılmıştır [16].

$$Nu = 0,024 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (10)$$

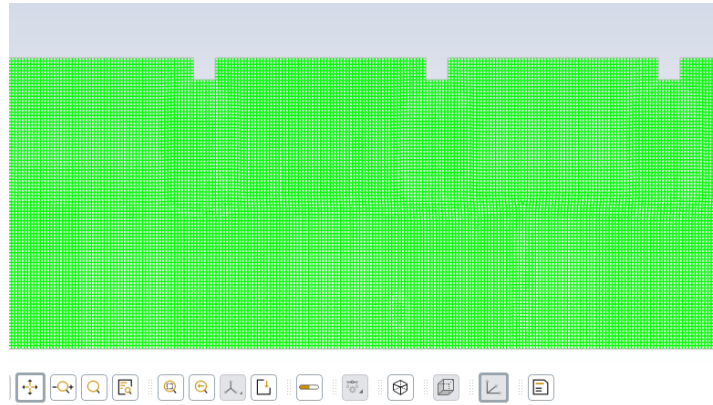
$$f = 0,085 Re^{-0.25} \quad (11)$$

Sayısal analizin en önemli bileşenlerinden birisi olan ağ yapısı (mesh) ANSYS yazılımı ile oluşturulmuştur (Şekil 2). Ağ yapısının optimizasyonu sistem verimliliği açısından önemlidir. Optimum hücre sayısını belirlemek için; artan ağ sayısı ile arka arkaya analizler yapılmıştır. Nusselt sayısındaki değişimin %1 ve sürtünme faktörünün %2 den az olduğu durumdaki hücre sayısı optimum olarak belirlenmiştir. Optimum

değerden fazla ağ sayısının artırılması çözüm doğruluğunu arttırmayıp hesaplama yükünü arttıracaktır. Ağ yapısı analizi P08 ve  $Re=16000$  için yapılmış olup analiz sonucunda belirlenen optimum hücre boyutu  $0,22$  mm'dir. Ayrıca ağ yapısı kalitesini belirleyen çarpıklık (skewness) ve diklik (orthogonal) gibi başlıca parametre değerleri Tablo 3' de verilmiştir.

**Tablo 3.** Ağ yapısı kalitesini belirleyen parametre değerleri

	Çarpıklık (maksimum)	Diklik (minimum)
Sayısal sonuçlar		
Düz yüzey	0,398	0,889
P/e=5,33	0,568	0,698
P/e=10,67	0,419	0,899
P/e=16	0,452	0,847
Referans değerler [17]		
Mükemmel	0,00-0,25	0,95-1,00
Çok İyi	0,25-0,50	0,70-0,95
İyi	0,50-0,80	0,20-0,69
Kabul edilebilir	0,80-0,94	0,15-0,20
Kötü	0,95-0,97	0,001-0,14
Kabul edilemez	0,98-1,00	0-0,001



**Şekil 2.** Kare kesit pürüzlü hava ısıtıcının ağ yapısı

Yapılan bu çalışmada, akışkan (hava) sabit sıcaklıkta ( $300$  K) ve  $1,75$  m.s<sup>-1</sup> ile  $7,01$  m.s<sup>-1</sup> hız değerleri aralığında üniform olarak kanala girişi (velocity-inlet) sağlanmıştır. Çıkışta  $1,013 \cdot 10^5$  Pa ( $P_g=0$ ) sabit basınçla bir akışkan çıkışı (pressure-outlet) sınır koşulu uygulanmıştır. Sabit hidrolik çap ve Denklem 12 yardımıyla hesaplanan türbülans yoğunluğu giriş ve çıkışta tanımlanmıştır. Yutucu plaka duvarına sabit ısı akısı ( $q=1000$  W.m<sup>-2</sup>) uygulanmıştır. Diğer duvarlar adyabatik ( $q=0$ ) olarak tasarlanmıştır. Tüm duvarlarda kaymaz akış (no-slip) şartı dikkate alınmıştır.

$$I = 0,16 Re^{-\frac{1}{8}} \quad (12)$$

Sayısal çalışmada sonlu hacimler metodunu kullanarak türbülanslı, zorlanmış konveksiyon ısı transferine maruz kalan tam gelişmiş akış için Denklem 13, 14 ve 15’de verilen kütle, momentum ve enerji denklemleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımı olan ANSYS Fluent 2019R3 sürümünde çözümlenmiştir. Denklem çözümlerinde SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algoritması kullanılmıştır.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u_i u_j) \quad (14)$$

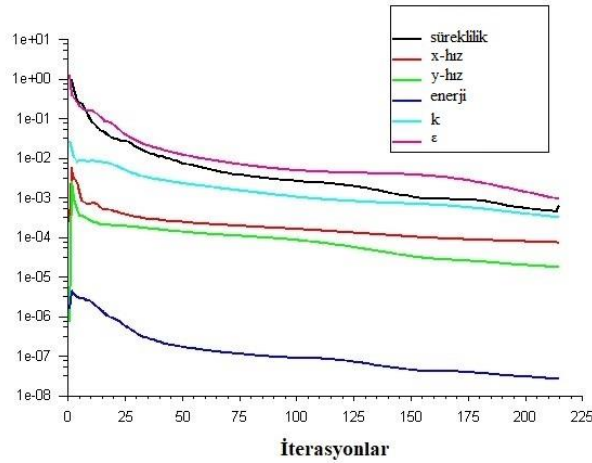
$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( (\tau + \tau_t) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (15)$$

burada  $\tau$  ve  $\tau_t$  sırasıyla moleküler termal yayılım ve türbülanslı termal yayılım olup aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\tau = \frac{\mu}{Pr} \quad (16)$$

$$\tau_t = \frac{\mu_t}{Pr_t}$$

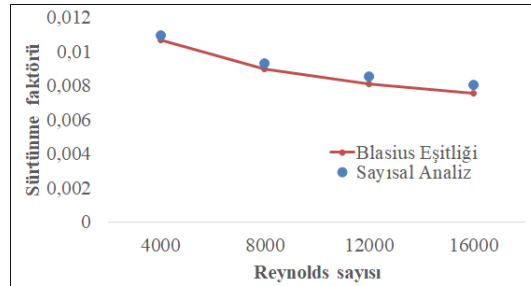
Kanal içerisindeki türbülanslı akışın simülasyonunda yaygın kullanılan Renormalization-group (RNG) k-ε Türbülans modeli kullanılmıştır. Yadav ve Bhagoria yaptıkları çalışmada güneş destekli hava ısıtıcısının sayısal analizi için kullanılacak çeşitli türbülans modellerini kapsamlı bir şekilde inceleyerek, RNG k-ε modelinin güneş hava ısıtıcısı simülasyonu için en uygun model olduğu sonucuna varmışlardır [10]. Ayrıca bu modelin doğru sonuç verdiği birçok çalışmada vurgulanmıştır [5,11,13]. Çözümlemede 2. Derece ayrıklaştırma şeması kullanılmıştır. Tüm bağımlı değişkenlerin yakınsama kriterleri  $10^{-3}$  olarak belirlenmiştir. Enerji denkleminde ise hassasiyet artırılarak  $10^{-6}$  tercih edilmiştir. Ayrıklaştırma kalıntılarının (residuals) gösterildiği örnek çıktı Şekil 3’de verilmiştir.



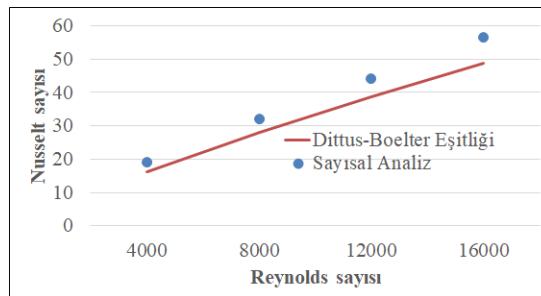
Şekil 3. Ayrıklaştırma kalıntılarının (residuals) gösterildiği örnek çıktı

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

Bu çalışmada, ısı transferini arttırmak amacıyla tasarlanan kare kesitli yapay pürüzlü güneş destekli hava ısıtıcı ile düz hava ısıtıcının CFD yaklaşımı kullanılarak sayısal analizi yapılmıştır. Yapılan analizde Reynolds sayısının, bağıl pürüzlülük adımı (P/e) ve bağıl pürüzlülük yüksekliğinin (e/D) ortalama ısı transferi ve akışkan sürtünmesi üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Analiz sonuçları, ısı transferindeki ve sürtünme faktöründeki artışı tartışmak için benzer çalışma koşullarındaki düz kanallardan elde edilen ve literatürde yaygın kullanılan ampirik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 4 ve Şekil 5 'de düz kanal üzerinde sürtünme faktörü ve Nusselt sayısının, Reynolds sayısına göre değişimi verilmiştir. Sürtünme faktörü değerlerinin Blasius eşitliği ile, Nusselt sayılarının ise, Dittus-Boelter ampirik korelasyonu sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir.

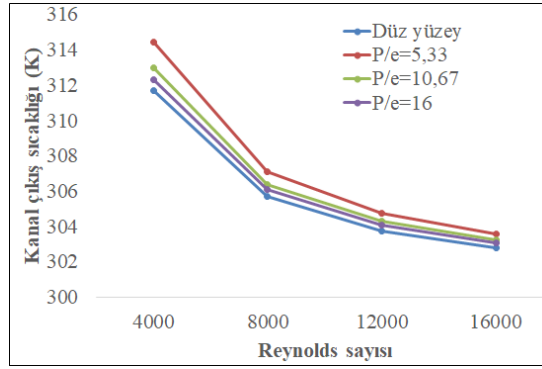


Şekil 4. Sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değişimi



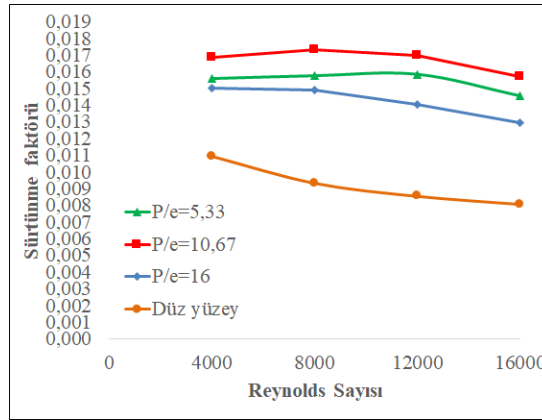
Şekil 5. Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi

Tasarlanan kare kesit yapay pürüzlülük ile birlikte ısıtıcıdaki çıkış sıcaklıkları da artmıştır. Şekil 6 'da düz yüzey ve pürüzlü yüzeyler için, kanal çıkış sıcaklıklarının Reynolds sayısına göre değişimi verilmiştir. En yüksek çıkış sıcaklıkları P/e oranını 5,33 olduğu durumda elde edilmiştir. 314,43 K değerindeki maksimum çıkış sıcaklığına  $Re=4000$  ve  $P/e=5,33$  şartlarında ulaşılmıştır. Reynolds sayısının artması ile tüm koşullarda çıkış sıcaklıkları düşmektedir.



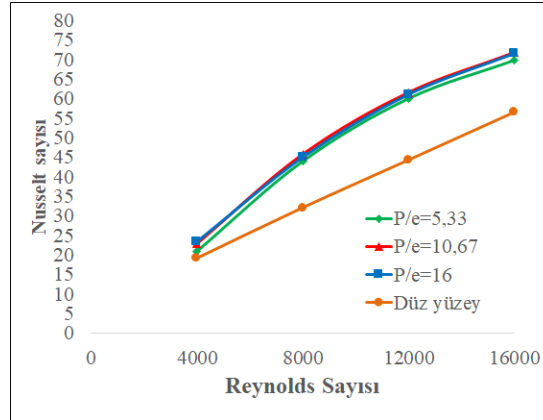
Şekil 6. Kanal çıkış sıcaklıklarının Reynolds sayılarına göre değişimi

Şekil 7 'de düz yüzey ve pürüzlü yüzeyler için, sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değişimi verilmiştir. Sürtünme faktöründeki artışla birlikte kare kesit pürüzlülükten kaynaklanan girdapların dökülmesiyle ek bir enerji kaybı görülür. Visköz alt tabakanın bastırılmasıyla Reynolds sayısı arttıkça sürtünme faktörü azalır. İstisnai durumlar olmakla birlikte P/e oranının artması sürtünme faktörünü azaltmıştır. Bu durum Yadav vd. [3] yaptığı çalışmada vurgulanmıştır.



Şekil 7. Sürtünme faktörünün Reynolds sayılarına göre değişimi

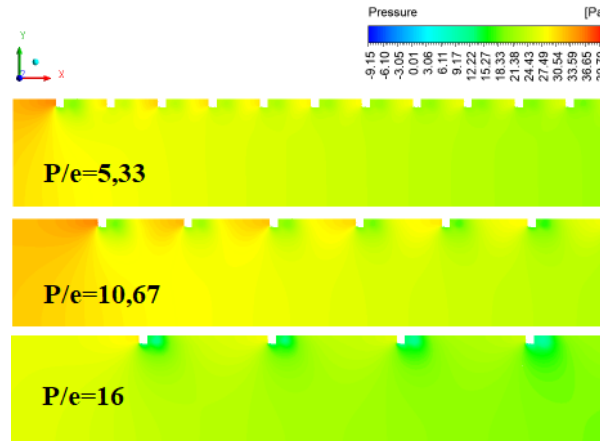
Yutucu plaka üzerindeki pürüzlülüklerin bulunması ısı transferini önemli ölçüde iyileştirir. İletimle ısı transferi azalır ve yüzey alanının artmasıyla konveksiyonla ısı transferi artar. Şekil 8 'de düz yüzey ve pürüzlü yüzeyler için, Nusselt sayısının, Reynolds sayısına göre değişimi verilmiştir. Reynolds sayısının artması ile tüm koşullarda Nusselt sayısı artmıştır. Kare kesit pürüzlü yüzeyde, düz yüzeye göre önemli ölçüde Nusselt sayısında artış olmuştur. Ayrıca P/e oranının artması az da olsa Nusselt sayısının artmasına neden olmuştur.



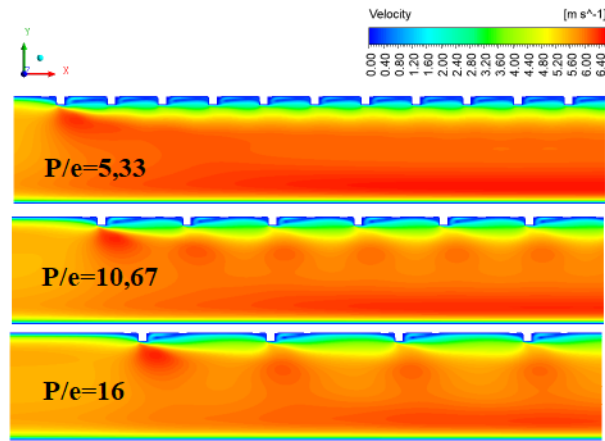
Şekil 8. Nusselt sayısının Reynolds sayılarına göre değişimi

Hava ısıtıcı akış alanında oluşturulan pürüzlülükler ısı transferinin arttırmakla birlikte basınç düşüşlerine de neden olurlar. Sürtünme kaybı olarak ifade edilen bu düşüş düz yüzey kanala göre daha fazladır. Bu kaybın normalden fazla olması ek pompalama maliyetlerine neden olmaktadır. Şekil 9’ da  $Re=12000$  değeri için basınç dağılımları verilmiştir.

$Re=12000$  değeri için 3 farklı kare kesit pürüzlü yüzey tasarımı için, hız dağılımı Şekil 10’de verilmiştir. Yapay pürüzlüklerden dolayı anlık hız dağılımları oldukça düzensizdir. Kare kesit pürüzlülüğün alt kısmında bir ayırma alanı oluşturan hava akışında ani bir genişleme görülmektedir. Pürüzlülüğün arkasında büyük bir ayrılma olduktan sonra, bir sonraki adımda tekrar bağlanma meydana gelmektedir. Ayrıca engel adımına bağlı olarak hava, akış yönünde hızlanmaktadır. Hava çıkış hızının giriş hızından yüksek olduğu ilgili şekilde görülmektedir. Düşük Reynolds sayısında, tüm yüzey türleri için Nusselt sayısı hemen hemen aynı değere yaklaşır. Bunun nedeni ısı transferine karşı direnç oluşturan laminer alt tabakanın daha az bozulmasıdır [5].

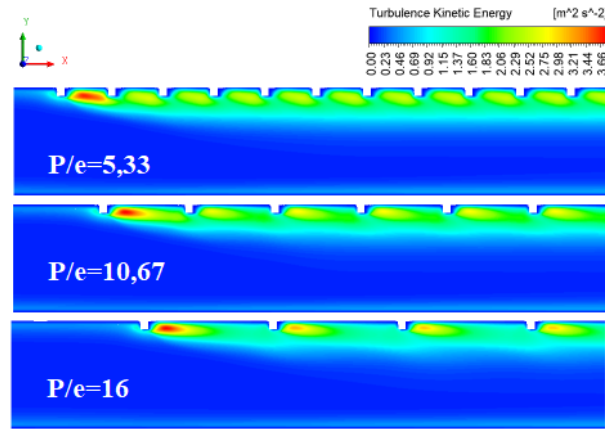


Şekil 9.  $Re=12000$  değeri için basınç dağılımı



**Şekil 10.**  $Re=12000$  değeri için hız dağılımı

Reynolds sayısındaki artış, türbülans kinetik enerjisini ve dağılıma oranını arttırmıştır. Reynolds sayısı 12000 değerinde sabit tutularak 3 farklı kare kesit pürüzlü yüzey tasarımı için, türbülans kinetik enerji dağılımı Şekil 11’de verilmiştir. Özellikle pürüzlülüğün başladığı ilk alanda en yüksek değerine ulaştığı görülmektedir. Türbülans kinetik enerji değeri akış yönünde, kare kesit pürüzlülükler arasındaki bölgede kademeli olarak azalmaktadır.



**Şekil 11.**  $Re=12000$  değeri için türbülans kinetik enerji dağılımı

Termal-hidrolik performans, sürtünme kaybına rağmen ısı transferindeki artışın değerini ifade eder, maksimum sürtünme faktörü iyileştirme oranı  $FFER=1,98$  değeri  $Re=12000$  ve  $P/e=10,67$  şartlarında gözlemlenmiştir. Nusselt sayısı iyileştirme oranı ise  $Re=8000$  ve  $P/e=10,67$  şartlarında  $NER=1,43$  ile maksimum değerine ulaşmıştır. Tüm çalışma koşulları için  $NER$ ,  $FFER$  ve Denklem 9 yardımıyla hesaplanan ısı arttırma oranları Tablo 4’te verilmiştir. Maksimum ısı arttırma oranına  $Re=8000$  ve  $P/e=16$  şartlarında  $TER=1,20$  değerine ulaşılmıştır. Bu değer 1’den büyük olması ilgi hava ısıtıcının pratik kullanımı açısından uygun olduğunu ifade etmektedir [16]. Sayısal çalışmadaki tüm şartlar için bu kural sağlanmıştır. Literatürde farklı pürüzlülük parametrelerine göre bu değer 0,4 ile 2,4 arasında olduğu belirtilmiştir [8]. Sürtünme kayıplarının azaltılması bu değer artmasına neden olmaktadır.

**Tablo 4.** *NER, FFER ve TER değerlerini karşılaştırılması*

Re	P/e=5,33			P/e=10,67			P/e=16		
	NER	FFER	TER	NER	FFER	TER	NER	FFER	TER
4000	1,10	1,43	0,98	1,19	1,54	1,03	1,22	1,37	1,10
8000	1,37	1,69	1,15	<b>1,43</b>	1,86	1,16	1,40	1,60	<b>1,20</b>
12000	1,36	1,85	1,10	1,39	<b>1,98</b>	1,11	1,38	1,64	1,17
16000	1,24	1,81	1,01	1,27	1,94	1,02	1,27	1,61	1,08

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada güneş destekli hava ısıtıcı için 3 farklı oranda kare kesit pürüzlülük oluşturularak tasarımı yapılmıştır. 3 farklı akışkan hızında yapılan analizler sonucunda; pürüzlülük oranının azalması basınç kayıplarını arttırmıştır. P/e oranı ve Reynolds sayısına göre belirlenen hava hızının önemi bir kez daha anlaşılmıştır. 1,20 olarak hesaplanan maksimum ısı arttırma oranına 8000 Reynolds sayısında ve P/e=16 pürüzlülük oranında ulaşılmıştır. Tasarlanan yapay pürüzlülük ile birlikte ısı transferinde artış sağlanmış ve hava çıkış sıcaklığı 314 K civarına kadar ulaşmıştır. Isı transferinin arttırılması için uygulanan yapay pürüzlülükler sürtünme kayıplarını neden olmaktadır. Bunun sonucunda da ek pompalama maliyetleri ortaya çıkmaktadır. Isı transferini arttırmak için yapılan bu tür uygulamalarda pompa maliyetleri de dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

#### KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

Re	Reynolds sayısı	q	Isı akısı
P <sub>w</sub>	Kanal çevresi	h	Konveksiyon ısı transfer katsayısı
Nu	Nusselt sayısı	k	Isıl iletkenlik
Pr	Prandtl sayısı	ΔP	Basınç farkı
D <sub>h</sub>	Hidrolik çap	v	Akışkan hızı
f	Sürtünme faktörü	NER	Nusselt sayısı iyileştirme oranı
μ	Vizkozite	FFER	Sürtünme faktörü iyileştirme oranı
P <sub>g</sub>	Gösterge basıncı	TER	Isı arttırma oranı
I	Türbülans yoğunluğu		

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S. P. Shetty, N. Madhwesh, and K. Vasudeva Karanth, "Numerical analysis of a solar air heater with circular perforated absorber plate," *Solar Energy*, vol. 215, pp. 416–433, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.solener.2020.12.053.



- [2] R. Singh Gill, V. Singh Hans, and R. Pal Singh, "Optimization of artificial roughness parameters in a solar air heater duct roughened with hybrid ribs," *Applied Thermal Engineering*, p. 116871, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116871.
- [3] A. S. Yadav, V. Shrivastava, V. K. Chouksey, A. Sharma, S. K. Sharma, and M. K. Dwivedi, "Enhanced solar thermal air heater: A numerical investigation," *Materials Today: Proceedings*, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.385.
- [4] A. S. Yadav and J. L. Bhagoria, "A Numerical Investigation of Turbulent Flows through an Artificially Roughened Solar Air Heater," *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 65, no. 7, pp. 679–698, Jul. 2014, doi: 10.1080/10407782.2013.846187.
- [5] A. S. Yadav and J. L. Bhagoria, "A numerical investigation of square sectioned transverse rib roughened solar air heater," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 79, pp. 111–131, May 2014, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.01.008.
- [6] Y. Mahanand and J. R. Senapati, "Thermo-hydraulic performance analysis of a solar air heater (SAH) with quarter-circular ribs on the absorber plate: A comparative study," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 161, p. 106747, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106747.
- [7] S. Sharma, R. Singh, and B. Bhushan, "CFD based thermal efficiency of square shape protruded roughened absorber plate for solar air heater," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, pp. 1–22, Apr. 2021, doi: 10.1080/15567036.2021.1908460.
- [8] V. S. Hans, R. P. Saini, and J. S. Saini, "Performance of artificially roughened solar air heaters-A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 8, pp. 1854–1869, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.01.030.
- [9] A. S. Yadav and J. L. Bhagoria, "A CFD (computational fluid dynamics) based heat transfer and fluid flow analysis of a solar air heater provided with circular transverse wire rib roughness on the absorber plate," *Energy*, vol. 55, pp. 1127–1142, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.03.066.
- [10] A. S. Yadav and J. L. Bhagoria, "Heat transfer and fluid flow analysis of solar air heater: A review of CFD approach," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 60–79, Jul. 2013, doi: 10.1016/J.RSER.2013.02.035.
- [11] I. Singh and S. Singh, "CFD analysis of solar air heater duct having square wave profiled transverse ribs as roughness elements," *Solar Energy*, vol. 162, pp. 442–453, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.01.019.
- [12] A. Singh Yadav and J. L. Bhagoria, "Modeling and Simulation of Turbulent Flows through a Solar Air Heater Having Square-Sectioned Transverse Rib Roughness on the Absorber Plate," *The Scientific World Journal*, vol. 2013, p. 12, 2013, doi: 10.1155/2013/827131.
- [13] B. Zina, A. Filali, N. Benamara, S. Laouedj, and H. Ahmed, "Numerical simulation of heat transfer improvement of a new designed artificially roughened solar air heater using triangular ribs with semi-circular nooks," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, pp. 1–17, Oct. 2020, doi: 10.1080/15567036.2020.1825564.
- [14] D. Gupta, S. C. Solanki, and J. S. Saini, "Thermohydraeic performance of solar air heaters with roughened absorber plates," *Solar Energy*, vol. 61, no. 1, pp. 33–42, Jul. 1997, doi: 10.1016/S0038-092X(97)00005-4.
- [15] A. Standard, "ASHRAE 93 (2003) Method of testing to determine the thermal performance of solar collectors. American Society of Heating," *Refrigeration and Air Conditioning Engineers*, Atlanta, GA, vol. 30329.

- [16] P. J. Bezbaruah et al., “Thermo-hydraulic performance augmentation of solar air duct using modified forms of conical vortex generators,” *Heat and Mass Transfer*, vol. 55, pp. 1387–1403, 2019, doi: 10.1007/s00231-018-2521-1.
- [17] C. Korkmaz and İ. Kacar, “Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonları İçin Optimum Ağ Elemanı Yapısının Belirlenmesi,” in *Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Üzerine Güncel Araştırmalar*, Akademisyen Kitabevi A.Ş, 2021, pp. 109–125.



## Investigation of Different Superplasticizers Effect on Workability and Strength Parameters in Ultra High Performance Concretes

Muhammet SEIS<sup>1\*</sup> Betül İSBİLİR KULA<sup>1</sup> Volkan OZDAL<sup>2</sup> Muhammed MARASLI<sup>2</sup> Serkan SUBASI<sup>1</sup> Heydar DEGHANPOUR<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Düzce University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Düzce 81620, Turkey

<sup>2</sup>Ege University Faculty of Science, Department of Physics, 35100, Bornova/İZMİR

### Article Info

Research article  
Received: 11.03.2022  
Revision: 09.05.2022  
Accepted: 21.06.2022

### Keywords

UHPC  
Superplasticizer  
Compressive Strength  
Workability  
UPV

### Abstract

The use of ultra-high performance concretes (UHPC) in the modern construction industry is increasingly widespread. UHPCs are a type of concrete that provides advantages in solving many engineering problems. UHPCs have superior properties compared to conventional concretes in terms of workability, self-settling, as well as high strength and durability. However, although UHPCs have many advantages, achieving the desired workability is one of the biggest challenges of the production procedure, since they contain high amounts of powder materials. Therefore, the aim of this study is to determine the most suitable superplasticizer (SP) additive in terms of workability and strength by using different SP additives in UHPC mixtures. In this study, workability and strength parameters were tested on UHPC mixtures using 8 different SP additives. The SPs used were named A, B, C, D, E, F, G, H. First of all, the spreading diameters of the obtained mixtures were measured. For each mixture, compressive strength, unit weight, ultrasound velocity, Schmidt hammer rebound and Leeb hardness measurements were performed on 70x140 mm sized cylindrical samples taken on days 2, 7 and 28. Since SPs have a working principle at the interfaces of particles in the internal structure of concrete, different behaviors were observed on workability, even if a little. All the results obtained have been compared with the literature and it has been proven that they meet the UHPC specifications. As a result of the study, the best compressive strength value (127.83 MPa) was achieved with the G superplasticizer, and the flow diameter value was determined as 230 mm.

## 1. INTRODUCTION

High strength and modulus of elasticity, continuity and long life, low creep, low permeability and long-term cost reduction are most important of the features of ultra-high performance concretes (UHPCs). The most important usage areas of UHPCs can be modern building facades, shell structural elements and bridge elements. In the last two decades, with significant developments in concrete technology, significant efforts have been made for UHPCs that can be used in modern bridge engineering [1, 2]. According to EN 206: 2013 standard, the compressive strength of the UHPC should be above 100 MPa [3]. Also, ASTM C1856 [4] has specified the compressive strength of UHPC at least 120 MPa and the amount of slump flow between 20-25 mm. In order to produce such a concrete, fine aggregate (< 5 mm), micro silica fume, high performance cements and other powder additives must be included in the mixture [3, 5]. To significantly reduce the water need, select SP additives must be used. Also, the flexural, tensile and shear strength of the UHPC to be produced can be increased by adding an amount of fibers that do not adversely affect the compressive strength. Considering the number of articles published on UHPCs related since 2015, a significant increase is observed. This shows how much application potential UHPCs have in the construction industry [3]. In addition, the durability of UHPCs against chemical and physical factors has been examined by many researchers and it has been confirmed that they have superior performance compared to conventional concretes [6–9].

Many factors affect the compressive strength of UHPCs, such as the type of material used, its quantity, property and the water/cement ratio [10]. Pourbaba et al. [11] examined age effect on UHPCs containing different proportions of steel fiber. The results revealed that the compressive strength increases with the increase of steel fiber. In addition, the 18-day compressive strength of all mixtures reached 90% of the finally compressive strength. 10% silica fume may not affect the processability of UHPCs much. In addition, the dosage and type of SP is also important. The SP dosage depends on the properties of the cement (C3A and alkali sulphate content). In low water / cement based materials, slump loss is observed over time and increases with higher rates. The use of silica fume up to 20% increases the compressive strength but does not exceed 15% [12]. The flexural strength of UHPCs has been reported around 30 MPa on average [13]. This value can be managed with different fiber types and ratios.

Due to its many advantages, the non-destructive method has attracted great attention from engineers for field applications. The continuous measurability of microstructural change in concrete and the strong relationship between ultrasonic pulse velocity (UPV) and cement hydration is a known theory for the UPV test method [14]. One of the other non-destructive test methods, the Schmidt rebound hammer test was first developed by a Swiss engineer in the late 1940s [15]. Estimated compressive strength is obtained based on the values obtained as a result of the Schmidt hammer test result. Also, the Leeb hardness test, provides information about the hardness and estimated strength of construction materials such as stone and concrete [16].

Micro-sized fillers are used to fill the gaps between aggregate particles and cement in UHPCs with very low water / cement ratios and high strength. As such, silica fume is widely used, having an average particle size of about 1/10 of the cement. Therefore, these powder materials, which are necessary to increase the strength, cause low workability of concrete. Consequently, in order to avoid this problem in UHPC production, a select SP additive material should definitely be used in the mixture. SPs are generally based on polycarboxylate chemistry and work mainly by creating a steric barrier between particles. However, polycarboxylates based on methacrylic acid ester (MPEG) have been confirmed to be effective dispersants for UHPC [17]. The developments in the field of chemistry and the advancement of polymer technology have led to the discovery of highly effective plasticizers since the mid-1980s. These plasticizers, which have high water reducing ability, also increase the workability of fresh concrete. This effect, provided by the new generation of plasticizers, has led scientists to investigate to eliminate the compression process required during the placement of fresh concrete. The new generation superplasticizers, which have long polymer chains, accumulate on the surface of fine particles (as adsorbed) and provide dispersal of cement particles by means of electrical impulse and steric effect. While traditional superplasticizers are based on sulfone naphthalene formaldehyde or sulfonated melamine formaldehyde, new generation superplasticizers are copolymers with a carboxylic group in the main chain and a polyethylene glycol group in which the polyethylene glycol group is attached as a side chain [18].

Chryso Premia based SPs have been used in many studies and their positive effects on the workability and strength of concrete have been reported. The amount of Chryso Premia SP varies according to factors such as water/cement ratio and powder material content. For example, Babatunde et al. [19] used 1-3.4% in the UHPC mixture, Boshoff et al. [20] 0.4% in the cement composite mixture, and Kruger et al. [21] 0.7% by weight of binder in the 3D concrete mixture. Stearic acid is an additive that reduces the surface contact of fine particles and improves the stability of magneto-rheological liquids thanks to its long carbon chains. Chryso Optima 100 is often used in the cement industry as a surfactant polymer additive material that reduces the proportion of particles to volume [22]. Voit et al. [23] have used 1-2.5 wt% a BASF ACE type SP, while Rios et al. [24] have used 5.5%. While Kalkan et al. [25] examined the effect of shrinkage-reducing admixtures on the mechanical properties of self-compacting concrete, they used 0.7-0.9% BASF Master Glenium 51 as SP. SPs such as Sika [26, 27] and Iksa Polycar [28] preferred by other researchers are also available as water reducing additives.

Due to the use of too many fine materials and the low water/binder ratio in UHPC mix designs, problems are experienced in the consistency of fresh concrete and during pouring, and accordingly, factors with high permeability and adversely affecting the strength and durability parameters emerge. By using new generation superplasticizers, UHPC productions with improved workability are provided in the fresh concrete phase. Since the SPs used in UHPC mixture designs have a great effect on the consistency of fresh concrete, a study was conducted with the SP supplied from different suppliers and the best SP recommended

to be used in UHPC mixtures was determined. In this study, 8 different SP: A, B, C, D, E, F, G and H additives it is aimed to examine the effects on UHPC properties. For this, UHPC with 8 different SP added mixtures was produced and workability, compressive strength, UPV, Schmidt and Leeb hardness tests were carried out on the obtained 70 x 140 mm cylinder specimens. In terms of competition in the product market for chemical additives, and accordingly, in order to avoid conflicts and ethical values, the brand and company names of the SPs are not shared, and therefore their names are indicated with letters.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Materials

CEM I / 52.5 R Portland cement has been used as a binder in the mixtures. White Portland Cement is a product, that has been used for more than 100 years around the world, preferred for obtaining aesthetical appearances and high strength levels. Particle size range of the cement used is given in Figure 1. Silica sand with a grain size range of 90-850 µm and quartz powder with a grain size range of 2-850 µm were used as filling material. The SiO<sub>2</sub> content of the quartz sand used is 96% (minimum), its specific gravity and specific surface area are 2.2 g/cm<sup>3</sup> and 15m<sup>2</sup>/g (minimum), respectively. Microwhite silica fume (SF) was added to the mixtures as pozzolanic material. Microwhite silica fume is a dry silica fume powder. This silica fume is often used to improve the properties and performance of high performance concrete and specialty mortar formulations. This SF, which is also reactive, is often used to improve the properties and performance of high performance concrete and special mortar formulations. Stainless micro steel fiber (MSF) with a length of 12.5 mm and a diameter of 0.175 mm was preferred as the fiber. The tensile strength and modulus of elasticity of the fiber used are 2800 MPa and 210 GPa, respectively. For the suitable selection of SP, which is the main purpose of this study, 8 different types of plasticizers were used in the mixtures. The properties of plasticizers named from A to H are given in Table 1. Company information of SPs used due to ethical rules is not provided.

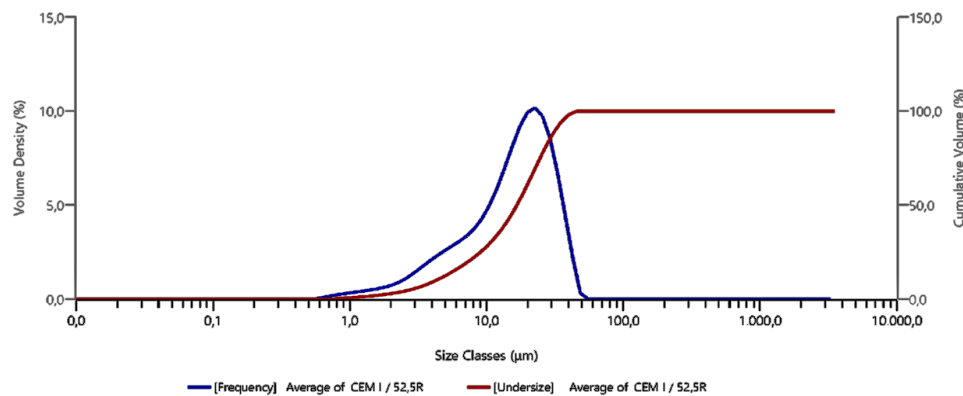


Figure 1. The particle size range and volume density of the cement used.

Table 1. Technical characteristics of 8 different superplasticizers.

SP type	Based on	Color	Density (g/cm <sup>3</sup> )	PH	Chloride Content	Alkali Content
A	polycarboxylate	Brown	1.08	4	≤%1	-
B	Polycarboxylate	Dark yellow	1.075	4	≤%1	-
C	Polycarboxylate ether	Yellow	1.072-1.112	5-7	≤%1	≤%3.0
D	Polycarboxylate ether	Brown	1.082-1.142	6-7	≤%1	≤%3.0
E	Polycarboxylate	Light brown	1.09	3-7	≤%1	-
F	Polycarboxylate	Light brown	1.06-1.1	3-7	≤%1	-
G	Polycarboxylate	Light brown	1.07	5	-	≤%10
H	Polycarboxylate	Light yellow	1.08	4.4	-	-

## 2.2. Mix Design

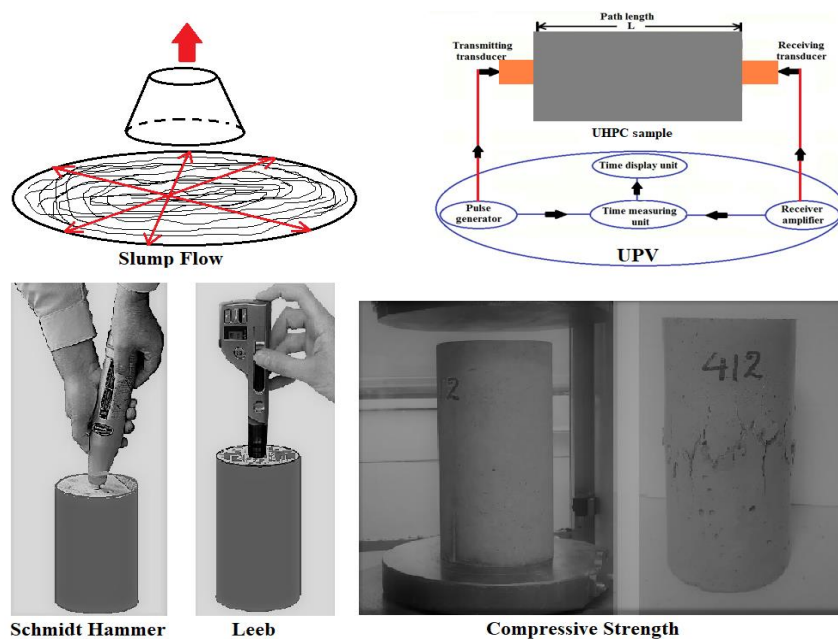
In the production of UHPCs in the experiments, firstly, aggregate ratios were determined by using the modified Andreassan model, which is one of the particle packaging model types to ensure maximum occupancy. Amounts of 90-850  $\mu\text{m}$  silica sand and 2-850  $\mu\text{m}$  quartz powder were determined in granulometry in accordance with the curve shown by the model. The amount of cement in the mixture was determined as 800  $\text{kg}/\text{m}^3$  by examining the literature studies conducted for UHPC production. According to the cement amount, SF ratio was determined as 25 wt%. The amount of SD used in UHPC production has been calculated according to the literature and company recommendations. All dry mixes used in concrete were mixed for 2 minutes. The SP ratio in all mixtures was chosen as 4% of the total binder. By adding 70% of the water and SP to the mixture, the mixing process continued for about 5 minutes. Then, the remaining water is added to the mixture and the mortar was mixed until it reaches the consistency. The water/binder ratio was determined as 0.20 in all mixtures. The average water temperature used in the mixtures was 7.5 °C. Then, 4% of the total weight MSF was added and the mixture was continued for the last 2 minutes and then poured into cardboard cylinder molds. The amounts of materials used in the UHPC mix are given in Table 2.

**Table 2.** Mixture content ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) for 1  $\text{m}^3$  volume.

Cement	Silica sand	Quartz	Silica fume	Superplasticizer	Water	Micro Steel fiber
800	800	200	200	40	200	93

## 2.3. Test Methods

After the mixtures were prepared, Slump test has been performed according to ASTM-C 1611 / C 1611M - 05 standard [29] to control their workability. 2-7-28-day 70 X 140 mm cylindrical samples produced for the determination of compressive strength were tested according to TS EN 12390-3 standard [30]. Ultrasonic pulse velocity (UPV), Schmidt and Leeb hardness tests were performed as non-destructive methods before subjecting them to compressive strength on the same specimens. Both sides of the samples were tested with a Schmidt hammer according to the ASTM C805 standard [31] and average values were obtained after 12 tests. UPV tests were performed according to ASTM C597 [32]. The ASTM A956 standard [33] was used to determine the Leeb hardness of the produced UHPC samples. In addition, unit weights were calculated by measuring the dry weight and dimensions of all 28-day samples. Schematic images representing test methods are shown in Figure 2.



**Figure 2.** Schematic images of test methods.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. SP Effects on the Fresh State Test Results

Although different SP additives were used in the same ratio (4 wt%) in all 8 mixtures, the Slump flow diameters varied between 222-260 mm. The comparison of slump flow diameters is given in Figure 3. Considering the results, it is observed that A-D, F-G and B-C-E values are equal to each other. The mixtures with the lowest workability were B-C-E added mixtures. Slump flow diameters of A and D added mixtures were higher than these mixtures by 8%. The slump flow value of F and G added mixtures 3.6%, and the value of the H added mixture 17% were higher than the B-C-E added mixtures. It is thought that the changes between the flow diameters are due to the PH value and chloride content. Also, considering all the results, G presented the maximum compressive strength of the mixture containing SP. This may be due to the fact that the alkali content is higher than the others.

The high specific surface area of the materials used in concretes such as UHPC containing high dosages of powder materials causes the water used to be inadequate. This leads to workability problems. Therefore, in order to avoid this problem, generally 12-25% water-reducing super plasticizer additives are used. SP additives wrap around the cement particles, charge the particles with a negative electric charge, allowing the cement particles to repel each other and prevent agglomeration. The resulting Slump flow diameters have been confirmed to be a suitable workability level for UHPCs. This proves the purity of the aggregates used. In the [34] study, it was stated that the low workability was due to impurities such as clay in aggregates. Optimizing the workability level is important as it affects the strength and rheological properties. Excessive workability prevents sufficient C-S-H gel production and leads to a decrease in compressive strength [35]. Therefore, it is beneficial to examine not only the workability behavior but also the mechanical properties for the selection of a SP as a water reducing admixture in concrete production. Previous research implies that the slump flow loss involves chemical and physical processes. This is mainly attributed to the w/binder ratio, type and dosage of SP, as well as SO<sub>3</sub> content, alkali content, C-S-H formation, load characteristic, C<sub>3</sub>S/C<sub>2</sub>S ratio [34].

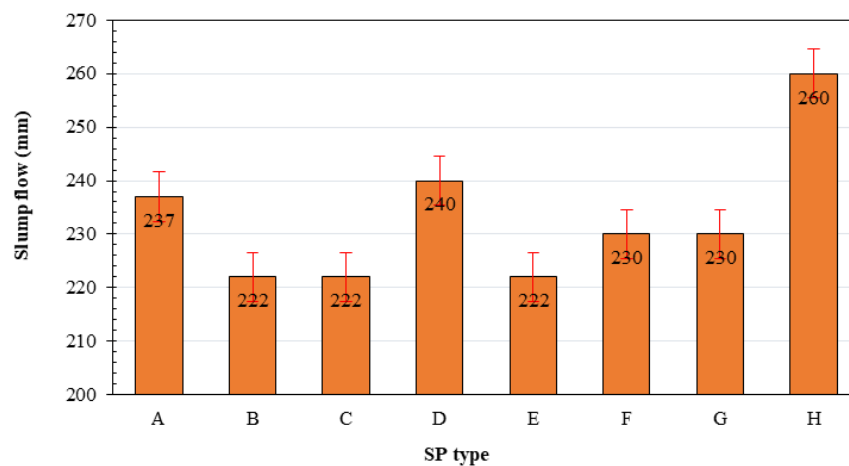


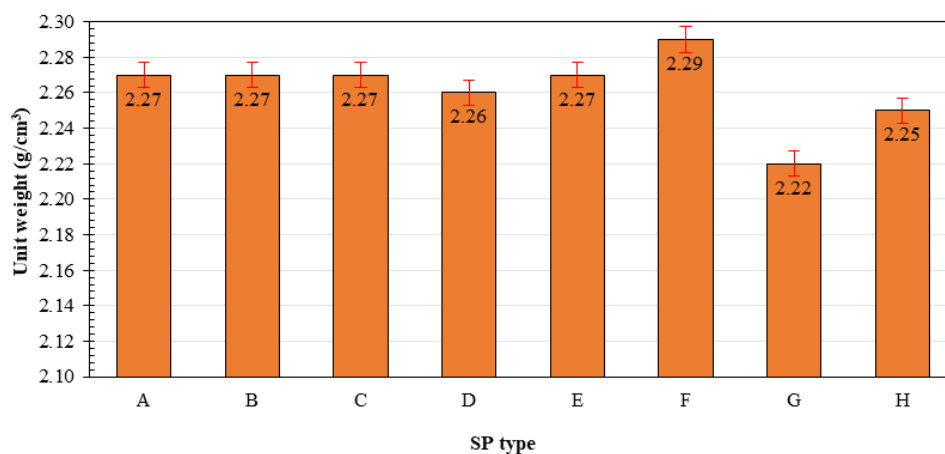
Figure 3. Comparison of slump flow diameters.

#### 3.2. SP Effects on the Hardened Properties

The unit weights of the samples obtained from 8 different mixtures are shown in Figure 4 and the effects of different SP additives are compared. No serious differences have been observed between results. The unit weights of UHPCs produced with A, B, C and E additives have been obtained equal. However, unit weight of D added composite was slightly lower with a difference of 0.4% compared to this group. Compared to the unit weights of these mixtures, the maximum unit weight value was obtained for the F added mixture with a difference of 0.9%. Also, the minimum unit weight value was obtained for the G added mixture with a difference of 2.2%. The unit weight of H added mixture was 0.9% less than the unit weight of these four mixtures. Since the binder, filler and water / cement ratios used in UHPC mixtures are the same, it is normal for unit weight values to be similar to each other. However, the difference observed

in samples such as the G added mixture may be due to air bubbles or test errors during mixing. When the slump flow and unit weight results were compared, no significant relationship was found between them.

The unit weight values of 2.22-2.29 g / cm<sup>3</sup> obtained in this study have been confirmed by the literature, and the reason why UHPCs are denser than conventional concretes is that large aggregates are not used, prefer fine aggregates using special packing unit weight, and the addition of fibers. The reason why UHPCs are heavy in mass is the use of heavy aggregates such as quartz and silica sand. Meeting the requirement for optimum classification of quartz sand for uniformity of the UHPC matrix and optimum packing unit weight is one of the challenges in UHPC manufacturing [36].



**Figure 4.** Unit weights of the samples obtained from 8 different mixtures.

Considering the compressive strength results (Figure 5), it is understood that SP types do not have a significant effect. In fact, the 28-day compressive strengths of C-D-F added mixtures are almost equal, and the strengths of the A-E added mixtures are also equal. However, according to the early strength results, the minimum compressive strength was obtained as 75.39 MPa for the H added mixture and the maximum compressive strength as 85.58 MPa for the E added mixture. Also, according to the 28-day compressive strength results, the minimum compressive strength was obtained as 115.26 MPa for the H added mixture and the maximum compressive strength as 127.83 MPa for the G added mixture. Maximum strength difference due to SP effects was approximately 10% for 28-day while maximum strength difference was approximately 13% for 2-day. This situation, in which the SP effect is more pronounced at an early age, has been confirmed by the literature [34]. When the compressive strengths were examined according to the age of the samples, the average strength of the 7-day and 28-day samples increased by 26% and 46%, respectively. When the strength results are compared with the unit weight results, it is observed that there is a parallel relationship between them.

Compressive strengths of 120 and above obtained for 28-day UHPCs prove that the trapped air content in the concrete is low. The chemical additives used may swell in the mixture and cause the formation of air gaps, which directly leads to a decrease in the compressive strength [37, 38]. The 0.2 water / binder ratio in this study was obtained as a result of many preliminary experiments. If the water / binder ratio falls below this level, more SP will be needed. This will cause the particles to separate from each other, the formation of air gaps and thus a decrease in the compressive strength [37]. The change in the strength of UHPCs is not limited to chemical additives, there are many other factors such as the curing temperature. Steam curing of UHPC at high temperatures is also a factor affecting strength. Microstructure develops due to pozzolanic reactions between C-H resulting from hydration of cement and complementary materials such as silica fume and nanosilica. Exposure to high temperature affects the reaction of the pores in the composite tissue and causes an increase in compressive strength compared to samples cured under ambient conditions [39]. Therefore, if the samples in this study were cured with steam at high temperatures, their compressive strength would probably have increased much more. Well-chosen steel fiber dosage can increase ductility and reduce autogenous shrinkage of UHPC. However, the increase in the amount of steel fiber may reduce the workability of the concrete and lead to a decrease in its strength.



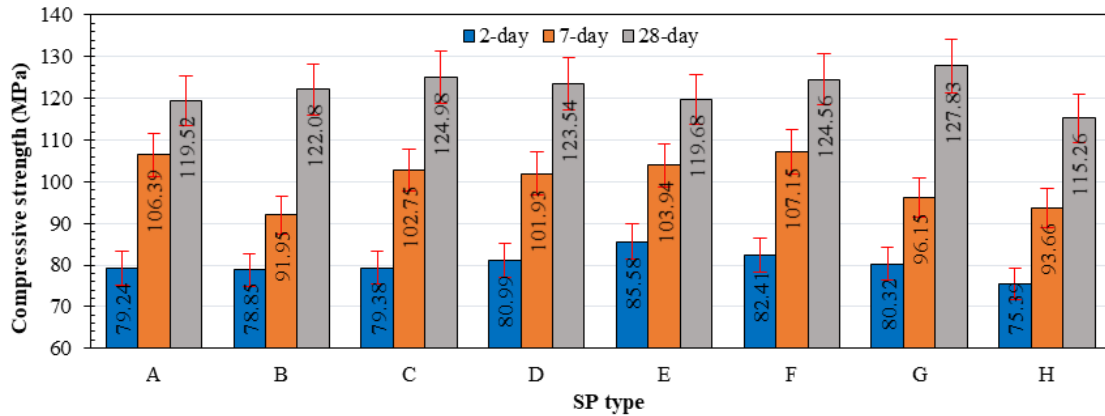


Figure 5. 2, 7 and 28-days compressive strength results.

Conventional test methods that examine the properties of concrete cannot provide information about its microstructural and physicochemical properties. The UPV test method has been suggested by many researchers to examine the microstructural changes and strength of concrete. According to the results of many studies, it has been confirmed that there is a strong relationship between UPV values and cement hydration [40].

The 2, 7, and 28 days UPV values are shown by comparison in Figure 6. When the UPV results were examined, a significant difference was observed between the 28-day UPV values, while the effects of the SP types at early age were insignificant. The 2, 7 and 28 days UPV values were measured as 4.16-4.25, 4.27-4.43, and 4.39-4.55 km/s, respectively. UPV values of UHPCs produced with all additives increased according to the sample age. This situation is also valid in conventional concretes and while it is more evident in the first days, the rise rate decreases after 28 days [41]. Although different additives do not have a significant effect on the UPV values, the small amount of change observed is due to the hydration rate and the porosity ratio in the microstructure. The increase in the number and ratio of pores causes a decrease in the ultrasonic pulse velocity. Also, the increase and concentration of hydration products in older ages create a more intense structure and exhibit higher UPV results. This situation is more effective in the first ages due to the high hydration rate. When UHPC values containing C additive are examined, there is a 5% difference between 2 and 7, while a difference between 7 and 28 is 0.7%. For example, there is a 5% difference between 2 and 7 and a 3% difference between 7 and 28 in D added UHPC values. This difference between C and D is related to the working principle of SPs. It can be concluded that the hydration rate in D is faster in older ages compared to C. A similar situation can be observed for other contributions. The UPV levels obtained were compared with the literature, and confirmed by the results of UHPCs studied in many studies [14, 42, 43]. Fodil et al [43] measured 4-5 km/s UPV values for concretes with compressive strength above 80 MPa.

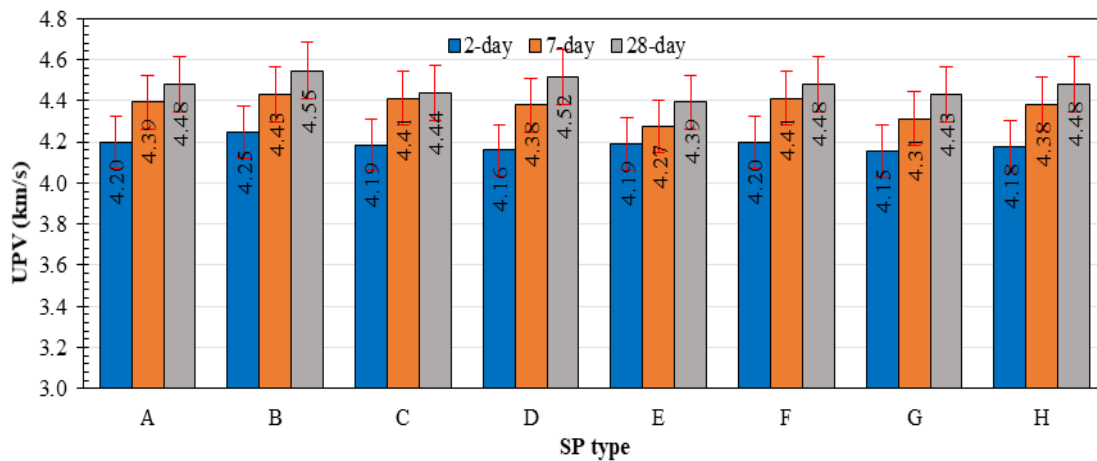
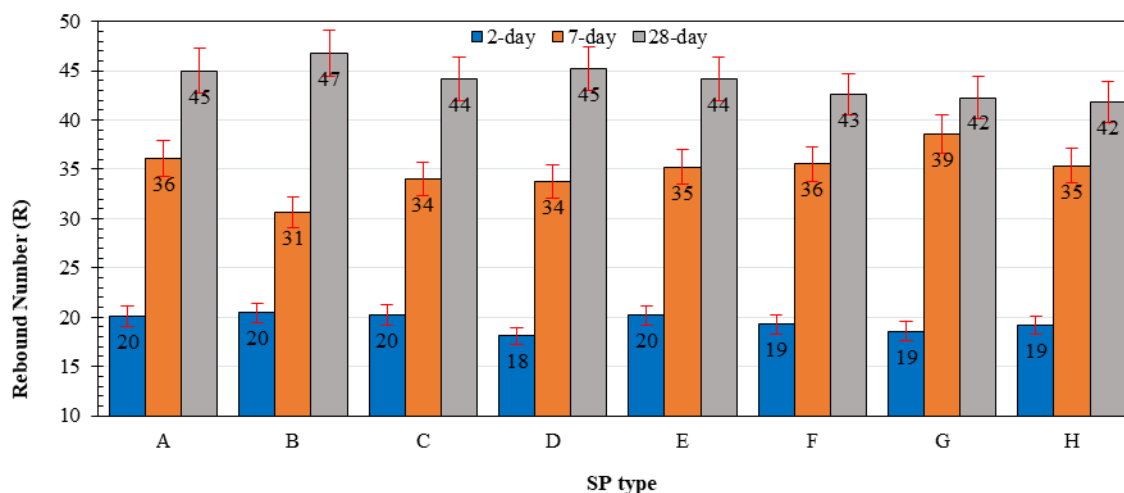


Figure 6. 2, 7 and 28-days ultrasonic pulse velocity test results.

The measured Schmidt hammer results for UHPCs are compared in Figure. 7. Comparing the Schmidt hammer test results with the compressive strength results, it is observed that they are more similar to the UPV test results in terms of sample age effect. Comparing the Schmidt hammer test results with the compressive strength results, it is observed that they are more parallel to each other than the UPV test results in terms of age effect. In other words, while a significant difference was observed between 2 and 7 days results, the difference was considerably reduced between 7 and 28 days. According to the SP type, the 2, 7 and 28 days Schmidt hammer test results were obtained as 18-20, 31-39 and 42-47 R, respectively. There was an 84% difference between the average results of 2 and 7 days and a 27% difference between 7 and 28 days. Considering the Schmidt numbers of the 7-day samples according to the SP type, a 10% difference was observed between the minimum value (D) and the maximum value (A, B, C and E). This difference was calculated as 25% and 12% for 7 and 28-day samples, respectively.

Schmidt values are mostly affected by the aggregate type in the concrete. For example, it is known that the Schmidt numbers of concrete containing coarse limestone aggregate are 7 points lower than concrete containing coarse aggregate, resulting in a 7 MPa difference in the compressive strength of concrete. Schmidt numbers of lightweight concretes also vary compared to normal concretes. There is difference in the rebound numbers of two concrete samples containing the same aggregate from different sources [15]. However, according to the results reported by Xu and Li [44], it was found that the Schmidt hammer numbers at different positions of a single piece of concrete were close to each other. When the rebound results obtained are compared with the literature, it is concluded that the values are suitable for high strength concrete. In concretes with low strength, microstructural aggregate roughness and gaps caused by the weak bond between aggregate-cement cause a decrease in Schmidt values [15]. In this study, in samples with low Schmidt numbers, the SP used probably caused an increase in the porosity ratio in the concrete by reducing the contact surface between particles. Therefore, the use of these SPs in high dosages in UHPC mixtures may lead to deterioration of other properties along with the compressive strength.



**Figure 7. 2, 7 and 28-days Schmidt hammer test results.**

The Leeb hardness test, which is a non-destructive method, provides information about the hardness and estimated strength of materials [16, 45]. In the present study, the hardness of cylindrical samples produced from UHPC mixtures was measured at different ages and compared in Figure. 8. The measurement was taken from a total of 6 points, namely the back front surfaces of the sample, and the average hardness value was calculated. When the hardness values obtained are compared with the other non-destructive test results, it can be concluded that there is a parallel relationship between them. An average of 16% difference between 2 and 7 day Leeb hardness results and 9% difference between 7 and 28 day results were observed. This situation is directly related to the cement hydration rate as in other test results. According to the 28-day Leeb hardness results, the maximum and minimum values were measured for A and G added UHPCs, respectively. 8% Difference has been observed between these values.

There are a few Leeb hardness studies on normal concretes, although limited. Song et al. [46] investigated the Leeb hardness of sodium silicate based concrete and normal C30 concrete and concluded that the average hardness value of normal concrete was 362 HL and that of sodium silicate based concrete was 405

HL. The hardness values of the 28-day GRC specimens produced in this study were measured between 509 and 548 HL. Therefore, the results prove to be compatible when compared to normal concrete. The 2 and 7 day Leeb hardness results were measured as 396-438 and 456-510, respectively. Gomez-Heras et al. [47] stated that the finer the grain size, the higher the Leeb hardness. This situation is directly related to the filling of fine-grained minerals into micro and macro pores [48].

#### 4. CONCLUSION

In this study, using 8 different superplasticizer additives, their effects on UHPCs with the same mixture content were investigated. Workability, compressive strength determination and non-destructive test methods were carried out on the cylindrical samples obtained from the mixtures. The results obtained can be summarized as follows;

A 17% difference was observed between the slump flow diameters. This may be due to the difference in behavior of SPs on C-S-H. All the slump flow results obtained for all 8 mixtures have been compared with the literature and confirmed that they are at an appropriate level.

No significant difference was observed between the unit weight of UHPCs. Minor differences may be related to the working principle of SPs. This proves that the ratio of the 8 different SPs used are suitable and compatible with powder materials.

The fact that 28-day compressive strengths are generally above 120 MPa proves that all used SPs are suitable for UHPCs. Some of the SPs have shown their effects on UHPC characteristics at an early age, some in later ages. However, in older ages, the strength and other properties of the samples have reached a similar level. This is all about the hydration rate of the cement and the proportion of C-S-H products produced over time. Therefore, in the selection of SP, it is important to consider factors such as the intended use of the UHPC and the expected durability time.

A parallelism was observed between nondestructive test results considering the sample age and SP type. While the effect of SP type was more pronounced in early ages, it decreased in later ages. UPV, Schmidt hammer and Leeb hardness tests provide information about the internal structure of concrete, porosity, capillary voids and C-S-H formation. Since the type and ratio of SP also has a significant effect on the formation of C-S-H, the slight differences that occur between nondestructive test results may be related to the working principle of different SPs.

As a result, all test results show that 8 different SPs can be used in UHPCs. However, if it is necessary to make a selection according to the compressive strength, which is important among the UHPC properties, it is recommended to produce the mixture containing G additive. The compressive strength of the sample obtained from this mixture was slightly higher than the others as 127.83 MPa. The slump flow diameter for this mixture was also measured as 230 mm, which is consistent with the literature.

#### ACKNOWLEDGMENTS

In this study, we would like to thank Fibrobeton company and R&D personnel who contributed to material supply, test production and some tests.

#### REFERENCES

- [1] TOPBAS, A., TULEN, F. Ö., MARASLI, M., & KOHEN, B. (2019). A Prefabricated GFRC-UHPC Shell Pedestrian Bridge. IASS Annual Symposium 2019 – Structural Membranes.
- [2] TOPBAS, A., Ateser, T., TULEN, F. O., MARASLI, M., & KOHEN, B. (2020). Physical Modeling and Design Development of Precast UHPC Shell Bridge. Proceedings of the IASS Annual Symposium 2020/21 and the 7th International Conference on Spatial Structures.
- [3] Xue, J., Briseghella, B., Huang, F., Nuti, C., Tabatabai, H., & Chen, B. (2020). Review of ultra-high performance concrete and its application in bridge engineering. *Construction and Building Materials*, 260, 119844. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119844>

- [4] ASTM C1856/C1856M-17. (2017). Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete. American Society for Testing and Materials.
- [5] Richard, P., Cheyrezy, M., Bouygues, S. D., & Quentin, S. (1995). (Refereed) (Received January 5: in final form April 12.1995), 25(7), 1501–1511.
- [6] Li, J., Wu, Z., Shi, C., Yuan, Q., & Zhang, Z. (2020). Durability of ultra-high performance concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 255, 119296. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119296>
- [7] Ghous, M., Kahraman, R., Al, N., & Gencturk, B. (2021). Durability characteristics of high and ultra-high performance concretes. *Journal of Building Engineering*, 33(May 2020), 101669. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101669>
- [8] Roux, N., Andrade, C., & Sanjuan, M. (1996). Experimental study of durability of reactive powder concretes, (February), 1–6.
- [9] Dehghanpour, H., Subasi, S., Guntepe, S., Emiroglu, M., & Marasli, M. (2022). Investigation of fracture mechanics, physical and dynamic properties of UHPCs containing PVA, glass and steel fibers. *Construction and Building Materials*, 328, 127079. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127079>
- [10] Abuodeh, O. R., Abdalla, J. A., & Hawileh, R. A. (2020). Assessment of compressive strength of Ultra-high Performance Concrete using deep machine learning techniques. *Applied Soft Computing Journal*, 95, 106552. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106552>
- [11] Pourbaba, M., Asefi, E., Sadaghian, H., & Mirmiran, A. (2018). Effect of age on the compressive strength of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 175, 402–410. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.203>
- [12] Duval, R., & Kadri, E. (1998). Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes, 28(4), 533–547.
- [13] Lataste, S. J. B. J., Parry, T., Millard, S. G., & Soutsos, M. N. (2010). Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength, 1009–1023. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9562-3>
- [14] Yoo, D., Shin, H., & Yoon, Y. (2016). Ultrasonic Monitoring of Setting and Strength Development of Ultra-High-Performance Concrete. *materials*. <https://doi.org/10.3390/ma9040294>
- [15] Kazemi, M., Madandoust, R., & de Brito, J. (2019). Compressive strength assessment of recycled aggregate concrete using Schmidt rebound hammer and core testing. *Construction and Building Materials*, 224, 630–638. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.110>
- [16] Mishra, D. A., & Basu, A. (2013). Estimation of uniaxial compressive strength of rock materials by index tests using regression analysis and fuzzy inference system. *Engineering Geology*, 160, 54–68. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.04.004>
- [17] Schrö, C., Gruber, M., & Plank, J. (2012). Cement and Concrete Research Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC), 42, 1401–1408. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.08.013>
- [18] Tohumcu1, I., & Bingol, A. F. (2013). Fresh Concrete Properties and Compressive Strength of Self Compacting Concretes With Silica Fume and Fly Ash. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 15(43), 31–44.

- [19] Olawuyi, B. J., & Boshoff, W. P. (2017). Influence of SAP content and curing age on air void distribution of high performance concrete using 3D volume analysis. *Construction and Building Materials*, 135, 580–589. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.128>
- [20] Boshoff, W. P., & Adendorff, C. J. (2013). Effect of sustained tensile loading on SHCC crack widths. *Cement and Concrete Composites*, 37, 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.11.009>
- [21] Kruger, J., & Zijl, G. Van. (2021). An investigation into the porosity of extrusion-based 3D printed concrete. *Additive Manufacturing*, 37(November 2020), 101740. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101740>
- [22] Asiaban, R., Khajehsaeid, H., Ghobadi, E., & Jabbari, M. (2020). New magneto-rheological fluids with high stability : Experimental study and constitutive modelling. *Polymer Testing*, 87(January), 106512. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106512>
- [23] Voit, K., & Zimmermann, T. (2015). Characteristics of selected concrete with tunnel excavation material. *CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS*, 101, 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.016>
- [24] Ríos, J. D., Cifuentes, H., Leiva, C., & Seidl, S. (2019). Analysis of the mechanical and fracture behavior of heated ultra-high- performance fiber-reinforced concrete by X-ray computed tomography. *Cement and Concrete Research*, 119(September 2018), 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.015>
- [25] Kalkan, I., Demir, I., Bakirci Er, S., & Sevim, O. (2016). Influence of Shrinkage Reducing Admixtures on the Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. 12th international conference on advances in civil engineering.
- [26] Mutuk, T., Çevik, S., & Oktay, B. M. (2019). High performance cement composites with nano-SiO<sub>2</sub> and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders. 4th International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences, 4(6), 391–393.
- [27] Al-sarraf, S. Z., Hamoodi, M. A. Y. J., & Ihsan, M. A. (2013). HIGH STRENGTH SELF-COMPACTED CONCRETE MIX DESIGN. *International Journal of Civil Engineering (IJCE)*, 2(4), 83–92.
- [28] Gursel, E., & Kaya, M. (2016). The effect of the use of mineral additives on early and advanced age compressive strength of high strength concretes. *Civil Engineering and Urban Planning: An International Journal (CIVEJ)*, 3(2), 13–31. <https://doi.org/10.5121/civej.2016.3202>
- [29] C 1611/C 1611M. (205AD). Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. American Society for Testing and Materials.
- [30] TS EN 12390-3. (2002). Hardened concrete tests - Part 3: Determination of compressive strength. Turkish Standard.
- [31] ASTM C805. (1997). Standard test method for rebound number of hardened concrete. American Society for Testing and Materials.
- [32] ASTM C597. (2009). Standard test method for pulse velocity through concrete. American Society for Testing and Materials.
- [33] ASTM A956. (2006). Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products. American Society for Testing and Materials.

- [34] Li, P. P., Yu, Q. L., & Brouwers, H. J. H. (2017). Effect of PCE-type superplasticizer on early-age behaviour of ultra-high performance concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, 153, 740–750. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.145>
- [35] Wu, R. Di, Dai, S. Bin, Jian, S. W., Huang, J., Lv, Y., Li, B. D., & Azizbek, N. (2020). Utilization of the circulating fluidized bed combustion ash in autoclaved aerated concrete: Effect of superplasticizer. *Construction and Building Materials*, 237, 117644. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117644>
- [36] Soliman, N. A., & Tagnit-hamou, A. (2017). Using glass sand as an alternative for quartz sand in UHPC. *Construction and Building Materials*, 145, 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.187>
- [37] Wang, R., & Gao, X. (2016). Relationship between flowability, entrapped air content and strength of UHPC mixtures containing different dosage of steel fiber. *Applied Sciences (Switzerland)*, 6(8). <https://doi.org/10.3390/app6080216>
- [38] Dils, J., Boel, V., & De Schutter, G. (2015). Vacuum mixing technology to improve the mechanical properties of ultra-high performance concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(11), 3485–3501. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0416-2>
- [39] Seis, M., Subasi, S., Isbilir Kula, B., & Marasli, M. (2021). Karbon nanotüplerin ultra yüksek performanslı betonların Mekanik ve fiziksel özelliklerine etkileri. *Cumhuriyet Zirvesi ,4. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi*, 148–157.
- [40] Yoo, D. Y., Park, J. J., Kim, S. W., & Yoon, Y. S. (2013). Early age setting, shrinkage and tensile characteristics of ultra high performance fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 41, 427–438. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.015>
- [41] Shariq, M., Prasad, J., & Masood, A. (2013). Studies in ultrasonic pulse velocity of concrete containing GGBFS. *Construction and Building Materials*, 40, 944–950. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.070>
- [42] N.A. Hamiruddin, Razak, R. A., Muhamad, K., Zahid, M. Z. A. M., & Aziz, C. N. S. C. A. (2018). The Effect of Different Sand Gradation with Ultra High Performance Concrete (UHPC). *Solid State Phenomena*, 280, 476–480. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.280.476>
- [43] Fodil, N., Chemrouk, M., & Ammar, A. (2018). Influence of steel reinforcement on ultrasonic pulse velocity as a non-destructive evaluation of high-performance concrete strength. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 0(0), 1–21. <https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1528890>
- [44] Xu, T., & Li, J. (2018). Assessing the spatial variability of the concrete by the rebound hammer test and compression test of drilled cores. *Construction and Building Materials*, 188, 820–832. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.138>
- [45] Ortega, J. A., Gómez-Heras, M., Perez-López, R., & Wohl, E. (2014). Multiscale structural and lithologic controls in the development of stream potholes on granite bedrock rivers. *Geomorphology*, 204, 588–598. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.09.005>
- [46] Song, Z., Xue, X., Li, Y., Yang, J., He, Z., Shen, S., Zhang, N. (2016). Experimental exploration of the waterproofing mechanism of inorganic sodium silicate-based concrete sealers. *Construction and Building Materials*, 104, 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.069>
- [47] Gomez-Heras, M., Benavente, D., Pla, C., Martinez-Martinez, J., Fort, R., & Brotons, V. (2020). Ultrasonic pulse velocity as a way of improving uniaxial compressive strength estimations from Leeb hardness measurements. *Construction and Building Materials*, 261, 119996. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119996>

- [48] García-Del-Cura, M. Á., Benavente, D., Martínez-Martínez, J., & Cueto, N. (2012). Sedimentary structures and physical properties of travertine and carbonate tufa building stone. *Construction and Building Materials*, 28(1), 456–467. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.042>

# Investigation of PV Panel Integrated PCM-Nanoparticle Mixture Using 1-D Mathematical Model

Korhan ÖKTEN<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup>Amasya University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 05000, Merkez/AMASYA

## Graphical/Tabular Abstract

### Article Info:

Research article

Received: 04.02.2022

Revision: 05.05.2022

Accepted: 27.06.2022

### Highlights

- Electrical power
- PV temperature
- Efficiency
- Melting ratio

### Keywords

PV panel

PCM

Nanoparticle

Efficiency

In this study, it was aimed to cool the panel and increase electricity production by placing the PCM / Nanoparticle mixture under the panel.

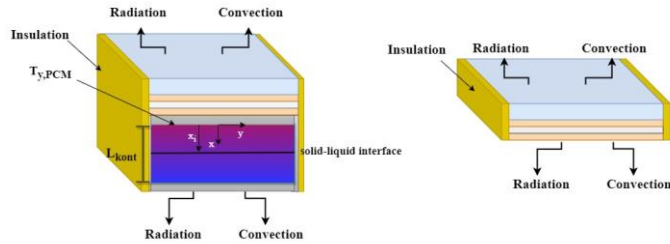


Figure A. PV panel and PV/PCM integration schematics

**Purpose:** In this study, it was aimed to cool the PV panel by adding PCM and a mixture of nanoparticles at different rates under the PV panel. The nanoparticle ratio in the PCM was chosen as 0.1, 0.3 and 0.5. These additions to the PV panel, under different radiation values; PV panel efficiency was evaluated by parameters of electricity production, PV panel temperature and PCM melting rate.

**Theory and Methods:** In the study, 1-D thermal resistance networks were used for modeling the PV panel. Also, a 1-D heat conduction equation was used for modeling the PCM container. The joint solution of these two models gave us the working outputs.

**Results:** As a result of the study, it was observed that the panel temperature and electricity production increased significantly due to the increase in the nanoparticle ratio. In addition, it was determined that the use of nanoparticles at high radiation values significantly increased the performance of the panel.

**Conclusion:** With this study, it has been proven that the use of nanoparticles in PV panel cooling in addition to PCM increases PV panel performance. In addition, it has been seen that the use of nanoparticles with higher thermal conductivity coefficients can give better results as an alternative. These results may solve the disadvantages of PV/PCM integration highlighted in the literature.





## Investigation of PV Panel Integrated PCM-Nanoparticle Mixture Using 1-D Mathematical Model

Korhan ÖKTEN<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Amasya University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 05000, Merkez/AMASYA

### Abstract

It is a well-known fact that PV panels heat up and decrease in efficiency depending on the amount of radiation and there are many studies on it. Adding PCM to the panel base for cooling PV panels is a passive cooling method commonly seen in the literature. In this study, PV panel temperature, panel efficiency, electricity generation, and melting rates in the FDM container were investigated using a 1-D mathematical model when PCM and PCM nanoparticle mixture were added to the PV panel base in different volumes ratios. The study was carried out for radiation values of 800, 1000, 1200 W/m<sup>2</sup>. When the results were examined, the highest efficiency and electricity production values were obtained for 0.5 nanoparticle PCM mixture by volume. Efficiency expression was obtained as 18.3%, 17.7%, and 17.2% for 800, 1000, and 1200 W/m<sup>2</sup> by volume for 0.5 nanoparticle mixture, which is approximately 1% higher than the conventional PV panel. The electrical production was obtained as 112.5, 128, and 153 W, respectively, for the 0.5 nanoparticle PCM mixture, which are 5, 7, and 8 W more, respectively, than the conventional PV panel.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 04.02.2022*  
*Düzeltilme: 05.05.2022*  
*Kabul: 27.06.2022*

### Keywords

*PV panel*  
*PCM*  
*Nanoparticle*  
*Efficiency*

### Anahtar Kelimeler

*PV panel*  
*FDM*  
*Nanopartikül*  
*Verim*

### PV Panel İle Bütünleştirilmiş FDM-Nanopartikül Karışımının 1-D Matematiksel Model Kullanılarak İncelenmesi

### Öz

PV panellerin radyasyon miktarına bağlı olarak ısınması ve veriminin düşmesi bilinen ve üzerinde birçok çalışma yapılan bir olgudur. PV panellerin soğutulması için panel tabanına FDM eklenmesi ise literatürde yaygın olarak görülen pasif soğutma yöntemlerinden biridir. Bu çalışmada ise PV panel tabanına FDM eklenmesi ve farklı hacim oranlarında FDM nanopartikül karışımı eklenmesi durumunda PV panel sıcaklığı, panel verimi, elektrik üretimi ve FDM konteynerindeki erime oranı, 1-B matematiksel model kullanılarak incelenmiştir. Çalışma 800, 1000, 1200 W/m<sup>2</sup> radyasyon değerleri için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek verim ve elektrik üretimi değerlerinin hacimce 0.5 nanopartikül FDM karışımı için elde edildiği görülmüştür. Verim ifadesi hacimce 0.5 nanopartikül karışımı için 800, 1000 ve 1200 W/m<sup>2</sup> için sırasıyla % 18.3, %17.7 ve %17.2 olarak elde edilmiştir ki bu değerler geleneksel PV panelinden yaklaşık %1 fazladır. Elektrik üretimi ise yine 0.5 nanopartikül FDM karışımı için sırasıyla 112.5, 128 ve 158 W olarak elde edilmiştir ve bu değerler geleneksel PV panelden sırasıyla 5, 7 ve 8 W daha fazladır.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

PV paneller, yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisinden faydalanarak karbon emisyonunu düşürmesi ve ucuz olması sebebi ile yaygın olarak kullanılan elektrik üretim sistemleridir [1,2]. Ancak PV paneller, diğer yenilenebilir enerji kaynağından elektrik enerjisi üreten sistemler (rüzgâr panelleri, hidro elektrik santraller) ile kıyaslandığında oldukça düşük verime sahiptirler. Bu sebeple PV panellerin verimini artırmak oldukça önemlidir. [3,4].

PV panel performansını etkileyen birçok parametre vardır. Bunlar; ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı ve radyasyon miktarıdır. Bu parametrelere bağlı olarak PV panel sıcaklığı arttığında, panel verimi önemli ölçüde düşmektedir. Dolayısı ile panel sıcaklığının düşürülmesi amacıyla literatürde aktif ve pasif soğutma

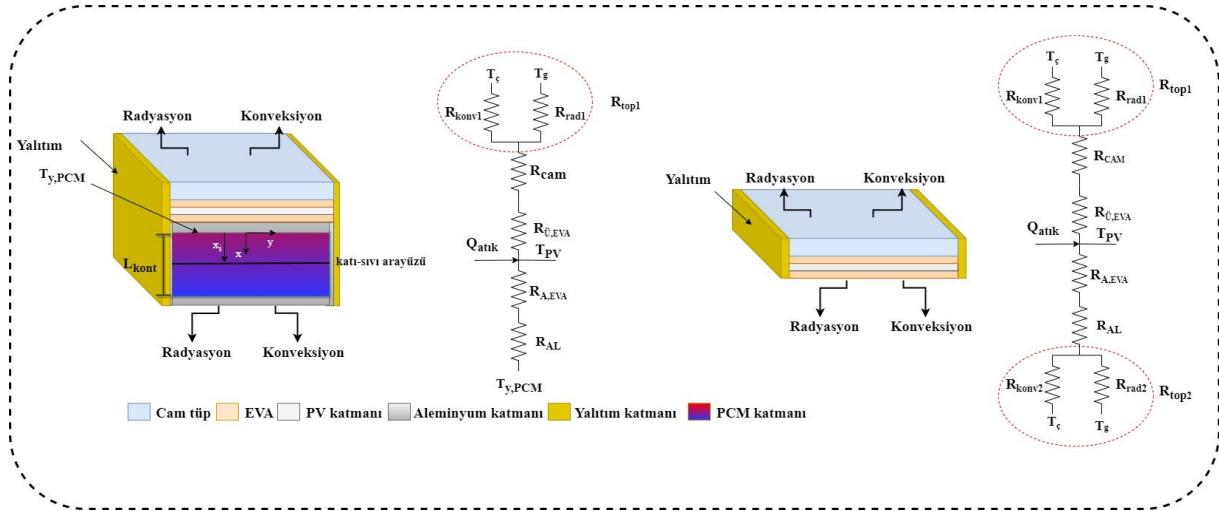
teknikleri kullanılarak yapılan birçok çalışma mevcuttur [5]. Literatürde panel tabanına, PV hücrelerinde oluşan ısıyı çekmek amacı ile FDM yerleştirilmesi yaygın olarak kullanılan pasif soğutma yöntemlerinden biridir.

Literatürde yer alan PV/FDM entegrasyonu ile ilgili çalışmalar incelenecek olunursa; Smith ve ark. [6] PV panel sıcaklığını düşürmek amacı ile panel tabanına FDM (Faz değiştiren malzeme) yerleştirmiş ve panel performansını geleneksel PV panel performansı ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar dünyanın farklı kıtalarındaki çevresel koşullar kullanılarak elde edilmiştir. Buna göre FDM kullanımı, incelenen tüm kıtalar için PV panel performansını artırmış olmakla beraber bazı bölgelerde verim artışı %6'yı aşmıştır. Strpnik ve Stritih [7] farklı radyasyon değerleri ve ortam koşulları için PV/FDM entegrasyonunu elektrik üretimi ve panel sıcaklıkları parametreleri ile deneysel ve nümerik olarak günlük ve yıllık olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda FDM kullanımı ile panel sıcaklığının 35.5 °C düştüğü ve elektrik üretiminin %7.3 arttığı görülmüştür. Savvakis ve Tsoutsos [8] yaptıkları çalışmada, PV/FDM entegrasyonu çıktılarını gerçek Akdeniz iklimi koşulları altında incelemişlerdir. PV/FDM kullanımı ile panel sıcaklığı 26.6 °C derece düşerken elektrik üretimi %5.7 artış göstermiştir. Emam ve Ahmed [9] PV/FDM entegrasyonunda, FDM' nin içerisinde bulunduğu konteyneri bölmelere ayırmış ve bu bölmelere farklı özelliklerde FDM' ler yerleştirerek PV panel sıcaklıklarını incelemişlerdir. 5 paralel bölüme ayrılmış ve panel sıcaklığına bağlı olarak 5 farklı FDM kullanılmış konteynerin, panel sıcaklığını en çok azaltan ve elektrik üretimini en çok artıran konfigürasyon olduğu saptanmıştır. Abdulmunem ve ark. [1] farklı PV panel açılarında FDM malzemesinin erime karakteristiğini ve buna bağlı olarak PV panel sıcaklığını incelemişlerdir. PV panel açısının 0°'den 90°'ye artışına bağlı olarak panel sıcaklığı %0.4 ile %1.2 arasında düşüş göstermiştir. Ahmad ve ark. [10], PV panelin soğutulması amacı ile 6 farklı konfigürasyon denemişlerdir. Bu konfigürasyonlar; geleneksel PV panel, PV panelin su ile soğutulması, PV/FDM entegrasyonu, PV/FDM entegrasyonuna ek olarak su soğutması, PV/kompozit FDM entegrasyonu ve PV/kompozit FDM entegrasyonuna ek olarak su soğutmasıdır. Aktif soğutmalı PV/kompozit FDM birleşimi tüm konfigürasyonlar içerisinde en iyi soğutmanın görüldüğü durum olmuştur. Sonuçlar bu durumda %66,8-82.6 arasında elektrik üretiminde artış olduğunu göstermiştir. Dual ve ark. [11] PV panel tabanında bulunan FDM' nin erimesi sırasında, konveksiyon akımlarına bağlı ısı transferini engellemek ve panelin homojen soğumasını sağlamak amacı ile FDM malzemesini gözenekli bir ortama entegre etmişlerdir. Sonuçlar gözenekli ortam kullanımının FDM' nin erimesi üzerine negatif etki ettiği belirlenmesine rağmen PV panel soğuma hızını artırdığını göstermiştir. Son olarak, Akshayver ve ark. [2] 3 farklı PV/FDM entegrasyonu incelemişlerdir. İlk olarak PV panel tabanına FDM konteyneri entegre edilmiş bir sistem, ikinci olarak üst ve alt tarafı PV hücresi ve ortasında FDM bulunan bir sistem ve son olarak üst ve alt tarafı PV hücresi ve ortasında FDM bulunan sistemde FDM konteynerinin ortasına yatay şekilde üçgensel yalıtım konumlandırılmış bir sistem modellemişler ve PV panel sıcaklıklarını karşılaştırmışlardır. En iyi sonuçlar karşılıklı PV panel arasına üçgensel yalıtım yerleştirilmiş durum için elde edilmiştir. Bu durum için sonuçlar PV/FDM entegrasyonuna göre %77 fazla elektrik üretildiğini göstermiştir.

Yukarıda bahsedildiği gibi PV panel sıcaklığının düşürülmesi PV panel verimini ve elektrik üretimini artırmaktadır. Bu çalışmadaki temel motivasyon ise ısı iletim katsayısını artırdığı bilinen nanopartikül FDM karışımlarının (Tablo 3) özelliklerini kullanarak radyasyon değeri ve nanopartikül oranı değişimine bağlı olarak PV panel verimi ( $n_{pv}$ ), PV panel sıcaklığı ( $T_{pv}$ ), FDM erime oranı ( $x_i / L_{cont}$ ) ve elektrik üretimi ( $W_{elek}$ ) parametrelerini iyileştirmektir. Radyasyon değeri olarak 800, 1000 ve 1200 W/m<sup>2</sup>, nanopartikül oranı olarak ise 0.1, 0.3 ve 0.5 değerleri seçilmiştir.

## 2. SİSTEM TANITIMI (SYSTEM DESCRIPTION)

PV ve PV/FDM sistemlerinin çözümlenmesi için 1-B matematiksel model oluşturulmuştur. Matematiksel model için iki farklı kontrol hacmi seçilmiştir. İlk olarak PV panel kontrol hacmi seçilerek termal direnç ağı yöntemi ile çözümlenmiştir. İkinci olarak ise FDM konteyneri kontrol hacmi olarak seçilmiş ve analitik yöntem kullanılarak çözümlenmiştir. Şekil 1' de görülen şematikte PV ve PV/FDM entegrasyonu için ısı transferi ve termal direnç ağı modelleri görülmektedir.



Şekil 1. PV ve PV/FDM konfigürasyonu şematik görünümü

Öncelikle radyasyon ve konveksiyonla gerçekleşen ısı transferinin hesaplanabilmesi için ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplamaların kolaylaştırılabilmesi için çevre sıcaklığı ( $T_c$ ) gökyüzü sıcaklığına ( $T_g$ ) eşit alınmış ve bu kabul ile aşağıda görülen eşitlik yazılabilmektedir [12].

$$h_{top} = h_{konv} + h_{rad} \tag{1}$$

Eş. 1’ de görülen  $h_{konv}$  ve  $h_{rad}$  aşağıdaki gibi hesaplanmıştır [12].

$$h_{konv} = 2.8 + 3V_{rüz} \tag{2}$$

$$h_{rad} = A_{pv} \sigma \varepsilon (T_y^2 + T_g^2) (T_y + T_g) \tag{3}$$

Eş. 2 ve Eş. 3’ te görülen  $V_{rüz}$  rüzgar hızını,  $T_y$  yüzey sıcaklığını,  $T_g$  gökyüzü sıcaklığını,  $\sigma$  Stefan boltzman sabitini,  $\varepsilon$  emicilik katsayısını ve  $A_{pv}$  PV panel alanını temsil etmekte olup PV panel alanı  $1 \text{ m}^2$  olarak alınmıştır. Isıl direnç modelinin oluşturulabilmesi için Şekil 1’ de görülen her birleşenin ısıl dirençleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$R_{top} = \frac{1}{h_{top} A_{PV}} \tag{4}$$

Eş. 4’ te görülen  $R_{top}$ , yüzeyden konveksiyon ve radyasyonla gerçekleşen ısı kayıplarını temsil eden birleşik ısıl dirençtir. Aşağıda ise cam, EVA ve Alüminyum katmanlarında gerçekleşen iletim ile oluşan ısıl dirençler görülmektedir.

$$R_{cam} = \frac{L_{cam}}{k_{cam} A_{PV}} \tag{5}$$

$$R_{EVA} = \frac{L_{EVA}}{k_{EVA} A_{PV}} \tag{6}$$

$$R_{Al} = \frac{L_{Al}}{k_{Al} A_{PV}} \tag{7}$$

Eş. 5, Eş. 6 ve Eş. 7’ de görülen,  $R_{cam}$ ,  $R_{EVA}$  ve  $R_{Al}$  sırasıyla cam, EVA ve alüminyum katmanlarının ısı dirençlerini;  $L_{cam}$ ,  $L_{EVA}$  ve  $L_{Al}$  sırasıyla cam, EVA ve alüminyum katmanlarının kalınlıklarını;  $k_{cam}$ ,  $k_{Al}$  ve  $k_{EVA}$  ise sırasıyla cam, EVA ve alüminyum katmanlarının ısı iletkenliklerini göstermektedir.

İlk olarak geleneksel PV panel çözümlenmesi, termal direnç ağı kullanılarak yapılmıştır. Eş. 8’ de üst yüzeyden gerçekleşen ısı kaybı; PV panel, gökyüzü ve üst yüzey sıcaklıkları arasındaki direnç ağlarından yararlanılarak tanımlanmıştır. Eş 9’ da ise alt yüzeyden çevreye olan ısı kaybı; PV panel, çevre ( $T_c = T_g$ ) ve alt yüzey sıcaklıkları arasındaki direnç ağlarından yararlanılarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\dot{Q}_{atk,\text{üst}} = \left( \frac{T_{y,\text{üst}} - T_g}{R_{top,\text{üst}}} \right) = \left( \frac{T_{pv} - T_g}{R_{EVA,\text{üst}} + R_{cam} + R_{top,\text{üst}}} \right) \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{atk,\text{alt}} = \left( \frac{T_{y,\text{alt}} - T_g}{R_{top,\text{alt}}} \right) = \left( \frac{T_{pv} - T_g}{R_{EVA,\text{alt}} + R_{al} + R_{top,\text{alt}}} \right) \quad (9)$$

Eş. 8’ de görülen  $\dot{Q}_{atk,\text{üst}}$  üst yüzeyden çevreye olan ısı kaybını,  $T_{y,\text{üst}}$  PV panel üst yüzey sıcaklığını ve  $R_{top,\text{üst}}$  üst yüzeyden çevreye gerçekleşen ısı direnci göstermektedir. Eş. 9’ da görülen  $\dot{Q}_{atk,\text{alt}}$  alt yüzeyden çevreye olan ısı kaybını,  $T_{y,\text{alt}}$  alt yüzey sıcaklığını ve  $R_{top,\text{alt}}$  alt yüzeyden çevreye gerçekleşen ısı direnci göstermektedir. Eş. 8 ve Eş. 9’ da görülen üst ve alt yüzeyden gerçekleşen ısı kayıplarının toplamı bize toplam ısı kaybını verecektir.

$$\dot{Q}_{atk} = \dot{Q}_{atk,\text{alt}} + \dot{Q}_{atk,\text{üst}} \quad (10)$$

PV-FDM entegrasyonu için ise öncelikle PV panel kontrol hacmi olarak seçilmiş ve Şekil 1’ de görülen ısı direnç ağı modeli oluşturulmuştur. Geleneksel PV paneline benzer şekilde PV panel üst yüzeyinden gökyüzüne olan ısı kaybı Eş. 11’ de görüldüğü gibi olacaktır.

$$\dot{Q}_{atk,\text{üst}} = \left( \frac{T_{y,\text{üst}} - T_g}{R_{top,\text{üst}}} \right) = \left( \frac{T_{pv} - T_g}{R_{EVA,\text{üst}} + R_{cam} + R_{top,\text{üst}}} \right) \quad (11)$$

PV panelin alt yüzeyinde ise PV/FDM entegrasyonunda geleneksel PV panelden farklı olarak ısı çevreye değil FDM’ ye geçecektir. Dolayısı ile  $\dot{Q}_{atk,\text{alt}}$  ( $\dot{Q}_{FDM}$ ) Eş. 12’ de görüldüğü gibi tanımlanmıştır.

$$\dot{Q}_{atk,\text{alt}} = \left( \frac{T_{pv} - T_{y,FDM}}{R_{EVA,\text{alt}}} \right) \quad (12)$$

Eş. 12’ de görülen  $T_{y,FDM}$  ifadesi FDM konteynerinin üst yüzey sıcaklığını temsil etmektedir. Benzer şekilde PV/FDM entegrasyonunda da toplam ısı kaybı, alt ve üst yüzeyden gerçekleşen ısı kaybının toplamına eşit olacaktır.

$$\dot{Q}_{atk} = \dot{Q}_{atk,\text{alt}} + \dot{Q}_{atk,\text{üst}} \quad (13)$$

FDM konteynerinin çözümü için ikinci olarak konteyner sınırları kontrol hacmi olarak seçilmiş ve analitik çözüm gerçekleştirilmiştir. Çözüm için zamana bağlı 1-B ısı iletim denklemi kullanılmıştır.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

Eş. 14’ ün non-homojen sınır koşulları ile çözümü mümkün değildir. Dolayısı ile Jiji ve Gaye [13] yaptıkları çalışmada boyutsuzlaştırma parametrelerini kullanarak denklemi dönüştürmüşler ve  $Ste < 0.1$  olduğu durum

için yarı kararlı durum kabulü yapılabileceğini ortaya koymuşlardır. Bir başka deyişle  $Ste < 0.1$  olduğunda  $\partial T / \partial t$  ifadesi oldukça küçük olacağından ihmal edilebilir olduğunu göstermişlerdir. Bu kabulde hareket ile Eş. 14 aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} = 0 \quad (15)$$

Eş. 15' te görülen  $T_s$  ifadesi, sıvı faz için sıcaklık değeridir. Öncelikle sıvı faz için çözüm elde edilmiş ve Eş. 15' in çözümü için aşağıda görülen sınır koşulları kullanılmıştır. Sınır koşullarına göre Şekil 1' de görülen koordinat sistemine göre  $x$ ' in sıfır değerinde sabit ısı akısı girdisi olduğu ( $\dot{Q}_{atk,alt} = \dot{Q}_{FDM}$ ) ve sıvı-katı ara yüzeyinde sıcaklığın sabit ve  $T_e$  (erime sıcaklığı) sıcaklığında olduğu kabulü yapılmıştır.

$$x = 0, \quad -k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{\dot{Q}_{FDM}}{A} \quad (15a)$$

$$x = x_i, \quad T_s = T_e \quad (15b)$$

Eş. 15a' da görülen  $k_s$  ifadesi sıvı faz ısı iletkenliğini,  $\dot{Q}_{FDM}$  ise FDM' ye geçen ısı miktarını göstermekte ve  $\dot{Q}_{FDM} = \dot{Q}_{atk,alt}$  dir. Katı faz için 1-B ısı iletim denklemi ise aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2} = 0 \quad (16)$$

Eş. 16' da görülen ısı denkleminin çözümü için aşağıda görülen sınır koşulları kullanılmıştır. Sınır koşulu olarak katı-sıvı ara yüzeyinde sıcaklığın erime sıcaklığında olduğu ve konteyner tabanından çevreye konveksiyon ve radyasyonla ısı kaybı olduğu düşünülmüştür.

$$x = x_i, \quad T_k = T_e \quad (16a)$$

$$x = L_{kont}, \quad \frac{\partial T_k}{\partial x} = -\frac{h_{top}}{k_k} (T_p - T_\zeta) \quad (16b)$$

Eşitliklerde görülen  $T_k$  katı faz sıcaklığını,  $L_{kont}$  konteyner uzunluğunu,  $k_k$  katı faz ısı iletkenliğini ve  $T_p$  konteyner taban sıcaklığını göstermektedir. Eş. 15 ve Eş. 16 sınır koşulları kullanılarak çözümlenir ise Eş. 17 ve Eş. 18 elde edilir.

$$T_s(x) = \frac{\dot{Q}_{FDM}}{A_{pv} k_s} (x_i - x) + T_e \quad (17)$$

$$T_k(x) = \frac{h_{top}}{k_k} (T_p - T_\zeta)(x_i - x) + T_e \quad (18)$$

FDM konteynerinin taban sıcaklığı ise Eş. 19' da görüldüğü gibidir.

$$T_p = \frac{\left( \left( -h_{top} \cdot \frac{(x_i - L_{kont}) T_\zeta}{k_s} \right) + T_m \right)}{1 - \left( h_{top} \frac{x_i - L_{kont}}{k_s} \right)} \quad (19)$$

Ara yüzeyin zamana bağlı ilerlemesini incelemek için Eş. 20' de ara faz eşitliği ve sınır koşulu görülmektedir [13]. Bu eşitliğe göre panel tabanından gelen ısı akısı sıvı fazdaki FDM' den iletim ile transfer olmaktadır. Bu ısının bir kısmı faz dönüşüm enerjisine dönüşecek, bir kısmı katı fazdan iletim ile aktarılacaktır.

$$k_k \frac{\partial T_k(x_i, t)}{\partial x} - k_s \frac{\partial T_s(x_i, t)}{\partial x} = \rho_s L \frac{dx_i}{dt}, \quad x_i(0) = 0 \quad (20)$$

Eş. 17 ve Eş. 18, Eş. 20' de yerine yazılırsa ara fazın x yönünde zamana bağlı değişimi Eş.21' de görüldüğü gibi elde edilir.

$$x_i(t) = \left( \left( \left( \left( -h_{top} \cdot (T_p - T_\zeta) \right) + \left( \dot{Q}_{PCM} / A_{pv} \right) \right) \right) \cdot \frac{t}{\rho_l \cdot L} \right) \quad (21)$$

Analitik çözümün ardından sistem çıktıları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Öncelikle Eş. 22' de PV panel verimi hesaplanması görülmektedir [12].

$$n_{pv} = n_{ref} \left( 1 - \beta_{ref} (T_{pv} - T_{ref}) \right) \quad (22)$$

Eş. 22' de görülen  $n_{ref}$  referans verim,  $\beta_{ref}$  güneş hücresi sıcaklık katsayısı ve  $T_{ref}$  ifadesi referans sıcaklıktır. Eş. 23' te ise PV panel üzerine, güneş kaynaklı gelen net ısı güç ifade edilmektedir [12].

$$\dot{Q}_{netPV} = G n_{op} A_{pv} \quad (23)$$

Eş. 23' te görülen  $G$  ifadesi radyasyon miktarını ve  $n_{op}$  ifadesi optik verimi ifade etmektedir. Eş. 24' te PV panelinin ürettiği net elektriksel güç görülmektedir.

$$\dot{W}_{elPV} = \dot{Q}_{netPV} n_{pv} n_{inv} \quad (24)$$

Eş. 24' te görülen  $n_{inv}$  ifadesi invertör verimini ifade etmektedir. Eş. 25' te panelden kaybedilen atık ısı miktarı hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{atik} = \dot{Q}_{netPV} (1 - n_{pv}) \quad (25)$$

Yukarıda sistemin çözümlenmesi için oluşturulan bir boyutlu matematiksel model ve sistem çıktılarının hesaplanmasından bahsedilmiştir. Geleneksel PV panel çözümlenmesi için Eş. 8, 9, 10, 22, 23, 24 ve 25' in çözümlenmesi ve PV/FDM entegrasyonu için ise Eş. 11, 12, 13, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24 ve 25' in çözümlenmesi ile sistem çıktıları elde edilmiştir. Çözüm EES (Engineering Equation Solver) ticari yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Oluşturulan matematiksel modelden sistem çıktıların elde edilebilmesi için PV panel ve FDM' nin termal ve fiziksel özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Tablo 1' de PV panelin termal ve fiziksel özellikleri görülmektedir.

**Tablo 1.** PV panel termal ve fiziksel özellikleri

	Kalınlık (m)	Isıl iletkenlik (W/mK)	Yayılcılık (-)	Sıcaklık Katsayısı (1/K)	Referans verim, $\eta_{ref}$ (-)	Alıntı
<b>Cam Tüp</b>	0.003	0.8	0.9	-	-	[12]
<b>PV Katmanı</b>	0.0002	148	-	0.0045	0.2	[9]
<b>EVA katmanı</b>	$1.27 \times 10^{-6}$	0.37	-	-	-	[12]
<b>Aleminyum</b>	0.004	211	0.095	-	-	[12]

PV panel tabanına yerleştirilen FDM konteyneri içerisine ham FDM ve nanopartikül FDM karışımı ile doldurulmuştur. Sistemde kullanılan ham FDM' nin termofiziksel özellikleri Tablo 2' de görülmektedir.

**Tablo 2.** Ham FDM'nin termofiziksel özellikleri

FDM	Değer
Erime sıcaklığı (°C)	35-36
Katı hal yoğunluğu(g/cm <sup>3</sup> )	0.969
Sıvı hal Yoğunluğu(g/cm <sup>3</sup> )	0.87
Katı hal sıvı iletkenliği (W/mK)	0.2
Sıvı hal sıvı iletkenliği (W/mK)	0.16
Gizli ısı (kJ/kg)	171
Katı hal özgül ısısı (K/kgK)	2.57
Sıvı hal özgül ısısı (Kj/kgK)	2.78

FDM' ye nanopartikül olarak grafen nano plakalar eklenmiştir. Tablo 3' te sıcaklığa bağlı olarak hacimce 0.1, 0.3 ve 0.5 oranında nanopartikül olması durumundaki FDM' nin ısı iletim katsayıları görülmektedir. Buna göre nanopartikül oranının her 0.2 oranında artışına bağlı olarak ısı iletim katsayısı, 25-30 °C' de yaklaşık %25, 40-50 °C' de yaklaşık %20 ve 60-70 °C' de yaklaşık % 18 artmıştır.

**Tablo 3.** Sıcaklığa bağlı olarak hacimce 0.1, 0.3 ve 0.5 oranında nanopartikül olması durumundaki FDM'nin ısı iletim katsayıları [14]

	25 °C $k_k$	30 °C $k_k$	40 °C $k_s$	50 °C $k_s$	60 °C $k_s$	70 °C $k_s$
0.1 NA (W/mK)	0.24	0.24	0,208	0.2	0.19	0.18
0.3 NA (W/mK)	0.3	0.3	0.249	0.239	0.229	0.219
0.5 NA (W/mK)	0.38	0.38	0.29	0.28	0.27	0.26

Tablo 4' te yine hacimce 0.1, 0.3 ve 0.5 nanopartikül bulunan FDM' nin özgül ısı değerleri görülmektedir. Görüldüğü gibi sıcaklığa ve nanopartikül oranına bağlı özgül ısı değişimleri oldukça düşüktür.

**Tablo 4.** Hacimce 0.1, 0.3 ve 0.5 nanopartikül bulunan FDM' nin özgül ısı değerleri [14]

	25 °C $c_k$	30 °C $c_k$	60°C $c_s$	70°C $c_s$
0.1 NA (kJ/kgK)	2.27	2.38	2.08	2.15
0.3 NA (kJ/kgK)	2.265	2.35	2.05	2.13
0.5 NA (kJ/kgK)	2.17	2.26	2	2.06

Tablo 5' te hacimce 0.1, 0.3 ve 0.5 nanoakışkan bulunan FDM' nin termal yayıcılık katsayısı görülmektedir. Değerler katı faz için nanopartikül oranının artışına bağlı olarak termal yayıcılığın ortalama %28 arttığını, sıvı faz için ise ortalama %15 arttığını göstermektedir.

**Tablo 5.** Hacimce 0.1, 0.3 ve 0.5 nanoakışkan bulunan FDM' nin termal yayıcılık katsayısı [14]

$\alpha$ (Termal Yayıcılık katsayısı)	Katı	Sıvı
0.1 NA	1.145	0.94
0.3 NA	1.45	1.04
0.5 NA	1.89	1.25

Son olarak Tablo 6'da bu çalışmada kullanılan monokristal PV panel sabitleri görülmektedir.

**Tablo 6.** PV panel sabitleri [12]

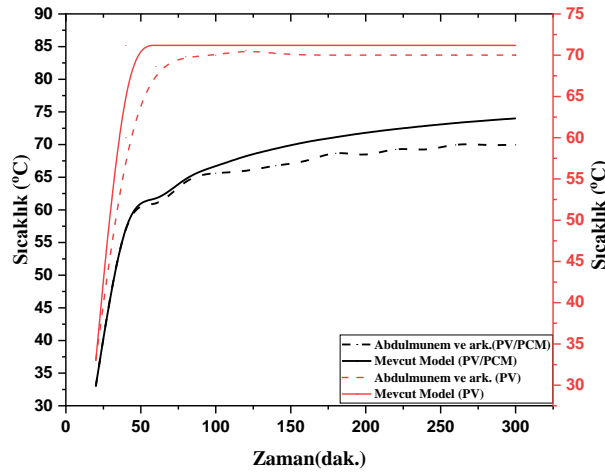
Sabitler	Değerler
$n_{inv}$	90
$n_{op}$	85
$n_{ref}$	25
$\beta_{ref}$	$9.03 \times 10^{-4}$
$T_{ref}$	25



### 3. SONUÇLAR (CONCLUSION)

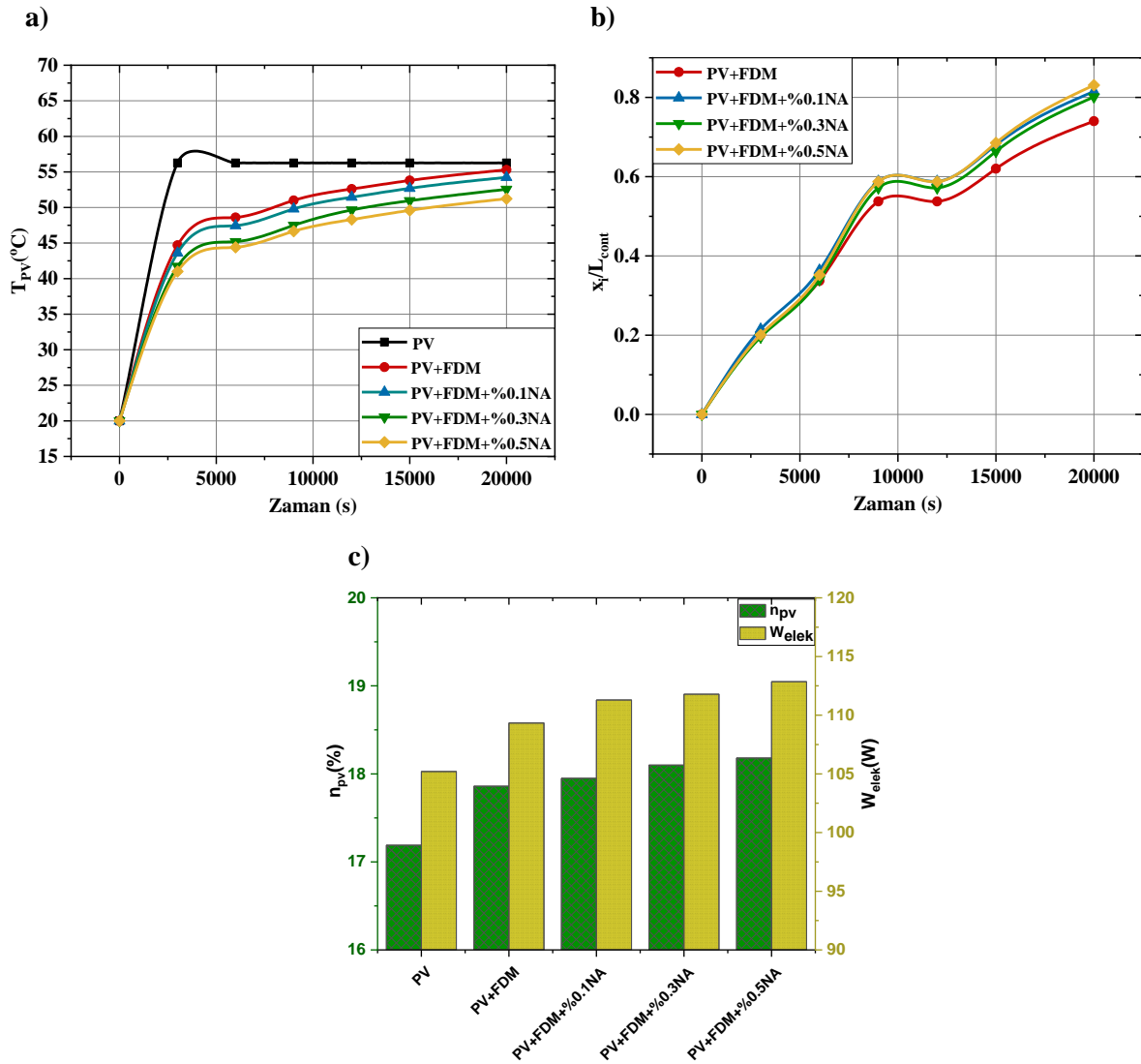
Bu bölümde hacimce 0,1, 0,3 ve 0,5 nanopartikül karıştırılmış FDM panel tabanına yerleştirilmiş, elde edilen sonuçlar geleneksel PV panel ve PV/FDM entegrasyonu ile yukarıda ayrıntıları verilen 1-D matematiksel model kullanılarak kıyaslanmıştır. Sistem çıktıları olarak  $T_{pv}$ ,  $x_i / L_{cont}$ ,  $n_{pv}$ ,  $\dot{W}_{elPV}$  kullanılmış ve radyasyon değerinin 800, 1000 ve 1200 W/m<sup>2</sup> olduğu durum için aşağıda verilmiştir.

Öncelikle 1-B matematiksel model oluşturularak elde edilen çözüm literatür çalışması ile Şekil 2' de görüldüğü gibi kıyaslanmıştır. Abdulmunem ve ark. [5] tarafından gerçekleştirilen nümerik ve deneysel çalışma sonuçları incelendiğinde, PV panel için mevcut model ile literatür çalışması arasındaki farkın maksimum 2°C olduğu görülmüştür. PV/FDM entegrasyonuna bakıldığında ise bu farkın 5°C' ye çıktığı görülmüştür. Bu sıcaklık farklarının kabul edilebilir olduğu görülmüş ve parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir.



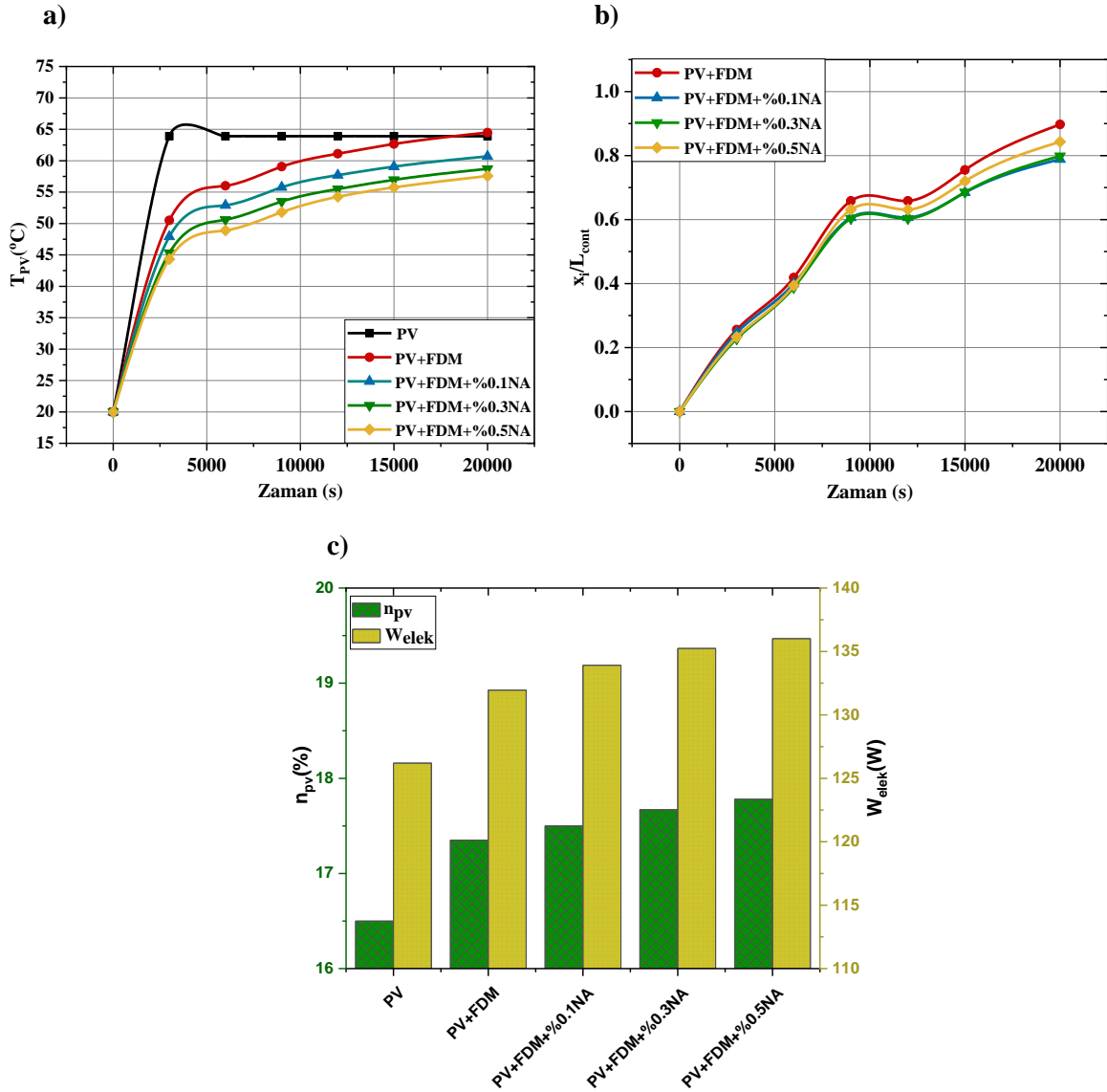
Şekil 2. PV panel ve PV/FDM entegrasyonunun literatür çalışması ile kıyaslanması

Parametrik çalışma için rüzgâr hızı 1 m/s, çevre sıcaklığı 20 °C, panel alanı 1 m<sup>2</sup> ve güneşlenme süresi 20000 s olarak alınmıştır. Şekil 3' te 800 W/m<sup>2</sup> radyasyon değeri için  $T_{pv}$ ,  $x_i / L_{cont}$ ,  $n_{pv}$  ve  $\dot{W}_{elPV}$  değerleri kıyaslanmıştır. Şekil 3a incelendiğinde, maksimum sıcaklığın geleneksel PV paneli için elde edilmiş ve maksimum 56°C olarak gözlemlenmiştir. PV/FDM entegrasyonunda ise hacimce nanopartikül oranı arttıkça panel sıcaklıklarının düştüğü gözlemlenmiştir. Buna göre maksimum PV panel sıcaklığı PV/FDM için 55°C elde edilmiş ve hacimce nanopartikül oranının artışına bağlı olarak yaklaşık 1°C düşüş göstermiştir.  $x_i / L_{cont}$  oranları incelendiğinde ise tüm PV/FDM entegrasyonlarında yakın erime oranları görülmekle birlikte maksimum erime miktarı, hacimce 0.5 oranında nanopartikül içeren karışımda yaklaşık 0.82 olarak elde edilmiştir.  $\dot{W}_{elPV}$  ve  $n_{pv}$  değerleri incelendiğinde ise maksimum değerler sırasıyla %18.3 ve 112.5 kW olarak hacimce 0.5 nanopartikül-FDM karışımı için elde edilmiştir. Bu değerler geleneksel PV panelden sırasıyla %1 ve 5.5 kW yüksektir. Ayrıca hacimce nanopartikül miktarının artışının,  $\dot{W}_{elPV}$  ve  $n_{pv}$  değerlerini artırdığı gözlemlenen başka bir olgudur.



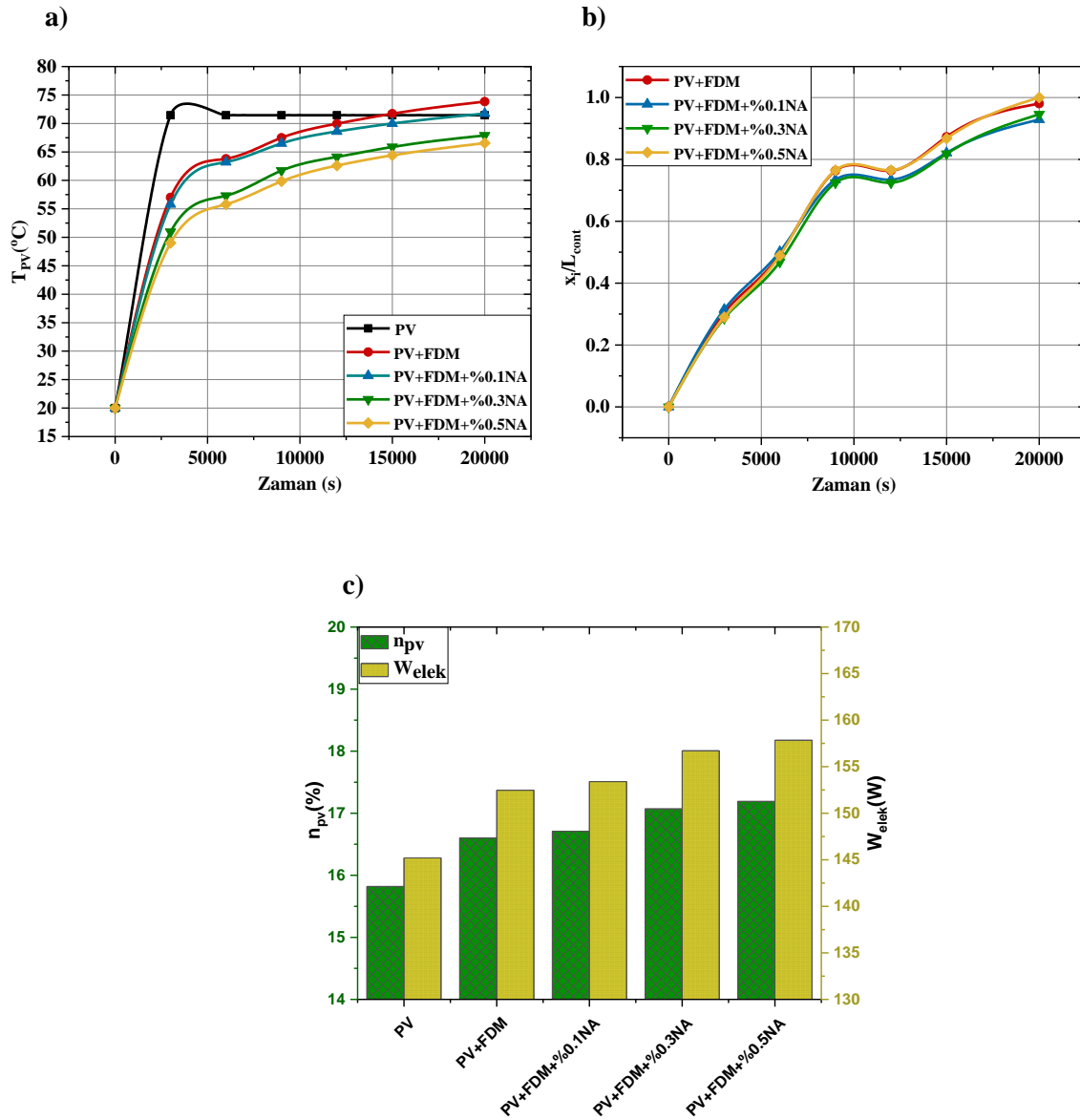
Şekil 3.  $800 \text{ W/m}^2$  radyasyon değeri için  $T_{pv}$ ,  $x_i / L_{cont}$ ,  $n_{pv}$ ,  $\dot{W}_{elPV}$  değerleri

Şekil 4' te radyasyon değeri  $1000 \text{ W/m}^2$  değeri için sistem çıktıları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde geleneksel PV panelin zamana bağlı olarak  $64 \text{ }^\circ\text{C}$  değerine ulaştığı ve bu değerde sabit kaldığı görülmektedir. FDM ve nanopartikül katkılı FDM eklenmiş PV panellerde ise sıcaklık süreç boyunca giderek artış göstermiş ancak geleneksel PV panel sıcaklığının altında kalmıştır. FDM ve nanopartikül katkılı FDM eklenmiş PV panellerinde ise panel sıcaklığı nanopartikül oranının artışına bağlı olarak yaklaşık  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  düşüş göstermiştir.  $x_i / L_{cont}$  değerleri incelendiğinde ise erime oranları birbirine yakın olmakla birlikte en yüksek erime oranı hacimce 0.5 nanopartikül karışımı için yaklaşık 0.9 olarak elde edilmiştir. Şekil 4c de ise PV panel verimi ve elektriksel güç üretimi görülmektedir. FDM kullanımı verimi yaklaşık olarak %1 artırırken, FDM/nanopartikül karışımı kullanımı yalnızca %0.2 ek bir artış sağlamıştır. Benzer şekilde FDM kullanımı elektrik üretimini yaklaşık 5 kW artırırken FDM/nanopartikül karışımı elektrik üretimini yaklaşık 3 kW ek bir artış sağlamıştır. En yüksek panel verimi ve elektrik üretimi 0.5 nanopartikül karışımı için yaklaşık %17.7 ve 136 kW olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.1000 W/m<sup>2</sup> radyasyon değeri için  $T_{pv}$ ,  $x_i / L_{cont}$ ,  $n_{pv}$ ,  $\dot{W}_{elPV}$  değerleri

Son olarak Şekil 5' te 1200 W/m<sup>2</sup> radyasyon değeri için PV panel sıcaklığı, erime oranları, PV panel verimi ve elektrik üretimi incelenmiştir. Şekil 5a' da PV panel sıcaklıkları incelendiğinde hacimce %0.3 ve %0.5 FDM nanopartikül karışımı için güneşlenme süresi boyunca geleneksel PV panelden daha düşük sıcaklıklar elde edilmiştir. FDM ve 0.1 nanopartikül içeren FDM karışımı PV panellerinin panel sıcaklığının ise güneşlenme süresinin sonuna doğru geleneksel PV panel sıcaklığının üzerine çıktığı görülmüştür. Maksimum erime miktarı yine hacimce 0.5 nanopartikül içeren FDM karışımı için elde edilmiş ve FDM katmanının tamamı erimmiştir. Panel verimleri incelendiğinde ise FDM kullanımı PV panel verimini yaklaşık %0.8 oranında artırmıştır. En yüksek PV panel verimi 0.5 nanopartikül içeren FDM karışımı için yaklaşık %17.2 olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde FDM kullanımı elektrik üretimini 7.5 kW artırırken, en yüksek elektrik üretimi yine 0.5 nanopartikül içeren FDM karışımı için 158 kW olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.  $1200 \text{ W/m}^2$  radyasyon değeri için  $T_{pv}$ ,  $x_i / L_{cont}$ ,  $n_{pv}$ ,  $\dot{W}_{elPV}$  değerleri

Yukarıda görüldüğü gibi FDM içerisine nanopartikül eklenmesiyle ısıl iletkenlik arttığından panelden çekilen ısı miktarı artmıştır. Buna bağlı olarak FDM erime oranı da artmaktadır. Panelde daha fazla ısı çekilmesi panel sıcaklığını düşürmekte, panel verimi ve elektrik üretimi artmaktadır. Bu sebeple çalışmadaki en iyi sonuçlar 0.5 nanopartikül FDM karışımı için elde edilmiştir.

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

Bu çalışmada PV panelin soğutulması amacı ile FDM ve nanopartikül-FDM kullanımı 1-B matematiksel model geliştirilerek incelenmiştir. Nanopartikül FDM karışımı termofiziksel özellikleri için literatür çalışmasından faydalanılmış ve hacimce 0.1, 0.3 ve 0.5 nanopartikül içeren FDM-nanopartikül karışımının PV panel soğutulması üzerindeki etkileri farklı radyasyon değerleri için belirlenmiştir. Oluşturulan matematiksel model literatür çalışması ile kıyaslanmış ve modelin kabul edilebilir olduğu saptanmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda aşağıda belirtilen bulgular saptanmıştır.

- Tüm radyasyon değerleri için PV panel tabanına FDM ve nanopartikül FDM karışımı tabakası yerleştirilmesi panel sıcaklığını düşürürken PV panel verimini ve elektrik üretimini artırmaktadır.

- Panel tabanına FDM katmanı yerleştirilmesi ile panel sıcaklığı radyasyona bağlı olarak 2-5 °C azalmış, elektrik üretimi 4-6.5 kW, panel verimi ise yaklaşık %1 seviyesinde artmıştır.
- FDM içerisinde nanopartikül oranının artması panel verimini artırmaktadır. Buna göre en yüksek panel performansı nanopartikül oranı 0.5 olduğu durum için elde edilmiştir.
- FDM içerisindeki nanopartikül oranı 0.5 olduğu durum için panel sıcaklığı geleneksel PV paneline kıyasla radyasyon değerine bağlı olarak 8-12 °C düşmüş, elektrik üretimi 6.5-10 kW ve panel verimi %1- 1.5 seviyesinde artmıştır.
- FDM-nanopartikül karışımı içerisindeki hacimce nanopartikül oranının artışı FDM konteyneri içerisindeki erime miktarını artırmıştır.

Bu sonuçlar ışığında PV panel tabanına FDM malzemesi yerleştirilmesi panel sıcaklığını bir miktar düşürürken, ek olarak FDM içerisine nanopartikül eklenmesi geleneksel PV panele kıyasla panel sıcaklığını önemli ölçüde düşürmüştür. Böylece elektrik üretimi ve panel verimi artmıştır.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Abdulmunem, A. R., Samin, P. M., Rahman, H. A., Hussien, H. A., Mazali, I. I., Ghazali, H. (2021). Numerical and experimental analysis of the tilt angle's effects on the characteristics of the melting process of PCM-based as PV cell's backside heat sink. *Renewable Energy*, 173, 520-530.
- [2] Kumar, A., Singh, A. P., Kotha, R. S., Singh, O. P. (2021). Thermal energy storage design of a new bifacial PV/PCM system for enhanced thermo-electric performance. *Energy Conversion and Management*, 250, 114912.
- [3] Atkin, P., Farid, M. M. (2015). Improving the efficiency of photovoltaic cells using PCM infused graphite and aluminium fins. *Solar Energy*, 114, 217-228.
- [4] Naderi, M., Ziapour, B. M., Gendeshmin, M. Y. (2021). Improvement of photocells by the integration of phase change materials and thermoelectric generators (PV-PCM-TEG) and study on the ability to generate electricity around the clock. *Journal of Energy Storage*, 36, 102384.
- [5] Abdulmunem, A. R. (2017). Passive cooling by utilizing the combined PCM/aluminum foam matrix to improve solar panels performance: indoor investigation. *The Iraqi Journal for Mechanical and Material Engineering*, 17(4), 712-723.
- [6] Smith, C. J., Forster, P. M., Crook, R. (2014). Global analysis of photovoltaic energy output enhanced by phase change material cooling. *Applied Energy*, 126, 21-28.
- [7] Stritih, U. (2016). Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM. *Renewable Energy*, 97, 671-679.
- [8] Savvakis, N., Tsoutsos, T. (2021). Theoretical design and experimental evaluation of a PV+PCM system in the mediterranean climate. *Energy*, 220, 119690.
- [9] Emam, M., Ahmed, M. (2018). Cooling concentrator photovoltaic systems using various configurations of phase-change material heat sinks. *Energy conversion and management*, 158, 298-314.
- [10] Ahmadi, R., Monadinia, F., Maleki, M. (2021). Passive/active photovoltaic-thermal (PVT) system implementing infiltrated phase change material (PCM) in PS-CNT foam. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 222, 110942.

- [11] Duan, J. (2021). The PCM-porous system used to cool the inclined PV panel. *Renewable Energy*, 180, 1315-1332.
- [12] Kurşun, B., Ökten, K. (2019). Thermodynamic analysis of a Rankine cycle coupled with a concentrated photovoltaic thermal system for hydrogen production by a proton exchange membrane electrolyzer plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(41), 22863-22875.
- [13] Jiji, L. M., Gaye, S. (2006). Analysis of solidification and melting of PCM with energy generation. *Applied Thermal Engineering*, 26(5-6), 568-575.
- [14] Sivashankar, M., Selvam, C., Manikandan, S., Harish, S. (2020). Performance improvement in concentrated photovoltaics using nano-enhanced phase change material with graphene nanoplatelets. *Energy*, 208, 118408.



## Oscillation Control of Two-Wheeled Robot using a Gyrostabilizer

Faruk ÜNKER<sup>1,\*</sup> <sup>1</sup>Gümüşhane University Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineerings, 29100, Bağlarbaşı/GÜMÜŞHANE

### Article Info

Research article

Received: 24.01.2022

Revision: 07.06.2022

Accepted: 13.06.2022

### Keywords

Absorber

Damping

Control Moment

Gyroscope

Inverted Pendulum

Self-Balancing Robot

Two-Wheeled Robot

### Abstract

Two-wheeled robots are popular in transportation applications because of their high manoeuvrability. In this research, the oscillation attenuation performance of the control moment gyroscope (CMG) for the two-wheeled robot was studied. This CMG is also more reactionless than other conventional absorbers by transforming the impact of angular momentum to unidirectional thrust along the center of gravity. The gimbals can precess while providing the angular momentum under the gravitational force. The CMG to be used for balancing the robot can maintain its stability in the desired frequency band. Because increasing the flywheel speed can produce the thrust force much more easily against the undesired oscillation forces that disrupt the balance of the robot. There is a relation between the gimbal amplitude and the flywheel speed of CMG, in which the required flywheel speed can be reduced if the higher gimbal amplitude is chosen. It can be also concluded from the study that the oscillation amplitudes at the target frequency can decrease as much as flywheel speed increases. There was also a mathematical model using ANSYS software. The simulation results using ANSYS matched well with the theoretical results of the Lagrangian model.

## 1. INTRODUCTION

Due to their high maneuverability, two-wheeled robots are popular in transportation applications (<http://segway.com>) despite the stability problem of an inverted pendulum [1]. The stability of the inverted pendulum-like robot has attracted significant interest over the past years [2,3]. There are apparent techniques for both the dynamics and control of these robots. An inverted pendulum-like robot is an unstable nonlinear vehicle that strongly depends on the center of gravity. [4,5]. However, two-wheeled robots can be balanced with appropriate control despite their being naturally unstable. For the sake of example, moving the wheel(s) of the robot [6,7], exerting a gyroscopic moment (CMG) [1], and riding a reaction wheel [8]. A common control strategy is to turn the wheels of the robot to move the center of a body mass forward and rear respectively. A two-wheeled robot requires a roll angle to be able to control the robot's balance under certain conditions such as the inertia forces of gravity, which significantly reduces its mobility in the upright position. Therefore, maintaining the equilibrium of forces brings interesting challenges to the researchers discussing different more realistic dynamical models to stabilize robots [4-8].

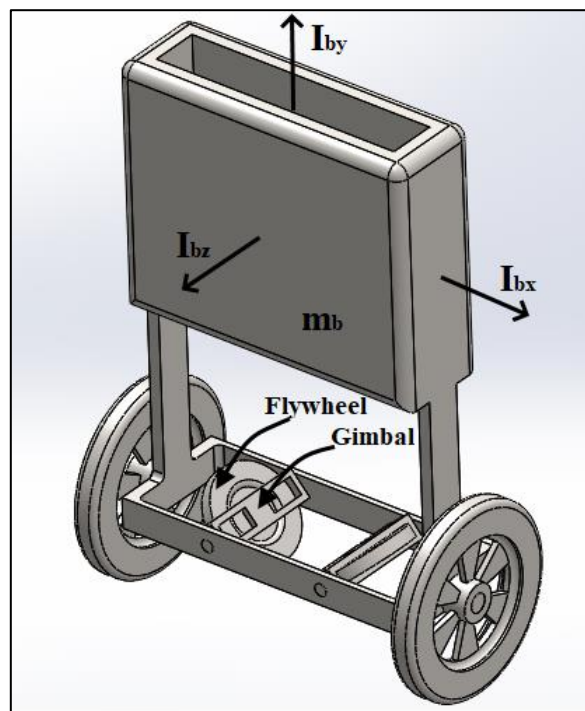
A reaction wheel is a simple and low-cost momentum actuator that can produce torque to balance the robot in the absence of ground reaction [8]. However, a primary challenge in conventional reaction wheels is that they have to change flywheel velocity to generate angular momentum to compensate the robot against constant falling-down force, which results in low momentum storage capacity. This is the main problem of reaction wheels that limits their application when the body mass is subject to continuous roll disturbances. However, compared with reaction wheels, a CMG is able to produce large amounts of torque per unit mass against continuous moments using a constant flywheel velocity. In recent years,

various studies have shown that the inertial forces of a structure can be controlled reactionless by using the gyroscopic torque produced by a rotating flywheel [9-11].

In this paper, the vibration attenuation performance of a CMG for a two-wheeled robot (an inverted pendulum problem) is investigated under the harmonic excitation torque of wheels. The angular momentum of a gyroscope stabilizer can provide weight and volume savings and ground-independent damping compared to conventional vibration absorbers [9-11]. Conventional vibration dampers generally operate on the principle of energy transfer from the main structure to the damper in the low frequency band [12]. However, the gyroscope can oscillate and precess while converting the angular momentum to linear along the center of body mass under the gravitational force within a wide range of excitation frequencies [9-11].

## 2.OVERVIEW OF ROBOT

Sinusoidal driving torque of  $\tau = \tau_0 \cos(\omega t)$  is applied to the robot wheels using forcing amplitudes ( $\tau_0$ ) and different forcing frequencies ( $\omega$ ). Table 1 gives the technical parameters of the robot model. Gyroscopes consist of a flywheel, which is assumed to have a certain rotational speed  $\Omega$ , inside a gimbal that can rotate ( $\theta$ ) freely around its geometric axis in the body of the robot, as shown in Figures 1 and 2.



**Figure 1.** The two-wheeled robot with gyroscopes



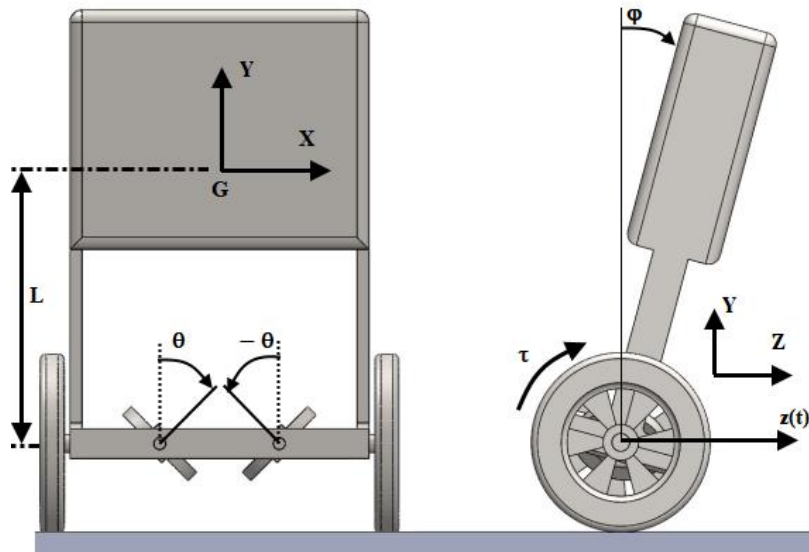


Figure 2. Two-wheeled robot with the length of the centroid (G) and head (pitch) displacement ( $\varphi$ ) at the free end

Table 1. Physical descriptions of the two-wheeled robot

Symbol	Numerical properties	Definition
$g$	9.80665 m/s <sup>2</sup>	Acceleration due to gravity
$r$	0.15 m	Radius of the wheel
$L$	0.47693741 m	Length of the centroid
$m_b$	169.216910 kg	Body mass
$m_g$	1.10344600 kg	Gimbal mass
$m_w$	14.2471463 kg	Wheel mass
$m_d$	2.52182131 kg	Flywheel mass
$I_p$	0.00849 kg.m <sup>2</sup>	Inertia of each flywheel
$I_o$	0.00432 kg.m <sup>2</sup>	Inertia of each flywheel
$I_{gx}$	0.00402 kg.m <sup>2</sup>	Inertia of each gimbal
$I_{gy}$	0.00410 kg.m <sup>2</sup>	Inertia of each gimbal
$I_{gz}$	0.00049 kg.m <sup>2</sup>	Inertia of each gimbal
$I_{bx}$	4.90519 kg.m <sup>2</sup>	Inertia of body
$I_w$	0.20413 kg.m <sup>2</sup>	Inertia of the wheel
$\Omega$	0-3000 rad/s	Flywheel speed
$\tau$	1 N.m	Torque for each wheel

## 2.1. Equations of Motion

The equations describing the robot motion can be derived by the Lagrange formula. Fortunately, the fundamental equations of the two-wheeled robot using CMG are obtained by Ünker [1] as

$$\left(M_t + \frac{2I_w}{r^2}\right)\ddot{z} + m_b L \ddot{\varphi} \cos \varphi - m_b L \dot{\varphi}^2 \sin \varphi = \frac{2\tau}{r}; \quad (1)$$

$$(I_o + I_{gz})\ddot{\theta} + (I_o - I_p + I_{gx} - I_{gy})\dot{\varphi}^2 \cos \theta \sin \theta - I_p \Omega \dot{\varphi} \cos \theta = 0; \quad (2)$$

$$(2I_o \cos^2 \theta + 2I_p \sin^2 \theta + 2I_{gx} \cos^2 \theta + 2I_{gy} \sin^2 \theta + I_{bx} + m_b L^2)\dot{\varphi} + 4(I_p - I_o + I_{gy} - I_{gx})\dot{\varphi} \dot{\theta} \sin \theta \cos \theta + 2I_p \Omega \dot{\theta} \cos \theta + \ddot{z} m_b L \cos \varphi - m_b g L \sin \varphi = -2\tau; \quad (3)$$

In which

$$M_t = 2m_d + 2m_g + 2m_w + m_b. \quad (4)$$

## 2.2. Balance Locations for Small Oscillations

Let's assume that the acceleration of the head motion of the robot is negligible ( $\ddot{\varphi} \approx 0$ ) for a low frequency with a small amplitude of the pitch vibrations ( $\varphi \approx 0$ ,  $\sin \varphi = \varphi$  and  $\cos \varphi = 1$ ). Also, if we make another assumption for the balanced position of the gimbal body, it has zero kinetic energy at a very small precession. ( $\theta \approx 0$ ,  $\sin \theta = \theta$ , and  $\cos \theta = 1$ ). Thus, the equations of the mathematical model of motion can be simplified using  $\dot{\theta} \approx 0$  and  $\dot{\varphi} \approx 0$  assumptions in Equations (1), (2), and (3). Hence, ignoring the terms of a higher power of angular velocities at the equilibrium position for a very small amplitude of precession ( $\theta \approx 0$ ,  $\sin \theta = \theta$ , and  $\cos \theta = 1$ ), the differential equations of motion can be simplified to;

$$\left(M_t + \frac{2I_w}{r^2}\right)\ddot{z} = \frac{2\tau}{r}; \quad (5)$$

$$(I_o + I_{gz})\ddot{\theta} - I_p \Omega \dot{\varphi} = 0; \quad (6)$$

$$2I_p \Omega \dot{\theta} + \ddot{z} m_b L - m_b g L \varphi = -2\tau. \quad (7)$$

## 2.3. Required Flywheel Speeds corresponding to the Operating Frequencies

Let the wheels of the robot be stimulated with a harmonic distortion torque as  $\tau = \tau_0 e^{j\omega t}$ . The displacements of the robot body and gimbal can then be written in terms of angular frequency ( $\omega$ ):

$$z = z_0 e^{j\omega t}, \theta = \theta_0 e^{j\omega t} \text{ and } \varphi = \varphi_0 e^{j\omega t}. \quad (8)$$

Thus, using Equation (8) in Equations (5-7) to solve these reduced equations of motion simultaneously, the following matrix can be written in the form:

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 \left( M_t + \frac{2I_w}{r^2} \right) & 0 & 0 \\ 0 & -\omega^2 (I_o + I_{gz}) & -j\omega I_p \Omega \\ -\omega^2 m_b L & 2j\omega I_p \Omega & -m_b g L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_0 \\ \theta_0 \\ \varphi_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 2\tau_0/r \\ 0 \\ -2\tau_0 \end{Bmatrix}. \tag{9}$$

From the determinant of the coefficients ( $z_0$ ,  $\theta_0$ , and  $\varphi_0$ ), the characteristic equation is as follow;

$$\left[ (I_o + I_{gz})m_b g L - 2(I_p \Omega)^2 \right] = 0. \tag{10}$$

Therefore, Equation (10) can be rearranged into the following flywheel speed resonance;

$$\Omega_{resonance} = \mp \frac{1}{I_p} \sqrt{\frac{(I_o + I_{gz})m_b g L}{2}}. \tag{11}$$

Furthermore, the amplitudes of vibrations can be found from Equation (9) as follows, respectively;

$$z_0 = -\frac{2\tau_0}{\omega^2 r \left( M_t + \frac{2I_w}{r^2} \right)}; \tag{12}$$

$$|\theta_0| = \frac{2\tau_0 I_p \Omega \left[ 1 + \frac{m_b L}{r \left( M_t + \frac{2I_w}{r^2} \right)} \right]}{-\omega \left[ (I_o + I_{gz})g m_b L - 2(I_p \Omega)^2 \right]}; \tag{13}$$

$$\varphi_0 = \frac{2\tau_0 (I_o + I_{gz}) \left[ 1 + \frac{m_b L}{r \left( M_t + \frac{2I_w}{r^2} \right)} \right]}{(I_o + I_{gz})g m_b L - 2(I_p \Omega)^2}. \tag{14}$$

Thus, the required flywheel speed can be obtained from Equation (13) such as;

$$\Omega_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}; \tag{15}$$

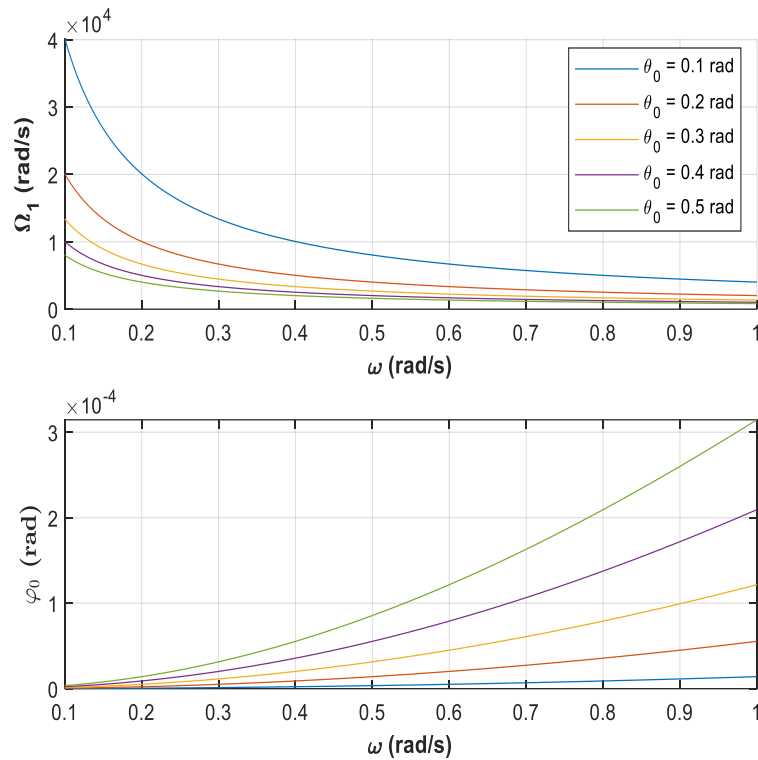
in which:

$$a = 2\omega |\theta_0| I_p^2;$$

$$b = -2\tau_0 I_p \left[ 1 + \frac{m_b L}{r(M_t + \frac{2I_w}{r^2})} \right]; \quad (16)$$

$$c = -\omega |\theta_0| g m_b L (I_o + I_{gz}).$$

The lowest flywheel speed that can be used versus a required precession amplitude  $\theta_0$  can be determined by the equations obtained above. Equations (13 and 14) illustrate that the amplitudes increase when the wheel's torque increases, which means more inertia force for the body of the robot in the horizontal axis. The curves in Figure 3 are plotted with the help of these equations derived above. As the frequency increases, the amplitude of the body vibration increases. It is necessary to increase the flywheel speed at low-frequency values as seen in Figure 3. Therefore, low angular momentum is needed at high roll amplitudes of gyro, according to the relationship between the flywheel speed and the roll amplitude.



**Figure 3.** The frequency influence on the flywheel speed,  $\Omega$  and the pitch amplitude,  $\varphi_0$  for  $\tau_0 = 1 \text{ Nm}$

### 3.RESULTS AND DISCUSSION

In this study, Lagrangian equations are solved with the help of MATLAB. The physical parameters to be used in solving the equations of motion of the model are given in Table 1. Numerical solutions of model equations were run for 0.05 s step intervals. The theoretical simulations of equations of motion were confirmed with the simulations obtained by ANSYS for different speeds of flywheels. The displacements are obtained by the Rigid Dynamics tool of ANSYS Workbench.

#### 3.1. Influence of the Angular Frequencies

The oscillation amplitudes obtained from the flywheel speed scanning are shown in Figure 4. In which, the flywheel speed of the CMG saves the robot from instability as soon as it reaches a certain speed. For example, for this model, the required speed is  $\Omega=1000 \text{ rad/s}$ , after which the robot moves stably and

protects itself with gradually decreasing vibration amplitude. In addition, by increasing the flywheel speed of the gyro, the amplitudes for each frequency can be reduced to desired levels.

In Figure 5, the optimum flywheel speed calculated using Equation (15) to minimize the oscillation amplitude of the target frequency at values of  $\tau_0 = 1 \text{ Nm}$  and  $\theta_0 = 0.3 \text{ rad}$  is  $2688 \text{ rad/s}$ . As can be seen from Figure 5, significant decreases were observed in the amplitudes of the vibrations, as the required flywheel speed would decrease as the frequency increased. Consequently, for the same angular momentum, the vibration amplitudes gradually increase as the frequency decreases.

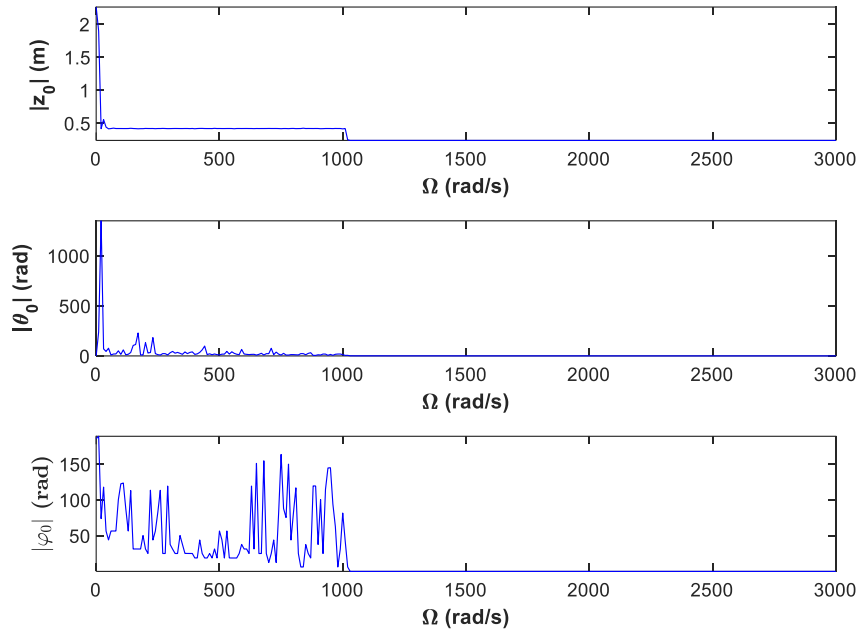


Figure 4. Influence of the flywheel speed  $\Omega$  for  $\tau_0 = 1 \text{ Nm}$  and  $\omega = 0.5 \text{ rad/s}$

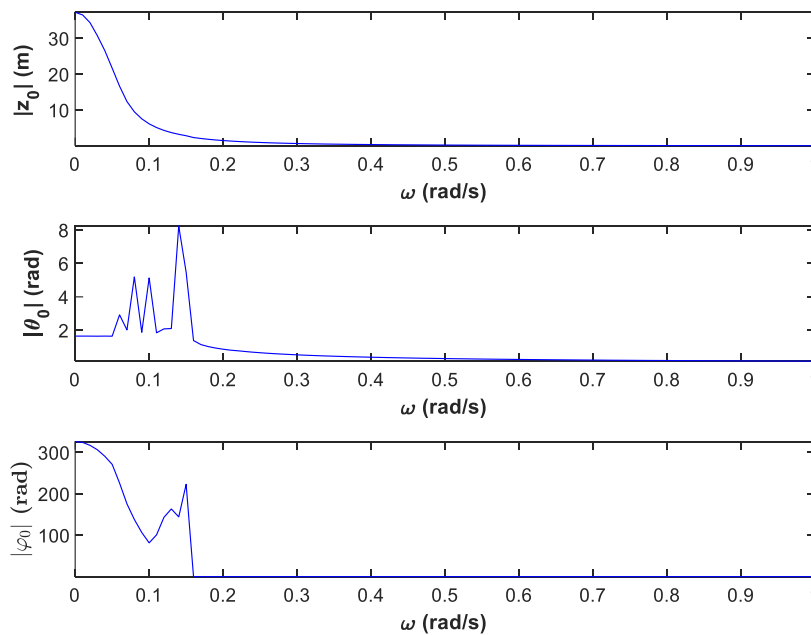
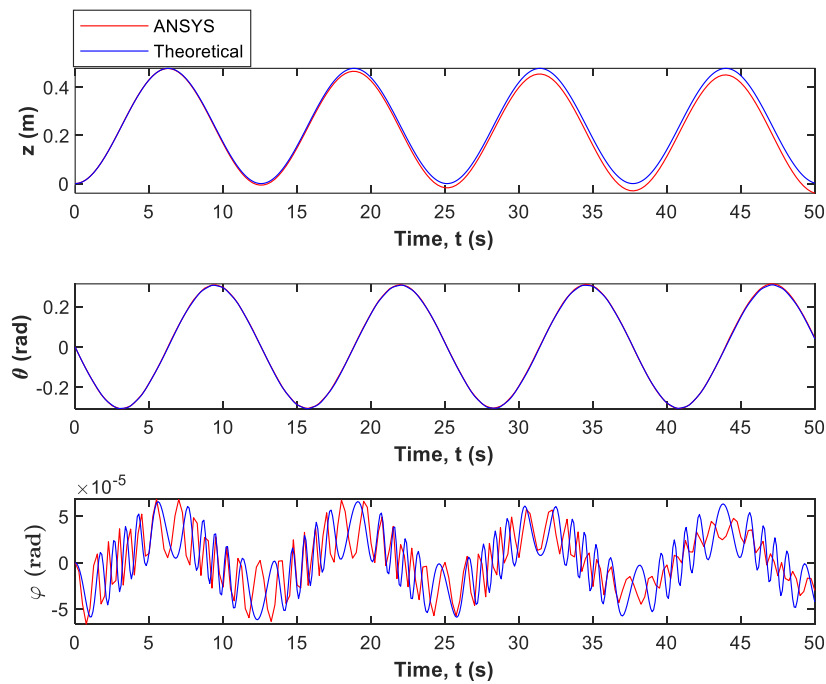


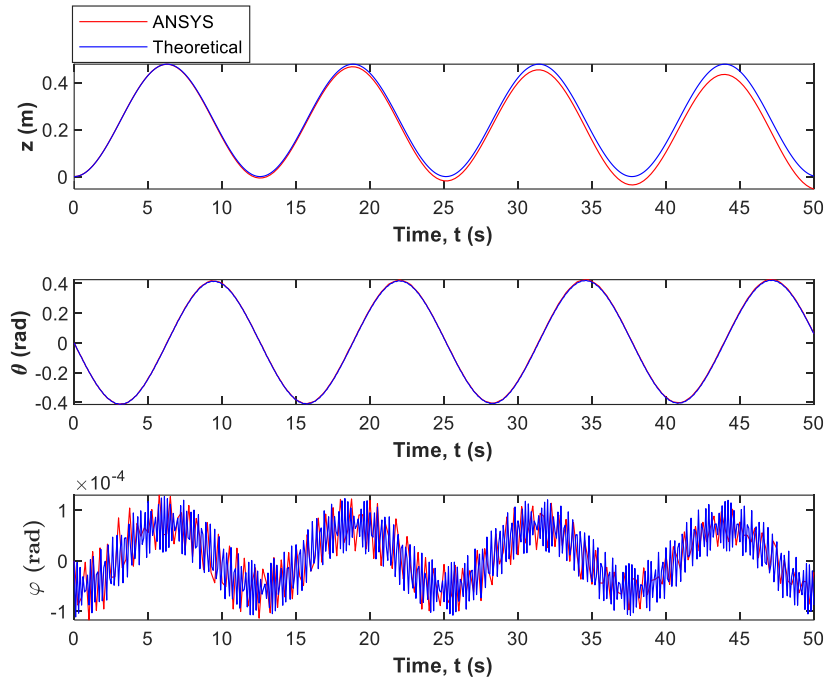
Figure 5. Influence of the angular frequency  $\omega$  for  $\tau_0 = 1 \text{ Nm}$  and  $\Omega = 2688 \text{ rad/s}$

### 3.2. Comparisons of Ansys and the Theoretical Results

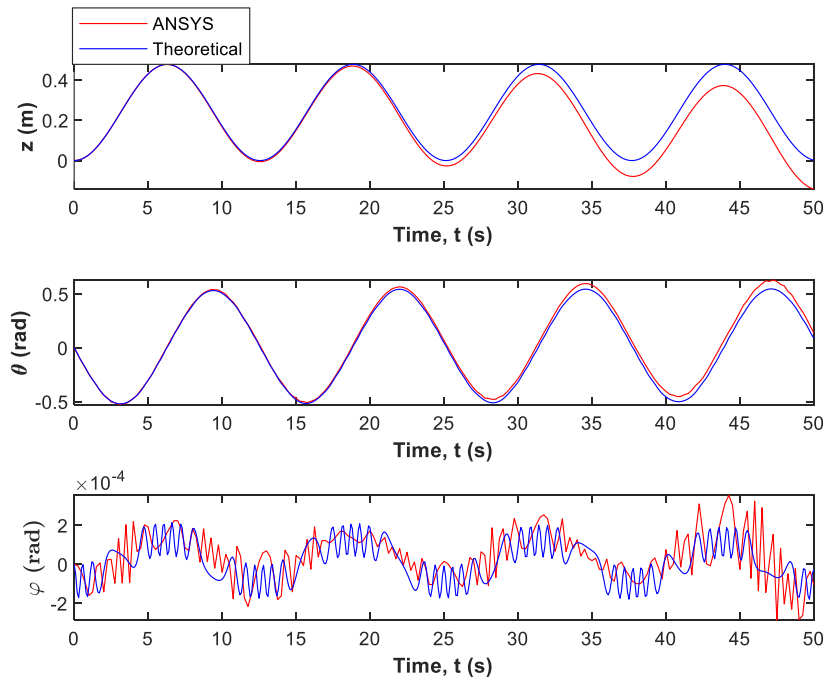
It can be seen from the comparisons that the results of the displacements agreed well and the simulations of ANSYS and the theoretical results are almost the same as provided in Figures 6 - 8. By increasing the gimbal amplitude, the required flywheel speed can be reduced. This means less angular momentum is needed for the robot's balance. The damping performance of the CMG was achieved by using low flywheel speed at large gimbal amplitude. However, in this case, it caused the oscillation amplitude of the robot body to increase. The oscillation amplitudes in Figure (3), plotted with the aid of Equation (15), contain minor errors due to the linearized equations. While a gyro's flywheel is rotating at a certain constant speed, the gimbal and body oscillate for the stability of the robot. That is, for the same preventing rollover performance, the required flywheel speed can be reduced if a higher roll amplitude of the gyro is used, taking into account the stability of the robot.



**Figure 6.** Comparison of ANSYS software and the theoretical results with the frequency  $\omega=0.5$  rad/s,  $\Omega = 2688$  rad/s, and  $\tau_0 = 1$  Nm for  $\theta_0=0.3$  rad



**Figure 7.** Comparison of ANSYS software and the theoretical results with the frequency  $\omega=0.5$  rad/s,  $\Omega = 2022$  rad/s, and  $\tau_0 = 1$  Nm for  $\theta_0=0.4$  rad



**Figure 8.** Comparison of ANSYS software and the theoretical results with the frequency  $\omega=0.5$  rad/s,  $\Omega = 1623$  rad/s, and  $\tau_0 = 1$  Nm for  $\theta_0=0.5$  rad

#### 4.CONCLUSIONS

In this study, the nonlinear dynamic equations of the robot with CMG were obtained using the Lagrangian approach. In addition, a CAE software (ANSYS) model was tested to check the damping capability of the GMG. As a result, it is seen that Lagrange model and ANSYS simulations are similar.

CMG can convert the angular momentum to unidirectional thrust at the center of body mass along the forcing excitation axis, which has considerably attenuated the vibration at the target frequency. However, the system becomes unstable when descending to low excitation frequencies at a constant speed of the flywheel. Since stability is dependent on angular momentum, damping performance improved as the flywheel speed of the gyroscope increased. This article demonstrates that there is a correlation between the flywheel speed and the gimbal's precession amplitude. Namely, when a high roll amplitude is used, the required angular momentum can be reduced for damping.

## ACKNOWLEDGEMENTS

## REFERENCES

- [1] Ünker, F. (2022). Proportional control moment gyroscope for two-wheeled self-balancing robot. *Journal of Vibration and Control*, 28 (17-18), 2310–2318. <https://doi.org/10.1177/10775463211009988>
- [2] Nghia, V.B.V., Van Thien, T., Son, N.N., & Long, M.T. (2022). Adaptive neural sliding mode control for two wheel self balancing robot. *Int. J. Dynam. Control*, 10, 771–784. <https://doi.org/10.1007/s40435-021-00832-1>
- [3] Chan, R.P.M., Stol, K.A., & Halkyard, C.R. (2013). Review of modelling and control of two-wheeled robots. *Annual Reviews in Control*, 37 (1), 89–103. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2013.03.004>
- [4] Alqudsi ,Y.Sh., Dorrah, H. T., Kassem, A. H., & El-Bayoumi, G. M. (2022). Robust compound control for wheeled inverted pendulum in an uncertain and disturbed environment. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 28, 101024. ISSN 2215-0986, <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2021.06.004>.
- [5] Abut, T., & Soyguder, S. (2022). Two-loop controller design and implementations for an inverted pendulum system with optimal self-adaptive fuzzy-proportional–integral–derivative control. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 44(2), 468-483. <https://doi.org/10.1177/01423312211040301>
- [6] Grasser, F., Arrigo, A.D., & Colombi, S. (2002). JOE: A mobile, inverted pendulum. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(1), 107–114.
- [7] Takei, T., Imamura, R., & Yuta, S. (2009). Baggage transportation and navigation by a wheeled inverted pendulum mobile robot. *IEEE Transactions on Industrial Electronic*, 56(10), 3985-3994.
- [8] Larimi, S.R., Zarafshan, P., & Moosavian, S.A.A. (2015). A New Stabilization Algorithm for a Two-Wheeled Mobile Robot Aided by Reaction Wheel. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 137(1), 011009 (8 pages).
- [9] Çuvalcı, O., Ünker, F., Baturalp, T. B., Gülbülak, U., & Ertaş, A. (2021). Modal Control of Cantilever Beam Using a Gyrostabilizer. *Sound & Vibration*, 55(4), 281—294. <https://doi.org/10.32604/sv.2021.015705>
- [10] Ünker, F., & Çuvalcı, O. (2019). Optimum Tuning of a Gyroscopic Vibration Absorber for Vibration Control of a Vertical Cantilever Beam with Tip Mass. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 24(2), 210–216. <https://doi.org/10.20855/ijav.2019.24.21158>
- [11] Ünker, F. (2020). Tuned gyro pendulum stabilizer for control of vibrations in structures. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 25(3), 355–362. <https://doi.org/10.20855/ijav.2020.25.31632>



- [12] Oueini, S., Nayfeh, A., & Pratt, J. (1999). A review of development and implementation of an active nonlinear vibration absorber. *Archive of Applied Mechanics*, 69, 585–620.  
<https://doi.org/10.1007/s004190050245>



## Elliptical Gear Design, Manufacturing, Analysis and Elliptical Gear Based Industrial Applications

İbrahim PAZARKAYA<sup>1\*</sup> Mehmet YAZAR<sup>2</sup> Ahmet ÖZDEMİR<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 03200, AFYONKARAHİSAR

<sup>2</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 17020, ÇANAKKALE

<sup>3</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Abstract

Elliptical gears are a specific type of gear used in situations where tooth profiles are arranged with equal steps on an ellipse and the driven shaft speed is desired to be changed within the same turn. The studies that covered elliptical gears focused on the design of tooth profiles, and the research increased on prototype manufacturing of elliptical gears. The elliptical gear tooth profile is developed based on the fact that the tooth profiles of elliptical gears are not identical to cylindrical gears and are obtained by shaping tooth flanks with involute curves by the rolling method on the section ellipse with a rack or cylindrical spur gear cutter. It has been determined that the use of CNC electrical discharge machining (EDM) in the manufacture of elliptical gears has preferably become the manufacturability of elliptical gears in standard modules by developing electronic gearboxes for hobbing machines. Elliptical gear pairs are used in different machines, mechanisms and equipment, especially flow meters, and pumps with elliptical gear pairs are widespread. In today's world, where energy efficiency is of utmost importance, it is necessary to measure the flow rates of high volumes of fluids accurately and precisely, as well as to eliminate the losses in fluid transfer. In this compilation study, the design of elliptical gears, traditional and non-traditional manufacturing methods, strength and vibration analyzes, and various industrial applications in the literature were evaluated, and the common result of the literary works was obtained. It is predicted that elliptical gears will be an indispensable part of many smart products that contain mechanical parts soon.

### Makale Bilgisi

Derleme makalesi  
Başvuru: 14.04.2022  
Düzeltilme: 22.06.2022  
Kabul: 28.07.2022

### Anahtar Kelimeler

Eliptik dişli  
Debimetre  
Hidrolik pompa  
CNC tel erozyon  
Azdırma tezgâhi.

### Keywords

Elliptical gear  
Flow meter  
Hydraulic pump  
CNC electrical discharge  
machine  
Hobbing machine.

## Eliptik Dişli Tasarımı, İmalatı, Analizi ve Eliptik Dişli Esaslı Endüstriyel Uygulamalar

### Öz

Eliptik dişliler, bir elips üzerine eşit adımlarla diş profillerinin dizildiği ve tahrik edilen mil hızının aynı dönüş içerisinde değiştirilmesi istenen durumlarda kullanılan özel bir dişli türüdür. Eliptik dişliler üzerine yapılan çalışmaların diş profillerinin tasarımı üzerine yoğunlaştığı ve prototip imalatlarına yönelik araştırmaların arttığı görülmektedir. Eliptik dişlilerin diş profillerinin silindirik dişliler gibi özdeş olmayacağından hareketle geliştirilen eliptik dişlinin diş profili; kramayer veya silindirik düz dişli formu kesicinin bölüm elipsi üzerinde yuvarlanma yöntemine uygun olarak evolvent eğriye sahip diş yanaklarının şekillendirilmesiyle elde edilmektedir. Eliptik dişlilerin imalatında CNC tel erozyon tezgahlarından faydalanmanın yaygınlaştığı, bununla birlikte azdırma tezgâhları için elektronik dişli kutuları geliştirilerek eliptik dişlilerin standart modüle imalatının da mümkün olduğu tespit edilmiştir. Eliptik dişli çiftleri farklı makine ve teçhizatda kullanılmakta, özellikle eliptik dişli çiftine sahip debimetre ve pompaların yaygınlaştığı görülmektedir. Enerji verimliliğinin son derece önem kazandığı günümüzde, yüksek miktardaki akışkanların debilerinin doğru ve hassas ölçülmesi, aynı zamanda akışkan transferindeki kayıpların da giderilmesi de gerekmektedir. Bu derleme çalışmasında eliptik dişlilerin tasarımı, geleneksel ve geleneksel olmayan imal usulleri ile imalatı, dayanım ve titreşim analizleri ve literatürde yer alan muhtelif endüstriyel uygulamaları gözen geçirilmiş ve çalışmanın ortak bulguları elde edilmiştir. Eliptik dişlilerin yakın gelecekte bünyesinde mekanik kısım barındıran birçok akıllı ürünün vazgeçilmez bir organı olacağı öngörülmektedir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eliptik dişli, bir elips üzerine eşit adımlarla diş profillerinin dizildiği ve sabit bir hızla tahrik edilen mil hızının aynı dönüş içerisinde değiştirilmesi istenen durumlarda kullanılan özel bir dişli türüdür. Bu dişli türü otomatik makinelerde, değişken çevrim oranı istenen mekanizmalarda, tekstil ve baskı makineleri gibi bir çok endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir.

Eliptik dişlilerin ilk örneği, İtalyan saatçi Giovanni Dondi'nin (1330 – 1388) el yazması Tractus Astarii' de Merkür ve Ay'ın hareketlerini takip eden bir saat mekanizmasında kullanılmıştır [1]. Bununla birlikte Leonardo da Vinci tarafından 17. yy' da anahtar açma tezgâhları, geneva mekanizmaları, müzik kutuları, otomatik oyun aletleri ve pompa gibi mekanik sistemlerde de yer aldığı tespit edilmiştir [2]. Ayrıca eliptik dişliler; paketleme, etiketleme, debimetre ve tekstil makinelerinde de kullanılmaktadır [3]. Düzlemsel çubuk mekanizmalarında, dairesel olmayan dişliler tarafından tahrik edilen donanımların artan doğruluk ve yüksek verimliliğe, özellikle dinamik yüklemelerde daha uygun dengeye sahip olduğu görülmektedir [4]. Eliptik dişli çarklarla ilgili çok sayıda teorik ve deneysel çalışma literatürde yer almaktadır. Bu çalışmalarda, kramayer biçimli kesici takımlarla eliptik dişlilerin diş profillerinin elde edilmesinde bilgisayar programlarından faydalanılmış, diş profilinin alttan kesimi incelenmiş, tel erozyon tezgahında imalatı yapılmış ve evolvent eğrisi ile üretilen dişliler birbiriyle karşılaştırılmıştır. Eliptik dişlilerin diş profillerinin dizildiği bölüm elipsinin geometrik denklemlerinin literatürde ayrıntılı bir şekilde yer aldığı görülmüştür [5]. Evolvent yönteminde, eliptik dişlinin bölüm elipsi üzerinde yuvarlanma hareketi yapan bir kesici takım ile dişlinin diş yanak profilleri oluşturulmakta ve bu yöntem için matematiksel modeller önerilmektedir [6].

Eliptik dişliler üzerine yapılan çalışmalar ülkemizde oldukça sınırlıdır. Yapılan bu derleme çalışmasında eliptik dişliler hakkında genel bilgilerin yanı sıra, literatürdeki çalışmalar hakkında bilgi verilmiş olup, araştırmacıların ilgisini eliptik dişliler üzerine çekmek ve ülkemizde eliptik dişli çiftlerine sahip katma değerli ürünlerin üretilmesine öncülük edilmesi amaçlanmıştır.

## 2. ELİPTİK DİŞLİLERİN TASARIMI

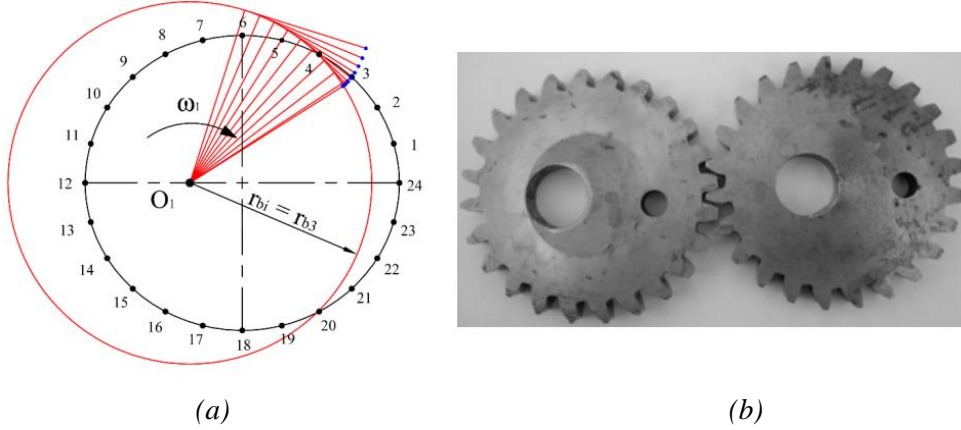
Eliptik dişliler, değişken hız oranlarına sahip hareketler için tasarlanabilmekte ve odak noktaları etrafında döndürüldüğünde düzgün bir şekilde dişler birbirini kavramaktadır. Eliptik dişlilerin adım eğrisi elips biçimli olduğundan tasarım ve imalatları zordur [7]. Dairesel olmayan dişlilerin adım eğrisi denklemi; sırasıyla, tahrik dişlisi adım eğrisi denklemi, merkezler arası uzaklık ve çıkış fonksiyonu olmak üzere üç veri ile belirlenmektedir [8]. Eliptik dişlilerin bir dönüşü sırasında dişli oranındaki sürekli değişim için bir adım ana hattı şekli tasarımı sunulmuş, dairesel olmayan dişlilerin bazı kinematik özellikleri gösterilmiş ve verilen parametreler için dairesel olmayan dişlilerin adım eğrilerinin tasarımının nasıl optimize edileceğini açıklanmıştır. Çalışılan dişli tertibatının kinematik özelliklerinin, silindirik düz dişliler gibi standart dairesel dişlilere nazaran farklı olduğu ortaya koyulmuştur. Dairesel olmayan dişlilerin, dairesel dişlilerin ve kam mekanizmalarının avantajlarının sentezlendiği ve sürekli değişken oran ile yüksek çıkış gücü ve mükemmel doğruluğun bir kombinasyonunu sunduğu görülmektedir [9]. Bazı çalışmalar, eliptik adım elipslerinin kinematik analizi ve bilgisayar destekli tasarımına odaklanmıştır [10]. Eliptik dişlilerin tasarım ve imalatlarında, standart modüllerin kullanılması için bölüm elipsinin çevre uzunluğunun doğru olarak hesaplanması gerekmekte ve buna yönelik farklı eşitliklerin ve revizyonlarının literatürde yer aldığı tespit edilmiştir [11]. Bölüm elipsinin çevre uzunluğunun hesaplanması yaklaşık çözümler içermekte ve en yaygın karşılaşılan yaklaşık hesap Ramanujan denklemi olarak bilinmektedir [12]. Bölüm elipsinin çevre uzunluğunun hesaplanmasının bir diğer yöntemi analitik hesaplama yöntemidir. Yöntem, elipsin odak noktasından anlık yarıçapların hesaplanmasına ve eliptik eğri üzerinde oluşan noktalar arasındaki sonsuz küçüklükteki doğruların toplanması esasına dayanmaktadır. Eliptik dişlilerde bölüm elipsinin analitik olarak hesaplandığı bir çalışmada [13], analitik yöntem ile bölüm elipsinin çevre uzunluğunun, MATLAB ve CATIA V5 paket programından elde edilen çevre uzunlukları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Eliptik dişlilerin tasarımında karşılaşılan problemlerden birisi, aynı dişlinin tüm dişleri değil, aynı dişin iki yanak profilleri arasında dahi fark oluşmasıdır. Bu, karmaşık matematiksel denklemlerin dikkate alınmasını

ve çözümlemede bilgisayar destekli tasarım programlarından faydalanmayı gerektirmektedir [14]. Diş profillerinin oluşturulması ile ilgili literatürde muhtelif çalışmalar bulunmakta ve dişli modellerinin elde edilmesinde çoğunlukla kramayer veya silindirik dişli formlu kesiciler tercih edilmektedir. Bu kesicilerle bölüm elipsi üzerinde yuvarlanma ve doğrusal kesme hareketi esnasında diş formları elde edilmektedir. Diş profillerinin oluşturulması amacıyla MATLAB paket programında bir algoritma geliştirilmiş ve diş profillerini elde edilmiştir [15]. Diğer bir çalışmada, merkezleri birbirine bağlı yaylar ile oluşturulan bir bölüm elipsi modeli önerilmiş, düz dişli formunda bir kesici takımla yuvarlanma yöntemine dayalı olarak eliptik dişli modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bu model, eliptik dişlilerde sadece diş profilini değil aynı zamanda dişin alttan kesme unsurunu da belirlemede kullanılmıştır. Bu model esas alınarak üretilen eliptik dişlilerin yağ, fuel-oil ve su iletiminde yer alan hidromakinelerde tercih edilebileceği beyan edilmiştir [16].

Standart düz dişli diş profili dışındaki farklı tip diş profiline sahip eliptik dişlilerin diş profillerini elde etmenin bir başka yolu, farklı diş profillerine sahip kramayer kesiciyi bölüm elipsi üzerinde yuvarlama yöntemi olarak önerilmiştir. Diş profili çift dairesel yay olan helisel dişlilerin matematiksel modeli geliştirilmiş, kinematik hataları dikkate alınmış ve anlık temas elipsleri analiz edilmiştir [6]. Benzer şekilde dışbükey-içbükey diş profili temas yüzeyine sahip dairesel yaylı diş profilli eliptik dişlilerin matematiksel modeli geliştirilmiş ve bir bilgisayar programı yazılmıştır. Diş profili kramayer bir kesiciye dönüştürülerek, yuvarlanma yöntemi ile eliptik dişli oluşturulmuştur. Dairesel yaylı diş profilli eliptik dişlinin tahrik yük kapasitesinin, evolvent diş profilli eliptik dişlinin tahrik kapasitesinden daha büyük olduğu görülmüştür. Yağ pompasında dairesel yaylı diş profilli eliptik dişli tahriki kullanıldığında, diş sayısı az olan dişlilerin seçilmesi halinde, eliptik adım eğrilerinin eksantrikliğini artırabileceği ve pompalama hacminin artmasına neden olabileceği tespit edilmiştir [17]. Eliptik dişlilerin diş profillerinin elde edilmesine yönelik çalışmalarda, bilgisayar destekli modelleme ortamında, makro program yazılarak istenilen modül ve diş sayılarında tasarlamak daha kolay hale gelmiştir. Bir elipsin evolvent eğrisi ve elipsin çevresini eliptik integral ve Fourier serisi ile yaklaşık bir çözümünü MAPLE paket programında modellenmiş ve örnek uygulama yapılarak ortaya koyulmuştur [18]. Diğer bir çalışmada, dairesel olmayan dişli, çift basınç açısına sahip simetrik olmayan diş profilli olacak şekilde tasarlanmıştır. Dairesel olmayan dişli için adım eğrisi boyunca simetrik olmayan diş profili merkez hattının ve yuvarlanma durumunun matematiksel modeli elde edilmiş ve dairesel olmayan dişli çifti oluşturulmuş, dişlilerin hareketleri, mekanik ve kinematik simülasyon yoluyla doğrulanmıştır. Çift basınç açılı dairesel olmayan dişlinin, tek basınç açılı dairesel olmayan dişlilere göre tercih edilebilir mekanik özelliklere sahip olduğu beyan edilmiştir [19]. Bilgisayar destekli 2B'lu çizim ortamında; eliptik düz dişlilerin literatürdeki denklemleri kullanılarak istenilen modül ve diş sayısına göre eliptik dişli oluşturacak bir LISP programı [20] geliştirilmiştir. Program ile 5 farklı eliptik dişli modellenmiş, CNC tel erozyon tezgahında dişliler üretilmiş ve eliptik dişliler bir hidrolik pompa düzeneğinde çalıştırılmıştır. Pompanın rotor dişlisinin devir sayısındaki artışın, eliptik düz dişlilerin çevresel hızlarında artışa yol açtığı, bu durumda gürültü seviyesinin dişlilerin modüllerinin artmasıyla birlikte 100 dev/dk' da 50 – 65 desibel (dB) aralığında, 1000 dev/dk' da 85 – 95 dB aralığında olduğu tespit edilmiş ve diş profilinin aşınmasında artışa neden olduğu beyan edilmiştir. Devir sayısının artmasıyla birlikte pompalama basıncının da arttığı tespit edilmiştir. Eliptik dişlinin rotor dişlisinin 40 dev/dk' da oluşturduğu basınç 4 bar, 175 dev/dk' da 10 bar olduğu görülmüştür [20].

Eliptik dişliler, değişken çevrim oranı istenen şanzımanlarda da tercih edilmektedir. Bu dişlilerin iletim oranlarının rijitliğinden dolayı değişik tipte diş profilli eliptik dişliler tasarlanmış ve kinematik analizleri yapılmıştır [21,22]. Çevrim oranları sırası ile 0,5; 1 ve 2 olan sürekli değişken çevrim oranlı bir şanzıman geliştirildiği, bu şanzıman için bir çift özdeş eliptik dişli ve uygun bölüm elipsi tasarım prosedürü önerilmiştir. Dişlilerin her birinin dönüş merkezinin, elips odakları ile çakışması için dişliler eksantrik olarak yerleştirilmiş ve eliptik dişli çiftlerinin diş profilleri asimetric olarak elde edilmiştir (Şekil 1). Ayrıca değişken çevrim oranlı şanzımanın, sabit çevrim oranlı dairesel dişlilerden oluşan şanzıman ile olan farklılıkları ve kinematik özellikleri tartışılmıştır [23].



**Şekil 1.** a) Eliptik dişlinin dış profil eğrisinin oluşturulması. b) İmal edilen eliptik dişli çifti [23].

Bir diğer çalışmada, bölüm elipsinin çizim yöntemi açıklanmış ve ProE ortamında farklı eksantrikliğe sahip birden fazla eliptik dişli modellenmiştir [24]. Eliptik dişlilerin hareketleri ADAMS paket programında simüle edilmiş ve eliptik dişlilerin hareket iletim özellikleri tartışılmıştır. Ayrıca gerçek ve sanal ortamdan elde edilen hareket verilerinin uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Eliptik dişlilerin bir debimetrede kullanılabileceğini, farklı eksantrikliğe sahip eliptik dişlilerin süpürdüğü hacmin hesaplanabileceği ve eksantriklik aralığına göre en uygun eliptik dişli çifti seçiminin önceden yapılabileceği ortaya koyulmuştur [24]. Eliptik dişlilerin tasarım parametreleri ile ilgili literatürden elde edilen bilgiler Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Literatürdeki tasarımı yapılmış eliptik dişliler.

Endüstriyel Uygulama	Tasarım Bilgileri						Yöntem	Kaynak
	Modül (m)	Diş sayısı (z)	Büyük yarıçap (a), (mm)	Küçük yarıçap (b), (mm)	a/b oranı	Basınç açısı		
Dairesel yaylı diş profilli eliptik dişli tasarımı	5	35-49	125			20°	Tasarım	[17]
Eliptik dişli tasarımı ve kinematik analizi	2,00	19	20,337	17,644	1,152	20°	Tasarım	[24]
			21,045	16,836	1,250			
Eliptik dişli tasarımı	0,7	62	27,067	14,574		30°	Tasarım	[77]

### 3. ELİPTİK DİŞLİLERİN İMALATI

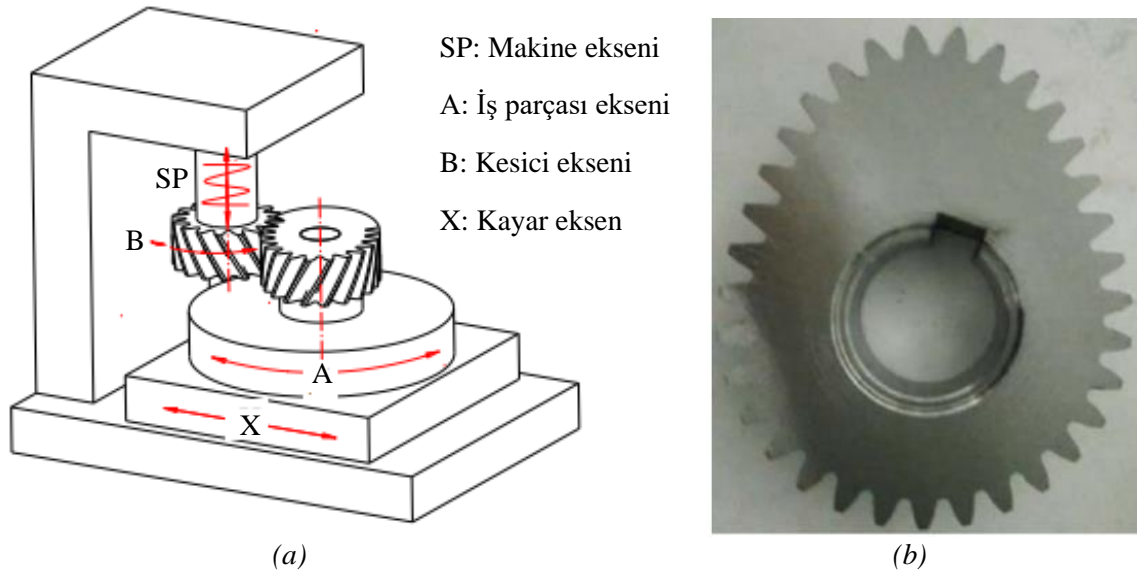
Eliptik dişlilerin imalatı üzerine yapılan çalışmalarda, üretim yöntemleri tartışılmış ve modern endüstride dairesele olmayan dişliler iyi bir şekilde imal edilebilmiştir [25]. Farklı imalat yöntemleri arasında hem dış hem de iç dişliler için kullanılabilen, kesici yarıçap ayarıyla adım ayarlanabilmektedir ve alttan kesme unsurunu önleyebilen dişli şekillendirmenin, eliptik dişli imalatı için uygun olduğu kabul edilmektedir [26,27]. Dairesel olmayan dişli şekillendirme ile ilgili, bilgisayarlı diş profili hesaplanması ve alttan kesme unsurunun analizi dahil olmak üzere dairesele olmayan dişli üretiminin matematiksel modeli açıklanmıştır [28]. Dairesel olmayan dişlilerin imalat işleminin grafik algoritması belirlenmiş ve sayısal bir hesaplama yöntemiyle de gösterilmiştir [29]. Düz dairesele olmayan dişlinin teorik bağlantı modeli ve pratik süreci tartışılmış, dairesele olmayan iç ve helis dişlilerin işleme süreci geliştirilmiş ve her türlü dairesele olmayan dişlinin 3 eksenli bir takım tezgahında imalatı gerçekleştirilmiştir [30,31]. Daha yakın zamanlarda, aynı özelliklere sahip olmayan bir yuvarlanma yöntemi önerilmiş ve dairesele olmayan dişlilerin seri üretimi

için bir makine geliştirilmiştir [32]. Eliptik dişliler geleneksel ve geleneksel olmayan imalat yöntemleriyle üretilebilmektedir.

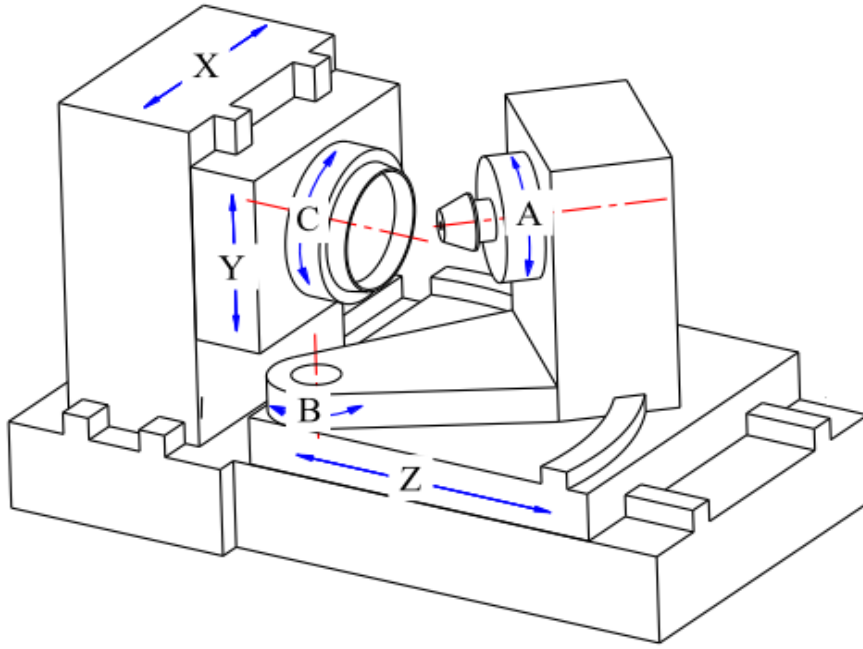
Eliptik dişlilerin geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi için dişli üretim tezgahlarının yapılandırılması gerekmektedir, diğer taraftan geleneksel olmayan imalat yöntemi olarak CNC tel erezyon tezgâhı tercih edilmektedir.

### 3.1. Geleneksel İmal Usulleri ile İmalat

Dişlilerin geleneksel imal usulleriyle üretilmesinde, azdırma, Fellow ve Maag yöntemlerinden birisi kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden birisini kullanan takım tezgâhları, uyguladığı yöntem ile adlandırılmaktadır. Örneğin azdırma tezgâhı, fellow tezgâhı gibi isimlendirilmektedir. Literatürde azdırma ve Fellow yöntemi ile üretilmiş eliptik dişlilere rastlanılmıştır. Fellow yöntemi, silindirik dişli formu bir kesicinin, yukarı, aşağı ve kendi eksenini etrafında dönme hareketiyle birlikte, iş parçasının kendi eksenini etrafında dönmesiyle, yuvarlanma esasına dayanan dişli şekillendirme işlemidir. Dairesel olmayan dişlilerin adım eğrisi normalleri işleme sırasında sürekli değiştiğinden, adım eğrisi normalleri ile kesici takımın arasında açı oluşmaktadır. Bu durum kesici takımın geri kaçmasına neden olmaktadır. Kesici takımın geri kaçmasını önlemeye yönelik bir Fellow tezgâhı için 4 eksenli, programlanabilir bir tezgâh modeli geliştirilmiş (Şekil 2), matematiksel modelin ardından dairesele olmayan dişlinin imalatı gerçekleştirilmiştir. [33]. Spiral konik dişli imalatında yaygın olarak kullanılan yüzey frezeleme yöntemi ile bir dişli tezgâhı (Şekil 3), dairesele olmayan dişli imalatına uyarlanmış ve yeni tip dairesele olmayan bir dişli türü imal edilmiştir. Yeni tip dairesele olmayan dişlinin dişleri, diğer dairesele olmayan dişlilerin dişleri gibi doğrusal formu değil, yay parçası şeklinde oluşturulmuştur (Şekil 4). Bu yay biçimli diş formu daha yüksek temas oranına sahip ve helisel dairesele olmayan dişlilere kıyasla daha küçük aksenal kuvvet oluşturduğunu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yeni tip dairesele olmayan dişli çiftlerinin çalışma esnasında, diş profillerinin iç bükümlerinde yağı tutabilme özelliği ile daha fazla yağlama yaptığı çalışmada vurgulanmıştır [34].



Şekil 2. A) 4 eksenli takım tezgahının şematik görüntüsü. B) Yapılandırılmış tezgah ile üretilmiş dairesele olmayan dişli [33].



- A: İş mili ekseni.  
 B: Taban açısı ekseni.  
 C: Kesici ekseni.  
 X: Yatay kayar eksen.  
 Y: Dikey kayar eksen.  
 Z: Talaş derinliği ekseni.  
 X ve Y: Sanal beşik eksenleri.

**Şekil 3.** Spiral konik dişli tezgahı [34].



(a)



(b)

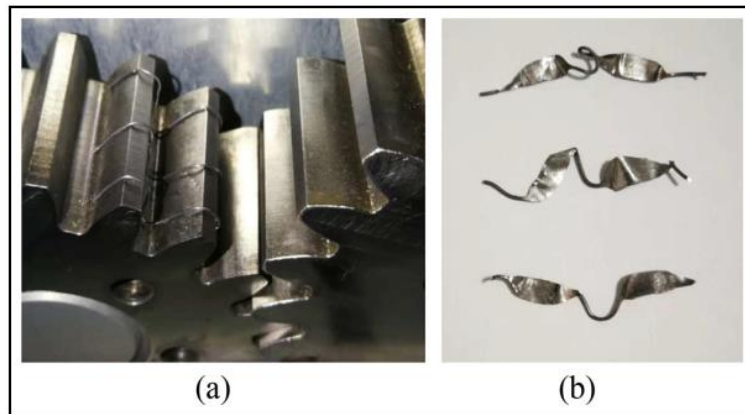
**Şekil 4.** a) Yeni tip dairesel diş formu dairesel olmayan dişli. b) Doğrusal diş formu dairesel olmayan dişli [34] [20].

Literatürde eliptik dişlilerin azdırma tezgahında imalatları ile ilgili yapılan çalışmalar yer almaktadır. Eliptik dişlilerin azdırma tezgahında imalatı sırasında meydana gelen bağlantı modelleri ve azdırma frezesinin talaş derinliğine doğru hareketi tarafından üretilen ek hareketi üzerine araştırmalara rastlanılmıştır. Dairesel olmayan dişlileri azdırma tezgahında üretebilmenin yolu, birden fazla eksen arasında zamanla değişen hız oranının korunabilmesidir. Elektronik dişli kutusu, dairesel olmayan dişlilerin üretilmesinde etkili bir çözüm olduğu tespit edilmiştir [35,36]. Dairesel olmayan dişlilerin imalatında, kesici takım ile iş parçası arasında sürekli temas sağlamak amacıyla işleme enterpolasyonu geliştirilmiştir. Enterpolasyon yöntemi, CNC tezgahının donanım yapısına dayalı olarak bir azdırma tezgahına uygulanılarak deneysel olarak doğrulanmıştır. Doğrulama işlemi için, bir çift eliptik dişli imal edilmiş ve dişli çiftinin performansını değerlendirmek için imal edilen bir pompada deneyler yapılmıştır. Geliştirilen

yönteme göre bölüm elipsinin, hızı ve ivmesinin işleme sürecinde sürekli olduğu ve hataların %90'dan daha fazla azaldığı sonucuna varılmıştır [37]. Jiang Han ve arkadaşları tarafından, dairesel olmayan bir helisel dişlinin azdırma tezgahında imalatı incelenmiş, geliştirilmiş bir azdırma bağlantı modeli üzerine çalışılmış, kinematik simülasyon testi gerçekleştirilmiş, enterpolasyon prosesi analiz edilmiş ve azdırma deneyi yapılmıştır. İki elektronik dişli kutusu şemasıyla enterpolasyon hataları iyileştirilmiş, hız oranı bağlantı modeline göre tasarlanan şemayla ve her bağlantı ekseninin yer değiştirme fonksiyonuna dayalı olarak azdırma şeması da ortaya koyulmuştur. Azdırma ve diş formu oluşturma deneyleri, azdırma bağlantı modelinin kesinliği ve enterpolasyon hesaplama hatalarının iyileştiği doğrulanmıştır [38].

Eliptik dişlilerin imalatında gerekli olan diş üstü elipsinin de hassas bir şekilde işlenmesi gerekmektedir. Dairesel olmayan CNC tornalama, kamlar, eksantrik milleri ve dış bükey elips pistonlar gibi elemanları üretmek oldukça yaygındır [39,40]. Dairesel olmayan tornalamada, tornalama işlemi sırasında eğrilik ve kesme yarıçapı anlık olarak değişir. Bu nedenle, iş mili geleneksel tornalama işleminde olduğu gibi sabit devir sayısında dönerse, kesici ucun ve iş parçasının bağıl hareketi ile oluşan kesme açısı ve ilerleme hızı periyodik olarak değişir. Bu durum büyük kesme kuvveti dalgalanmalarına ve düşük yüzey kalitesine sebep olur [41]. Form şekil tamlığı ve mevcut dairesel olmayan tornalamayı esas alarak, konumlandırma doğruluğu üzerine çalışılmış ve hızlı radyal servo sürücüler ile eksenleri kontrol edilen yeni tip torna tezgâhı üretilmiştir. Bu torna tezgâhı, biçim hatasını doğrudan bir amaç olarak ele alan yeni bir kontrol yapısına sahip olduğu görülmüştür. Prototip torna tezgahıyla yapılan deneyler sonucunda, önerilen yöntemin yalnızca motor sürücülerinin hata kontrolünü izlemeye odaklanan geleneksel kontrolörlere kıyasla form hatalarını yaklaşık %30 azalttığını saptanmıştır [42].

Dairesel olmayan dişlilerin iletim doğruluğu ve kararlılığını artırmak amacıyla, bir konik silindirik dişli tasarım yöntemine benzer şekilde, konik dairesel olmayan dişli çifti tasarlanmıştır. Bu dişli, C eksenli bir CNC torna tezgahında, küresel uçlu kesici takımla eliptik konik dişli üretilmiş ve dişlilerden bir tanesi üzerine Şekil 5'te gösterildiği gibi kurşun tel yerleştirilmiştir. Dişlilerin çalışma esnasında düzleşen kurşun tellerin toplam kalınlığı, normal çalışma boşluğu olarak kabul edilmiştir. Deneylerden elde edilen bulgular; konik helisel dairesel olmayan dişlilerle, aksel yer değiştirme yöntemi kullanılması diş boşluğu için uygun olmadığı ve konik düz dairesel olmayan dişlilerde boşluk ayarı yapılabildiği sonucuna varılmıştır. Konik dairesel olmayan dişli çiftinin diş yüzeylerinin anlık teması, düz bir çizgi oluşturmuş, diş yüzeyi tipinin çizgili bir yüzey olduğu ve dişlilerin diş yüzeyi, birbirine geçme etkisini azaltabilen bir helisel dairesel olmayan dişlinin özelliklerini sergilediği tespit edilmiştir. Normal boşluğun sayısal değişiminin orantılı ilişkisi, aksel yer değiştirmenin orantılı ilişkisine eşit olduğu belirlenmiştir. Kesme prensibine dayalı olarak elde edilen diş yüzeyinin geometrik modelinin, gerekli iletim gereksinimlerini karşılayabilmiştir. Boşluk ayarının, bilgisayarlı sayısal kontrol işleme deneyleriyle birlikte kurşun telin ezilme analiziyle de doğrulanabilir olduğunu gösterilmiştir [43].



**Şekil 5.** a) Diş boşluklarına yerleştirilen kurşun tel. b) Çalışma sonrası düzleşen kurşun tel [43].

Modern endüstride, mekanik tahrikin yüksek doğruluğunun istenmesi nedeniyle eliptik dişlilerin taşlanması da gereklidir. Dişlilerin özellikle ısıl işlem sonrası diş formlarının ve yüzey pürüzlülüklerinin giderilmesi gereksiniminden dolayı dişli taşlama işlemi yapılmaktadır. Dişli taşlama tezgâhı ve dişli tipi, taşlama taşının biçim ve özelliklerini belirlemektedir. Dişli taşlamada diş profillerinin yan yüzeyleri taşlanmaktadır ve



azdırma freze çakısı yerine, taş bağlanarak yapılmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte CNC taşlama tezgahlarından faydalanılmaktadır. Dişli taşlama, sonsuz vida, konik dişli ve profil taşlama işlemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır ve eliptik dişliler üzerinde de uygulanabilir durumdadır. Özellikle sertleştirilmiş eliptik dişliler için taşlama ana yöntemdir. Ancak, eliptik dişlilerin taşlanması hakkında sınırlı bilgi mevcuttur. Eliptik dişlilerin, dişleri birbirinden farklı olduğundan dolayı eliptik dişlilerin taşlanabilmesine yönelik matematiksel model oluşturulmuştur. Matematiksel modeller; hareket oluşturma, diş profiline göre pozisyonlanma analizine göre, her bir diş için uzunluk formülü geliştirilmiş ve CNC konik dişli taşlama tezgâhı ile eliptik dişlilerin taşlanması mümkün olduğunu gösterilmiştir [44].

Dairesel olmayan dişliler, dairesele dişliler gibi azdırma ve fellow dişli açma yöntemleriyle açılabilir. Dairesel olmayan dişlileri, geleneksel yöntemlerle imal edebilmek için, mekanik dişli açma tezgahlarına elektronik sistemler eklenerek veya CNC dişli açma tezgahlarında üretilebilir. Ancak geleneksel imalat yöntemiyle standart modüldeki dairesele olmayan dişliler açıldığı görülmüştür. Eliptik dişlilerin geleneksel imal usulleriyle üretim parametreleri literatürden elde edilen bilgiler doğrultusunda Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Literatürdeki geleneksel imal usulleri ile imalatı yapılmış eliptik dişliler.

Endüstriyel Uygulama	Tasarım Bilgileri						Yöntem	Kaynak
	Modül (m)	Diş sayısı (z)	Büyük yarıçap (a), (mm)	Küçük yarıçap (b), (mm)	a/b oranı	Basınç açısı		
Eliptik dişli tasarımı ve imalatı	2,00	42				20°	Freze tezgahında vargelleme usulü imalat	[32]
Eliptik dişli tasarımı ve imalatı	2,00	33				20°	Fellow tezgâhı ile imalat	[33]
Eliptik dişli tasarımı ve imalatı	2,00	32					Yüzey frezeleme yöntemiyle imalat	[34]
		48						
Eliptik dişli tasarımı ve imalatı	1,00	54	67,355	36,268		20°	Azdırma tezgâhı ile imalat	[37]
Eliptik dişli tasarımı ve imalatı	4,00	21					Azdırma tezgâhı ile imalat	[38]

### 3.2. Geleneksel Olmayan İmal Usulleri ile İmalat

Eliptik dişlilerin bir diğer üretim yöntemi CNC tel erozyon tezgahında (CNC tel EDM) kesilmesidir. Bu yöntemin avantajı standart modüle bağımlı olunmamasıdır. Tel erozyon tezgahında işleme (WEDM) yöntemi kullanılarak dairesele olmayan dişlilerin işlenmesinde yenilikçi bir yöntem ortaya koyulmuştur [45]. CNC tel EDM yönteminin kullanılabilmesi için bilgisayar destekli modelleme ve imalat programlarından faydalanılmaktadır. Eliptik dişlilerin imalatına yönelik, AutoCAD bünyesinde yer alan AutoLISP ortamında paket program yazılmış, paket programla 5 farklı modül ve diş sayısına sahip eliptik dişli çifti oluşturulmuş ve CNC tel EDM yöntemi ile imal edilmiştir. Dişlilerin ANSYS paket programında doğal frekansları bulunmuş, eksen kaçıklıkları bir deney düzeneği ile belirlenmiş ve eksen kaçıklıklarının doğrusal olduğu, sapmanın 5,6 µm olarak saptanmış ve modüldeki artışa bağlı olarak hesaplanabildiği ortaya koyulmuştur [46]. WEDM yönteminin; eliptik dişlilerin imalatı performans bakımından diğer

yöntemlere göre daha kötü olmadığı vurgulanmış, bu yöntemle yüzey kalitesinde bozulma ve malzemede faz değişimi olmadan dişli çark imal edilebileceği beyan edilmiştir [47]. Eliptik dişli prototiplerinin imalatında eklemeli imalat (3D yazıcı) ile üretimin tercih edildiği literatürde görülmüştür. 0,01 mm köşe keskinliğine, yüzey pürüzlülüğü  $R_a = 1,6\mu\text{m}$ 'ye sahip eliptik dişli eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş ve SolidWorks ortamında döndüren eliptik dişlinin açılma hızı 100 rad/s ile hareket analizi yapılmıştır. Döndürülen eliptik dişlinin en küçük açılma hızı 50 rad/s ile 12. dişte olduğu tespit edilmiştir [23].

Eliptik dişlilerin her bir dişinin hatta aynı dişin, iki yan profilindeki farklılıklarından dolayı geleneksel olmayan imal usulleri imalatı daha uygundur. Bu yöntemler arasında öne çıkan WEDM yöntemidir. Bunun nedeni, WEDM tezgâhları için bilgisayar destekli imalat programları ile G kodlarının rahatlıkla üretilebilmesi ve tasarıma en yakın sonucun bu yöntemle alınabilmektedir. Ayrıca WEDM yöntemi ile istenilen sertlikteki eliptik dişliler metal malzemelerden kesilebilmektedir. Su jeti ve CNC lazer tezgâhlarında eliptik dişlilerin kesilmesi ile ilgili literatürde bir bilgiye rastlanılmamıştır. Bunun nedeni, su jeti ve CNC lazer kesimlerinde, malzemenin kesilmesi esnasında suyun veya lazerin giriş noktası ile çıkış noktası arasında açı oluşmasıdır, özellikle genişliği büyük dişlilerde bu durum net bir şekilde görülmektedir. Bu sebepten dolayı su jeti gibi diğer geleneksel olmayan imal usulleri tercih edilmemiştir.

Eliptik dişlilerin diğer dişli türlerinde olduğu gibi toz metalürjisi ile üretimi bir kalıp yardımıyla gerçekleştirilebilir. Bu yöntem ile WEDM yöntemine göre eliptik dişlilerin çok daha seri bir şekilde üretimi mümkündür. Ancak literatürde eliptik dişlilerin toz metalürjisiyle üretimi hakkında yayımlanmış bir esere ulaşılamamıştır. Eliptik dişlilerin tasarım ve imalat parametreleri ile ilgili literatürden elde edilen bilgiler Tablo 3'de verilmiştir.

**Tablo 3.** Literatürdeki geleneksel olmayan imal usulleri ile imalatı yapılmış eliptik dişliler.

Endüstriyel Uygulama	Tasarım Bilgileri						İmal Usulü	Kaynak
	Modül (m)	Diş sayısı (z)	Büyük yarıçap (a), (mm)	Küçük yarıçap (b), (mm)	a/b oranı	Basınç açısı		
Eliptik dişli tasarımı ve imalatı	1,50	36	32,770	19,630	1,669	20°	CNC tel erezyon tezgâhı ile imalat	[78]
	1,75	33	35,040	21,025	1,521			
	2,00	32	38,850	23,300	1,667			
	2,25	31	42,330	25,400	1,666			
	2,50	30	45,510	27,310	1,666			
Eliptik dişli tasarımı ve imalatı	1,50	36	33,491	19,596	1,709	20°	CNC tel erezyon tezgâhı ile imalat	[20]
	1,75	33	35,444	21,441	1,653			
	2,00	32	39,649	23,300	1,701			
	2,25	31	43,199	25,399	1,700			
	2,50	30	46,451	27,302	1,701			
Eliptik dişli tasarımı ve imalatı		24	45	42,426		20°	Eklemeli (3D yazıcı) imalat	[23]

#### 4. ELİPTİK DİŞLİLERİN DAYANIM VE TİTREŞİM ANALİZİ

Bilgisayar teknolojisinin ilerlemesiyle birlikte birçok sektörde olduğu gibi mühendislik alanında da bilgisayar sistemlerinin kullanımı artmıştır. Mühendislik alanında özellikle bilgisayar destekli tasarım, imalat ve analizleri (CAD/CAM/CAE sistemler) ile ilgili birçok yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yazılımlar sayesinde, geliştirilen mekanik donanımların sonlu elemanlar analizi ile çalışma esnasındaki davranışı önceden tespit edilebilmektedir. Bununla birlikte, bu donanımların hem teoriye dayalı hem de deneysel yöntemlerle de davranışları tespit edilmektedir. Literatürde yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu

deneysel yöntemlerle elde edilen analiz sonuçlarının, sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve elde edilen verilerin uyumlu olduğu görülmüştür.

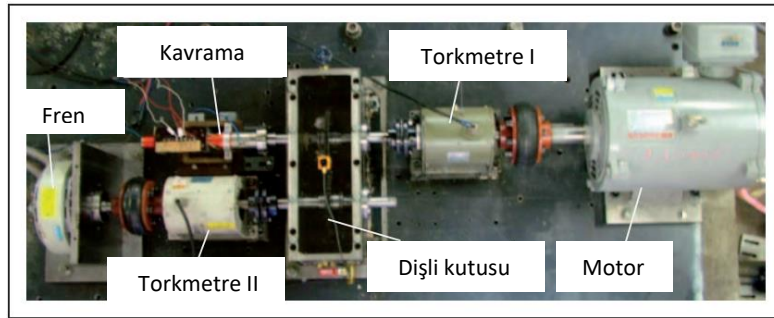
Bu bölümde, eliptik dişli çarklar üzerinde yapılmış çalışmalar analitik, deneysel ve bilgisayar destekli mühendislik olarak üç başlıkta toplanmış ve literatürde bulunan bazı çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

#### 4.1. Analitik Yöntem ile Analiz

Son yıllarda eliptik dişlilerin dinamik davranışları da incelenmiş ve dişli dişlerinin temas noktalarındaki deformasyon, dinamik davranış ve titreşim odaklı yapılan çalışmalar literatürde yerini almıştır. Eliptik dişlilerin eksantriklik ve değişken aktarım oranı dikkate alınarak dinamik davranışlarını incelemek amacıyla bir eliptik dişli çifti modellenmiştir [48]. Diğer bir çalışmada, doğrusal olmayan dinamik bir model kurulmuş ve frekans değişimi incelenmiştir [49]. Planet dişlilerin doğrusal olmayan dinamik özelliklerinin ele alındığı ve analitik yöntemlerle çözümlerin önerildiği çalışmalar da literatürde bulunmaktadır [50]. Eliptik dişlilerin zamanla değişen, eksantrikliği ve dış torka maruz kalan eliptik dişli çiftinin parametrik titreşimleri ve kararsızlıkları araştırılmış, bölüm elipsinin değişen yarıçapı, kinematik teoriye dayalı formüle edilmiş, doğal frekanslar ve titreşim modları hesaplanmıştır [50]. Eliptik dişlilerin doğal frekansları, titreşim modları ve parametrik kararsızlıkları sistematik olarak araştırılmıştır [51]. Dişli mekanizmalarındaki rezonansları önlemek için, dairesel olmayan dişlilerin uygulanabilirliği üzerine yoğunlaşmıştır [52].

#### 4.2. Deneysel Yöntem ile Analiz

Eliptik dişlilerin titreşim ve dayanımlarını ele alan deneysel çalışmalar literatürde yer almaktadır. Eliptik dişlilerin titreşim özellikleri üzerine bir simülasyon yöntemi önerilmiş, burulma titreşim simülasyon modeli kurulmuş ve bir simülasyon programı geliştirilmiştir. Bu model ile eliptik dişlilerin tork değişimleri, dönüş hızı değişimleri, çevresel titreşim ve ivme analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, eliptik dişli tahriklerinin diş ayırımının kritik dönüş hızları elde edilmiş (Şekil 6) ve bunların yük torkları ile ilişkileri de ortaya konmuştur. [53].



**Şekil 6.** Titreşim deney düzeneği [53].

Eliptik dişlilerin tork, dönüş hızı, diş dibi geriliminin araştırıldığı, deneysel doğrulamasının gerçekleştirildiği, bir tek eliptik dişli ve bir çift eliptik dişli olan iki eliptik dişlinin hesabının yapıldığı tespit edilmiştir [54]. Eliptik dişlinin dinamik giriş tork değişiminin, tahrik dişlisi dönüş hızının artmasıyla birlikte daha büyüdüğü ve deneysel olan Diş Ayırımının Kritik Dönüş Hızı (DAKDH) üzerinden hesaplanandan çok daha hızlı artmakta olduğunu görülmüştür. Tahrik edilen dişlinin giriş dönüş hızı ve giriş torku değişimi, çıkış dönüş hızıyla istenen çıkış hızı arasında farka yol açtığı tespit edilmiştir. DAKDH' nin hesaplama sonuçlarının, eliptik dişliler üzerinde deneysel olanlara neredeyse eşit olduğunu belirlenmiş, hesaplama ve deneysel sonuçların uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır [54].

### 4.3. Bilgisayar Destekli Mühendislik ile Analiz

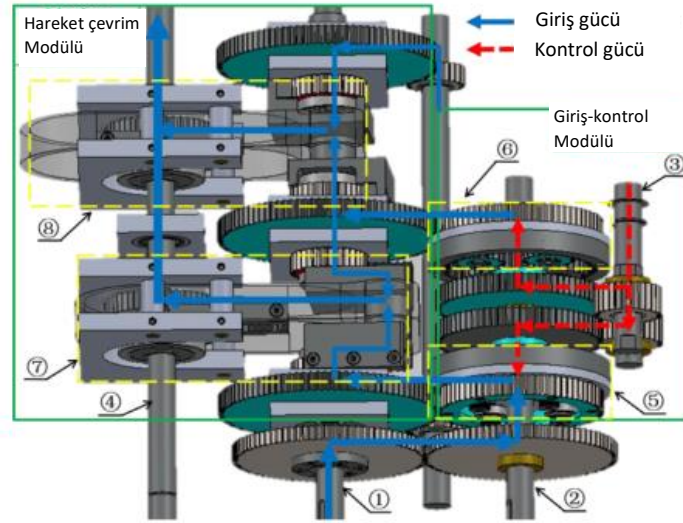
Günümüzde bilgisayar teknolojisinin ilerlemesi ile birlikte makine elemanlarının statik ve dinamik analizlerinin paket programlar aracılığı ile yapıldığı bilinmektedir. Eliptik dişlilerin de yapısal analizleri bilgisayar destekli paket programlar aracılığıyla gerçekleştirilebilmektedir. Dairesel olmayan dişlilerin temas noktalarındaki deformasyonunun belirlenmesine yönelik, sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı ve sonuçlarının, düz dişlilerin sonuçları ile kıyaslandığı tespit edilmiştir [55]. Dairesel olmayan dişlilerin düz dişliler ile kıyaslanma nedeni, literatürde düz dişliler ile ilgili verilerin detaylı bir şekilde bulunması ve dairesele olmayan dişlilerin, düz dişliler yerine kullanılıp kullanılmayacağı hakkında bilgi sahibi olunmak istenmesidir. Yapılan bir diğer çalışmada, dairesele olmayan dişlilerin değişken çevrim oranından dolayı dişli 3 bölgeye ayrılmış, dairesele olmayan dişlinin deformasyonunun, her bir dişte teğetsel kuvvetin değişmesi ve kavrama hattının uzunluklarının, dolayısıyla kavrama süresinin farklılığından kaynaklı olarak, standart düz dişliye göre farklı olduğunu görülmüştür [55]. Bölüm elipsini sonlu mikro dilimlere bölünerek dinamik bir model oluşturulan çalışmada, modelleme doğruluğunu artırmak için zamana bağlı sonlu elemanlar yöntemini esas almışlardır [56]. Sonlu elemanlarla analiz yöntemine dayalı olarak, bir eliptik dişli tahrikli dört çubuk mekanizmasının kinematik analizinin çalışıldığı, Solidworks paket programının Cosmosworks modülüyle diş gerilme dağılımlarının incelendiği ve ANSYS paket programı ile eliptik dişlilerin modal analizlerinin yapıldığı tespit edilmiştir [46].

Bir diğer bilgisayar destekli analiz paket programı olan ABAQUS ile farklı eksantrikliğe sahip eliptik dişlilerin modal analizlerini yaparak doğal frekanslarını bulmuşlar, her titreşim modunda tüm dişlilerin benzer özellik gösterdiğini ancak, doğal frekansları arasında büyük farkların oluştuğunu beyan etmişlerdir. Bunun sebebinin her dişlinin farklı yapıya sahip olmasına, tek taraflı bükülme titreşiminin, dairesele titreşimin ve burulma titreşiminin, dairesele olmayan dişlinin ana modları olmasından dolayı neredeyse hiç radyal titreşimin oluşmadığına atfedildiği görülmüştür [57]. Küçük shaft ivmeleri elde etmek amacıyla eliptik dişlinin bölüm elips eğrilerinin, bölüm elipslerinin gereken en yüksek hızlanmasına ve düzgünlüğüne bağlı olarak kontrol edildiği, sinüsoidal ve eliptik dişliler arasında bir karşılaştırma yapıldığı tespit edilmiştir [58]. En yüksek açısız ivme, teğetsel ivme ve basınç açısında önemli farklılıklar meydana geldiği, eliptik dişlilerin, yalnızca küçük shaft ivmeleri değil, aynı zamanda küçük teğetsel ivmeler ve basınç açıları da sağladığı sonucuna varılmış, açısız hız değişken bileşeninin büyük değerleri için daha düşük teğetsel ivmeler ve basınç açıları sergileyebileceği sonucu elde edilmiştir. Ayrıca, eliptik dişliler için mil, diş yükleri ve gerilmelerin daha düşük çıktığı tespit edilmiştir [58]. Eliptik dişlilerin bir başka çeşidi olan oval dişlilere sahip şanzımanın kinematik analizlerini ADAMS ortamında yapılmış, oval dişlilerin açısız hızının zamana göre değişimini incelemiş ve teorik sonuçlar ile deneysel sonuçların birbiri ile uyumlu olduğunu tespit edilmiştir [59].

## 5. ELİPTİK DİŞLİLERİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI

Dairesel veya silindirik dişli çiftleri, otomotiv ve madencilik makineleri gibi farklı uygulamalarda, çoğu dişli şanzımanında hareket ve güç iletimi amaçlı görev yapan rutin makine elemanlarıdır [60]. Bu dişli şanzımanları, istenilen çevrim oranına göre belirli sayıda dişli çiftiyle, sabit hız oranlarıyla hareket ve gücü iletmek üzere tasarlanmıştır. Sabit hız oranlarına sahip dişli çiftleri, dişli şanzımanlarının hız oranlarının aralıklarını sınırlamakta ve düşük yakıt verimliliğine yol açmaktadır [61]. Güç aktarımı için sürekli değişken hız oranlarına sahip diğer dişli şanzımanlar, yani sürekli değişken şanzımanlar (CVT'ler); hız kutularının sürekli değişen girdi-çıkış hız oranları sıfır ile belirlenen hız oranında sağlayacak şekilde sonsuz değişken şanzımanlar (IVT'ler) geliştirilmiştir [62]. Eliptik dişliler, istenilen hareket dönüşümü sayesinde, değişken hız oranlarıyla tasarlanabilen, dairesele olmayan dişlilerin yaygın bir türüdür [63]; CVT ve IVT tip şanzımanlarda ve hız kutularında tercih edilmektedir. IVT şanzıman için modifiye edilmiş yüksek dereceli eliptik adım eğrisine dayanan dairesele olmayan dişli tasarlanmış ve dairesele olmayan dişli çiftinin güç kaybı incelenmiştir [7]. Şekil 7'de çalışılan ve prototipi üretilen şanzımanın kısımları; giriş mili 1, ikinci giriş mili 2, kontrol mili 3, çıkış mili 4, birinci planet dişli sistemi 5, ikinci planet dişli sistemi 6, birinci Scotch Yoke mekanizması 7, ikinci Scotch Yoke mekanizması 8 numara ile gösterilmiştir [7]. Eliptik dişli çarkların da yer aldığı bir mekanik sistem kurgulanmış; dönmeyi, karşılıklı dönme hareketine dönüştürmek için planet mekanizması kurulmuş ve kinematik analizini yapılmıştır [64]. Mekanizmanın düz ve eliptik dişlilerden oluştuğu ve klasik planet dişlilerden dolayı kompakt ve güvenilir olduğunu beyan edilmiştir.

Mekanizmanın çeşitli takım tezgahlarında, karıştırıcı tanklarda, alternatif içten yanmalı motorlarda, sondaj kulelerinde ve dönme hareketini karşılıklı dönme hareketine dönüştürmenin gerekli olduğu diğer cihaz ve makinelerde uygulanabileceği değerlendirilmiştir [64].



**Şekil 7.** Sonsuz değişken şanzımanın şematik görünümü [7].

Eliptik dişlilerin kullanım alanından bir diğeri ise debimetre ve pompa rotorlarıdır. Eliptik rotorlu debimetrede iç akış alanı karakteristikleri hakkında ayrıntılı bilgi gerekliliğine rağmen, çok az sayıda yayın bulunmaktadır. Akış analizinin sonucunu doğrulamak maksadıyla akış görselleştirmesi yapılan bir çalışmada, eliptik dişliye sahip debimetrenin, akış hızının esas olarak rotor devrine bağlı olduğu, rotor ve gövde arasındaki boşluğun hassas bir şekilde ayar gerektirdiği tartışılmıştır. Bir eliptik dişliye sahip debimetrenin akış alanının FSI (Fluid Structure Interaction) analizi, rotorun bir noktasındaki açılma hız ve basınçta periyodik değişimler olduğunu göstermiş ve gerçek debimetrenin, akış görselleştirmesinde, benzer akış alanının olduğu görülmüştür [65].

Debimetre ve pompalarda oluşan akış dalgalanmalarını azaltmaya yönelik, harici dairesel olmayan dişli tahrik seti kullanan yeni bir yaklaşım üzerine çalışma yapıldığı görülmüştür [66]. Dairesel olmayan dişliler motor ve eliptik dişli pompa arasına takılarak, eliptik dişli pompanın düşük frekanslı ve büyük genlikli akış şiddetini teoride tamamen ortadan kaldırılabildiği tespit edilmiştir. Düşük maliyetli ve basit yapısıyla, akış dalgalanmasını azaltmaya yönelik bu yöntem, daha büyük deplasmanlı ve küçük akış dalgalanmalarına sahip yüksek performanslı eliptik dişli pompa tasarımıyla yüksek uygulama değeri göstermiştir [66].

Diğer taraftan; eliptik dişli çiftine sahip debimetreler, petrol, doğalgaz gibi enerji kaynaklarının ve enerji tüketiminin ölçümünde yaygın olarak tercih edilmektedir. Mekanize tarımda makine performansının iyileştirilmesi ve az enerji tüketimi büyük önem taşımaktadır. Mekanize tarımda kullanılan bir traktörün yakıt sistemi üzerinde yapılan çalışmada, arkadan çekişli (RWD), dört çekişli (4WD) ve önden çekişli (FWD) traktör sürüş sisteminin, toprak işleme çalışması sırasında traktör performansı ve yakıt tüketimi üzerindeki etkisini değerlendirilmiştir [67]. Daha sonra sürüş sistemi tipinin etkisini araştırmaya yönelik arazi deneyleri yapılmıştır. Deneyler yakıt tüketim ölçümünü 0,01 l/dk hassasiyetli iki eliptik dişli çiftine sahip debimetre kullanarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, dizel motorlarda enjektör pompasının fazla yakıtı depoya geri döndüğünden dolayı, enjektör pompasına giden yakıt yoluna takılan debimetreye ek olarak, yakıt deposuna doğru olan yakıt dönüş yoluna da başka bir debimetre yerleştirilmiş ve motorun tüketim akış hızı, iki debimetrenin farklılaşan akış miktarına göre belirlenmiştir [67]. Denizcilik sektöründe yüzer donanımların yakıt tüketiminin ölçülmesi ve gemi yöneticilerinin, bilimsel olarak bir gemi enerji harcama yönetim sisteminin kurgulanması son derece önemlidir. Enerji tasarrufu, rutin motor bakım programı yapmak için geminin operasyonda olduğu sürede yakıt tüketimini doğru bir şekilde ölçen, kapsamlı ve iyileştirilebilir bir sisteme gerek duyulmaktadır [68]. Diğer bir çalışmada, Deforme Helis Ferroelektrik Sıvı Kristalin (DHFLC) özelliğinden faydalanılarak bir eliptik dişli çiftine sahip debimetre ağına küçük voltaj

sinyallerini optik alana doğrusal ve pasif olarak iletmek amacıyla uygulanmıştır [69]. Birden fazla sensörden gelen sinyaller tek bir optik fiberde çoğaltılmış ve çalışma için pozitif deplasmanlı oval dişli çiftine sahip debimetreyi, kısa aralıklı darbe üretmek amacıyla manyetik anahtar olabilme yönüyle tercih edilmiştir. Çok küçük akışlar dahil tüm akış hızlarında hatasız akış iletimi sağlanmıştır [69]. Konsantr güneş enerjisi (CSP) santralleri, genellikle su kaynakları kıt olan bölgelerde veya sistemin genel verimliliğini etkileyen kuru soğutmalı soğutma sistemleri gerektirmektedir. Güneş enerjisi tesislerinin sürdürülebilirliğini sağlamaya yönelik hibrit bir soğutma sistemi ile daha düşük su tüketimi, daha yüksek verimlilik için bir çözüm bulunduğu literatürde tespit edilmiştir [70].

Dünyadaki fosil yakıtlar ile elektrik üretimi çok yaygındır. Kömürün yanması sonucu oluşan baca gazında çok fazla ısı ve su buharı bulunmaktadır [71]. Bu nedenle baca gazındaki ısı ve suyun geri kazanımı, su kıtlığına ve yüksek enerji talebine karşı çözüm olabilir. Son zamanlarda, birçok araştırmacı tarafından taşıma membran kondansatörünün (TMC) oluşturduğu baca gazından ısı ve su geri kazanımı üzerine bir dizi deneysel çalışma ve sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir [72]. Isı ve kütle transfer modeline dayalı olarak, taşıma TMC durum-uzay modeli geliştirilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Baca gazı fanla tahrik edilmiş, gaz kütle akış ölçer (0-40 l/dak, doğruluk:  $\pm\%1$ ) ve bir eliptik dişli çiftli debimetreyle (90-900 ml/dak, doğruluk:  $\pm 0.5\%$ ), sırasıyla baca gazı ve su akışlarının akış hızları ölçülmüştür [73].

Petrol sahalarında, çok fazlı debimetreler (MPFM), petrol-gaz üretim verimini en üst düzeye çıkarmak için önemli veriler elde edilmesini sağlar. Çok fazlı akış ölçümündeki en son bulguları ve karşılaşılan zorlukları, pozitif deplasmanlı (PD) debimetrelerin, günümüzde petrol akışı ölçüm uygulamalarında türbin debimetrelerin yerini alabileceği tartışılmıştır [74]. Çok fazlı debimetreler ile ilgili diğer bir çalışmada, yağ-su iki fazlı akışı ölçmeye yönelik bir venturi ölçer ve bir oval dişli akış debimetreyi birleştiren hibrit akış ölçer dikkate alınmıştır [75]. Hibrit akış ölçerin, toplam hacim akış hızı, toplam kütle akış hızı ve yoğunluk açısından petrol-su iki fazlı akışının ölçümü için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. İlave araştırmalar yapılması halinde, hibrit akış ölçerlerin, Coriolis sayaçlarına göre düşük maliyetli bir alternatif sunabileceği görülmüştür [75].

İnsan nüfusunun artışıyla beraber üretim sektörlerinin çeşitlenmesi, enerji tüketiminde büyük bir artışa yol açmıştır. Bu enerji tüketim artışına örnek olarak, tropikal bölgelerde kullanılan bir frigorifik kamyonuna soğutma sistemi geliştirilmiş, iklimlendirme, dondurma özellikleri üzerine CFD (Computational Fluid Dynamics) simülasyonları gerçekleştirilmiş ve soğutma sisteminin, hava debisi ölçmek amacıyla yüksek hassasiyete sahip eliptik dişli çiftli debimetreler, hava debisini ölçebilecek konumlara monte edilmiştir [76].

Eliptik dişli çiftine sahip debimetre üretimini yerli imkanlarla geliştirmek istenmektedir ve çalışmalar ulusal düzeyde artmaktadır. Güney Kore’de dışa bağımlı olunan eliptik dişli çiftine sahip debimetre üretimini, yerli teknoloji geliştirmek ve teknik becerinin dışa bağımlılığını ortadan kaldırmak amacıyla yapmışlardır. Çalışmada 30° basınç açısına sahip eliptik dişlilerde diş çakışması olduğunu, daha büyük basınç açılarında ise diş kökünün geniş, dişin üst kısmının sivri olduğu tespit etmişler ve eliptik dişli tasarımlarını 2D ve 3D simülasyon aracılığıyla doğrulamışlardır [77].

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde eliptik dişli çarkların; sadece mekanik ürünlerin tasarım ve imalatında değil, aynı zamanda sıvı ve gaz nakli yapılan tesislerde gerek pompa gerekse debimetre donanımlarında yaygın olarak tercih edildiği görülmektedir. Bununla birlikte tasarım ve imalatlarının güçlüğünden dolayı, tasarım ve imalat süreçlerini iyileştirmek ve hızlandırmak için imalat teknolojilerini geliştirmeye yönelik araştırmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmektedir.

- Eliptik dişli çarkların tasarımlarında kramayer veya düz dişli formlu kesici, bölüm elipsi üzerinde yuvarlanma yaparak diş formlarını ortaya çıkarmaktadır. Diş formları bilgisayar destekli tasarım ortamında makro programlama ile etkileşimli olarak hazırlanabilmektedir.
- Bölüm elipsinin eksantrikliği ve basınç açısı diş profillerinin sivrilikliğini etkileyen en önemli parametredir.
- Eliptik dişlilerin standart modülde tasarlayabilmek, bölüm elipsinin çevre uzunluğunun tam hesaplanması gerektirmektedir. Analitik yaklaşımların tercih edilebildiği tespit edilmiştir.

- Eliptik dişlilerin imalatları için CNC tel erozyon veya azdırma tezgâhında işleme yaygınlaşmaktadır.
- Azdırma tezgahlarında eliptik dişli imalatı için, tezgâha özel aparatların veya elektronik dişli kutularının kullanılması gerekmektedir.
- Eliptik dişli çiftleri ile değişken çevrim oranına sahip dişli kutusu tasarım ve imalatlarının yapıldığı tespit edilmiştir.
- Eliptik dişlilerin çalışma şartları altındaki davranışlarını belirlemek amacıyla hem deneysel hem de bilgisayar destekli analizleri ile ilgili yapılan çalışmalar literatürde yerini aldığı görülmüştür.
- Eliptik dişli çiftine sahip debimetreler, pervaneli tip debimetreler göre çok daha hassas ölçüm yapabilmektedir. Bununla birlikte eliptik dişliye sahip debimetrelerde rotor dişlisinin açılmal konumu hassas olarak kontrol edilebilmektedir.
- Eliptik dişliye sahip debimetreler petrol ve doğalgaz sahalarında, çıkarılan kaynağın miktarını hassas olarak ölçülebilmektedir.
- Çin örneğinde olduğu gibi ülkemizde, termik santrallerin bacalarında oluşan su ve baca gazının geri kazanımı için debimetre ile yapılacak ölçümlere dayalı sistem uygulanması su kıtlığını hafifletilebilecek ve artan enerji talebini azaltılabilecektir.
- Ülkemizin geniş tarımsal arazilerinin iş makinası olan traktör, biçerdöver gibi tarım makinelerinin yakıt ölçümleri ve tasarrufları için eliptik dişliye sahip debimetrelerden faydalanılmalıdır.
- Soğutma sistemlerinde, hava sirkülasyonu hassas bir şekilde ölçülmesinde eliptik dişliye sahip debimetreler meyve ve sebze buz hanelerinde de kullanılabilmektedir.
- Beyaz eşya sektöründe, özellikle çamaşır ve bulaşık makinelerinde su ve elektrik tasarrufu için eliptik dişliye sahip pompa ve debimetreler tercih edilmelidir.
- Farklı akışkanların belirli oranlarda karıştırıldığı mikser donanımlarında karışımın kalitesini etkileyen akış davranışları eliptik dişliye sahip debimetreler ile belirlenebilir.
- Kore örneğinde olduğu gibi, eliptik dişliye sahip debimetre tasarımının ve üretiminin ulusal düzeyde gerçekleştirilmesi, teknolojik gelişmişlik düzeyimize katkı sağlayacaktır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Addomine, G. Figliolini, and E. Pennestrì, “A landmark in the history of non-circular gears design: The mechanical masterpiece of Dondi’s astrarium,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 122, pp. 219–232, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.12.027.
- [2] M. J. LAI, “An Investigation of The Dynamic Behaviour of Systems With, Noncircular Gears,” *Cnkijournal, Beijing*, pp. 377–388, 1996.
- [3] D. Mundo, “Geometric design of planetary gear train with non-circular gears,” *Mech. Mach. Theory Elsevier Ltd*, pp. 456–472, 2006.
- [4] Y. A. Yao and H. S. Yan, “A new method for torque balancing of planar linkages using non-circular gears,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 217(5), pp. 495–503, 2003.
- [5] S. L. Chang, C. B. Tsay, and L. I. Wu, “Mathematical model and undercutting analysis of elliptical gears generated by rack cutters,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 31, no. 7, pp. 879–890, 1996, doi: 10.1016/0094-114X(95)00121-E.
- [6] F. L. Litvin, “Gear Geometry and Applied Theory,” *PTR Prentice-Hall, New Jersey*, pp. 300–400, 1994.
- [7] L. Gang and Z. Weidong, “Design and power loss evaluation of a noncircular gear pair for an infinitely variable transmission,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 156, 2021.
- [8] W. Junfeng, L. Xiaobo, L. Chuan, L. Bo, and Z. Fangyan, “Three-dimensional design and motion analysis of non-circular gear [J].,” *J. hubei Univ. Technol.*, vol. 29(04), pp. 69–72, 2014.
- [9] S. MEDVECKÁ-BEŇOVÁ, “DESIGNING PITCH CURVES OF NON-CIRCULAR GEARS,” *Sci. J. Silesian Univ. Technol. Ser. Transp.*, vol. 99, pp. 105–114, Jun. 2018, doi:

- 10.20858/sjsutst.2018.99.10.
- [10] S. H. Tong and C. H. Yang, "Generation of Identical Noncircular Pitch Curves," *ASME J. Mech. Des.*, vol. 120(2), pp. 337–341, 1998.
- [11] F. L. Litvin and A. Fuentes, "Gear Geometry and Applied Theory," *Cambridge Univ. Press. New York*, 2004.
- [12] D. D. Chung and R. Wolfgramm, "Maxillary arch perimeter prediction using Ramanujan's equation for the ellipse," *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.*, vol. 147, no. 2, pp. 235–241, 2015, doi: 10.1016/j.ajodo.2014.10.022.
- [13] İ. PAZARKAYA and A. ÖZDEMİR, "Eliptik Dişli Çarklarda Bölüm Elipsinin Analitik Olarak Hesaplanması," *1. ULUSLARARASI MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ VE MULTİDİSİPLİNER YAKLAŞIMLAR KONGRESİ*, pp. 490–498, 2021.
- [14] J. Han, D. Z. Li, T. Gao, and L. Xia, "Research on Obtaining of Tooth Profile of Non-circular Gear Based on Virtual Slotting," *14th IFToMM World Congr. (Taipei Taiwan)*, no. URL:<http://www.iftomm2015.tw/IFToMM2015CD/PDF/PS6-001.pdf>, pp. 25–30, 2015.
- [15] X. Wang, "A numerical algorithm of tooth profile of non-circular cylindrical gear," in *AIP Conference Proceedings*, Jul. 2017, vol. 1864, doi: 10.1063/1.4992991.
- [16] A. A. Lyashkov, K. L. Panchuk, and I. A. Khasanova, "Automated Geometric and Computer-aided Non-Circular Gear Formation Modeling," in *Journal of Physics: Conference Series*, Jul. 2018, vol. 1050, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/1050/1/012049.
- [17] B. W. Bair, "Computer aided design of elliptical gears with circular-arc teeth," *Mech. Mach. Theory*, vol. 39, no. 2, pp. 153–168, Feb. 2004, doi: 10.1016/S0094-114X(03)00111-3.
- [18] J. BETTEN, "involute of an ellipse," *Math. Model. Mater. Sci. Contin. Mech. Augustinerbach*, pp. 4–20, 2009.
- [19] J. HAN, D. LI, L. XIA, and B. JIANG, "Research on Design Method of Non-Circular Gear Pair with Double Generating Angles, , Computer Aided Drafting," *Des. Manuf. Vol.*, vol. 25, p. 52, 2015.
- [20] M. YAZAR and Ö. Ahmet, "COMPUTER-AIDED DESIGN, MANUFACTURE AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A PAIR OF ELLIPTICAL SPUR GEARS," *ANADOLU Univ. J. Sci. Technol. A - Appl. Sci. Eng.*, vol. 17, no. 5, pp. 869–869, Dec. 2016, doi: 10.18038/aubtda.279855.
- [21] Y. Hou and C. Lin, "Kinematic analysis and experimental verification of an oval noncircular bevel gears with rotational and axial translational motions," *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, p. 60, 2019.
- [22] A. Prikhodko, "Experimental kinematic analysis of an intermittent motion planetary mechanism with elliptical gears," *J. Meas. Eng.*, vol. 8, pp. 122–131, 2020.
- [23] S. Maláková, M. Urbanský, G. Fedorko, V. Molnár, and S. Sivak, "Design of geometrical parameters and kinematical characteristics of a non-circular gear transmission for given parameters," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 3, pp. 1–24, Feb. 2021, doi: 10.3390/app11031000.
- [24] K. Zhou, Y. Guo, and X. Li, "Modeling and Dynamics Analysis of Non-Circular Gears," in *PervasiveHealth: Pervasive Computing Technologies for Healthcare*, Apr. 2020, pp. 442–447, doi: 10.1145/3436286.3436434.
- [25] F. Zheng, L. Hua, D. Chen, and X. Han, "Generation of Noncircular Spiral Bevel Gears by Face-Milling Method," *ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 138(8), p. 081013, 2016.
- [26] F. L. Litvin, I. Gonzalez-Perez, K. Yukishima, A. Fuentes, and K. Hayasaka, "Generation of planar and helical elliptical gears by application of rack-cutter, hob, and shaper," *Comput.*



- Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 196, no. 41–44, pp. 4321–4336, 2007, doi: 10.1016/j.cma.2007.05.003.
- [27] A. Katz, K. Erkorkmaz, and F. Ismail, “Virtual Model of Gear Shaping— Part I: Kinematics, Cutter–Workpiece Engagement, and Cutting Forces,” *ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 140(7), p. 071007, 2018.
- [28] B. W. Bair, “Computerized tooth profile generation of elliptical gears manufactured by shaper cutters,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 122, no. 2–3, pp. 139–147, 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(01)01242-0.
- [29] J. Li, X. Wu, and S. Mao, “Numerical computing method of noncircular gear tooth profiles generated by shaper cutters,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 33, no. 11–12, pp. 1098–1105, 2007, doi: 10.1007/s00170-006-0560-0.
- [30] F. Zheng, L. Hua, X. Han, B. Li, and D. Chen, “Linkage model and manufacturing process of shaping non-circular gears,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 96, pp. 192–212, 2016, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2015.09.010.
- [31] F. Zheng, L. Hua, X. Han, B. Li, and D. Chen, “Synthesis of Shaped Noncircular Gear Using a Three-Linkage Computer Numerical Control Shaping Machine,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 139, no. 7, 2017, doi: 10.1115/1.4035794.
- [32] F. Zheng, X. Guo, and M. Zhang, “Non-uniform flank rolling measurement for shaped noncircular gears,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 116, pp. 207–215, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2017.07.048.
- [33] F. Zheng, H. Lin, X. Han, M. Zhang, W. Zhang, and X. Guo, “Avoidance of Cutter Retracting Interference in Noncircular Gear Shaping Through 4-Linkage Model,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 141, no. 5, 2019, doi: 10.1115/1.4043193.
- [34] F. Zheng, H. Xinghui, L. Hua, M. Zhang, and W. zhang, “Design and manufacture of new type of non-circular cylindrical gear generated by face-milling method,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 122, pp. 326–346, 2018, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.01.007.
- [35] X. Tian, J. Han, L. Xia, and L. Wu, “A flexible electronic helical guide controller,” *Procedia CIRP*, vol. 56, pp. 173–177, 2016.
- [36] J. Han, L. Wu, B. Yuan, X. Tian, and L. Xia, “A novel gear machining CNC design and experimental research,” *Int J Adv Manuf Tech*, vol. 88, pp. 1711–1722, 2016.
- [37] L. Wu, J. Han, Y. Zhu, X. Tian, and L. Xia, “Non-circular gear continuous generating machining interpolation method and experimental research,” *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 39, no. 12, pp. 5171–5180, 2017, doi: 10.1007/s40430-017-0873-y.
- [38] J. Han, D. Li, X. Tian, and L. Xia, “Linkage model and interpolation analysis of helical non-circular gear hobbing,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, no. 11. 2020, doi: 10.1007/s40430-020-02663-1.
- [39] W. Dan, C. Ken, and W. Xiankui, “An investigation of practical application of variable spindle speed machining to noncircular turning process,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 44, pp. 1094–1105, 2009.
- [40] W. Dan, Z. Tong, and W. ChenXiankui, “Application of active disturbance rejection control to variable spindle speednoncircular turning process,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 49, pp. 419–423, 2009.
- [41] Q. Li, W. Ai, and B. Chen, “Variable angle compensation control of noncircular turning,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 70(1):735, p. 46, 2014.
- [42] J. Yang, P. Rao, B. Chen, H. Ding, and W. Ai, “Form error on-line estimation and compensation

- for non-circular turning process,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 184, no. May, 2020, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105847.
- [43] H. Jiang, L. Dazhu, T. Xiaoqing, and X. Lian, “Meshing principle and transmission analysis of a beveloid non-circular gear,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 12(11), pp. 1–11, 2020.
- [44] Y. Liu, J. Gong, and X. Wu, “Investigation on the grinding of elliptical gears with CNC conical wheel gear grinder,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 64, no. 1–4, pp. 349–356, 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4028-0.
- [45] T. Sałaciński, A. Przesmycki, and T. Chmielewski, “Technological aspects in manufacturing of non-circular gears,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 10, 2020, doi: 10.3390/app10103420.
- [46] M. Yazar, “Design, Manufacturing and Operational Analysis of Elliptical Gears,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 22, no. 8, pp. 1441–1451, 2021, doi: 10.1007/s12541-021-00549-3.
- [47] C. García-Hernández, R. M. Gella-Marín, J. L. Huertas-Talón, N. Efkolidis, and P. Kyratsis, “WEDM manufacturing method for noncircular gears, using CAD/CAM software,” *Stroj. Vestnik/Journal Mech. Eng.*, vol. 62, no. 2, pp. 137–144, 2016, doi: 10.5545/sv-jme.2015.2994.
- [48] M. Lai, “An investigation of the dynamic behavior of systems with noncircular gears,” *hD Thesis, Univ. Wisconsin-Madison, USA.*, 1997.
- [49] A. Kahraman and R. Singh, “Non-linear dynamics of a spur gear pair,” *J. Sound Vib.*, vol. 142, pp. 49–75, 1990.
- [50] N. Gao, C. Meesap, S. Wang, and D. Zhang, “Parametric vibrations and instabilities of an elliptical gear pair,” *JVC/Journal Vib. Control*, vol. 26, no. 19–20, pp. 1721–1734, 2020, doi: 10.1177/1077546320902543.
- [51] J. Lin and R. G. Parker, “Mesh stiffness variation instabilities in two-stage gear systems,” *J. Vib. Acoust.*, vol. 124(1), pp. 68–76, 2002.
- [52] O. Karpov, P. Nosko, and P. Fil, “Prevention of resonance oscillations in gear mechanisms using non-circular gears,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 114, pp. 1–10, 2017.
- [53] X. Liu, K. Nagamura, and K. Ikejo, “Simulation on the vibration characteristics of elliptical gears,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 227, no. 4, pp. 819–830, 2013, doi: 10.1177/0954406212454372.
- [54] X. LIU, K. NAGAMURA, and K. IKEJO, “Analysis of the Dynamic Characteristics of Elliptical Gears,” *J. Adv. Mech. Des.*, vol. 6, p. 4, 2012.
- [55] S. MALÁKOVÁ, “TEETH DEFORMATION OF NON-CIRCULAR GEARS,” *Sci. J. Silesian Univ. Technol. Ser. Transp.*, vol. 110, 2021.
- [56] D. W. Liu, R. . . Zhi, and J. Xin, “Dynamic model and its application of transmission system in noncircular gears,” *J. Mach. Des.*, vol. 33(1), pp. 35–39, 2016.
- [57] K. Zhou, Y. Li, C. Wang, and C. Li, “Non-circular Gear Modal Analysis Based on ABAQUS,” in *Proceedings - 8th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, ICICTA 2015*, May 2016, pp. 576–579, doi: 10.1109/ICICTA.2015.147.
- [58] L. V. Vanegas-Useche, M. M. Abdel-Wahab, and G. A. Parker, “Nuevo par de engranajes no circulares para reducir las aceleraciones del eje: Comparación con engranajes sinusoidales y elípticos,” *DYNA*, vol. 83, no. 198, pp. 220–228, Sep. 2016, doi: 10.15446/dyna.v83n198.49170.
- [59] K. Zhou, Y. Li, C. Li, and C. Wang, “Non-circular Gear Kinematics Simulation Based on ADAMS,” *Proc. - 8th Int. Conf. Intell. Comput. Technol. Autom. ICICTA 2015*, pp. 572–575, 2016, doi: 10.1109/ICICTA.2015.146.

- [60] K. J. Waldron, G. L. Kinzel, and S. K. Agrawal, "Kinematics, Dynamics, and Design of Machinery, 3th Edition," Wiley, New York, 2004.
- [61] Z. X. Sun and K. Hebbale, "Challenges and opportunities in automotive transmission control," *Proc. 2005 Am. Control Conf. Portl.*, pp. 3284–3289, 2005.
- [62] X. F. Wang and W. D. Zhu, "Design, modeling, and simulation of a geared infinitely variable transmission," *ASME J. Mech. Des.*, vol. 136(7), p. 071011, 2014.
- [63] F. Litvin and A. Fuentes-Aznar, "Noncircular Gears: Design and Generation," Cambridge Univ. Press, New York, 2009.
- [64] P. A.A. and S. A.I., "Kinematic analysis of mechanism for converting rotational motion into reciprocating rotational motion," *Procedia Eng.*, vol. 129, pp. 87–92, 2015.
- [65] G. S. Lee and M. Y. Park, "FLOW FIELD CHARACTERISTICS IN THE HOUSING OF NONCIRCULAR GEAR FLOWMETER," no. July, 2008.
- [66] D. Liu, Y. Ba, and T. Ren, "Flow fluctuation abatement of high-order elliptical gear pump by external noncircular gear drive," *Mech. Mach. Theory*, vol. 134, pp. 338–348, 2019, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.01.011.
- [67] A. M. Moinfar, G. Shahgholi, Y. A. Gilandeh, and T. M. Gundoshmian, "The effect of the tractor driving system on its performance and fuel consumption," *Energy*, vol. 202, p. 117803, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117803.
- [68] K. Rongping, "Port Ship Energy Consumption Management Based On Beidou Satellite Communication[J]," *Jimei Univ.*, 2017.
- [69] J. Firth, F. Ladouceur, Z. Brodzeli, M. Wyres, and L. Silvestri, "A novel optical telemetry system applied to flowmeter networks," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 48, pp. 15–19, 2016, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2016.01.006.
- [70] A. Zaza, E. G. Bennouna, N. E. Laadel, and Y. El Hammami, "Experimental Study of Fouling in Hybrid Cooling Tower Used in CSP Plants: Effects of the Polymer and galvanized steel tubes," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 25, no. June, p. 101005, 2021, doi: 10.1016/j.tsep.2021.101005.
- [71] L. Xiao, M. Yang, S. Zhao, W. Z. Yuan, and S. M. Huang, "Entropy generation analysis of heat and water recovery from flue gas by transport membrane condenser," *Energy*, vol. 174, pp. 835–847, 2019.
- [72] S. Soleimanikutanaei, C. X. Lin, and D. Wang, "Numerical modeling and analysis of Transport Membrane Condensers for waste heat and water recovery from flue gas," *Int J Therm Sci*, vol. 136, pp. 96–106, 2019.
- [73] Y. Yang, N. F. Li, S. M. Huang, C. H. Liang, and L. Xiao, "State-space model for transient behavior of transport membrane condenser," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 165, 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120667.
- [74] M. Meribout, A. Azzi, N. Ghendour, N. Kharoua, L. Khezzar, and E. AlHosani, "Multiphase Flow Meters Targeting Oil & Gas Industries," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 165, p. 108111, 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108111.
- [75] X. Li, Z. Huang, Z. Meng, B. Wang, and H. Li, "Oil-water two-phase flow measurement using a venturi meter and an oval gear flow meter," *Chem. Eng. Commun.*, vol. 197, no. 2, pp. 223–231, 2010, doi: 10.1080/00986440902938469.
- [76] J. Yan, S. Li, and R. Li, "Numerical study on the auxiliary entrainment performance of an ejector with different area ratio," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 185, no. August 2020, p. 116369, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116369.

- [77] J. J. Park and E. S. Lee, "A study on the elliptical gear design for oval flowmeter," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, vol. 37, no. 8, pp. 1029–1033, 2013, doi: 10.3795/KSME-A.2013.37.8.1029.



## Evaluation of Irreversibility Analysis for Different Coal Types of a Thermal Power Plant

Sinem UZUN<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Erzincan Binali Yıldırım University of Engineering and Architecture Faculty, Department of Mechanical Engineering, 24100, Erzincan/TÜRKİYE

### Article Info

Research article

Received: 07.04.2022

Revision: 04.07.2022

Accepted: 11.08.2022

### Keywords

Coal

Energy

Exergy

Irreversibility

Thermal power plant

### Abstract

In this study, first law (energy conservation) and second law (exergy) analyzes of thermodynamics were performed for a thermal power plant. It is very important to perform energy and exergy analyzes in industrial plants. These analyzes can provide guidance on improving energy efficiency and recycling waste energy. In this study, energy and exergy analyzes were made for coals with different chemical contents in nine different countries. According to the results of the analysis, the highest first-law efficiency was found in Serbian coal (second type), as 53.61%. The second highest law efficiency was determined as 46.67% in Bangladesh coal (sixth type). Environmental Destruction Index (EDI) and Sustainability Index (SI) values were determined for all coal types. According to the results of the analysis, the highest EDI value was obtained as 4.00 at the temperature of 305 K for the 2nd coal type, and the highest SI value was obtained as 1.91 at the temperature of 293 K for the 6th coal type, according to the changing reference temperature values. According to this study, the highest second law efficiency was obtained from Bangladesh coal with a carbon (C) content of 77.84%.

### Subscripts

i inlet

o outlet

## 1. INTRODUCTION

The limits of efficient use of energy resources are determined by the first and second laws of thermodynamics. The first law of thermodynamics emphasizes that energy cannot be created out of nothing and existing energy cannot be destroyed. Since the total energy does not change, it has been important to determine what is consumed in energy systems [1]. As a common result of the first and second laws of thermodynamics, it was determined that the exergy is consumed in the energy systems. Thus, while designing energy systems, it became important to design using first and second laws of thermodynamics. And exergy analysis method was developed for systematic performance analysis of these systems [2].

Exergy analysis has been done for many systems and there are many examples in the literature [3- 11]. In one of these studies, exergy and energy analysis was made for a power plant in Serbia. The main purpose of this article is to determine the individual energy and exergy losses of the system components. Energy and exergy efficiency were determined under different loading conditions. Load variation was tested at 100 % and 60 % full load. The energy and exergy losses for the examined plant are presented as a result of the analysis. The results show that energy losses have mainly occurred in the condenser where 421 MW is lost to the environment while only 105.78 MW has been lost from the boiler. Still, the irreversibility rate of the boiler is higher than the irreversibility rates of other components. Finally, the exergy destruction rates of

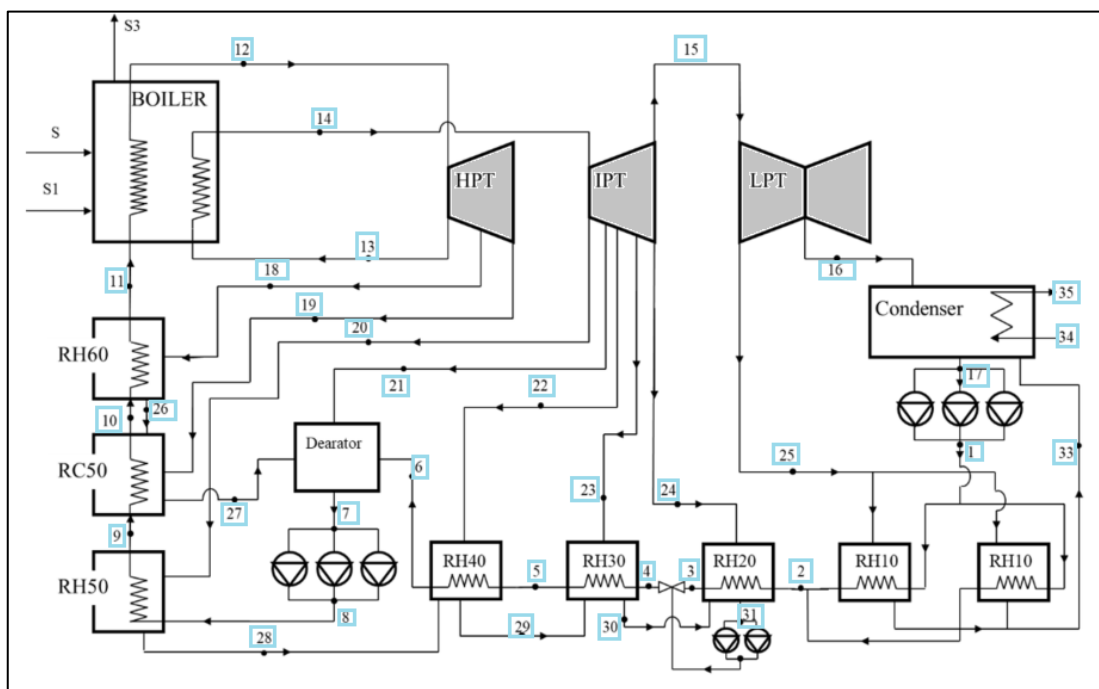
the components were determined [12]. In another study, in a coal fueled thermal power plant (TPP), a flue gas with a high CO<sub>2</sub> content can be obtained and this provides CO<sub>2</sub> sequestration in an efficient and energy-efficient manner. Exergy analysis of the power plant is made for detailed analysis. The power plant is divided into four sections: boiler, turbines and feedwater heaters (FWHs), air separation unit (ASU) and flue gas treatment unit (FGU). The exergy of each model (including physical exergy and chemical exergy) has been achieved. Exergy efficiency was achieved for two models of boilers. The exergy efficiencies of the oxy combustion system used in the study and the conventional system were compared [13]. First and second laws analyzes of thermal power plants were compared based on some parameters in Indian conditions. In the study, thermal power plants using subcritical, supercritical and ultra supercritical steam conditions are discussed. The study covers the effect of condenser pressure on plant and exergy efficiency. The effect of high grade coal on performance parameters compared to typical Indian low grade coal was also investigated. The greatest exergy loss occurred in coal combustion and steam generator. The maximum possible plant efficiency was found to be approximately 41% for the supercritical steam plant and approximately 44.4% for the ultrasupercritical steam plant [14]. In the study of Rudra et al.[15], versions are being studied to improve the efficiency of coal-fired steam power plants with some steam parameters. For exergy analysis, a version of a process simulation computer code (ASPEN Plus) is used. The overall exergy efficiency for the coal-fired process is 36%. The study also describes the effects of condenser pressure on plant and exergy efficiency. As a result of the study, the maximum possible plant efficiency was found to be approximately 40.2% for the supercritical steam plant and approximately 44.8% for the ultra-supercritical steam plant. Both conventional and advanced exergy analysis methods were applied for a supercritical power plant which uses coal as fuel in othr study. As a result of the study, it was found that the boiler subsystem still has the largest preventable exergy destruction. Much of the avoidability is exergy destruction in feedwater preheaters; the components are mostly internal while there are leftovers, indicating that the improvements mainly depend on the following. improvements in the design and operation of the component [16]. In a study of qualitative analyzes of coals in Bosnia and Herzegovina, the study includes some features: ash (A), moisture (W), combustible matter (V<sup>g</sup>) etc. In this paper, arithmetic mean, absolute range, standard deviation and variations coefficient values were determined using statistical parameters. The analysis showed significant deviations in the ash properties and some values were found like moisture is 36.23 %. Bosnia do not deviate much from the characteristics of the coal in the surrounding countries. It is foreseen that the results obtained will be used in problems such as coal combustion analysis in thermal power plants, optimization of electricity filter, decrease of SO<sub>2</sub> in flue gas [17]. A study was conducted to investigate the effects of steam parameters (pressure, temperature) on energy and exergy efficiency of the power plant under different load conditions for five different TPPs. The Soma TPP, which operates under subcritical conditions, has a single intermediate superheat and has six feedwater preheaters, has been taken as the reference power plant. For the other four cases, the Simulations were made using the Ebsilon program and the analysis results found were compared with the reference plant. When the energy and exergy efficiencies of Case 4 and the Reference Power Plant are compared, the energy efficiency increased by 9.24 % and the exergy efficiency increased by 8.06% under 100% loading conditions. As a result of this study, it has been shown that steam conditions under different loadings have a significant effect on the first and second laws efficiency of the systems [18]. Acir and others [19], first and second law analyses were made for a 160 MW TPP. Irreversibility and energy- exergy efficiencies were determined. The energy efficiency was determined as 42-76% for the total plant. It was observed that dead state temperatures directly effect the exergy efficiency of the TPP.

In this study, first and second law analysis of thermodynamics are performed and irreversibility is investigated. Coal chemical data of nine different countries and operating data of a thermal power plant in Turkey are used. According to the mines they are extracted from, coal compounds vary. First of all, coal chemical data of nine different countries to be analyzed are obtained. Then, based on the energy conservation and exergy principles of thermodynamics, thermodynamic analyzes of these coals are made. According to the results of the analysis, the first and second law efficiencies are determined for the total power plant for each coal type.

## 2. SYSTEM DESCRIPTION

A coal-fired power system consists of many basic elements. The coal-fired power system is mainly based on a regenerative Rankine cycle consisting of a boiler, turbines, a generator, a condenser, feedwater heaters, a deaerator and several pumps. In the boiler, the steam is heated to the designed pressure and temperature with the thermal energy released by the coal. The steam then expands in the turbine to generate power and the steam from the turbine is condensed into the feed water in the condenser [20]. Figure 1 shows the schematic diagram of the coal-fired power plant system [21].

Thermal power plants are facilities that first convert the chemical energy in the fuels into heat energy and then into electrical energy. In generally natural gas, coal, diesel, fuel-oil, hard coal are used as fuel in thermal power plants. Within the scope of this study, it is aimed to make an energy and exergy analysis of a TPP with the use of different coal and in this study and a 210 MW thermal power plant using different coals is examined.



*Figure 1. Schematic diagram of the coal-fired power plant system*

## 3.COAL DATA

Coal is a type of fuel that is often used in thermal power plants. In each region, the coal content shows different characteristics. Table 1 shows the content values of coals in some regions. The data in Table 1 and Table 2 are taken from References [12- 16], [22- 24].

The data presented in Table 1 show, respectively, the carbon, sulfur, hydrogen, nitrogen (azote), oxygen, moisture, ash and lower calorific value of the coal. Chemical exergy and total exergy values for different coal are also shown in Table 2.

**Table 1.** Chemical properties of different coal

Country	C	S	H	N	O	W	A	LHV (kcal/kg)
<b>Turkey</b>	41.5	3.5	2.25	0.66	9.0	14.73	28.6	2300
<b>Serbia</b>	20.38	0.65	1.83	7.98	0.6	23.56	-	1637
<b>China</b>	60.51	0.43	3.62	0.7	9.94	13.8	11	5446
<b>India</b>	38.9	0.6	2.6	0.7	6.7	5.7	43.1	3421
<b>S.Africa</b>	68.1	0.5	3.5	1.7	7.5	2.4	-	6148
<b>Bangladesh</b>	77.84	0.6	5.4	1.68	11.20	3.28	21.5	5430
<b>Greece</b>	34.43	0.84	2.77	0.96	16.26	12	27.93	1259
<b>Bosnia</b>	39.32	3.46	3.78	0.8	11.05	32.20	9.21	3758
<b>Canada</b>	52.1	0.9	4	0.5	15.25	-	21.5	-

**Table 2.** Chemical Exergy and total exergy for different coal

	Energy (kW)	Chemical Exergy (kW)	Total Exergy (kW)	$\beta$
<b>Turkey</b>	389456	10190	412823	1.060
<b>Serbia</b>	277191	7403	299897	1.082
<b>China</b>	922164	24338	985919	1.069
<b>India</b>	579273	15318	620520	1.071
<b>S.Africa</b>	1041033	27364	1108477	1.065
<b>Bangladesh</b>	919455	24288	983906	1.070
<b>Greece</b>	213185	5749	232898	1.092
<b>Bosnia</b>	636337	17019	689445	1.083
<b>Canada</b>	841902	22447	909327	1.080

The exergy  $\beta$  factor based on LHV is calculated [25]. [26] as in Equation 1.

$$\beta = 1.0437 + 0.1882 \left( \frac{h}{c} \right) + 0.0610 \left( \frac{o}{c} \right) + 0.0404 \left( \frac{n}{c} \right) \quad (1)$$

The type of coal for each country is named in Table 3.



**Table 3.** Coal types by country

Country	Coal type
Turkey	Coal 1
Serbia	Coal 2
China	Coal 3
India	Coal 4
S.Africa	Coal 5
Bangladesh	Coal 6
Greece	Coal 7
Bosnia	Coal 8
Canada	Coal 9

#### 4. NUMERICAL ANALYSIS

In this study, analyzes for nine different coals were made for six different system temperatures. As a result of the energy and exergy analysis made for each case, the second law efficiency was obtained for the basic components of the system; such as boiler, condenser, heaters and pumps. However due to the excess of the coal type and the wide range in the system temperature, the total efficiency of the system was examined instead of examining the efficiency of all components.

##### 4.1. Energy and Exergy

Energy cannot be created or completely destroyed. However it can transform into different forms of energy during the process. The upper limits of the transformation are determined by the second law of thermodynamics. The ability of energy to do work is called exergy. Exergy analysis of thermal systems helps to determine the nature of the energy's ability to do work and its location and amount in the system.

To evaluate the performance of thermal power plants energy and exergy efficiencies or specific heat consumption values are checked.

According to the principle of conservation of mass, the amount of material entering and leaving a control volume must be equal and is given by the following equations [27-28].

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o \quad (2)$$

In a continuous flow open system, the total energy entering and leaving the control volume as heat, work, kinetic, potential or mass flow is equal.

$$\dot{Q}_i + \dot{W}_i + \sum \dot{m}_i \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_i = \dot{Q}_o + \dot{W}_o + \sum \dot{m}_o \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_o \quad (3)$$

If the kinetic and potential energy changes are neglected, the equation takes the Eq. 4.

$$\dot{Q}_i + \dot{W}_i + \sum \dot{m}_i h_i = \dot{Q}_o + \dot{W}_o + \sum \dot{m}_o h_o \quad (4)$$

In this equation,  $\dot{m}$  = mass flow,  $h$  = enthalpy,  $Q$  = heat and  $W$  = work. The exergy values entering and leaving the control volume are obtained in the following equations. The exergy destruction rate equation is derived from the exergy balance for the control volume of the equilibrium component of any power plant as follows [1].

$$\dot{E}x_D = \Sigma(\dot{E}x)_i - \Sigma(\dot{E}x)_o + \left[ \Sigma \left( \dot{Q} \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \right)_i - \Sigma \left( \dot{Q} \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \right)_o \right] + \dot{W} \quad (5)$$

In this equation,  $Ex_{in}$  is incoming exergy streams and  $Ex_{out}$  is outgoing exergy streams,  $T_0$  is surrounding temperature,  $Q$  is heat transfer rate,  $T$  is fixed temperature and  $W$  is work transfer rate.

Equation 6 is used to calculate the physical exergy through the control volume.

$$\dot{E}x = \dot{m} \left[ (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \right] \quad (6)$$

In this equation,  $h$  is specific enthalpy and  $s$  is specific entropy.

The exergy efficiency [29] is calculated as in Equation 7.

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}_{fuel}} \quad (7)$$

The Environmental Destruction Index (EDI) of the system can be defined as the inverse of the exergy efficiency [30].

$$EDI = \frac{1}{\eta_{II}} \quad (8)$$

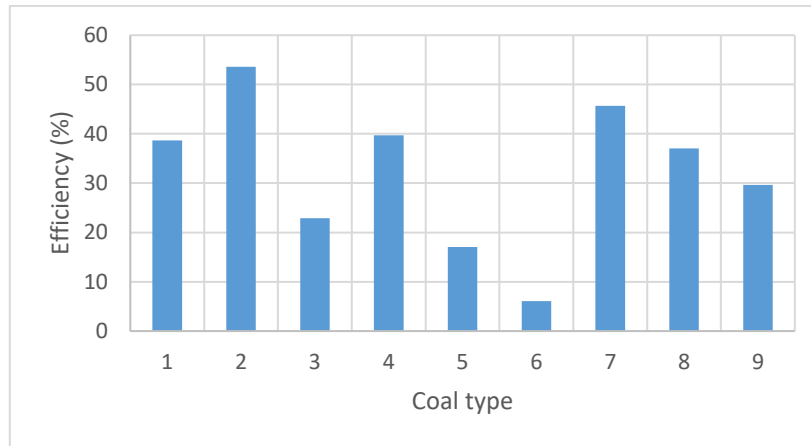
The Sustainability Index (SI) concept which ensures the efficient use of resources is also dependent on exergy efficiency [31].

$$SI = \frac{1}{1 - \eta_{II}} \quad (9)$$

In this study different country coals are numbered; Turkish coal is coal type 1, Serbia; coal type 2, China; coal type 3, India; coal type 4, S.Africa; coal type 5, Bangladesh; coal type 6, Greece; coal type 7, Bosnia; coal type 8 and Canada; coal type 9 and these mappings are shown in Table 3.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The results obtained first law efficiency analysis applied to the thermal power plant using operational data are given Figure 2. According to the results in Figure 2, the highest 1st law efficiency is obtained in the 2nd coal type and this value is 53.61%. The lowest efficiency value was determined as 6.1% in the coal type 6.



**Figure 2.** Total first law efficiency for coal types

The second law efficiency datas obtained as a result of the analyzes made for nine different coal values are given in Table 4. While the first law total efficiency remained constant with the changing ambient temperature, the second law total efficiency took different values according to the changing temperature.

**Table 4.** Total second law efficiency for coal types

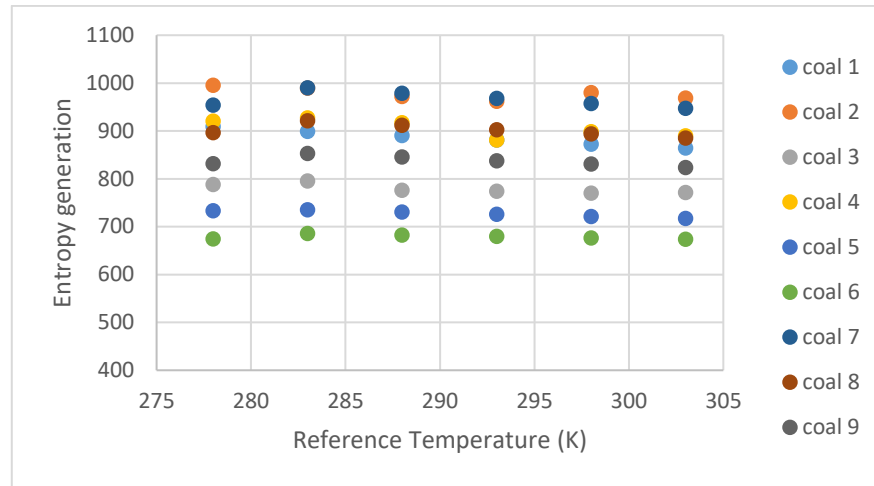
Second law efficiency (%)						
Temperature (K)	278	283	288	293	298	303
<b>Coal type 1</b>	32.64	32.54	32.21	31.88	31.68	31.24
<b>Coal type 2</b>	26.01	25.98	26.25	26.02	25.33	24.96
<b>Coal type 3</b>	39.50	39.32	39.25	39.50	38.24	37.73
<b>Coal type 4</b>	31.72	31.63	31.31	31.72	30.79	30.37
<b>Coal type 5</b>	42.64	42.43	41.99	42.22	41.25	40.71
<b>Coal type 6</b>	46.67	46.42	45.94	47.67	45.11	44.52
<b>Coal type 7</b>	28.79	28.73	28.44	28.79	27.99	27.59
<b>Coal type 8</b>	32.66	32.55	32.22	32.66	31.69	31.25
<b>Coal type 9</b>	36.29	36.15	35.78	36.10	35.17	34.70

The second law efficiency datas obtained as a result of the analyzes made for nine different coal values are given in Table 4.

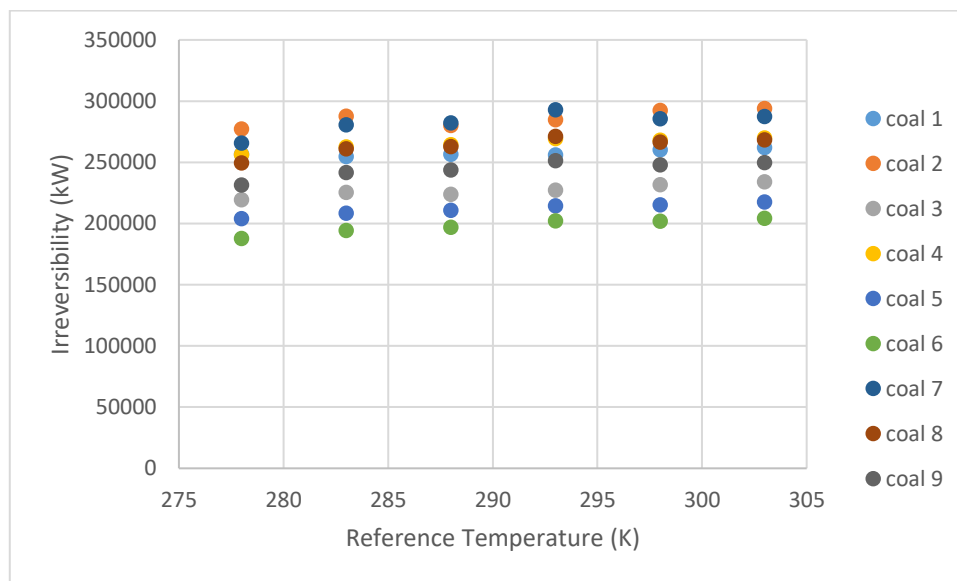
According to the results in Table 4, with the increasing temperature value, the total second-law efficiency tended to decrease in all coal types. While the total second law efficiency was 46.67 % for the 6th coal type at 278 K. The total efficiency decreased to 44.52 % at 303 K. Type 2 coal has the second-lowest law efficiency compared to other coals. While its second law efficiency was 26.01 % at 278 K, it decreased to 24.96 % at 303 K.

In Figure 3. for different types of coal. the change in entropy with temperature is shown. According to the graph. the highest entropy production was observed in the 2nd coal type. while the lowest entropy production was observed in the 6th coal type.

Irreversibility describes the amount of exergy destroyed or wasted work potential in a closed system. When examined according to varying coal types, the highest irreversibility value was obtained in coal type 2 and the lowest irreversibility value was obtained in the 6th coal type.



**Figure 3.** Entropy generation change in the boiler according to temperature

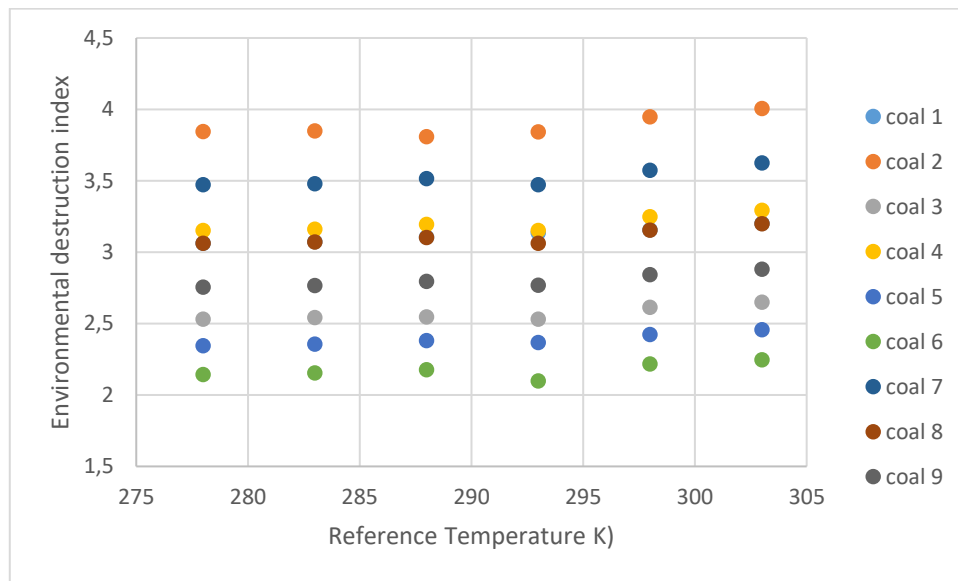


**Figure 4.** Irreversibility change in the boiler according to temperature

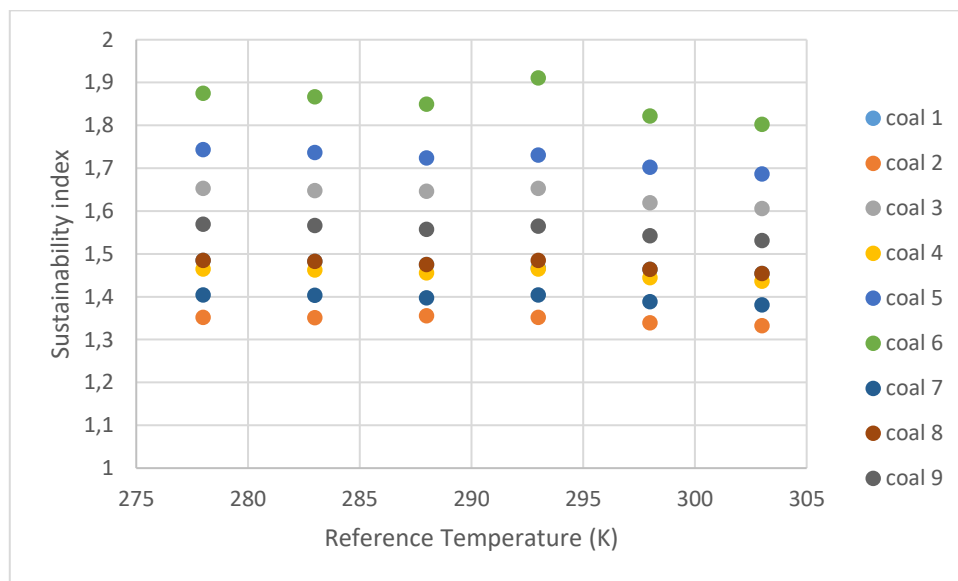
The change in temperature changes the irreversibility and second law efficiency, especially in the boiler. The irreversibility change in the boiler according to the changing temperature in all coal types is shown in Figure 4.

The Environmental Destruction Index (EDI) measures system's overall progress towards environmental sustainability [32]. Exergy creates a relationship between environmental impact and sustainability by making maximum use of resources, so that energy can be used more efficiently. The variation of this effect is shown in Figures 5 and 6.

As seen in Figures 5 and 6, SI decreases with increasing reference temperatures while EDI values increases. The results show that SI and exergy efficiencies decrease with increasing reference temperature in the system. Similar results have been obtained in the literature [21], [31].



**Figure 5.** Environmental destruction index change according to temperature



**Figure 6.** Sustainability index change according to temperature

#### 4.CONCLUSIONS

In this study, first and second law analysis of thermodynamics were performed and irreversibility was investigated. Coal chemical data of nine different countries and operating data of a thermal power plant in Turkey were used. According to the results obtained, total first law and total second law efficiency values were determined for 9 different coals. According to these values, the highest first law efficiency was determined as 53.61 % in the second type of coal. The highest second law efficiency was determined as 46.67 % in the 6th coal type.

The lowest entropy production was seen in the 6th coal type, which is the type of coal with the highest exergy efficiency. According to the irreversibility values examined, it was observed that the irreversibility

value of the second type of coal was higher with increasing temperature compared to the others and at 303 K, the irreversibility value reached approximately 300000 kW.

The results show that while the first law efficiency did not change with increasing reference temperature, the second law efficiency decreased in all coal types. The fact that the second law efficiency is the 6th highest coal type can be explained by the fact that this coal contains more carbon in its chemical content compared to the others.

## REFERENCES

- [1] O. J. Khaleel, F. Basim Ismail, T. Khalil Ibrahim, and S. H. bin Abu Hassan. "Energy and exergy analysis of the steam power plants: A comprehensive review on the Classification, Development, Improvements, and configurations." *Ain Shams Eng. J.*, Nov. 2021. doi: 10.1016/J.ASEJ.2021.11.009.
- [2] H. Yüncü. *Ekserji analizi : İkinci kanun verimi & termoekonomi*. Ankara : [2010] (ODTÜ Basım İşliği).
- [3] H. Y. Wang, L. L. Zhao, Q. T. Zhou, Z. G. Xu, and H. T. Kim. "Exergy analysis on the irreversibility of rotary air preheater in thermal power plant." *Energy*, vol. 33, no. 4, pp. 647–656, Apr. 2008.
- [4] M. K. Gupta and S. C. Kaushik. "Exergy analysis and investigation for various feed water heaters of direct steam generation solar–thermal power plant." *Renew. Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 1228–1235, Jun. 2010. doi: 10.1016/J.RENENE.2009.09.007.
- [5] P. Regulagadda, I. Dincer, and G. F. Naterer. "Exergy analysis of a thermal power plant with measured boiler and turbine losses." *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, no. 8–9, pp. 970–976, Jun. 2010. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2010.01.008.
- [6] J. Edwards, H. Bindra, and P. Sabharwall. "Exergy analysis of thermal energy storage options with nuclear power plants." *Ann. Nucl. Energy*, vol. 96, pp. 104–111, Oct. 2016. doi: 10.1016/J.ANUCENE.2016.06.005.
- [7] S. C. Kaushik, V. S. Reddy, and S. K. Tyagi. "Energy and exergy analyses of thermal power plants: A review." *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 4, pp. 1857–1872, May 2011. doi: 10.1016/J.RSER.2010.12.007.
- [8] T. K. Ibrahim *et al.*. "Thermal performance of gas turbine power plant based on exergy analysis." *Appl. Therm. Eng.*, vol. 115, pp. 977–985, Mar. 2017. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.01.032.
- [9] S. Adibhatla and S. C. Kaushik. "Exergy and thermoeconomic analyses of 500 MWe sub critical thermal power plant with solar aided feed water heating." *Appl. Therm. Eng.*, vol. 123, pp. 340–352, Aug. 2017. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.05.099.
- [10] M. Akbari Wakilabadi, M. Bidi, and A. F. Najafi. "Energy, Exergy analysis and optimization of solar thermal power plant with adding heat and water recovery system." *Energy Convers. Manag.*, vol. 171, pp. 1639–1650, Sep. 2018. doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2018.06.094.
- [11] S. Sadeghi, S. Ghandehariun, and B. Rezaie. "Energy and exergy analyses of a solar-based multi-generation energy plant integrated with heat recovery and thermal energy storage systems." *Appl. Therm. Eng.*, vol. 188, p. 116629, Apr. 2021. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.116629.
- [12] D. Mitrović, D. Zivkovic, and M. S. Laković. "Energy and exergy analysis of a 348.5 MW steam power plant." *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 32, no. 11, pp. 1016–1027, Jan. 2010. doi: 10.1080/15567030903097012.
- [13] J. Xiong, H. Zhao, and C. Zheng. "Exergy analysis of a 600 MWe oxy-combustion pulverized-coal-fired power plant." *Energy and Fuels*, vol. 25, no. 8, pp. 3854–3864, Aug. 2011. doi: 10.1021/ef200702k.
- [14] K. K. Suresh, M.V.J.J., Reddy, K.S. and Ajit. "Energy and Exergy Analysis of Thermal Power Plants

Based on Advanced Steam Parameters.” 2006. [Online]. Available: IITB.

- [15] S. Rudra, H. M. Shim, and Hyung Taek KIM. “Exergetic Analysis of Coal Fired Thermal Power Plants Based Advance Steam Parameters.” pp. 695–701. 2008.
- [16] L. Wang, Y. Yang, T. Morosuk, and G. Tsatsaronis. “Advanced thermodynamic analysis and evaluation of a supercritical power plant.” *Energies*, vol. 5, no. 6, pp. 1850–1863. 2012. doi: 10.3390/en5061850.
- [17] S. N. Djurić, P. Č. Stanojević, D. B. Djuranović, S. D. Brankov, and S. M. Milašinović. “Qualitative analysis of coal combusted in boilers of the thermal power plants in Bosnia and Herzegovina.” *Therm. Sci.*, vol. 16, no. 2, pp. 605–612. 2012. doi: 10.2298/TSCI110612027D.
- [18] B. Cetin and E. Özen. “Farklı yük şartlarında kömür yakıtlı termik güç santrallerinin termodinamik analizi.” *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Derg.*, Jul. 2020. doi: 10.17341/gazimmfd.490516.
- [19] A. Acır, A. K. Bilginsoy, and H. Coşkun. “Investigation of the Effect of Varying Dead State Temperatures on Energy and Exergy Efficiencies in a Thermal Power Plant.” *J. Energy Inst.*, vol. 85, no. 1, pp. 14–21. 2012.
- [20] C. Li and R. Zhai. “Exergy and thermo-economic analyses and performance comparison of different solar aided coal-fired power systems.” *Energy Convers. Manag.*, vol. 229, Feb. 2021.
- [21] İ. Ata, E. H. Tanürün, S. Uzun, S. Bayrak, and A. Acır. “Exergy Analysis and Determination of Irreversibility of a Thermal Power Plant.” *Heat Transf. Res.*, vol.53, no. 2, pp. 1-12. 2022.
- [22] M. I. James, F. Kelly, and C. E. Capes. “Beneficiation of lignite by oil agglomeration as an integral part of coprocessing.” in *American Chemical Society*. 1988, p. 33:1.
- [23] M. Ikural, J. F. Kelly, and C. E. Capes. “Beneficiation of Lignite by Oil Agglomeration as an Integral Part of Coprocessing.” *Am. Chem. Soc. Div. Fuel Chem.*, vol. 33, no. 1, 1988.
- [24] M. Agraniotis, S. Karellas, I. Violidakis, A. Doukelis, P. Grammelis, and E. Kakaras. “Investigation of Pre-Drying Lignite in an Existing Greek Power Plant THERMAL SCIENCE.” 2012.
- [25] E. Amirabedin and Z. Yilmazoglu. “Design and Exergy Analysis of a Thermal Power Plant Using Different Types of Turkish Lignite.” *Int. J. Thermodyn.*, vol. 14, no. 3, pp. 125–133. 2011.
- [26] R. Saidur, J. U. Ahamed, and H. H. Masjuki. “Energy, Exergy and Economic Analysis of Industrial Boilers.” *Energy Policy*, vol. 38, pp. 2188–2197. 2010.
- [27] Y. Çengel and Y. Boles. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill, 1994.
- [28] A. Coşkun and M. G. H. Al-Talabani. “Bir Kombine Çevrim Santralinin Ekserji Analizi.” *Mühendislik Bilim. ve Tasarım Derg.*, vol. 5, no. 3, pp. 537–545. Dec. 2017. doi: 10.21923/jesd.290766.
- [29] A. Acır. “Application of Artificial Neural Network to Exergy Performance Analysis of Coal Fired Thermal Power Plant.” *Int. J. Exergy*, vol. 12, no. 3, pp. 362–379. 2013.
- [30] A. Midilli and I. Dincer. “Development of Some Exergetic Parameters for PEM Fuel Cells for Measuring Environmental Impact and Sustainability.” *Int. J. Hyd. Energy*, vol. 34, pp. 3858–3872. 2009.
- [31] M. A. Rosen, I. Dinçer, and M. Kanoglu. “Role of Exergy in Increasing Efficiency and Sustainability and Reducing Environmental Impact.” *Energy Policy*, vol. 36, pp. 128–137. 2008.
- [32] M. H. Schmiedeknecht. *Environmental Sustainability Index*. Springer Berlin Heidelberg, 2013.



## Parallel Machine Scheduling Problem with Unavailable Time Periods and Sequence Dependent Setup Times

Feriştah ÖZÇELİK<sup>1,\*</sup> Tuğba SARAÇ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 26040, Odunpazarı/ESKİŞEHİR

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
Received: 11.03.2022  
Revision: 21.04.2022  
Accepted: 19.06.2022

#### Highlights

- Unrelated parallel machine scheduling problem with unavailable time periods and sequence dependent setup times is considered.
- A mathematical model and a genetic algorithm have been developed for the considered problem.
- By taking into account the unavailable time periods, an average of 5.29% reduction is achieved in the makespan.

#### Keywords

Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem  
Unavailable Time Periods  
Sequence Dependent Setup Times  
Genetic Algorithm

In this study, unrelated parallel machine scheduling problem with unavailable time periods and sequence dependent setup times is discussed. A mathematical model and a genetic algorithm have been developed for the considered problem.

**Purpose:** In many factories, the production process may be interrupted periodically due to planned maintenance, lunch and rest breaks. It is important to consider these unavailable time periods when scheduling machines. For that reason, unrelated parallel machine scheduling problem with unavailable time periods and sequence dependent setup times is discussed in this study.

**Theory and Methods:** A mathematical model and a genetic algorithm have been developed for the considered problem.

**Results:** The performance of the proposed solution methods is demonstrated using randomly generated test problems. As can be seen from Table A, the optimum solutions to all 10 job problems are obtained within the time limit with the proposed model. Feasible solutions to 20 and 30 job problems are obtained except for two problems within the time limit. With the developed GA, the optimal solutions of the problems that their optimum is known are reached, and the solutions to other problems are improved. The greatest improvement rate is 58.2%.

Table A. Test Results

problem	GAMS		GA		Improvement %
	$Z_{IPM-KMZ}$	$t(s.)$	$Z_{GA}$	$t(s.)$	
10-2-1-1	269	4395	269	1	0,00
10-2-1-2	321	3900	321	1	0,00
10-2-1-3	283	3670	283	1	0,00
10-2-2-1	323	2173	323	1	0,00
10-2-2-2	383	5636	383	1	0,00
10-2-2-3	271	1754	271	1	0,00
20-3-1-1	388	7200	372	1	4,12
20-3-1-2	340	7200	295	1	13,24
20-3-1-3	439	7200	416	1	5,24
20-3-2-1	538	7200	416	1	22,68
20-3-2-2	470	7200	424	1	9,79
20-3-2-3	412	7200	374	1	9,22
30-4-1-1	-	7200	386	1	-
30-4-1-2	760	7200	329	1	56,71
30-4-1-3	694	7200	361	1	47,98
30-4-2-1	-	7200	372	1	-
30-4-2-2	645	7200	418	2	35,19
30-4-2-3	933	7200	390	2	58,20

**Conclusion:** By taking into account the unavailable time periods, an average of 5.29% reduction is achieved in the makespan. In addition, 26% on average more successful results are obtained in shorter times with the developed genetic algorithm than GAMS/Cplex.





## Parallel Machine Scheduling Problem with Unavailable Time Periods and Sequence Dependent Setup Times

Feriştah ÖZÇELİK<sup>1,\*</sup> Tuğba SARAÇ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 26040, Odunpazarı/ESKİŞEHİR

### Abstract

In many factories, the production process may be interrupted periodically due to planned maintenance, lunch and rest breaks. It is important to consider these unavailable time periods when scheduling machines. For that reason, unrelated parallel machine scheduling problem with unavailable time periods and sequence dependent setup times is discussed in this study. A mathematical model and a genetic algorithm have been developed for the considered problem. The performance of the proposed solution methods is demonstrated using randomly generated test problems. By taking into account the unavailable time periods, an average of 5.29% reduction is achieved in the makespan. In addition, 26% on average more successful results are obtained in shorter times with the developed genetic algorithm than GAMS/Cplex.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 11.03.2022*  
*Düzeltilme: 21.04.2022*  
*Kabul: 19.06.2022*

### Keywords

*Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem*  
*Unavailable Time Periods*  
*Sequence Dependent Setup Times*  
*Genetic Algorithm*

### Anahtar Kelimeler

*İlişkisiz Paralel Makine Çizelgeleme Problemi*  
*Kullanılmayan Zaman Dilimleri*  
*Sıra Bağımlı Hazırlık Süreleri*  
*Genetik Algoritma*

### Kullanılmayan Zaman Dilimlerinin ve Sıra Bağımlı Hazırlık Sürelerinin Olduğu Paralel Makina Çizelgeleme Problemi

### Öz

Pek çok fabrikada üretim süreci, planlı bakım, öğle yemeği ve dinlenme molaları gibi nedenlerle periyodik olarak kesintiye uğrayabilmektedir. Makineleri çizelgelerken kullanılmayan zaman dilimlerinin göz önünde bulundurulması önemlidir. Bu nedenle, bu çalışmada kullanılmayan zaman dilimlerinin ve sıra bağımlı hazırlık sürelerinin olduğu ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Ele alınan problem için bir matematiksel model ve bir genetik algoritma geliştirilmiştir. Önerilen çözüm yöntemlerinin performansı rassal üretilen test problemleri kullanılarak gösterilmiştir. Kullanılmayan zaman dilimlerinin dikkate alınmasıyla son işin tamamlanma zamanında ortalama %5,29'luk bir azalma sağlanmıştır. Ayrıca, geliştirilen genetik algoritma ile GAMS/Cplex'den ortalama %26 daha başarılı çözümler daha kısa sürelerde elde edilmiştir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çizelgeleme literatüründe çalışmaların önemli bir kısmında makinaların sürekli olarak kullanılabilir durumda olduğu varsayılır. Oysa, pek çok sektörde üretim planlı bakım, öğle yemeği ve dinlenme molaları gibi nedenlerle periyodik olarak kesintilere uğramaktadır. Çizelgeleme yapılırken periyodik kullanılmayan zaman dilimlerinin dikkate alınmaması, işlerin tamamlanma zamanlarını uzatabilir. Literatürde kullanılmayan zaman dilimlerini dikkate alan tek makine çizelgeleme konulu çalışmalardan erişilebilenler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1'den de görülebileceği gibi en çok ele alınan amaç fonksiyonlarından birisi  $C_{enb}$ 'tür ([1]-[7]). Ve çözüm yöntemi olarak genellikle metasezgisel ya da sezgisel algoritmalar ([1]-[7], [9]-[10], [12], [15]-[17]) kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Kullanılmayan zaman dilimlerinin dikkate alındığı tek makine çizelgeleme çalışmaları

Kaynak	SBHS Amaç	Çözüm Yöntemi
Low vd. [1]	$C_{enb}$	HA
Perez-Gonzalez ve Framinan [2]	$C_{enb}$	HA
Ji ve Cheng [3]	$C_{enb}$	PTA
Rapine vd. [4]	$C_{enb}$	PTA
Shabtay ve Zofi [5]	$C_{enb}$	PTA
Shabtay [6]	$C_{enb}$ , toplam kaynak tüketim maliyeti	PTA
Mor ve Mosheiov [7]	$C_{enb}$ , toplam tamamlanma zamanı ve geciken iş sayısı	HA
Kacem vd. [8]	ağırlıklı toplam tamamlanma zamanı	DP, B&B
Khoudi ve Berrichi [9]	toplam gecikme ve makinenin kullanılmadığı süre	GA, B&B
Laalaoui ve M'Hallah [10]	ağırlıklı toplam geciken iş sayısı	VNS
Low vd. [11]	toplam erkenlik ve gecikme	MIP, DP
Mashkani ve Moslehi [12]	toplam tamamlanma zamanı	HA, B&B
Mor ve Shapira [13]	ağırlıklı toplam tamamlanma zamanı	DP
Mosheiov vd. [14]	toplam iş gecikmesi	DP
Su ve Wang [15]	tamamlanma zamanlarının toplam mutlak sapması	HA
Yazdani vd. [16]	toplam erkenlik ve gecikme	VNS
Yin vd. [17]	toplam iş gecikmesi	DP, PTA
Bülbül vd. [18]	tamamlanma zamanlarının toplam sapması	DP

SBHS: Sıra Bağımlı Hazırlık Süreleri, GA: Genetik Algoritma, B&B: Dal-Sınır, PTA: Polinom Zamanlı Algoritma, DP: Dinamik Programlama, VNS: Değişken Komşuluk Arama, HA: Sezgisel Algoritma, MIP: Karma Tamsayılı Programlama

Tek makine çizelgeleme dışındaki paralel makine, akış tipi ve atölye tipi gibi farklı ortamlara sahip makine çizelgeleme problemleri incelendiğinde kullanılmayan zaman dilimini dikkate alan çalışmaların sadece paralel makine çizelgelemeyle sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu kapsamda erişilen çalışmalar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2’den de görülebileceği gibi çalışmaların önemli bir kısmında tüm makinaların aynı özelliklere sahip olduğunun varsayıldığı özdeş paralel makine çizelgeleme problemi ([19]-[25]) ele alınmıştır. Üstelik Al-Shayea vd. [19] problemin sadece iki makinenin olduğu basit versiyonunu incelemişlerdir. İlişkisiz paralel makinaları dikkate alan sadece bir çalışmaya [27] erişilmiştir. Ancak dikkat edileceği üzere, Tablo 1 ve Tablo 2’de yer alan çalışmaların hiçbirisinde sıra bağımlı hazırlık süreleri (SBHS) ele alınmamıştır. Oysa eğer hazırlık süreleri sıra bağımlı ise başarısız bir iş sırası  $C_{enb}$  değerinin kontrolsüzce artmasına yol açabilir. Bu tür hazırlık sürelerinin pek çok sektörde olduğu da göz önünde bulundurulduğunda SBHS’nin dikkate alınmasının önemi ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada SBHS’lerin ve kullanılmayan zaman dilimlerinin olduğu ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi literatürde ilk kez ele alınmıştır.

İzleyen bölümde ele alınan problem tanımlanmış ve geliştirilen matematiksel model sunulmuştur. Üçüncü bölümde önerilen genetik algoritma açıklanmış, dördüncü bölümde deneysel sonuçlar verilmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar ve geleceğe dair öneriler tartışılmıştır.

**Tablo 2.** Kullanılmayan zaman dilimlerinin dikkate alındığı paralel makine çizelgeleme çalışmaları

Kaynak	MO	SBHS	Amaç	Çözüm Yöntemi
Al-Shayea vd. [19]	$P_2$		$C_{enb}$	GA
Berrichi ve Yalaoui [20]	$P_m$		toplam gecikme	AC
Dong [21]	$P_m$		toplam maliyet	CG, B&B
Fu vd. [22]	$P_m$		toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı	PTA
Huo [23]	$P_m$		$C_{enb}$	PTA
Moradi ve Zandieh [24]	$P_m$		$C_{enb}$ , sistemin kullanılmadığı süre	GA
Nessah ve Chu [25]	$P_m$		toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı	LB
Kaabi ve Harrath [26]	$Q_m$		$C_{enb}$	PTA
Wang ve Liu [27]	$R_m$		$C_{enb}$ , sistemin kullanılmadığı süre	NSGA-II
Bu çalışma	$R_m$	✓	$C_{enb}$	VNS

MO: Makine Ortamı, SBHS: Sıra Bağımlı Hazırlık Süreleri,  $P_m$ :  $m$  özdeş paralel makine,  $Q_m$ :  $m$  farklı hızlara sahip (uniform) paralel makine,  $R_m$ :  $m$  ilişkisiz paralel makine, GA: Genetik Algoritma, AC: Karınca Kolonisi, CG: Sütun Türetme, B&B: Dal-Sınır, PTA: Polinom Zamanlı Algoritma, LB: Alt Sınır, VNS: Değişken Komşuluk Arama

## 2. PROBLEM TANIMI VE ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL (PROBLEM DEFINITION AND THE PROPOSED MATHEMATICAL MODEL)

Ele alınan problemde,  $n$  iş,  $m$  paralel makinede işlem görmektedir.  $j$  işinin her makinedeki işlem süresi ( $p_{jl}$ ) farklıdır. İşlerin hazırlık süreleri sıra ve makine bağımlıdır. İşler sıfır zamanında hazırır. Her makine aynı anda sadece bir iş gerçekleştirebilmektedir. Her makinada kullanılabilen ve kullanılmayan zaman dilimleri (KMZ) mevcuttur. Bir iş kullanılmayan zaman dilime atanamaz ve bölünemez. Bu nedenle ya kullanılmayan zaman diliminden önce tamamlanmalıdır ya da kullanılmayan zaman diliminden sonra başlamalıdır. Amaç fonksiyonu, son işin tamamlanma zamanının enküçüklenmesidir.

Önerilen matematiksel model (İPM-KMZ) ve bu modele ait kümeler, indisler, parametreler, karar değişkenleri, kısıtlar ve amaç fonksiyonu aşağıda verilmiştir;

*Kümeler ve Indisler:*

$N$ : iş kümesi,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$

$M$ : makine kümesi,  $M = \{1, 2, \dots, m\}$

$Q = \{1, 2, \dots, e_{nb} \delta_i\}$  KMZ kümesi. Burada  $\delta_i$  makine  $i$ 'nin KMZ sayısı

$i, j \in N$  iş indisi

$k \in N$  sıra indisi

$l \in M$  makine indisi

$f \in Q$  KMZ indisi

*Parametreler:*

$p_{jl}$ :  $j$  işin  $l$  makinedeki işlem süresi

$h_{jl}$ :  $j$  işin  $l$  makinede ilk sıraya atanması durumunda hazırlık süresi

$s_{ijl}$ :  $i$  işi  $j$  işinden önce  $l$  makinede çizelgelenmişse sıra ve makine bağımlı hazırlık süresi

$\theta$ : yeterince büyük bir pozitif sayı

$b_l$ : makine  $l$ 'deki kullanılmayan zaman diliminin süresi

$\sigma_l$ : makine  $l$ 'deki kullanılabilir zaman diliminin süresi

**Karar Değişkenleri:**

$x_{jkl}$ : eğer  $j$ . iş  $l$ . makinenin  $k$ . sırasına atandıysa 1, diğer durumda 0

$e_j$ :  $j$  işinin başlama zamanı

$C_j$ :  $j$  işinin tamamlanma zamanı

$C_{enb}$ : enbüyük tamamlanma zamanı  $C_{enb} = \max \{C_j\}$

$e_{fl}^{UP}$ : makine  $l$ 'deki  $f$ . KMZ'nin başlama zamanı

$C_{fl}^{UP}$ : makine  $l$ 'deki  $f$ . KMZ'nin tamamlanma zamanı

$w_{jfl}$ : çakışma kısıtları için kullanılan 0-1 değişken. (1, eğer  $C_j \leq e_{fl}^{UP}$ ; 0, eğer  $C_{fl}^{UP} \leq e_j$ ).

**(İPM-KMZ)****Amaç fonksiyonu:**

$$\min z_{İPM-KMZ} = C_{enb} \quad (1)$$

**Kısıtlar:**

$$\sum_j x_{jkl} \leq 1 \quad \forall k, l \quad (2)$$

$$\sum_k \sum_l x_{jkl} = 1 \quad \forall j \quad (3)$$

$$\sum_j x_{jkl} - \sum_i x_{i(k-1)l} \leq 0 \quad \forall k, l \quad k > 1 \quad (4)$$

$$C_j \geq h_{jl} + p_{jl} - M(1 - x_{jkl}) \quad \forall j, k, l \quad k = 1 \quad (5)$$

$$C_j \geq C_i + p_{jl} + s_{ijl} - M(2 - x_{jkl} - x_{i(k-1)l}) \quad \forall i, j, k, l \quad i \neq j, k > 1 \quad (6)$$

$$e_j \geq -M(1 - x_{jkl}) \quad \forall j, k, l \quad k = 1 \quad (7)$$

$$e_j \leq M(1 - x_{jkl}) \quad \forall j, k, l \quad k = 1 \quad (8)$$

$$e_j \geq C_j - p_{jl} - s_{ijl} - M(2 - x_{jkl} - x_{i(k-1)l}) \quad \forall i, j, k, l \quad i \neq j, k > 1 \quad (9)$$

$$e_j \leq C_j - p_{jl} - s_{ijl} + M(2 - x_{jkl} - x_{i(k-1)l}) \quad \forall i, j, k, l \quad i \neq j, k > 1 \quad (10)$$

$$C_{enb} \geq C_j \quad \forall j \quad (11)$$

$$e_{fl}^{UP} = \sigma_l \quad f = 1, \forall l \in M \quad (12)$$

$$C_{fl}^{UP} = C_{f-1,l}^{UP} + b_l + \sigma_l \quad f > 1, \forall l \in M \quad (13)$$

$$e_{fl}^{UP} = C_{fl}^{UP} - b_l \quad \forall f \in Q, \forall l \in M \quad (14)$$

$$C_{fl}^{UP} \leq e_j + \theta \left( 1 - \sum_k x_{jkl} \right) + \theta w_{jff} \quad \forall j \in N, \forall f \in Q, \forall l \in M \quad (15)$$

$$C_j \leq e_{fl}^{UP} + \theta \left( 2 - \sum_k x_{jkl} - w_{jff} \right) \quad \forall j \in N, \forall f \in Q, \forall l \in M \quad (16)$$

$$x_{jkl} \in \{0,1\} \quad \forall j, k \in N, \forall l \in M \quad (17)$$

$$e_j, C_j \geq 0 \quad \forall j \in N \quad (18)$$

$$C_{enb} \geq 0 \quad (19)$$

$$e_{fl}^{UP}, C_{fl}^{UP} \geq 0 \quad \forall f \in Q, \forall l \in M \quad (20)$$

$$w_{jf} \in \{0,1\} \quad \forall j \in N, \forall f \in Q \quad (21)$$

Amaç (1) son işin tamamlanma zamanının enküçüklenmesidir. Denklem (2) her makinanın her sırasına en fazla bir işin atanmasını sağlamaktadır. Denklem (3) her işin mutlaka bir makinanın bir sırasına atanmasını garanti etmektedir. Denklem (4) işlerin sıra atlamadan işlenmesini sağlamaktadır. Denklem (5) ve (6) işlerin tamamlanma zamanını hesaplama kısıtlarıdır. Denklem (7)-(8) ilk sıradaki, Denklem (9)-(10) sonraki sıralardaki işlerin başlama zamanlarını hesaplayan kısıtlardır. Denklem (11) son işin tamamlanma zamanını belirlemektedir. Denklem (12)-(14) kullanılmayan zaman dilimlerinin başlama ve bitiş zamanlarını hesaplamaktadır. Denklem (15) ve (16) her makinada işler ile kullanılmayan zamanların çakışmalarını önleyen kısıtlardır. Denklem (17)-(21) karar değişkenlerine ait işaret kısıtlarıdır.

### 3. ÖNERİLEN GENETİK ALGORİTMA (THE PROPOSED GENETIC ALGORITHM)

Genetik algoritma (GA), evrim teorisinden gelen ilkelere dayanan güçlü ve geniş çapta uygulanabilir stokastik arama ve eniyileme tekniğidir [28]. GA’da, her çözüm kromozom adı verilen bir sembol dizisi ile ifade edilir. Birden çok kromozomdan oluşan ve popülasyon adı verilen yapı kullanılarak aynı anda çok noktada eşzamanlı arama yapılır. GA, her nesil için seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörlerini kullanarak daha başarılı çözümleri araştırır. Geliştirilen genetik algoritmanın adımları aşağıda verilmiştir:

*Adım 1:* Rastgele bir başlangıç popülasyonu oluştur.

*Adım 2:* Mevcut popülasyondaki her kromozom için uyum değerini hesapla.

*Adım 3:* Mevcut nesile *ikili turnuva* seçim, *OX* çaprazlama ve *rastgele taşı*, *ikili yer değiştirme*, *tek makinada ikili yer değiştirme* mutasyon operatörlerinden rassal seçilen birisini uygulayarak yeni nesili türet.

*Adım 4:* Durdurma kriteri sağlandıysa DUR, sağlanmadıysa *Adım 2*'ye git.

Bu çalışmada çözümlerin gösteriminde permütasyon kodlama yapısı kullanılmıştır. Kromozom  $(n + m - 1)$  adet genden oluşmaktadır. Kromozomun  $(m - 1)$  geni ‘\*’dır ve farklı bir makinarya geçildiğini gösterir. Üç paralel makinede çizelgelenen on iş için örnek bir kromozom Şekil 1’de verilmiştir.

2	7	3	*	9	1	6	10	*	5	4	8
---	---	---	---	---	---	---	----	---	---	---	---

**Şekil 1:** Örnek bir kromozom

Şekil 1’deki örnek kromozomun karşı geldiği çözümde; 2, 7 ve 3 numaralı işler 1. makinarya, 9, 1, 6 ve 10 numaralı işler 2. makinarya ve 5, 4 ve 8 numaralı işler 3. makinarya verilen sırada atanmıştır.

Çaprazlama operatörü olarak ise OX kullanılmıştır. Bu operatörün çalışma mekanizması Şekil 2’de gösterilmiştir.

Ebeveyn 1	2	7	3	*	9	1	6	10	*	5	4	8
Ebeveyn 2	10	3	7	9	*	4	6	8	5	*	1	2
Çocuk	3	7	9	*	4	1	6	10	8	5	*	2

**Şekil 2:** OX çaprazlama operatörü

Şekil 2’de rassal olarak seçilen iki ebeveyn kromozomun ilkinden rassal bir parça seçilir. Şekilde seçilen parça gri ile işaretlenmiştir. Bu parça konumu korunarak doğrudan çocuk kromozoma aktarılır. İkinci ebeveyn kromozomdan mavi ile işaretli genler silinir ve kalan genler çocuk kromozomun boş genlerine sırası korunarak aktarılır.

Bu çalışmada üç farklı mutasyon operatörü kullanılmıştır. Bu operatörler; *rastgele taşı*, *ikili yer değiştirme*, *tek makinada ikili yer değiştirme*dir. *Rastgele taşı* operatöründe rassal olarak seçilen bir gen kromozomun rassal olarak seçilen bir noktasına taşınmaktadır. *İkili yer değiştirme* operatöründe kromozomun rassal olarak seçilen iki geni karşılıklı yer değiştirmektedir. *Tek makinada ikili yer değiştirme* operatöründe ise karşılıklı yer değiştirecek genler aynı makinadan seçilmektedir. Bu çalışmada *rastgele taşı*, *ikili yer değiştirme*, *tek makinada ikili yer değiştirme* mutasyon operatörleri sırasıyla %20, %40 ve %40 olasılıkla rassal seçilerek uygulanmıştır.

Geliştirilen GA’nın uyum fonksiyonu, önerilen matematiksel modelin amaç fonksiyonudur. Seçim operatörü olarak ikili turnuva kullanılmıştır. GA, 10000 nesil boyunca çözümü iyileştirememişse sonlandırılır. Popülasyon büyüklüğü 50, çaprazlama oranı 0,75 ve mutasyon oranı 0,01 olarak alınmıştır.

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

Tüm testler Intel (R) Core (TM) i7- 5700HQ CPU@2.70 GHz işlemcisi, 8 GB belleği ve Windows 10 işletim sistemine sahip bir bilgisayarda çözülmüştür. Önerilen matematiksel modelin çözümünde GAMS 24.0.2 Cplex çözücüsü kullanılmıştır. Geliştirilen GA ise Delphi’de kodlanmıştır. Bölüm 4.1’de, test problemlerinin türetilme mekanizması, bölüm 4.2’de örnek problem ve bölüm 4.3’de ise elde edilen test sonuçları ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

##### 4.1. Test Problemleri (Test Problems)

Önerilen yöntemlerin performansını test etmek için rassal olarak türetilen test problemleri kullanılmıştır. Türetilen test problemlerinin özellikleri Tablo 3’de verilmiştir.

**Tablo 3. Test Problemlerinin Özellikleri**

$n-m$	10-2, 20-3, 30-4, 100-5, 150-6, 200-7
$p_{jl}$	$U[20,100]$
$h_{jl}, s_{jkl}$	$U[5,20]$
$b_l$	$U[20,30]$
$\sigma_l$	$\delta \frac{n}{m} \Delta$ burada $\delta \sim U[120,150]$ , $\Delta \in \left\{ \frac{1}{4}, \frac{1}{3} \right\}$

Altı adet iş-makina ( $n-m$ ) kombinasyonu ve iki tip  $\Delta$  değerine sahip olmak üzere 12 problem tipi oluşturulmuştur. Her bir problem tipi için üçer örnek olacak şekilde toplamda 36 adet test problemi türetilmiştir. Test problemleri  $n-m-\Delta$  *tipi-örnek no* şeklinde isimlendirilmiştir.  $\Delta$  *tipi* 1 ya da 2 değerini almaktadır. 1,  $\Delta$ ’nın  $\frac{1}{3}$ , 2 ise  $\Delta$ ’nın  $\frac{1}{4}$  olduğu durumu temsil etmektedir.

##### 4.2. Örnek Problem (Sample Problem)

Örnek problem 10 iş, 2 makine içermektedir. İşlerin makine bazlı üretim süreleri ve ilk hazırlık süreleri Tablo 4’te, sıra bağımlı hazırlık süreleri Tablo 5’te, kullanılabilir ve kullanılmayan zaman dilimlerinin süreleri ise Tablo 6’da verilmiştir.

**Tablo 4.**  $p_{jl}$  ve  $h_{jl}$  parametreleri

$p_{jl}$			$h_{jl}$		
$j/l$	1	2	$j/l$	1	2
1	92	57	1	14	13
2	66	41	2	12	15
3	84	46	3	11	8
4	57	45	4	5	13
5	76	76	5	11	14
6	48	95	6	6	13
7	42	90	7	10	10
8	51	56	8	8	16
9	32	44	9	9	19
10	40	69	10	13	13

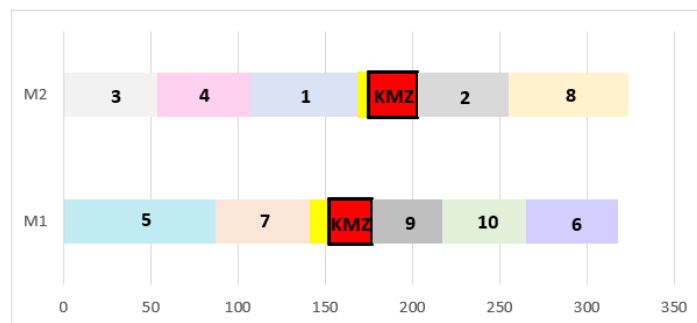
**Tablo 5.**  $s_{jkl}$  parametresi

$l=1$											$l=2$										
$i/j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$i/j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	13	9	14	17	13	8	9	14	6	1	0	11	5	15	17	9	16	17	6	13
2	11	0	18	15	19	16	6	8	11	17	2	17	0	10	19	9	13	13	13	19	9
3	11	8	0	6	7	15	9	18	10	7	3	14	18	0	8	7	20	15	13	16	10
4	8	16	20	0	7	14	18	13	6	12	4	5	10	14	0	11	10	20	20	9	19
5	19	5	11	18	0	17	12	8	14	15	5	16	11	19	8	0	13	6	5	17	20
6	17	15	8	13	6	0	18	10	9	11	6	8	18	7	6	7	0	7	10	12	10
7	15	16	6	17	18	18	0	14	8	12	7	19	20	8	14	11	11	0	19	12	16
8	16	18	18	15	7	7	11	0	13	8	8	11	13	14	10	19	6	9	0	6	6
9	14	7	16	7	18	12	10	7	0	8	9	16	14	19	13	8	12	18	12	0	19
10	13	18	15	9	8	5	16	17	16	0	10	9	10	7	18	14	12	6	8	11	0

**Tablo 6.**  $\sigma_l$  ve  $b_l$  parametreleri

$l$	$\sigma_l$	$b_l$
1	152	25
2	175	28

Ele alınan problemde KMZ'leri ele almanın son işin tamamlanma zamanına etkisini gösterebilmek amacıyla, iki farklı durum incelenmiştir. İlk durumda iş sıraları belirlenirken KMZ dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle örnek problem öncelikle önerilen matematiksel modelin (7)-(10) ve (12)-(18) kısıtları olmadan klasik ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi (İPM) olarak çözülmüş ve birinci makine için iş sırası 5, 7, 9, 10 ve 6 ikinci makine için ise iş sırası 3, 4, 1, 2, 8 olarak elde edilmiştir. Elde edilen iş sıraları sabitlenerek problem önerilen modelle çözülmüş ve son işin tamamlanma zamanı 324 olarak elde edilmiştir. Durum 1'e ait Gantt şeması Şekil 3'de verilmiştir.

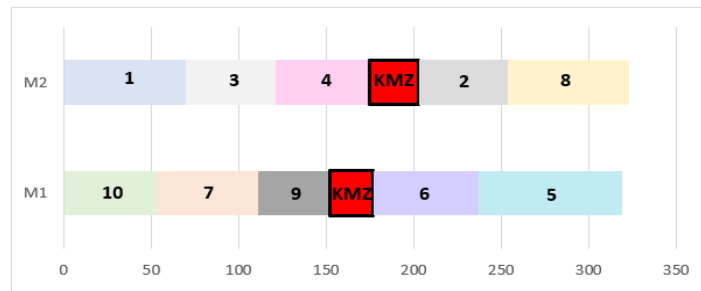


**Şekil 3.** Durum 1: İş sıralarının İPM ile elde edildiği çözüm için Gantt Şeması

Şekil 3'ten de görülebileceği gibi, Makine 1 (M1)'de KMZ'den önceki son iş olan 7 numaralı işin tamamlanma zamanı 141 olup KMZ'nin başlangıcı ise 152'dir. 11 birimlik bir bekleme oluşmuştur. Makine 2 (M2)'de KMZ'den önceki son iş olan 1 numaralı işin tamamlanma zamanı 169 olup KMZ'nin başlangıcı ise 175'dir. 6 birimlik bir bekleme oluşmuştur.

İkinci durumda, örnek problem önerilen matematiksel model ile 1682 saniyede çözülmüş ve eniyi amaç fonksiyonu değeri 323 olarak elde edilmiştir. Elde edilen çözüme ait Gantt Şeması Şekil 4'de verilmiştir. M1'de KMZ'den önceki son iş olan 9 numaralı işin tamamlanma zamanı 151 olup KMZ'nin başlangıcı ise 152'dir. Sadece 1 birimlik bir bekleme oluşmuştur. Benzer şekilde M2'de KMZ'den önceki son iş olan 4 numaralı işin tamamlanma zamanı 174 olup KMZ'nin başlangıcı ise 175'dir. Yine sadece 1 birimlik bir bekleme oluşmuştur.

Durum 1 ve Durum 2 birlikte değerlendirildiğinde KMZ'lerin dikkate alınmasıyla hem KMZ'lerden önceki makinelerin boş bekleme sürelerinde önemli bir düşüş hem de son işin tamamlanma zamanında azalma sağlanmıştır.



Şekil 4. Durum 2: Örnek Problemin İPM-KMZ ile çözülmesiyle elde edilen Gantt Şeması

#### 4.2. Test Sonuçları (Test Results)

Öncelikle 10 iş 2 makinalı problemler için KMZ'leri ele almanın son işin tamamlanma zamanına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla ilgili problemler hem İPM-KMZ modeli ile çözülmüş hem de İPM ile elde edilen iş sıraları sabitlenerek İPM-KMZ modelinin amaç fonksiyonu değerleri ( $Z_{İPM}$ ) hesaplanmıştır. Süre limiti içinde tüm problemlerin eniyi çözümlerine ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 7'de verilmiştir. Burada son sütunda yer alan  $\%fark$  değerleri (22) numaralı formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\%fark = \frac{Z_{İPM} - Z_{İPM-KMZ}}{Z_{İPM}} 100 \quad (22)$$

Tablo 7'den de görülebileceği gibi KMZ'lerin dikkate alınmasıyla  $C_{enb}$  değeri en fazla %11,84, ortalama %5,29 oranında azaltılmıştır.

Tablo 7. KMZ'leri dikkate almanın etkisi

problem	İPM-KMZ GAMS		İPM GAMS		%
	$Z_{İPM-KMZ}$	$t$ (sn.)	$Z_{İPM}$	$t$ (sn.)	
10-2-1-1	269	4395	284	1104	5,28
10-2-1-2	321	3900	331	2477	3,02
10-2-1-3	283	3670	321	1399	11,84
10-2-2-1	323	2173	324	1602	0,31
10-2-2-2	383	5636	432	2351	11,34
10-2-2-3	271	1754	271	1649	0,00



Daha sonra  $n \leq 30$  ve  $n \geq 100$  problemleri önerilen İPM-KMZ modeli ve geliştirilen GA ile çözülmüş ve elde edilen sonuçlar sırasıyla Tablo 8 ve Tablo 9'da verilmiştir. Tablo 8'de son sütunda yer alan %iyileşme değerleri (23) numaralı formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\%iyileşme = \frac{Z_{İPM-KMZ} - Z_{GA}}{Z_{İPM-KMZ}} 100 \quad (23)$$

**Tablo 8.**  $n \leq 30$  problemlerinin test sonuçları

problem	GAMS		GA		% iyileşme
	$Z_{İPM-KMZ}$	$t$ (sn.)	$Z_{GA}$	$t$ (sn.)	
10-2-1-1	269	4395	269	1	0,00
10-2-1-2	321	3900	321	1	0,00
10-2-1-3	283	3670	283	1	0,00
10-2-2-1	323	2173	323	1	0,00
10-2-2-2	383	5636	383	1	0,00
10-2-2-3	271	1754	271	1	0,00
20-3-1-1	388	7200	372	1	4,12
20-3-1-2	340	7200	295	1	13,24
20-3-1-3	439	7200	416	1	5,24
20-3-2-1	538	7200	416	1	22,68
20-3-2-2	470	7200	424	1	9,79
20-3-2-3	412	7200	374	1	9,22
30-4-1-1	-	7200	386	1	-
30-4-1-2	760	7200	329	1	56,71
30-4-1-3	694	7200	361	1	47,98
30-4-2-1	-	7200	372	1	-
30-4-2-2	645	7200	418	2	35,19
30-4-2-3	933	7200	390	2	58,20

**Tablo 9.**  $n \geq 100$  problemlerinin test sonuçları

problem	GAMS		GA	
	$Z_{İPM-KMZ}$	$t$ (sn.)	$Z_{GA}$	$t$ (sn.)
100-5-1-1	-	7200	909	80
100-5-1-2	-	7200	922	50
100-5-1-3	-	7200	877	85
100-5-2-1	-	7200	927	144
100-5-2-2	-	7200	932	58
100-5-2-3	-	7200	905	80
150-6-1-1	-	7200	1126	142
150-6-1-2	-	7200	1114	164
150-6-1-3	-	7200	1187	104
150-6-2-1	-	7200	1175	147
150-6-2-2	-	7200	1162	197
150-6-2-3	-	7200	1158	177
200-7-1-1	-	7200	1365	158
200-7-1-2	-	7200	1373	199
200-7-1-3	-	7200	1376	271
200-7-2-1	-	7200	1335	343
200-7-2-2	-	7200	1359	311
200-7-2-3	-	7200	1347	363

Tablo 8'den de görülebileceği gibi, problemler önerilen İPM-KMZ modeli ile çözüldüğünde, tüm 10 boyutlu problemlerin süre limiti içinde eniyi çözümlerine ulaşılmıştır. 30-4-1-1 ve 30-4-2-1 problemlerine süre limiti içinde uygun çözüm bulunamazken diğer problemler için uygun çözümler elde edilmiştir.

Geliştirilen GA ile eniyi çözümleri bilinen tüm problemlerin eniyi çözümlerine ulaşılmıştır. Matematiksel model ile çözülemeyen problemlere uygun çözüm bulunmuş ve modelle uygun çözümleri elde edilen tüm problemlerin  $C_{enb}$  değerleri de iyileştirilmiştir. Enbüyük iyileşme oranı 30-4-2-3 problemi için %58,2 olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 9'dan da görülebileceği gibi,  $n \geq 100$  problemlerinin hiçbirisine önerilen İPM-KMZ modeli ile süre limiti içinde uygun çözüm bulunamamıştır. Geliştirilen GA ile ise tüm problemler için uygun çözümler elde edilmiştir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada sıra bağımlı hazırlık sürelerinin ve kullanılmayan zaman dilimlerinin olduğu ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Ele alınan problem için bir matematiksel model ve bir genetik algoritma geliştirilmiştir. Önerilen çözüm yöntemlerinin performansı rassal türetilen test problemleri kullanılarak gösterilmiştir. Kullanılmayan zaman dilimlerinin dikkate alınmasıyla son işin tamamlanma zamanında ortalama %5,29'luk bir azalma sağlanmıştır. Önerilen matematiksel model ve GAMS/Cplex ile süre limiti içinde 10 boyutlu problemlerin en iyi çözümleri elde edilmiştir. 20 ve 30 boyutlu problemler için uygun çözümlere ulaşılrken, 100 ve daha büyük boyutlu problemler çözülememiştir. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için geliştirilen GA ile bu problemlerin uygun çözümlerine erişilmiştir. Ayrıca geliştirilen GA, 10 boyutlu problemlerin en iyi çözümlerine ulaşmıştır. 20 ve 30 boyutlu problemlerin GAMS/Cplex ile elde edilmiş çözümleri ise ortalama %26 iyileştirilmiştir. Gelecekte, geliştirilen matematiksel model ve genetik algoritma, kullanılmayan zaman dilimlerinin daha önce hiç dikkate alınmadığı akış tipi ve atölye tipi çizelgeleme problemlerine uyarlanabilir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Low C., Ji M., Hsu C-J., Su C-T. (2010). Minimizing the makespan in a single machine scheduling problems with flexible and periodic maintenance, *Applied Mathematical Modelling*, 34, 334–342.
- [2] Perez-Gonzalez P., Framinan J.M. (2018). Single machine scheduling with periodic machine availability, *Computers & Industrial Engineering*, 123, 180–188.
- [3] Ji M., Cheng T.C.E. (2010). Scheduling resumable simple linear deteriorating jobs on a single machine with an availability constraint to minimize makespan, *Computers & Industrial Engineering*, 59, 794–798.
- [4] Rapine C., Brauner N., Finke G., Lebacque V. (2012). Single machine scheduling with small operator-non-availability periods, *Journal of Scheduling*, 15, 127–139.
- [5] Shabtay D., Zofi, M. (2018). Single machine scheduling with controllable processing times and an unavailability period to minimize the makespan, *International Journal of Production Economics*, 198, 191–200.
- [6] Shabtay D. (2022). Single-machine scheduling with machine unavailability periods and resource dependent processing times, *European Journal of Operational Research*, 296, 423–439.
- [7] Mor B., Mosheiov G. (2012). Heuristics for scheduling problems with an unavailability constraint and position-dependent processing times, *Computers & Industrial Engineering*, 62, 908–916.
- [8] Kacem I., Chu C., Souissi A. (2008). Single-machine scheduling with an availability constraint to minimize the weighted sum of the completion times, *Computers & Operations Research*, 35, 827 – 844.
- [9] Khoudi A., Berrichi A. (2020). Minimize total tardiness and machine unavailability on single machine scheduling problem: bi-objective branch and bound algorithm, *Operational Research*, 20, 1763–1789.

- [10] Laalaoui Y., M'Hallah R. (2016). A binary multiple knapsack model for single machine scheduling with machine unavailability, *Computers & Operations Research*, 72, 71–82.
- [11] Low C., Li R-K., Wu G-H. (2016). Minimizing total earliness and tardiness for common due date single-machine scheduling with an unavailability interval, *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 6124734
- [12] Mashkani O., Moslehi G. (2016). Minimising the total completion time in a single machine scheduling problem under bimodal flexible periodic availability constraints, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(3), 323-341.
- [13] Mor B., Shapira D. (2022). Single machine scheduling with non-availability interval and optional job rejection, *Journal of Combinatorial Optimization*, In press.
- [14] Mosheiov G., Oron D. Shabtay D. (2021). Minimizing total late work on a single machine with generalized due-dates, *European Journal of Operational Research*, 293, 837–846.
- [15] Su L-H, Wang H-M. (2017). Minimizing total absolute deviation of job completion times on a single machine with cleaning activities, *Computers & Industrial Engineering*, 103, 242–249.
- [16] Yazdani M., Khalili S.M., Babagolzadeh M., Jolai F. (2017). A single-machine scheduling problem with multiple unavailability constraints: A mathematical model and an enhanced variable neighborhood search approach, *Journal of Computational Design and Engineering*, 4, 46–59.
- [17] Yin Y., Xu J., Cheng T. C. E., Wu C-C, Wang D-J. (2016). Approximation schemes for single-machine scheduling with a fixed maintenance activity to minimize the total amount of late work, *Naval Research Logistics*, 63, 172–183.
- [18] Bülbül K., Kedad-Sidhoum S., Sen H. (2019). Single-machine common due date total earliness/tardiness scheduling with machine unavailability, *Journal of Scheduling*, 22, 543–565.
- [19] Al-Shayea A.M., Saleh M. , Alatefi M., Ghaleb M. (2020). Scheduling two identical parallel machines subjected to release times, *Delivery Times and Unavailability Constraints, Processes*, 8, 1025.
- [20] Berrichi A., Yalaoui F. (2013). Efficient bi-objective ant colony approach to minimize total tardiness and system unavailability for a parallel machine scheduling problem, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, 2295–2310.
- [21] Dong M. (2013). Parallel machine scheduling with limited controllable machine availability, *International Journal of Production Research*, 51(8), 2240-2252.
- [22] Fu B., Huo Y., Zhao H. (2011). Approximation schemes for parallel machine scheduling with availability constraints, *Discrete Applied Mathematics*, 159, 1555–1565.
- [23] Huo Y. (2019). Parallel machine makespan minimization subject to machine availability and total completion time constraints, *Journal of Scheduling*, 22, 433–447.
- [24] Moradi E., Zandieh M. (2010). Minimizing the makespan and the system unavailability in parallel machine scheduling problem: a similarity-based genetic algorithm, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51, 829–840.
- [25] Nessah R., Chu C. (2010). Infinite split scheduling: a new lower bound of total weighted completion time on parallel machines with job release dates and unavailability periods, *Annals of Operations Research*, 181, 359–375.
- [26] Kaabi J., Harrath Y. (2019). Scheduling on uniform parallel machines with periodic unavailability constraints, *International Journal of Production Research*, 57(1), 216-227.

- [27] Wang S., Liu M. (2015). Multi-objective optimization of parallel machine scheduling integrated with multi-resources preventive maintenance planning, *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 182–192.
- [28] Gen M., Cheng R. (1997). *Genetic algorithms and engineering design*, John Wiley and Sons.

## Experimental Investigation of the Dishwasher Cleaning Performance

Oğuzhan KELEŞ<sup>1</sup>  Zeynep PARLAR<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup>Istanbul Technical University, Mechanical Engineering Faculty, 34437, Beyoğlu/Istanbul

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, a lower spray arm mechanism was designed to increase the washing efficiency of dishwashers and to reduce the noise level during operation.

#### Article Info:

Research article  
Received: 13.05.2022  
Revision: 22.06.2022  
Accepted: 05.07.2022

#### Highlights

- Mechanical Effect.
- Nozzle angle.
- Swept area.

#### Keywords

Washing performance  
Dishwasher  
Sound level  
Planet spray arm  
Water jet



Figure A. planet spray arm mechanism design

**Purpose:** The parameters affecting the cleaning performance of dishwashers can be listed as temperature, time, mechanical and chemical effect [4]. The mechanical effect used in the cleaning process is created by the water jet. The pressure of the sprayed water increases after passing through the nozzle. Water pressure, rotational speed of spray arm and the area swept by the spray arm can be listed as parameters that directly affect the washing performance. In this study, it is aimed to improve the mechanical effect by increasing the area swept by the spray arm.

**Theory and Methods:** The washing performance of the dishwasher, in which this planet spray arm mechanism is used, has been experimentally investigated in accordance with the EN 50242 Standard. Washing performance tests were carried out on a 14-person dinner set. The contaminants, minced meat, eggs, oats, spinach, margarine, milk and tea, were applied to the parts of the dinnerware as specified in the standard. Afterwards, all of the parts that make up the set were evaluated according to the dirt-area scoring and the washing score value was obtained.

**Results:** In this study, the parameters affecting the washing performance of the dishwasher were examined and a lower spray arm was designed to increase the washing performance. With the proposed planet spray arm design, 82% of the interior volume can be swept. The nozzles on the spray arms are placed at the angle and position where the best performance can be obtained. Thus, both the washing performance is increased and the noise level is reduced.

**Conclusion:** The washing performance of the prototype planetary spray arm mechanism was evaluated according to EN50242 "Measurement of Washing Performance in Household Dishwashers" standards. The tests were performed under the same conditions for the proposed and existing design. As a result of the tests, an increase of 6.14% was observed in the washing performance. The sound levels of the existing lower spray arm and the planetary spray arm design were also compared. An improvement of 3 dBA was observed in the sound level.



## Experimental Investigation of the Dishwasher Cleaning Performance

Oğuzhan KELEŞ<sup>1</sup> Zeynep PARLAR<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Istanbul Technical University, Mechanical Engineering Faculty, 34437, Beyoğlu/İstanbul

### Abstract

Today, with the advancement of technology, studies on machines that make human life easier have also increased. While the companies in the sector compete with each other, they work hard to design machines that make a difference and to improve customer perception. In present study, a lower spray arm mechanism was designed to increase the washing efficiency of dishwashers and to reduce the noise level during operation. The washing performance of dishwashers could be increased with long washing times and the use of chemicals. However it causes increasing water and energy consumption, as well as environmental effect. For this reason, it has been aimed to improve the cleaning performance with the help of water jet, which is defined as the mechanical effect. For this purpose, a new mechanism design with planet spray arm, which allows sweep more area in the interior volume of the dishwasher, has been realized. The washing performance of the dishwasher, in which this planet spray arm mechanism is used, has been experimentally investigated in accordance with the EN 50242 Standard. The washing performance has been improved by 6.14% and dramatic decreases in sound level were observed.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 13.05.2022*  
*Düzeltilme: 22.06.2022*  
*Kabul: 05.07.2022*

### Keywords

*Washing performance*  
*Dishwasher*  
*Sound level*  
*Planet spray arm*  
*Water jet*

### Anahtar Kelimeler

*Yıkama performansı*  
*Bulaşık makinası*  
*Ses gücü düzeyi*  
*Uydu pervane*  
*Su jeti*

## Bulaşık Makinası Yıkama Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi

### Öz

Günümüzde teknolojinin ilerlemesiyle beraber insan hayatını kolaylaştıran makineler üzerinde yapılan çalışmalar da artmıştır. Sektörde yer alan firmalar birbirleri ile rekabet ederken fark yaratan makineler tasarlamak ve müşteri algısını geliştirmek için yoğun bir çalışma içerisindeyler. Sunulan çalışmada bulaşık makinalarının, yıkama etkinliğini artırma ve çalışma sırasında meydana gelen ses düzeyini düşürmeye yönelik bir pervane mekanizması tasarlanmıştır. Bulaşık makinelerinin yıkama performansının uzun yıkama süreleri ve kimyasal kullanımı ile artırılması hem su ve enerji tüketimini arttırdığı hem de çevresel nedenlerle istenmemektedir. Bu nedenle mekanik etki olarak tanımlanan su jeti yardımıyla temizleme performansının iyileştirilmesine yönelinmiştir. Bu amaçla bulaşık makinası iç hacminde daha fazla alan taramaya imkân veren uydu pervaneli yeni bir mekanizma tasarımı gerçekleştirilmiştir. EN 50242 Bulaşık Makinaları Yıkama Performansının Ölçülmesi standardına uygun olarak bu pervane mekanizmasının kullanıldığı bulaşık makinasının yıkama performansı deneysel olarak incelenmiştir. Hali hazırda kullanılan pervane sistemine göre yıkama performansı %6.14 oranında iyileştirilmiştir. Bunun yanında nozül tasarımındaki değişikliklerle ses düzeyinde de ciddi düşüşler gözlemlenmiştir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Modern şehir yaşantısında giderek çalışma hayatına katılan kişi sayısının artması insanların evde geçirdiği vaktin azalmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda özellikle genç nüfusun evdeki günlük işlere ayırdıkları zamanı azaltmak istemeleri elektrikli ev aletlerine olan ihtiyacı arttırmaktadır. Sunulan çalışmada elektrikli ev aletlerinden bulaşık makineleri ele alınacaktır. Bulaşık makineleri kirli bulaşıkları otomatik olarak yıkama ve durulama işlemi yaparak kullanıcılara zaman ve enerji tasarrufu sağlamakta, günden güne kullanım oranı artmaktadır [1]. Tüketicilerin Richter'in yaptığı araştırmaya göre bulaşık makinesi satın alırken en çok yıkama performansı, su ve enerji tüketimini dikkate aldıkları görülmektedir. Ayrıca düşük ses seviyesi ve satış fiyatı da tercih nedenleri arasında yer almaktadır [2]. Berkholz ve diğerlerinin yaptığı çalışmaya göre zaman tasarrufu sağladığı ve daha sağlıklı olduğu için tüketiciler bulaşık makinesi almayı tercih etmektedirler [3].

Bulaşık makineleri temizleme işlemini otomatik olarak yapan ve kir ile yüzey arasındaki bağı koparmaya yarayan makineler olarak tanımlanabilir. Genel olarak yıkama, durulama ve kurutma adımlarından oluşan bir çevrimde çalışmaktadır. Bu makinelerin temizleme performansını etkileyen parametreler sıcaklık (suyun ısıtılması), zaman (yıkama süresi), mekanik (su jeti ile kirin yüzeyden uzaklaştırılması) ve kimyasal (deterjan yardımıyla temizleme) etki olarak sıralanabilir [4].

Kimyasal (deterjan) kullanımı ve uzun yıkama süreleri ile en etkili temizlemeyi elde etmek mümkündür. Ancak günümüz insanları kimyasal yollarla temizleme işlemini sağlıklı bulmadığından bunun yerine mekanik etkiyle temizleme yöntemi gibi alternatifler aramaktadır. Amerika'da % 80'i bulaşık makinesi kullanıcısı olan 500 kişiyle kullanıcı davranışlarını incelemek üzere yapılan anket çalışmasında, kullanıcıların %54'ü uzun süren yıkama işlemlerine rağmen bulaşık makinesinin iyi temizlemediğini düşünmektedir. Kullanıcıların %75'i ise kirlerin daha iyi çıkarılması için, kirli bulaşıkları makineye dizmeden önce ön durulama işlemi yapmaktadır [5].

Temizleme sürecinde kullanılan mekanik etki su jetiyle oluşturulmaktadır. Pervane içerisindeki suyun nozüllere ulaştığı sırada ani kesit daralmasıyla birlikte hızının yükselmesi sonucunda oluşan etki su jeti olarak tanımlanmaktadır. Püskürtülen su, pervane nozülünden geçtikten sonra basıncı yükselmektedir. Bu yüksek basınç yardımıyla kirin yüzeyle arasındaki bağı daha kolay kopması sağlanmaktadır [6].

Tsouknidas ve Zhang yaptıkları çalışmada, mekanik etkinin iyileştirilmesinin iki ana faktöre bağlı olduğunu ve bunların pervane dönüş hızı ve pervane nozüllerinin çıkışındaki su basıncı olduğunu ifade etmişlerdir. Yüksek basınç ve düşük dönüş hızında yıkama performansının en iyi sonucu verdiğini, yüksek dönüş hızı ve düşük basınçta ise azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca makinenin toplam ses seviyesinin bu parametrelere bağlı olduğunu ve bu parametrelerdeki değişimlerin ses seviyesini nasıl etkilediği çalışma kapsamında incelenmiştir [7].

Tutkak yaptığı çalışmada yıkama adımlarının enerji tüketimi üzerindeki etkisini incelemiştir. Yıkama performansında en yüksek etkiye sahip parametrenin yıkama suyu sıcaklığı olduğu ifade edilmiştir [8]. Sertore ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada bir nozülün farklı uzaklıklardaki yüzeylere yönlendirilen su jetinin yüzeylerdeki yayılma profili incelenmiştir. Nozül ve nozülün etki ettiği yüzey arasındaki mesafenin artmasıyla beraber yüzeyde oluşan etki kuvvetinin azaldığı görülmüştür [9]. Aynı araştırmacılar tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise etki yüzeyi açısı ile kuvvet arasındaki ilişki incelenmiştir. Jetleme açısının artmasıyla etkiyen kuvvetin azaldığı gözlemlenmiştir [10].

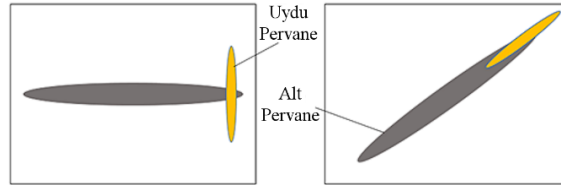
Nomura ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, geleneksel bulaşık makinelerinde kullanılan tek pervaneli sistemde suyun erişebildiği alanların kısıtlı olduğu ve bu sebeple yıkama veriminin artmasının zorlaştığı iddia edilmektedir. Bu problemi çözebilmek adına tasarlanan sistem, normal pervane üzerine küçük bir pervane daha konularak ve nozül açıları ayarlanarak sağlanmıştır. Böylece geleneksel pervane sistemlerindeki periyodik hareketin kaotik bir harekete çevrildiği ve yıkama performansının artırıldığı söylenmektedir [11].

Su ve enerji kaynakları talebin günden güne artması bu kaynakların daha dikkatli kullanılmasını teşvik etmektedir. Su ve enerji tüketiminin azaltılarak yıkama performansının iyileştirilmesi bulaşık makinelerinin kullanımını arttırmaktadır. Bu çalışmada bulaşık makinelerinin, yıkama performansını iyileştirmek amacıyla mekanik etkiyi arttırmak üzere bir uydu pervane mekanizması önerilmiş, aynı zamanda nozül açıları değiştirilerek ses düzeyini düşürmek hedeflenmiştir.

## **2. YIKAMA PERFORMANSINI ARTTIRMAYA YÖNELİK PERVANE TASARIMI (SPRAY ARM DESIGN TO INCREASE WASHING PERFORMANCE)**

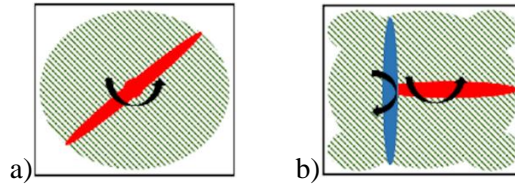
Günümüzde kullanılan bulaşık makinelerinin yıkama sistemleri genellikle bir alt pervane ve bir üst pervane olmak üzere toplamda iki adet pervaneden oluşmaktadır. Bu çalışmada Arçelik firmasına ait bir bulaşık makinesi kullanılmış ve alt pervane ele alınmıştır. Yıkama sepetinin alt kısmında ve yıkama alanının tam ortasında bulunan alt pervane plastik parçaya yataklanmış olup, kendi eksenini etrafında serbestçe dönebilmektedir. Ortalama olarak bulaşık makinalarında bulaşıklara etkiyen su basıncının 15 kPa civarında olduğu söylenebilir. Pervanenin dönüş hızı 40±5 d/dk olup suyun pervane kollarında yaratmış olduğu moment ile birlikte herhangi bir motorize sistem olmadan yıkama yapmaktadır.

Su basıncı, pervane dönüş hızı ve pervane tarafından taranan alan pervane tasarımında yıkama performansına doğrudan etki eden parametreler olarak sıralanabilir. Sunulan bu çalışmada pervane tarafından taranan alan artırılarak mekanik etkinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla alt pervanenin üzerinde ve köşe noktalara ulaşabilen ek bir pervane daha yerleştirilmesi düşünülmüştür. Bu ek pervane uydu pervane olarak adlandırılacaktır. Şekil 1 de uydu pervanenin kenar ve köşelerdeki konumu görülmektedir.



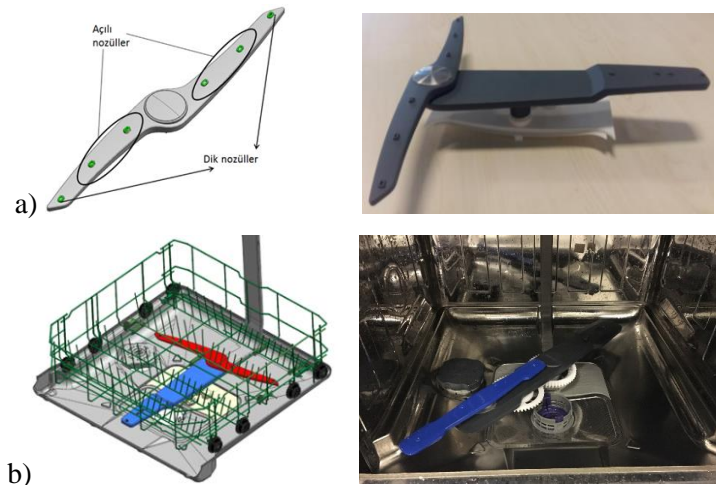
**Şekil 1.** Uydu pervanenin kenar ve köşelerdeki konumu

Uydu pervanenin alt pervane ile senkron hareket etmesi, köşe ve yan duvarlardaki konumunun kontrol edilebilmesi için gereklidir. Bu amaçla, uydu pervanenin ana pervane dönme ekseninde bir uydu hareketi yapabilmesi için bir dişli mekanizması tasarlanmıştır. Bu dişli mekanizması, ana pervanenin dönme eksenine bağlı bir kılavuz dişli ve kılavuz dişlinin etrafında belirlenen çevrim oranında dönen dişli çarklardan oluşmaktadır. Uydu pervane ana pervane üzerine yataklanmış olup yıkama için gerekli suyu ana pervane içerisinde kalan delikli yapı sayesinde almaktadır. Alt pervanenin hareketiyle tahrik edilen dişli çark sistemi, kendisine bağlı olan uydu pervanenin dönmesi sağlanmaktadır. Mevcut ve uydu pervane sisteminin bulaşık makinası yıkama tabanında süpürdüğü alan Şekil 2 de görülmektedir. Dairesel süpürme ile bulaşık makinasının tabanının %67'si, ek pervane yerleşimiyle %82'si taranmaktadır.



**Şekil 2.** a) Alt pervanenin mevcut durumda taradığı alan, b) Uydu pervane sisteminin taradığı alan

Nozüllerin konumlarının ve açılarının belirlenmesi su jetinin oluşturulabilmesi için gerekmektedir. Mevcut durumda pervane köşelerinde bulunan nozüller, pervanenin köşe noktalarındaki yıkama etkinliğini artırmak için açılı bir şekilde tasarlanmıştır. Fakat pervane köşe noktalarda olmadığı için nozüllerden çıkan suyun kazan yan duvarına çarpması nedeniyle gürültü meydana gelmektedir. Bu durumu iyileştirmek için uydu pervane üzerinde köşe noktalarda bulunan nozüller düz olarak tasarlanmış olup, diğer nozüller suyun pervanenin dönüşüne yardım edebilmesi için açılı olarak tasarlanmıştır. Ana pervanenin alt tarafına dönme momentini artırmak üzere ayrıca nozüller eklenmiştir. Şekil 3 de uydu pervanedeki nozül yerleşimi ve alt pervane ile birlikte bulaşık makinasına montaj durumu görülmektedir.



**Şekil 3.** a) Uydu pervane nozül tasarımı ve prototipi, b) Tasarlanan yeni alt pervane montaj hali



Uydu pervane sistemi mevcut pervanenin kullanıldığı aynı özellikteki bulaşık makinasına montaj edilmiştir. Bu nedenle her iki durumda da kullanılan su pompaları aynıdır. Bulaşık makinesinin hangi fonksiyonda çalıştığına göre sistem basıncı 25-50 kPa aralığında değişkenlik göstermektedir. En yüksek basınç pompa çıkışında 50 kPa olarak ölçülmüştür. Bu durumda üst pervane 10-15 kPa aralığında çalışırken, alt pervane 30-35 kPa aralığında çalışmaktadır. Uydu pervane sisteminde dişli çark grubu alt pervane içerisine yerleştirilmiş olduğundan akış alanı daha dar hala gelmiş ve bunun sonucunda alt pervanedeki basınç değeri 28-29 kPa aralığına düşmüştür. Mevcut sistemde alt pervane 40±5 d/dk ile dönerken, yeni tasarlanan uydu pervane sistemde dişli çark mekanizmasında meydana gelen kayıplar nedeniyle dönme hızı 33±3 d/dk olarak ölçülmüştür.

### 3. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

#### 3.1. Yıkama Performansının Belirlenmesi (Determination of Washing Performance)

Bulaşık makinalarında yıkama performansının belirlenmesinde EN50242 “Ev Tipi Bulaşık Makinelerinin Performansının Ölçülmesi” standardı uygulanmaktadır [12]. Bu standarda göre 14 kişilik yemek takımı; kıyama, yumurta, yulaf, ıspanak, margarin, süt ve çay ile kirletilmektedir. Daha sonra kirletilmiş yemek takımı, yıkama performansı tespit edilecek makina ve referans makina aynı koşullarda teste tabi tutulmalıdır. Yıkama sonrası kirletilmiş yemek takımının temizlik durumuna bağlı olarak bir yıkama puanı hesaplanmaktadır. Test edilen makinanın yıkama performansı P,

$$P = \frac{\text{Test edilen makinenin yıkama puanı}}{\text{Referans makinenin yıkama puanı}}$$

şeklinde hesaplanabilir. Bu değere karşılık gelen yıkama performansı sınıfı Tablo 1’de görüldüğü gibi tespit edilir [8].

**Tablo 1.** Yıkama performansı sınıfları [8].

Yıkama Performans Sınıfı	Yıkama Endeksi (%)
A	$P \geq 1.12$
B	$1.12 \geq P > 1.00$
C	$1.00 \geq P > 0.88$
D	$0.88 \geq P > 0.76$
E	$0.76 \geq P > 0.64$
F	$0.64 \geq P > 0.52$
G	$0.52 \geq$

#### 3.2. Deney Şartları (Experimental Parameter)

Yıkama testlerinde istenen ortam koşulları; oda sıcaklığı  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , bağıl nem  $\%55 \pm \%5$ , su besleme sıcaklığı  $15 \pm 2^\circ\text{C}$ , su besleme basıncı  $240 \pm 20$  kPa, su sertlik değeri  $2.5 \pm 0.5$  mmol/l olarak standartta tanımlanmıştır. Tablo 2’de yıkama performansı değerlendirilecek yeni pervane sisteminin montaj edildiği makina A ve standartta tariflenen referans makine B’ye ait teknik özellikler görülmektedir.

**Tablo 2.** A ve B bulaşık makinalarının teknik özellikleri.

Özellik	Makina A	Makina B
Su tüketimi (l)	9.5	14.4±0.4
Enerji tüketimi (kwh)	0.83	1.33±0.08
Kapasite (kişi)	14	12
Alt pervane dönüş hızı(d/dk)	40±5	35±5

Yıkama performans testlerine başlanılmadan önce, bulaşık makinesi standartta yer alan referans deterjanla durulama maddesi olmaksızın üç kez çalıştırılmıştır. Yıkama performansı testlerinde standart deterjan ve durulama maddesi bileşimi kullanılmıştır [12].

### 3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması (Preparation of Experimental Samples)

Yıkama performansı testleri 14 kişilik yemek takımı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Takımı oluşturan parçaların hepsi testten öncesi kir-alanı puanlamasına göre 5 skorunu (hiç kir olmama) alacak şekilde temizlenmiştir. Deney makinesi A ve referans makina B için hazırlanan tüm kirletme maddeleri aynı partiden seçilmiştir. Deney için gerekli her bir kirletme madde miktarının tamamı 0,001 gr hassasiyetli bir tartı kullanılarak tartılmış, gerekli porsiyonlara ayrılmış ve takımın parçalarına uygulanmıştır. Deneylerde kullanılan yemek takımına ait parçaların boyutları Tablo 3'te görülmektedir.

**Tablo 3.** Yemek Takımı parça boyutları

Yemek takımı parçası	Çap/Hacim/Uzunluk
Çorba tabağı	230 mm
Düz tabak	260 mm
Tatlı tabağı	190 mm
Fincan	0.21 l
Fincan tabağı	140 mm
Bardak	250 ml
Çatal	184 mm
Çorba kaşığı	195 mm
Bıçak	203 mm
Çay kaşığı	126 mm
Tatlı kaşığı	156 mm
Oval düz tabak	320 mm
Büyük servis kâsesi	200 mm
Orta servis kâsesi	160 mm
Küçük servis kâsesi	130 mm

Kirletme maddeleri olan kıyma, yumurta, yulaf, ıspanak, margarin, süt ve çay standartta belirtildiği şekilde yemek takımının parçalarına uygulanmıştır.

**Kıyma kiri:** Domuz ve sığır kıymasından 1:1 oranında homojen karıştırılarak hazırlanmıştır. 150 gram kıyılmış ete çirpilmiş 50 gramlık yumurta karıştırılmış ve sonrasında 60 gramlık porsiyonlara ayrılmıştır. 60 gramlık porsiyonlara ayrılan kıyılmış etten 50 gramı 8 gram su ile homojen duruma gelene kadar karıştırılmıştır. Hazırlanan kıyma 7 adet düz tabağa ve bir adet en büyük servis kâsesine uygulanmıştır. Standartta tariflenen bir plastik çatal yardımıyla tabakların üst tarafına ve kenar kısımlarda 20 mm boşluk temiz kalacak şekilde eşit olarak dağıtılmıştır.

**Yumurta kiri:** Üç adet yumurtanın beyazı sarısından ayrıştırılmış ve yumurta sarısı bir kâsede çirpılmıştır. Daha sonrasında düz tabak ve tatlı tabaklarının sayıca yarısına ve üst kısmına kenar kısımlardan 20 mm boşluk temiz kalacak şekilde standartta tanımlanan genişliği 25 mm olan fırça yardımıyla eşit olarak sürülmüştür. Tüm çatalara ise yumurta kirinden ince düzgün bir tabaka şeklinde uygulanmış ve çatalar ayrı bir tabakta uç kısımları aşağı gelecek şekilde kurumaya bırakılmıştır.

**Yulaf kiri:** Yulaf kiri hazırlanmasında, 50 gramlık yulaf ezmesi 750 ml soğuk su ve 250 ml süt ile iyice karıştırılmıştır. Karışım kaynama noktasına getirilene kadar ısıtılmış ve bir tahta kaşık yardımıyla sürekli karıştırılmıştır. Çorba tabaklarının ve çorba kaşıklarının tamamına yulaf lapası uygulanmıştır. Çorba kaşıkları hazırlanan yulaf lapasına daldırılmış ve kaşığın sırt kısmı yukarıya gelecek şekilde deney yüküne ait olmayan bir tabak üzerinde kurumaya bırakılmıştır. Çorba tabaklarına ise tabağın üst yüzeyine ve kenardan 20 mm boşluk temiz kalacak şekilde standartta tanımlanan 25 mm genişliğindeki fırça yardımıyla eşit olarak uygulanmıştır.

**İspanak kiri:** Dondurulmuş ve içerisinde hiçbir katkı maddesi olmayan ıspanak oda sıcaklığında çözüldükten sonra standartta yer alan kevgire konulmuştur. İspanak kevgir üzerinde ezilerek ufak parçalara ayrılmış, yemek takımı parçası başına 3 gram uygulanacak şekilde standartta tanımlanan 25 mm

genişliğindeki fırça yardımıyla tatlı tabaklarının yarısı, küçük ve orta boy servis kâselerine kenar kısımlardan 20 mm boşluk temiz kalacak şekilde sürülmüştür.

**Margarin kiri:** Evlerde kullanılan margarin oda sıcaklığına gelene kadar bekletilmiş, oval düz bir tabağa bir bıçak yardımıyla kenarlardan 20 mm boşluk temiz kalacak biçimde uygulanmıştır.

**Süt kiri:** Kirletme malzemelerinden süt 250 ml kapasiteli, yüksekliği 115 mm ve çapı 60 mm olan laboratuvar cam bardaklarında hazırlanmıştır. Hazırlama işlemine geçilmeden önce mikrodalga fırında bir ön ısıtma işlemi gerçekleştirilmiştir. Her biri 50 ml su ile doldurulan cam bardaklar, mikrodalga fırının döner tablasına simetrik bir şekilde yerleştirilmiş ve 780 W'ta 4 dakika ve 150 W'ta 10 dakika ısıtılmıştır. Daha sonrasında mikrodalgadan çıkarılan su dolu bardaklar boşaltılmıştır. Süt her bir bardağa 10 ml olacak şekilde bir pipet yardımıyla döküldükten sonra, mikrodalga fırında 780 W'ta 4 dakika ve 150 W'ta 10 dakika olmak üzere pişirilmiştir.

**Çay kiri:** Çay kiri hazırlanmasında standartta yer alan firmadan temin edilen siyah çay kullanılmıştır. 1 litre kaynamış su 6 gram çay üzerine dökülmüş ve 5 dakika süreyle kapalı bir kaptaki bekletilmiştir. Fincan ve fincan tabakları yarıya kadar çay ile doldurulduktan sonra 80°C'ye ısıtılan ısı dolabına konulmuş ve 1 saat süreyle ısı dolabında bekletilmiştir. Isı dolabından çıkarılan fincan ve tabaklar üzerinde kalan çay boşaltılmış, çay kiri hazır hale getirilmiştir.

Kirletilmiş yemek takımı parçaları birbirine çok yakın olmayacak şekilde ısı dolabına yerleştirilerek 80°C de iki saat bekletilmiştir. Isı dolabından çıkarılan kirli yemek takımı parçaları 40 dk süre ile ortam sıcaklığında soğutulmuştur. Isı dolabından çıkan kirlere ait görseller Şekil 4'de görülmektedir.



**Şekil 4.** Yıkama için hazırlanan kirletilmiş yemek takımı parçaları

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

### 4.1. Deneyleerin yapıışı (Experimental Procedure)

Kirletilmiş yemek takımı parçaları A ve B makinasını üreten firmaların talimatlarına uygun olarak üst ve alt sepetlere Şekil 5'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.

Yıkama performansı testleri, deney makinesi ile referans makinasının aynı anda çalıştırılması ile başlatılmıştır. Makina A için ekonomi programı, Makina B için üniversal programı verilmiştir. Testler beş kez tekrarlanmıştır. Her yıkama için Bölüm 3.3 de anlatıldığı şekilde yemek takımı parçaları kirletilmiştir.



**Şekil 5.** Kirletilmiş yemek takımı parçalarının alt ve üst sepete yerleşimi

#### 4.2. Yıkama Sonrası Değerlendirme (Evaluation after washing)

Her bir kirletilmiş yemek takımı parçası yıkama periyodu sonrası aynı eğitimli deney personeli tarafından görsel olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirmenin yapıldığı ortamın aydınlık seviyesi 1500 lux'tur. Tablo 4'te görüldüğü üzere küçük nokta biçimli kir parçacıklarının sayısına veya toplam kirletilmiş alan büyüklüğüne göre yapılmaktadır. Birden fazla skor için kurallar karşılanıyorsa, en düşük uygulanabilen skor verilmiştir (EN 50242 2016). Nokta biçimli kir parçacıklarının sayısı veya kirletilmiş alan büyüklüğü matematiksel olarak ifade edilebilen büyüklükler olduğundan değerlendirme işlemi güvenilirdir ve kişiden kişiye göre değişmemektedir.

**Tablo4.** Kir alanı-yıkama puanı

Küçük nokta biçimli kir parçacıklarının sayısı (n)	Toplam kirletilmiş alan (mm <sup>2</sup> )	Puan
Uygulanmaz	Kir alanı >200	0
Uygulanma	50<Kir alanı<200	1
n>10	4<Kir alanı<50	2
4<n≤10	Kir alanı <4 veya 5-10 parçacık	3
0<n≤4	Kir alanı <4 veya 1-4 parçacık	4
n=0	Temiz	5

Değerlendirmeler sırasında puanlanan yemek takımına ait fincan üzerinde Tablo 4 dikkate alınarak yapılan puanlama örnek olarak şekil 6 da gösterilmiştir.



**Şekil 6.** Yemek takımının kirlilik durumunun değerlendirilmesi

Yemek takımının bütün parçaları göz önünde bulundurularak Makina A da mevcut alt pervanenin bulunması durumu için yıkama performansı değerlendirilmesi Tablo 5'te görülmektedir. Değerler 5 yıkamanın ortalaması alınarak verilmiştir. Yemek takımının göz önüne alınan parçası için yıkama puanı  $(yp_i) \sum yp_i = \text{puan değeri} \times \text{parça adedi}$  şeklinde hesaplanmıştır.

**Tablo 5.** Mevcut pervane sisteminin yıkama performansının değerlendirilmesi

Yemek Takımı Parçası	Kir Türü	Toplam Kir Miktarı	Parça Adedi	Puan Değerlendirmesi						
				5	4	3	2	1	0	yp <sub>i</sub>
Çorba tabağı	Yulaf	42 g	14			3	6	5		26
Düz tabak	Yumurta	14 g	7		6	1				27
Düz tabak	Kıyma	21 g	7		4	3				25
Tatlı tabağı	Yumurta	14 g	7	2	4	1				29
Tatlı tabağı	Ispanak	35 g	7	1	4	2				27
Oval düz tabak	Margarin	12 g	1		1					4
Fincan	Çay	Yarıya kadar	14		8	2	4			46
Fincan Tabağı	Çay	Yarıya kadar	14	2	10	12				50
Büyük servis kâsesi	Kıyma	4 g	1		1					4
Orta servis kâsesi	Ispanak	3.5 g	1		1					4
Küçük servis kâsesi	Ispanak	2.5 g	1			1				3
Bardak	Süt	10 ml	14			3	5	6		25
Çatal	Yumurta	Fırça sürülerek	14	13	1					69
Çorba kaşığı	Yulaf	Daldırarak	14	9	5					65
Bıçak	Yok	Yok	14	12	2					68
Çay kaşığı	Yok	Yok	14	11	3					67
Tatlı kaşığı	Yok	Yok	14	13	1					69
Servis takımı	Yok	Yok	4	4						20

Yemek takımının bütün parçaları göz önünde bulundurularak yeni tasarlanan uydu pervanesinin olduğu hal için Makina A'nın yıkama performansı değerlendirilmesi Tablo 6'da görülmektedir. Değerler 5 yıkamanın ortalaması alınarak verilmiştir.

**Tablo 6.** Uydu pervane sisteminin yıkama performansının değerlendirilmesi

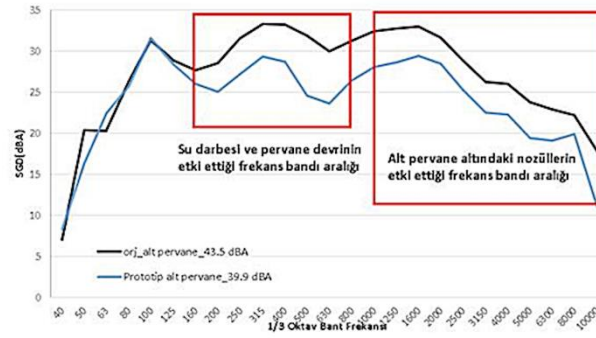
Yemek Takımı Parçası	Kir Türü	Toplam Kir Miktarı	Parça Adedi	Puan Değerlendirmesi						
				5	4	3	2	1	0	yp <sub>i</sub>
Çorba tabağı	Yulaf	42 g	14	1	1	4	3	5		32
Düz tabak	Yumurta	14 g	7	2	3	1	1			27
Düz tabak	Kıyma	21 g	7		5	1	1			25
Tatlı tabağı	Yumurta	14 g	7	3	3					27
Tatlı tabağı	Ispanak	35 g	7	4	2	1				31
Oval düz tabak	Margarin	12 g	1	1						5
Fincan	Çay	Yarıya kadar	14	3	7	4				55
Fincan Tabağı	Çay	Yarıya kadar	14	4	9	1				59
Büyük servis kâsesi	Kıyma	4 g	1	1						5
Orta servis kâsesi	Ispanak	3.5 g	1	1						5
Küçük servis kâsesi	Ispanak	2.5 g	1		1					4
Bardak	Süt	10 ml	14		4	4	5	1		39
Çatal	Yumurta	Fırça sürülerek	14	10	4					69
Çorba kaşığı	Yulaf	Daldırarak	14	13	1					66
Bıçak	Yok	Yok	14	12	2					68
Çay kaşığı	Yok	Yok	14	11	3					67
Tatlı kaşığı	Yok	Yok	14	13	1					69
Servis takımı	Yok	Yok	4	4						20

Bulaşık makinasının yıkama puanı (YP) ise  $\sum y_{p_i}$  değerinin toplam parça sayısını bölünmesi ile elde edilmektedir. Buna göre mevcut pervanesinin kullanıldığı bulaşık makinası için yıkama puanı 3.91, uydu pervanesinin kullanıldığı bulaşık makinasının yıkama puanı 4.15 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler dikkate alındığında uydu pervane kullanımı ile yıkama performansının %6.14 oranında arttığı söylenebilir.

Referans B makinasının yıkama puanı benzer şekilde de 3.64 olarak hesaplanmıştır. Mevcut pervane sisteminin bulunduğu Makine A'nın yıkama endeksi hesaplandığında  $P_{Amevcut}=1.08$  olarak Tablo 1 göz önüne alındığında B yıkama sınıfına karşılık geldiği görülmektedir. Benzer şekilde uydu pervane tasarımının olduğu bulaşık makinesi yıkama endeksi hesaplandığında  $P_{Auydu}=1.14$  olarak A yıkama sınıfına karşılık geldiği görülmektedir.

#### 4.3. Ses Gücü Düzeyi Ölçümleri (Measurement of Sound power level)

Ses gücü düzeyini iyileştirmek amacıyla uydu pervane sisteminde nozül açıları değiştirilmiştir. Bulaşık makinası dış ortam seslerinden yalıtılmış bir odaya yerleştirilmiş, bir metre uzağına yerleştirilen bir mikrofon yardımıyla ses gücü düzeyi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler soğuk yıkama esnasındaki ilk alt yıkama periyodunda yapılmıştır. Sonuçlar doğrudan mevcut alt pervane ile uydu pervane ses gücü değerlerini karşılaştırma fırsatı vermektedir. Ancak bulaşık makinasının toplam ses gücü düzeyi iyileşmesini görmek için sıcak yıkama dâhil tüm yıkama çevriminde ölçüm yapmak gerekmektedir. Yapılan testlerde elde edilen sonuçlar Şekil 7'da görülmektedir.



Şekil 7. Ses gücü düzeyi

Sonuçlara göre alt pervane gürültüsünde yaklaşık olarak 3.5 dBA iyileşme sağlanmaktadır. Bulaşık makinesindeki toplam iyileşme etkisi üst pervane gürültüsü de dikkate alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Uydu pervane üzerinde yer alan nozüller orijinal durumdaki kadar yüksek açılıyla yerleştirilmemiş olmaması yan duvarlara suyun çarpmasıyla oluşan gürültünün azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Sunulan çalışmada bulaşık makinesi yıkama performansına etki eden parametreler incelenerek performansı artıracak yönde bir alt pervane tasarımı gerçekleştirilmiştir. Performansa etki eden faktörler; mekanik etki, kimyasal etki, sıcaklık ve zaman olarak dört ana başlık altında toplanmıştır. Bu faktörlerin her biri yıkama performansı üzerinde farklı etkilere sahiptir. Çalışma kapsamında mekanik etki faktörünün iyileştirilerek yıkama performansının artırılması amaçlanmıştır.

Yıkama performansının mekanik etki ile artırılması için pervanenin taradığı alanın artırılması gerekmektedir. Mekanik etki oluşturulan su jetine ve nozül çıkışındaki su basıncına bağlıdır. Bu parametreler dikkate alınarak yeni bir pervane tasarımı geliştirilmiştir.

Prototip imalatı gerçekleştirilen uydu pervane mekanizmasının EN50242 “Ev Tipi Bulaşık Makinelerinin Yıkama Performansının Ölçülmesi” standartlarına uygun olarak yıkama performansı değerlendirilmiştir. Testler geliştirilen tasarım ve mevcut tasarım için aynı şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Testler sonucu elde edilen verilere göre, makina yıkama performansında %6.14’lik bir artış görülmüştür.

Yıkama performansının iyileştirilmesinin yanı sıra müşteri konforunu artıracak yönde makinenin çalışma esnasındaki ses düzeyini düşürmekte çalışmanın amaçlarından biridir. Mevcut durumda alt pervane köşe noktalarındaki nozüllerin köşe noktalara suyu götürebilmek adına açılı tasarlandığı bilinmektedir. Bu açılı nozüller yıkama alanının köşe noktalarından geçmediği durumlarda kazan yan duvarlarına çarparak gürültü oluşturmaktadır. Uydu pervane tasarımı ile köşe noktalara su ulaşabildiğinden dolayı pervane üzerindeki nozüllerin açılı tasarımı değiştirilmiştir. Köşe noktalarındaki bulaşıklara dik olarak vuran yeni nozüller böylelikle köşe noktalar dışındaki konumlarda yan duvarlara çarpmayacağı için ekstra bir ses oluşturmamaktadır. Bu yönde yapılan ses ölçüm çalışmalarında mevcut alt pervane ile uydu pervane tasarımının ses düzeyleri karşılaştırılmıştır. Yapılan testler sonucu elde edilen sonuçlara göre 3 dBA’lik bir ses düzeyi iyileşmesi görülmüştür.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler Arçelik AŞ merkez ArGe laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar Arçelik AŞ Merkez ArGe Laboratuvarına desteklerinden dolayı teşekkür eder.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Düzgün, B. , Bayındır, R. & Aydınalp Köksal, M. (2021). Estimation of Large Household Appliances Stock in the Residential Sector and Forecasting of Stock Electricity Consumption: Ex-Post and Ex-Ante

- Analyses . Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 9 (2) , 182-199 . DOI: 10.29109/gujsc.871922
- [2] Richter, C., (2010). Automatic dishwashers: efficient machines or less efficient consumer habits? *International Journal of Consumer Studies* Vol.35, pp.180–186. <https://doi.org/10.1111/j.1470-6431.2010.00973.x>
- [3] Berkholz, P., Stamminger, R., Wnuk, G., Owens, J. and Bernarde, S., (2010). Manual dishwashing habits: an empirical analysis of UK consumers. *International Journal of Consumer Studies* Vol.34, pp.235–242.
- [4] Andersson, S., and Hagejard, J., (2016). Development of a Sustainable Dishwasher for Compact Living, Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden
- [5] US consumer dishwashing study. (2012). Dupont. [http://fhc.biosciences.dupont.com/fileadmin/user\\_upload/live/fhc/DuPont-US-Dishwashing-Study-infographic.pdf](http://fhc.biosciences.dupont.com/fileadmin/user_upload/live/fhc/DuPont-US-Dishwashing-Study-infographic.pdf)
- [6] Çengel, Y., and Cimbala, J., (2014). Fluid Mechanics: Fundamentals and Application. 3rd Edition. McGraw-Hill, New York
- [7] Tsouknidas, P., and Zhang, X., (2010). Dishwasher Improvement at ASKO, Developing A Simplified Test Method to Determine the Influence of Spray Speed and Pressure, Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden
- [8] Tutkak, E., (2010). Bulaşık Makinesi Enerji Tüketimi – Yıkama Performansı İlişkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. (Tez)
- [9] Sertore, D., Fusetti, M., Michelato, P., Pagani C. ve Pierini P., (2006). “High Pressure Rinsing Water Jet Characterization”, *Proceedings of EPAC06*, 26-30 June, Edinburgh, Scotland, pp.18-22.
- [10] Sertore, D., Fusetti, M., Michelato, P., ve Pagani, C., (2008). “High Pressure Rinsing Water Jet Interactions”, *Proceedings of EPAC08*, 23-27 June, Milano, Italy, pp.910-912.
- [11] Nomura, H., Wakami, N., ve Kondo, S. (1995). Non-linear technologies in a dishwasher. *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 20-24 March 1995, DOI: [10.1109/FUZZY.1995.410039](https://doi.org/10.1109/FUZZY.1995.410039)
- [12] TS EN 50242 (2016). Elektrikli Bulaşık Makinaları- Performans Ölçme Metotları



# Numerical Investigation of the Effects of Engine Speed on Performance and Combustion Characteristics on a Converted Spark-Ignition Natural Gas Engine

Fatih AKTAS<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup>Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 06570, Maltepe/ANKARA

## Graphical/Tabular Abstract

### Article Info:

Research article  
Received: 27.03.2022  
Revision: 12.05.2022  
Accepted: 27.06.2022

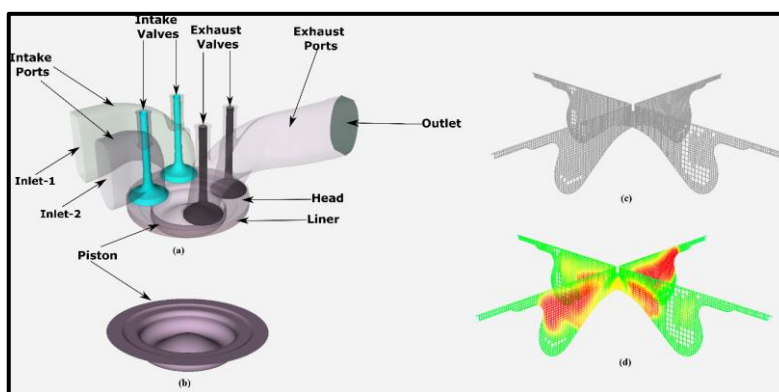
### Highlights

- High compression ratio.
- Diesel to natural gas.
- Spark ignition.

### Keywords

Natural gas  
Performance  
Combustion characteristics  
Spark-ignition

In this study, a diesel engine was converted to a spark-ignition engine utilizing natural gas to examine the impact of various engine speed values on performance and combustion characteristics.



**Figure A.** (a) Flow volume and nomenclature, (b) piston geometry, (c) adaptive mesh, (d) temperature image

**Purpose:** In the study, engine performance and in-cylinder combustion characteristics were investigated at high loads and speeds after conversion from a diesel engine with a high compression ratio to a spark ignition engine using natural gas.

**Theory and Methods:** G-equation combustion model, reduced methane chemical kinetic mechanism that represents natural gas with 29 species and 171 equations, and RANS k- $\epsilon$  turbulence model were used in the numerical analysis. Full load, 17.5:1 compression ratio, constant ignition timing, and 6 different engine speeds were used in the analyses. In order to examine only the effect of speed, the initial value, boundary conditions, and spark plug ignition time were considered constant.

**Results:** Engine efficiency decreased as engine speed increased, while engine power and fuel consumption increased. Furthermore, increasing engine speed increased the ignition delay time, causing the flame front to arrive at the squish zone later.

**Conclusion:** Increased engine speed increased engine power and fuel consumption while decreasing average effective pressure and thermal efficiency. Due to the late spark ignition time, two peak formations were seen in the in-cylinder pressure diagram. The maximum in-cylinder pressure value decreased as engine speed increased. The maximum in-cylinder heat release value decreased and occurred later as engine speed increased, but the total amount of heat released in the cylinder increased. The flame thickness did not change significantly.



# Numerical Investigation of the Effects of Engine Speed on Performance and Combustion Characteristics on a Converted Spark-Ignition Natural Gas Engine

 Fatih AKTAS<sup>1,\*</sup>
<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe/ANKARA

## Abstract

In this study, the effects of different engine speed values on performance and combustion characteristics were investigated by converting a diesel engine to a spark-ignition engine using natural gas. In numerical analysis, G-equation combustion model, reduced methane chemical kinetic mechanism that represent natural gas consisting of 29 species and 171 equations, and RANS k-e turbulence model were used. Analyzes were performed at full load, 17.5:1 compression ratio, constant ignition timing, and 6 different engine speeds. In order to examine only the effect of speed, the initial value, boundary conditions, and spark plug ignition time were considered constant. While engine power and fuel consumption increased with increasing engine speed, engine efficiency decreased. In addition, increasing engine speed also increased the ignition delay time, and the flame front reached the squish zone later.

## Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
 Başvuru: 27.03.2022  
 Düzeltilme: 12.05.2022  
 Kabul: 27.06.2022

## Keywords

Natural gas  
 Performance  
 Combustion  
 characteristics  
 Spark-ignition

## Dönüştürülmüş Bir Kıvılcım Ateşlemeli Doğal Gaz Motorunda Motor Hızının Performans ve Yanma Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi

## Öz

Bu çalışmada dizel bir motor doğalgaz kullanan buji ateşlemeli motora dönüştürülerek farklı motor hız değerlerinin performans ve yanma karakteristiği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sayısal analizlerde G-equation yanma modeli, 29 tür ve 171 denklemden oluşan, doğalgazı temsil eden indirgenmiş metan kimyasal kinetik mekanizması ve RANS k-e türbülans modeli kullanılmıştır. Analizler tam yükte, 17,5:1 sıkıştırma oranında, sabit ateşleme zamanında ve 6 farklı motor hız değerinde gerçekleştirilmiştir. Sadece hızın etkisini inceleyebilmek için ilk değer, sınır şartları ve buji ateşleme zamanı ise sabit olarak kabul edilmiştir. Artan motor hızı ile motor gücü ve yakıt tüketimi artarken motor verimi azalmıştır. Ayrıca artan motor hızı tutuşma gecikme zamanını da arttırmış ve alev cephesi sıkışma bölgesine daha geç ulaşmıştır.

## Anahtar Kelimeler

Doğalgaz  
 Performans  
 Yanma karakteristiği  
 Buji ateşleme

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yapılan araştırmalar ulaşım, taşıma, ziraat ve güç aktarma işlemlerinde içten yanmalı motorların geçmişte olduğu gibi yakın gelecekte de ana güç kaynağı olarak kullanımının devam edeceğini öngörmektedir [1,2]. İçten yanmalı motor kullanımının devamı ise fosil yakıt tüketimi ve emisyon salınımının da artması anlamına gelmektedir. Ancak içten yanmalı motorlarda gelişen kontrol ve dönüşüm teknolojileri sayesinde doğalgaz, singaz, hidrojen vb. alternatif gaz yakıtların kullanımı ile petrol kökenli yakıtlara olan bağımlılık azaltılabilir [3]. Gaz yakıtların kullanımının artırılmasında en etkili yollardan biri ise belirli bir kilometreyi aşmış motorların daha çevreci motorlara dönüşümünün sağlanmasıdır [4].

Gaz yakıtların buji ateşlemeli motorlarda yakılması oldukça kolaydır. Ancak bu motorlar genelde doğal emişlidir ve sıkıştırma oranları dizel motorlara göre daha düşüktür. Emme portundan da gaz yakıt gönderilmesi ile hacimsel verim düşmekte ve buna bağlı olarak da motor performansı azalmaktadır. Ancak dizel motorların genelde turbonya sahip olması, yüksek sıkıştırma oranlarında üretimi ve sahip oldukları özel

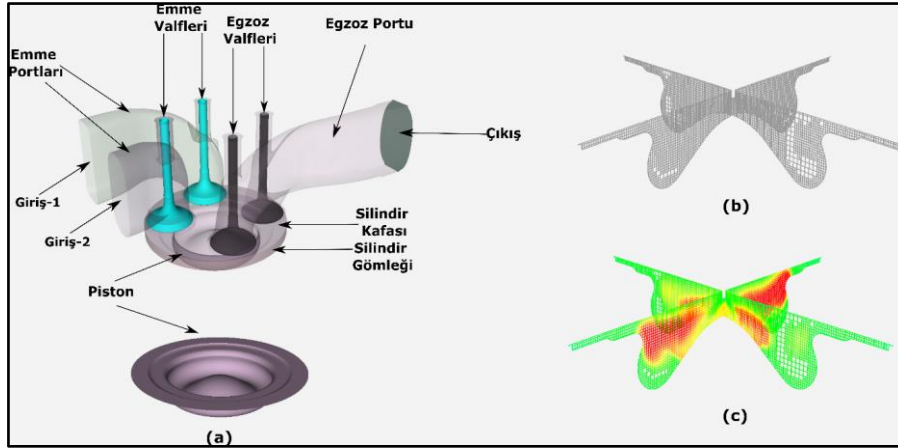
yanma odası geometrilerinden dolayı bu dönüşümde öne çıkabilmektedir. Özellikle dizel motorlara yapılan dönüşüm ve alternatif yakıt çalışmaları ile beraber ön karışım dolgulu sıkıştırma ateşlemeli (PCCI), homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli (HCCI) ve reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli (RCCI) gibi alternatif çevrimler ortaya çıkmıştır [5-7]. Bu yanma teknolojilerinde ise düşük yükte teklemeye, yüksek yükte vuruntu ve iki tane yakıt deposu bulundurulması gibi farklı problemler ortaya çıkmaktadır. Tüm bu problemlerin üstesinden ise dizel motorlarda emme manifolduna düşük basınçlı doğalgaz enjektörü ve dizel enjektör yerine ise buji montajı ile doğalgazın dizel çevrim yerine otto çevrimde çalışması sağlanarak gelinmektedir. Yakıt olarak ise doğalgaz tercih edilmesinin başlıca sebepleri ise çevresel zararının daha az olması, çıkarma teknolojilerinin gelişmesine bağlı olarak bol bulunması, özellikle ABD’de ulaşılabilir ve ucuz olması gösterilebilirken Türkiye’de dağıtım hattının arttırılması ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır [8]. Ayrıca ABD’de ağır hizmet dizel araçların doğalgaz ile çalışan araçlara 2025 yılına kadar %20 oranında bir dönüşüm olacağı öngörülmektedir [9].

Dizel motorların doğalgaz motorlarına dönüşüm teknolojisi ile ilgili yapılan çalışmalar ise 90’lı yılların başlarına dayanmakla birlikte gelişen kontrol teknolojisi ile son zamanlarda çalışmalar yeniden hız kazanmıştır. Meyer vd. [10] yaptıkları çalışmada ağır hizmet taşıt motorunu doğalgaz ile çalışacak şekilde dönüştürmüşlerdir. Tam yük ve yüksek hızda yapılan çalışmalarda güç artarken ısı veriminin düştüğü sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca artan yakıt eşdeğerlik oranı ile  $NO_x$  emisyonu artarken, buji ateşleme zamanının öne alınmasıyla da  $NO_x$  değeri düşmüştür. Konu ile ilgili güncel olarak ise Liu vd [11-17]’nin birçok deneysel ve sayısal çalışmaları bulunmaktadır. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar genel olarak 13,1:1 sıkıştırma oranlı dizel bir motorun doğalgaz enjektörü ve buji sistemi entegrasyonu ile otto çevrimle çalışan bir motora dönüşümünü içermektedir. Testler genellikle düşük-orta yüklerde ve düşük hız aralıklarında (900-1300 devir/dakika) gerçekleştirilmiştir. Yanma odası şekli, yakıt-hava oranı, buji ateşleme zamanı, doğalgaz metan sayısı vb. birçok parametrenin etkisi incelenmiştir. Yapılan dönüşüm sonrasında çevrimler arası değişimlerin az olduğu, istikrarlı yanma koşullarının gerçekleştiği ve vuruntunun sınır değerleri aşmadığı sonucuna ulaşmışlardır. Genel olarak yakıt eşdeğerlik oranı 1 ile 0,71 arasında çalışılmıştır. Yakıt eşdeğerlik oranının düşmesi ile silindir içi ısı salımları buna bağlı olarak da elde edilen indike güç ve ısı verim de azalmıştır. Bununla beraber tutuşma gecikme zamanı artarken yanma zamanı bir yere kadar artmış daha sonra ise azalmıştır. Sıkıştırma ateşlemeli motorların buji ateşlemeli motorlara dönüşümü ile ilgili çalışmalar literatürde de görüldüğü üzere 13:1 gibi düşük sıkıştırma oranında düşük ve orta yükler için gerçekleştirildiği görülmektedir. Ancak son zamanlarda ağır hizmet dizel motorların, çok fazla yapısal değişiklik yapmadan doğal gaz kullanan buji ateşlemeli motorlara dönüştürmeye yönelik artan yenilenmiş bir ilgi meydana gelmiştir.

Motor hızı, silindir içi gaz hareketini, sürtünme işini, silindir içi kalan artık gaz oranını, hacimsel verimliliği, alev yayılma hızını, yanmanın tamamlanması için gerekli olan süreyi ve ısı transfer oranlarını etkiler [18]. Yapılan bu çalışmada 17,5:1 gibi yüksek sıkıştırma oranında, özel tasarım geometrisine (kademeli girişli) sahip yanma odalı dizel bir motor, dizel enjektör yerine buji montajı ve hava-doğalgaz karışımının ön karışımli olarak gönderilmesi ile farklı motor hızlarında sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada ise motor hızı 1800 devir/dakika’dan 2300 devir/dakika’ya 100’er devir/dakika aralıkla arttırılarak, sabit buji ateşleme zamanında (719,5 KMA) ve yakıt eşdeğerlik oranında ( $\phi=0,63$ ) gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yüksek hızlar için buji ateşleme zamanı optimizasyon çalışması yapılmamış ve sabit alınmıştır. Ayrıca her devir için sınır şartları ve ilk değerler de sabit alınarak sadece hızdaki değişimin performans ve yanma karakteristiklerine etkileri incelenmiştir.

## 2. MATEMATİKSEL VE SAYISAL MODEL (MATHEMATICAL AND NUMERICAL MODEL)

Yapılan 3-B sayısal çalışma, ağır hizmet dizel bir motorda dizel enjektör yerine buji montajı ve yakıt hava karışımının da emme manifoldundan ön karışımli olarak tanımlanarak tek silindir modellenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan silindirin sahip olduğu özel (kademeli girişli) yanma odası ve genel görüntüsü, herhangi bir açıdaki kartezyen adaptif ağ görüntüsü ve alev ilerleme hızı görüntü örnekleri Şekil 1’de, motor özellikleri ise Tablo 1’de verilmiştir. Kullanılan doğalgaz yakıtın dizel yakıt ile karşılaştırılmalı özellikleri ise Tablo 2’de verilmiştir.



**Şekil 1.** (a) Akış hacmi, isimlendirilmesi ve piston görüntüsü, (b) adaptif ağ görüntüsü, (c) türbülans alev hızı görüntü örneği

Sınır ve başlangıç şartlarını elde edebilmek için 1-B AVL Boost programı kullanılırken, 3-B yanma analizleri için ANSYS Forte, 2020 R2 kullanılmıştır. Emme-egzoz valflerinin oturma yüzeyleri ve yanma odasının sahip olduğu özel şekil tam geometri (360°) ile modellenerek sıkıştırma ve genişleme stroğu boyunca bu geometrilerin akış karakteristiğine olan etkileri de gözlemlenmiştir. Silindir içi akış ve yanma fenomenlerini etkileyen en önemli unsurlardan biri de sıkıştırma (squish) yüksekliğidir. Bu yükseklik motorun sahip olduğu 17,5:1 sıkıştırma oranını elde edebilecek şekilde gerçek motordaki yüksekliğe yakın tutulmuştur. Silindir hacmi ayarlanması ve uygun olarak isim tanımlanması yapıldıktan sonra ise uygun eleman boyutunun seçimine geçilmiştir. İlk olarak global mesh size tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Global mesh size, deneysel verilerle yapılan doğrulama çalışmaları, bağımsızlık çalışmaları ve literatürden elde edilen bilgiler doğrultusunda 2,25 mm olarak alınmıştır [19-24]. Global mesh size ayarlanmasından sonra ise lokal eleman iyileştirmeleri gerçekleştirilmiştir. Bu iyileştirmeler daha çok hassas çözüm gerektiren bölgeler olmuştur. Örneğin; valf çevrelerinde, pistonun ÜÖN'dan 20 KMA öncesi ve sonrasında, buji etrafında (10 mm'lik bir top oluşturulması) ve yapılan tüm duvar tanımlamalarının çevresinde oluşturulmuştur. Sonrasında ise belirli krank açıları için sıcaklık ve hız çözümlerinin daha hassas yapılabilmesi için de ÜÖN'dan önce ve sonra ¼ oranı kadar daha fazla eleman iyileştirilmiş ağ yapısı kullanılmıştır. Şekil 1(b)'de örneği verildiği üzere çözümlerde adaptif ağ yapısı kullanılmıştır. Yani program buji ateşlemesinden sonra alev ilerlemesi boyunca Şekil 1(c)'de görüldüğü gibi konuma ve zamana göre eleman sayısını arttırıp-azaltarak çözümün daha hassas gerçekleşmesini sağlamıştır.

Tablo 1. Motor özellikleri

Özellik	Değer
Toplam motor hacmi (cm <sup>3</sup> )	2930
Toplam silindir sayısı	3
Çap / Strok (mm)	104 / 115
Sıkıştırma oranı (-)	17,5:1
Kompresör basınç oranı	2,68
Kompresör Verimi	0,78
Yanma odası	Piston içerisinde özel kase yapısı ve düz silindir kafası
Valf zamanları (KMA)	IVO: 28° ÜÖNö/IVC: 60° AÖNs EVO: 65° AÖNö/EVC: 33° ÜÖNs

Tablo 2. Dizel ve doğalgaz yakıt özellikleri [25,26]

Özellikler	Dizel	Doğal Gaz
Ana bileşen	C ve H	Metan (CH <sub>4</sub> )
Alt ısı değer (MJ/kg)	42,5	50
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı (K)	553	923
Oktan sayısı	30	120
Setan sayısı	40-60	-
Havada yanıcılık sınırları (% hacim)	0,7-5	5-15
Alev hızı (m/s)	0,3	0,45
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	833-881	692
Moleküler ağırlık (g/mol)	170	16,043
Spesifik yer çekimi	0,83	0,55
Kaynama noktası (K)	453-653	111,5
CO <sub>2</sub> emisyonu (%)	13,4	9,5

Yapılan geometri, isim ve eleman tanımlamaları sonrasında ise kullanılacak denklem ve modellerin oluşturulmasına geçilmiştir. Yanma denkleminde, 29 tür ve 171 denkleme indirgenmiş, doğalgazı temsil eden metan yanma mekanizması kullanılmıştır. Bu mekanizma yaklaşık 4000 türden meydana gelen, çeşitli eşdeğerlik oranları (0,4–2), basınç (10–100 bar), sıcaklıklar (1000 K ve üzeri) ve EGR (0–20 %) oranları için doğrulanmıştır [27,28].

Tür ve denklem sayısının daha az olması, basit karbonlu olması, diğer C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> bileşiklerinden gelecek kararsızlıkların önlenmesi ve doğalgazın da büyük çoğunluğunun metandan oluşmasından dolayı doğalgaz yerine metan tercih edilmiştir. Programın yanma analizini gerçekleştirmesi sırasında çözdüğü türbülanslı reaktif akış için korunum denklemleri (tür korunum denklemi, süreklilik denklemi, momentumun korunumu denklemi, enerjinin korunumu denklemi ve gaz fazı karışım hal denklemi), türbülans modeli ve kullanılan denklemler ayrıntıları ile birlikte daha önce yapılan çalışmalarda verilmiştir [20, 21, 23, 27, 28].

Alev yayılımını tahmin etmek için kullanılan en önemli parametrelerden biri, motor yanma modelinde alev yüzeyidir. Alev cephesi  $G(\vec{x}, t)$  ile tanımlanmış ve alev yayılımını analiz etmek için G-denklemler modeli kullanılmıştır [27, 29, 30].

ANSYS Forte'de kullanılan denklem seti denklem (1) ve (2)'deki gibidir:

$$\frac{\partial \tilde{G}}{\partial t} + (\tilde{u} - \tilde{u}_{vertex}) \cdot \nabla \tilde{G} = \frac{\bar{\rho}_u}{\bar{\rho}_b} S_T^0 |\nabla \tilde{G}| - D_T \bar{K} |\nabla \tilde{G}| \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{G}^{n_2}}{\partial t} + \tilde{u} \cdot \nabla \tilde{G}^{n_2} = \nabla_{\perp} \cdot \left( \frac{\bar{\rho}_u}{\bar{\rho}_b} D_T \nabla_{\perp} \tilde{G}^{n_2} \right) + 2D_T (\nabla \tilde{G})^2 - c_s \frac{\tilde{\epsilon}}{\bar{k}} \tilde{G}^{n_2} \quad (2)$$

burada  $\nabla_{\perp}$  teğetsel gradyan operatörü,  $\tilde{u}$  akışkan hızı,  $\tilde{u}_{vertex}$  hareketli tepe noktasındaki verteks hızı,  $\rho_u$  ve  $\rho_b$  yanmış ve yanmamış karışımların ortalama yoğunlukları,  $D_T$  türbülanslı yayılmadır,  $\bar{K}$  ortalama alev ön eğriliğini,  $c_s$  model sabiti,  $\bar{k}$  ve  $\tilde{\epsilon}$ , RNG k-ε modelindeki ortalama türbülanslı kinetik enerjiyi ve yitim hızını temsil eder.

Türbülanslı yanma sürecini simule etmek için Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) ve G-denklemleri, kıvılcım başlangıcı için discrete particle ignition kernel (DPIK) modeli ve türbülans denklemleri çözümü için ise yeniden normalleştirilmiş grup (RNG) k-ε modeli kullanılmıştır [30-34]. Ayrık parçacık ateşleme çekirdeği (DPIK) modeli, Lagrangian yaklaşımı kullanarak alev başlangıcını öngörür

ve karşı gradyan difüzyonu ile ilişkili olarak, ince ve buruşuk alev rejimleri için alevin ön konumunu hassas bir şekilde belirler, bu da alev yayılımı ilerleme analizi için faydalıdır [35].

Ayrıca DPIK modeli ağ boyutundan daha küçük bir alev çekirdeği dikkate alınarak çekirdek başlangıcını simüle etmektedir. Çekirdekte eşit dağılmış sıcaklık varsayıldığında, alev çekirdeği büyüme hızı denklem (3)'te aşağıdaki gibi verilir:

$$\frac{dr_k}{dt} = \frac{\rho_u}{\rho_k} (S_{plasma} + S_T) \quad (3)$$

burada  $r_k$  kernel yarıçapı,  $\rho_k$  kernel bölgesindeki gaz yoğunluğu ve  $\rho_u$  is yerel yanmamış gaz yoğunluğudur. Plazma hızı olan  $S_{plasma}$  denklem (4)'teki gibidir:

$$S_{plasma} = \frac{\dot{Q}_{spk}\eta_{eff}}{4\pi r_k^2 [\rho_u(u_k - h_u) + P \frac{\rho_u}{\rho_k}]} \quad (4)$$

burada  $\rho_u$  ve  $h_u$  yanmamış karışımın yoğunluğu ve entalpisidir.  $\rho_k$  ve  $u_k$  çekirdeğin içindeki karışımın yoğunluğu ve iç enerjisidir.  $\dot{Q}_{spk}$  elektrik enerjisi deşarj oranıdır,  $\eta_{eff}$  bujiye olan ısı kaybından kaynaklanan elektrik enerjisi aktarım verimliliğidir. Ortaya çıkan alev cephesi bilgilerine göre silindir içi ısı salınımı, gaz kinetiği ve emisyon oluşumu hesaplanmaktadır. Yapılan analiz çalışmalarında ayrıca duvar ısı transferi [36] ve alev sönme modellerini [28] de çözülmektedir.

Yanma analizleri emme valfi kapandığı krank açısında ( $60^\circ$  AÖNs) başlatılıp egzoz valfi açıldığı krank açısında ( $65^\circ$  ÜÖNö) tamamlanmıştır. Emme valfinin kapandığı krank açısındaki ilk değerler (basınç, sıcaklık ve tür kütle oranları) ve sınır şartları 1-B AVL Boost programı kullanılarak sağlanmıştır. Elde edilen bu değerler tüm motor hızları için sabit tutularak sadece motor hızının performansa ve yanma karakteristiğine olan etkileri incelenebilmiştir. Emme ve egzoz akışları çözüme dahil edilmemiş ve çözüm aralığının da sınırlı tutulması ile hesaplama maliyeti azaltılmıştır. Duvarlara sabit sınır sıcaklıkları eşit dağıtılmış bir şekilde uygulanmıştır. Piston, silindir gömleği, silindir kafası, emme ve egzoz valf sıcaklıkları sırasıyla 500 K, 540 K, 590 K, 345 K ve 700 K olarak kabul edilmiştir. İlk değer olarak ise yakıt eşdeğerlik oranı  $\Phi=0,63$  olarak kabul edilmiştir. Bu değer dizel yanma rejiminde deneysel ve sayısal çalışmalarda 0,56 olarak elde edilmiştir [23]. Sıcaklık= 448,443 K, basınç =2,932 bar, türbülans kinetik enerji ve türbülans uzunluk ölçeği ise  $10\,000\text{ cm}^2/\text{sec}^2$  ve 1 cm olarak ayarlanmıştır.

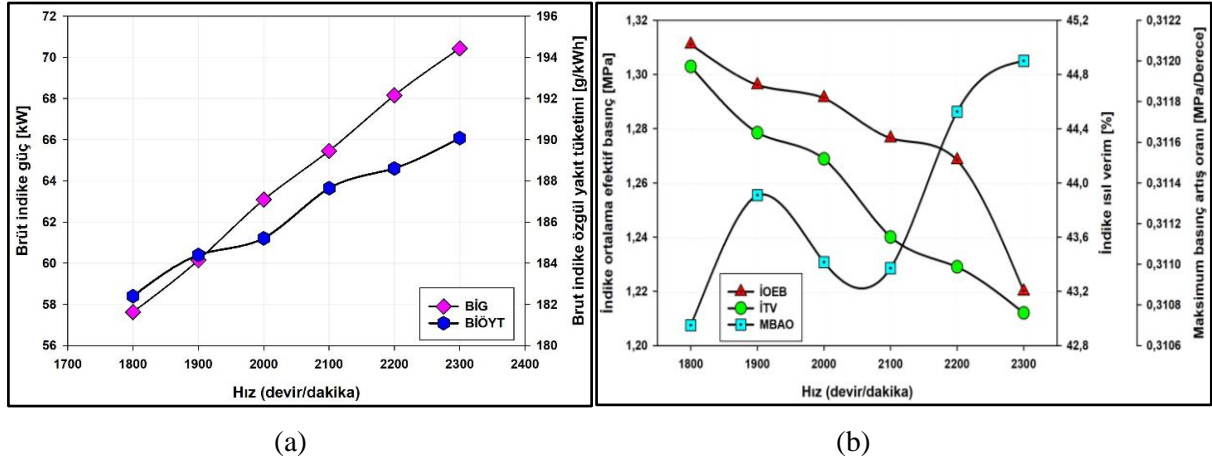
Yapılan çalışmanın deneysel verilerle doğruluğu dizel yanma rejiminde yapılan çalışmalarla sağlanmıştır. Bu doğrulama çalışması sonucuna göre, brüt indike güç (BİG), brüt indike özgül yakıt tüketimi (BİÖYT), indike ortalama efektif basınç (İOEB), indike ısı verim (İİV), maksimum silindir içi basınç, maksimum silindir içi ısı salınımı ve is emisyonu değerleri deneysel verilerden sırasıyla %0,75, %0,33, %1,06, %0,47, %1,44, %7,48 ve %18,5 oranında farklılık göstermiştir [19, 23, 25]. Dizel motordan buji ateşlemeli doğalgaz kullanan motora yapılan dönüşüm sonrasında ise eleman sayısından bağımsızlık çalışmaları gerçekleştirilerek en uygun eleman sayısının piston üst ölü nokta iken 851 653 olduğu saptanmıştır [26].

Analizler yüksek hız olarak tanımlanabilecek 1800-2300 devir/dakika aralığında, tam yük altında doğalgaz kullanımı için gerçekleştirilmiştir. Buji ateşleme zamanı ise dönüşüm öncesi dizel enjeksiyon zamanı olan 719,5 KMA olarak alınmıştır. Kimyasal çözücü işlemcisi buji ateşlemesinden sonra aktif hale getirilerek çözüm kolaylığı sağlanmıştır. Modelde en verimli çözüme ulaşabilmek için uyarlanabilir zaman adımı kontrolü uygulanmıştır. Başlangıç ve maksimum simülasyon zaman adımları sırasıyla  $5,0e-7$  sn ve  $5,0e-6$  sn olarak alınmıştır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Yapılan çalışmada dizel bir motordan buji ateşlemeli doğalgaz ile çalışan dönüştürülmüş bir motorda performans ve silindir içi yanma karakteristikleri yüksek hız olarak tanımlanabilecek 1800 devir/dakika'dan 2300 devir/dakika'ya kadar 100'er devir/dakika artırımla tam yük altında 6 farklı hızın performans ve yanma karakteristiğine olan etkileri araştırılmıştır. Şekil 2(a)'de farklı motor hızlarının brüt indike güç (BİG) ve brüt indike özgül yakıt tüketimi (BİÖYT) değerlerine etkileri verilmiştir. Artan devir sayısı ile silindir içi sürtünme ve hacimsel verim azalmaktadır [18]. Ancak güç hesabındaki devir sayısındaki artış sürtünme ve hacimsel verimden kaynaklı azalmaya baskın gelerek gücün artmasını sağlamıştır. Diğer yandan artan sürtünme kuvveti ile de silindir içi yakıt tüketiminin arttığı görülmektedir.

Şekil 2(b)'de ise indike ortalama efektif basınç (İOEB), indike ısı verim (İIV) ve maksimum basınç artış oranı (MBAO) verilmiştir. MBAO değeri genelde vuru ve gürültü ile ilişkilendirilerek motor tasarım ve optimizasyonunda bakılan önemli parametrelerden biridir. Bu oran literatürde genel olarak 1,5-1,0 MPa/derece [23] olmakta ve kritik vuru sınırı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2(b)'de de MBAO değerlerinin tüm hız değerlerinde sınır değerin (1 MPa/derece) altında kaldığı görülmektedir. Sürtünmedeki artış, hacimsel verimdeki düşüş ve optimize edilmemiş buji ateşleme zamanından kaynaklı, artan hız ile İOEB ve İIV değerleri azalmıştır. Motor hızındaki artışın özellikle buji ateşleme zamanının da geç olması ile vuru sınırının altında kaldığı görülmüştür. Bu nedenle, alev yayılımının yanma olayına egemen olduğu hipotezini desteklemektedir [15].

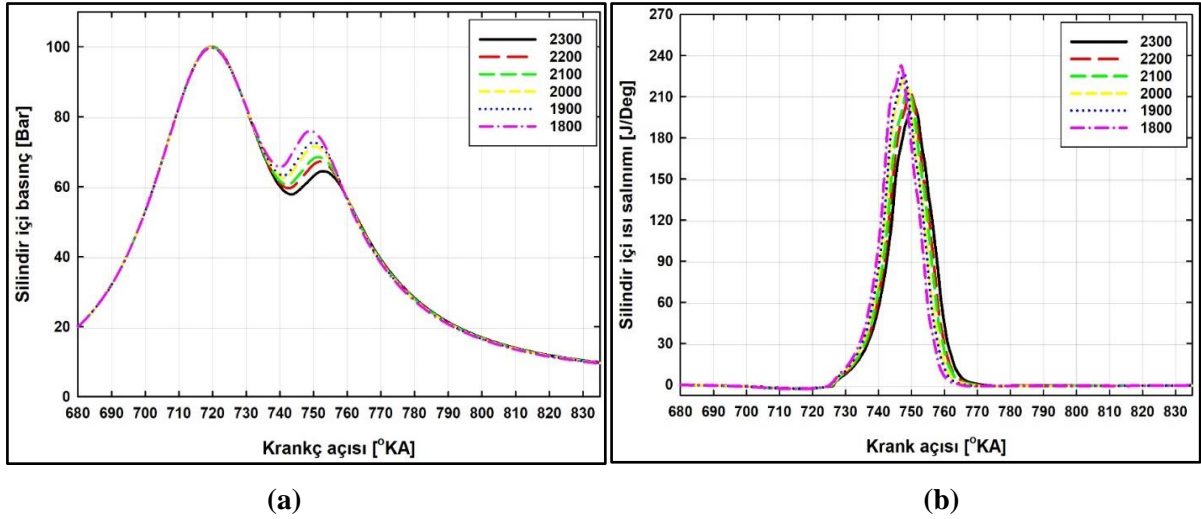


Şekil 2. Farklı hızlar için (a) brüt indike güç, brüt indike özgül yakıt tüketimi, (b) indike ortalama efektif basınç, ısı verim ve maksimum basınç artış oranı

Şekil 3(a) ve (b)'de farklı hız değerleri için silindir içi basınç ve ısı salınım grafikleri krank açısına bağlı olarak verilmiştir. Şekil 3(a)'da tüm hız değerleri için üst ölü nokta (ÜÖN)'da ve yanma başlangıcı sonrası olmak üzere iki tane tepe formasyonu oluşumu görülmüştür. Sıkıştırma oranının 17,5:1 gibi yüksek bir değer olmasına rağmen buji ateşleme zamanı (BAZ)'ın göreceli olarak geç (BAZ: 719,5 KMA) olması ve doğalgazın oktan sayısının yüksekliğinden dolayı tutuşma en erken (1800 devir/dakika'da) yaklaşık 731 KMA'da başlayabilmiştir. ÜÖN'da tüm hız değerleri için henüz yanma başlamadığından birinci tepe formasyonunda aynı maksimum basınç değerleri (yaklaşık 100 bar) elde edilmiştir. Sonrasında ise yanmanın başlaması ile ikinci tepe formasyonunun oluştuğu noktada ise farklı maksimum basınç değerleri farklı krank açıları elde edilmiştir. Ayrıca yanmanın ve maksimum basıncın oluştuğu nokta ÜÖN'dan çok sonra olmasından dolayı ateşleme zamanı için parametrik çalışmasının gerekliliği görülmektedir. Çünkü BAZ'nin geciktirilmesi, tepe silindir basıncının genleşme strokunda meydana gelmesine neden olarak tepe basıncını düşürür ve piston üzerine yapılan işi azaltır. Artan motor devri ile birlikte düşen hacimsel verim ve motor hızına göre optimize edilmemiş buji ateşleme zamanı sebebiyle silindir içi basınç değerleri motor devrinin artması ile azalmıştır.

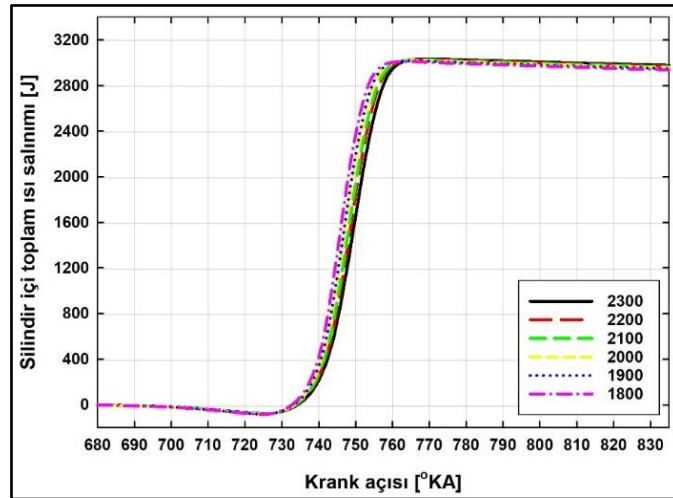
Şekil 3(b)'de, maksimum ısı salınımının 1800 devir/dak'da olduğu ve bu hız değeri için maksimum ısı verime sahip olduğu görülmektedir. Şekil 3'teki daha düşük tepe basıncı ve ısı salınım oranı, motor güç çıkışını etkileyen çevrim başına daha az iş olduğunu gösterir. Dolayısıyla, artan hız ile Şekil 2(b)'de de görüldüğü üzere İOEB ve İIV lineer olarak azalmıştır. Maksimum ısı salınım oranı 1800 devir/dakika motor hızında 750 KMA açısında 238 J/derece olarak gerçekleşmiştir.

Silindir içi ısı salınım oranı ve yanma hızı, motor devri arttıkça alev yanma hızının düştüğünü gösterir. Şekil 3(a)'te artan motor hızının, muhtemelen sabit BAZ ayarlarında yanmayı tamamlamak için daha az süre olması nedeniyle, maksimum basıncı azalttığını ve geciktirdiğini göstermektedir.



Şekil 3. Farklı hızlar için (a) silindir içi basınç ve (b) ısı salınım değerleri

Şekil 4'te silindir içi toplam ısı salınım miktarı verilmiştir. Artan hız ile açığa çıkan toplam ısı salınım miktarının arttığı görülmektedir. Normal şartlarda 64 mg/strok yakıt miktarı ve metanın alt ısı değerinin de yaklaşık 50 MJ/kg olduğu düşünüldüğünde 3200 J'lük toplam enerji salınımı beklenebilir. Ancak duvara geçen ısı transferi miktarı çıkarıldığında Şekil 4'te de görüldüğü üzere yaklaşık 3000 J toplam ısı salınım değeri elde edilmiştir.



Şekil 4. Farklı hızlar için silindir içi toplam ısı salınım miktarı

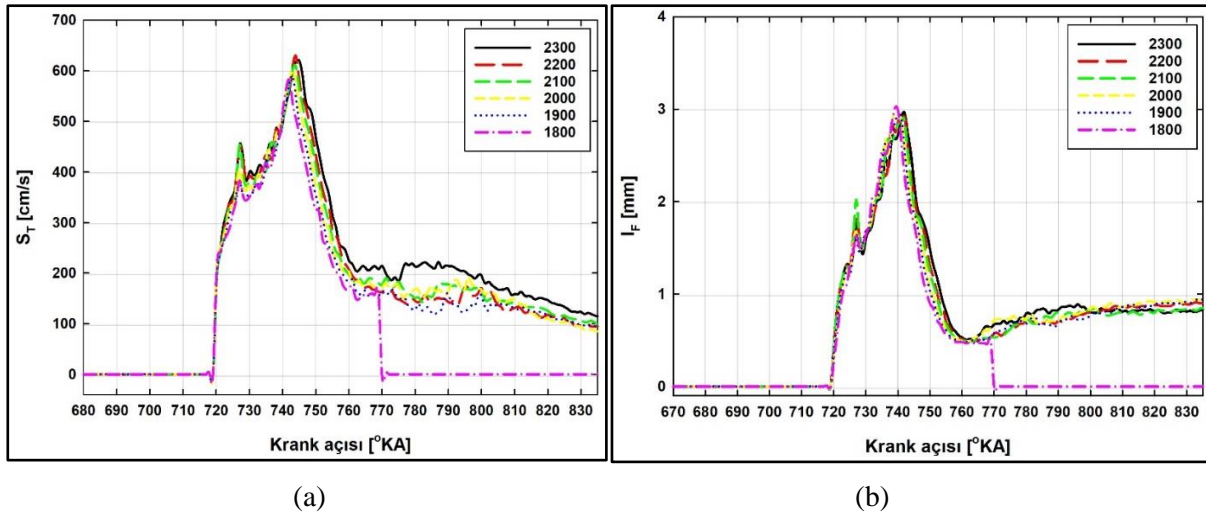
Tablo 3'de silindir içi yanma karakteristiği değerleri verilmiştir. Burada  $KAx$ , x% kümülatif ısı salınımı ile ilişkili krank açısı olarak tanımlanmıştır. KA10 yanma başlangıç zamanı, KA50 enerji salınım merkezi ve KA90 ise yanma bitiş zamanı olarak kabul edilmiştir. KA10 ile KA90 arasında geçen zaman ise yanma süresi olarak tanımlanmıştır. Burada verilen tutuşma gecikme zamanı, yakıtın ateşlenmesinden önceki fiziksel ve kimyasal hazırlık sürecini değerlendirmek için önemli bir parametredir. Genel olarak optimize edilmemiş buji ateşleme zamanı ve ilk değerlerle beraber artan motor devrinin tüm yanma evrelerini (KA2, 10, 50 ve 90) geciktirdiğini göstermektedir. Buna bağlı olarak da alev çekirdeği oluşumu ve yanma başlangıç zamanı da gecikmiştir. Bu etkilere bağlı olarak da tutuşma gecikme zamanı artmıştır.



Tablo 3. Farklı hız değerleri için silindir içi yanma karakteristiği değerleri

Hız (devir/dakika)	Tutuşma Gecikmesi (KMA)	Yanma Süresi (KMA)	KA2 (ÜÖNs)	KA10 (ÜÖNs)	KA30 (ÜÖNs)	KA50 (ÜÖNs)	KA90 (ÜÖNs)
2300	20,06	16,98	13,03	20,06	26,07	30	37,04
2200	20,06	15,97	12,00	20,06	26,06	29,03	36,03
2100	20,00	16,00	12,00	20,00	25,04	28,00	36,00
2000	19,04	16,02	12,02	19,04	24,02	27,02	35,06
1900	19,05	14,99	12,04	19,05	24,00	27,03	34,04
1800	18,05	14,96	11,03	18,05	23,02	26,04	33,01

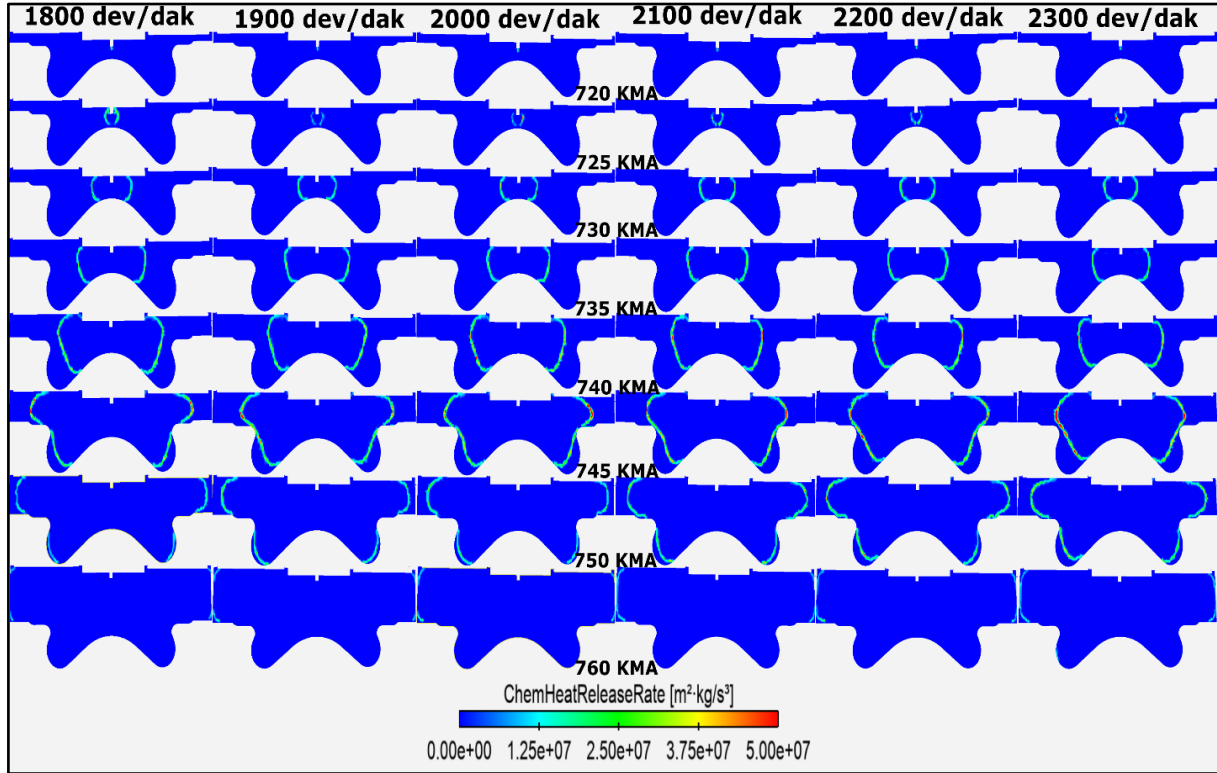
Türbülans alev hızı ( $S_T$ ) akış alanının, kimyasal ve fiziksel özelliklerin bir fonksiyonu olarak yanmamış karışıma göre ortalama alev cephesinin yayılma hızı olarak tanımlanır. Türbülans alev kalınlığı ( $L_f$ ) ise dalgalı ve gerilmiş alevin ön ısıtma ve reaksiyon bölgelerinin kalınlığı olarak tanımlanmaktadır [12]. Şekil 5'te farklı motor devirleri için silindir içi türbülans alev hızı ve alev kalınlığı grafikleri verilmiştir. Şekil 5(a) incelendiğinde tüm motor devirlerinde alev çekirdeği oluşumu başlamasıyla alev hızının aniden sıfırdan artmaya başladığı, sonrasında ise tam gelişmiş türbülanslı alev formun yakalanmasıyla daha da hızlı arttığı görülmektedir. Alevin sıkışma bölgesine ulaşması ve artan yüzey alanı etkisiyle alev hızında genel olarak bir düşüş gerçekleştiği görülmekle beraber 1800 devir/dakika'da alevin sıkışma hacmine erken ulaşması, silindir içi döngü miktarının yeterli kalmaması ya da fakir yanma sonucunda alev sönmesi meydana geldiği görülmektedir [24]. Ancak bu sorunlar gelişen kontrol teknolojisi ile emme egzoz valf zamanı kontrolü, ateşleme zamanı, yakıt ya da döngü oranı kontrolü ile aşılabilir [36]. Şekil 5(b) incelendiğinde ise, motor hızındaki değişikliklerin çanak içindeki veya sıkışma hacmi içindeki alev kalınlığı üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi olduğu söylenebilir. Ayrıca alev kalınlığının sıkışma bölgesine girdiğinde aniden düşmesinin de düşük türbülans seviyesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [13]. Şekil 5(a)'da olduğu gibi 1800 devir/dakika'da ani alev sönmesine bağlı olarak alev kalınlığı da sıfıra düşmüştür.



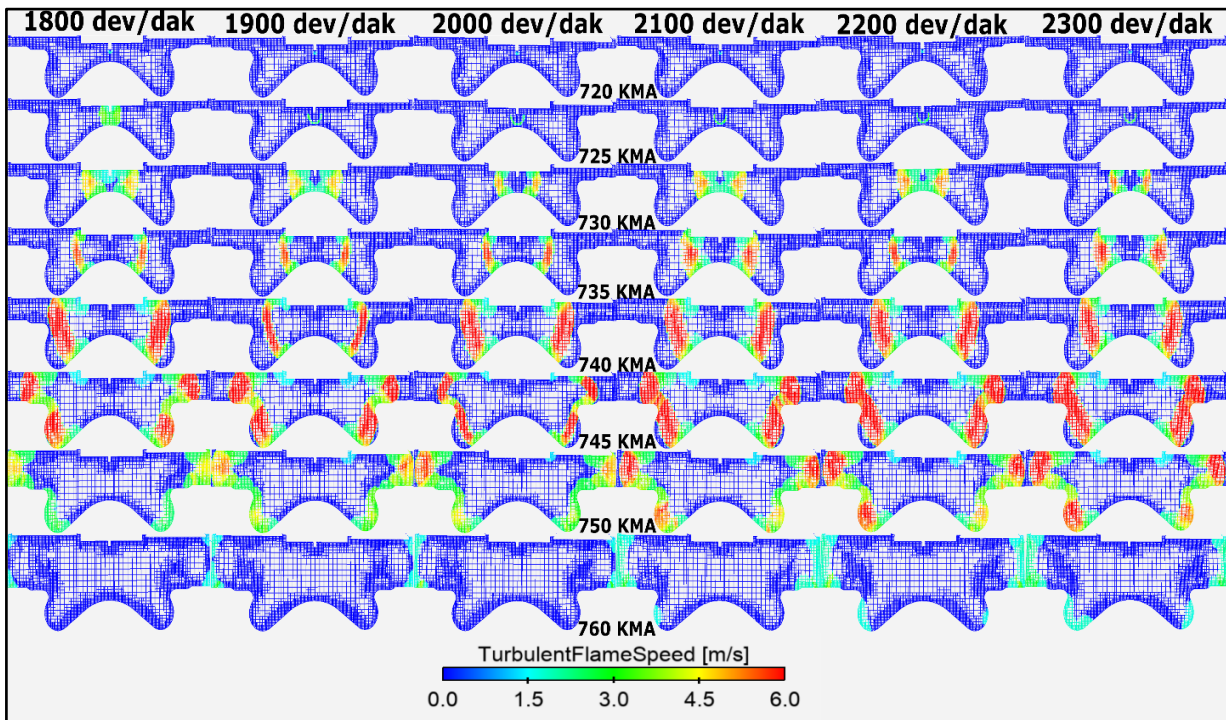
Şekil 5. Farklı motor devirleri için (a) silindir içi türbülans alev hızı ve (b) alev kalınlığı

Şekil 6'da farklı motor devirleri için silindir içi kimyasal ısı salınım oranı konturu verilirken, Şekil 7 ve 8'de türbülans alev hızı ve alev kalınlığı görüntüleri ise adaptif ağ yapısının anlaşılabilirliği için ağ görüntüsü üzerinde verilmiştir. Buji ateşleme zamanının sabit tutulmasından dolayı yüksek motor devirlerinde alevin başlama zamanı ve dolayısıyla da bu aşama için gerekli süre gecikmiştir. Yüksek motor

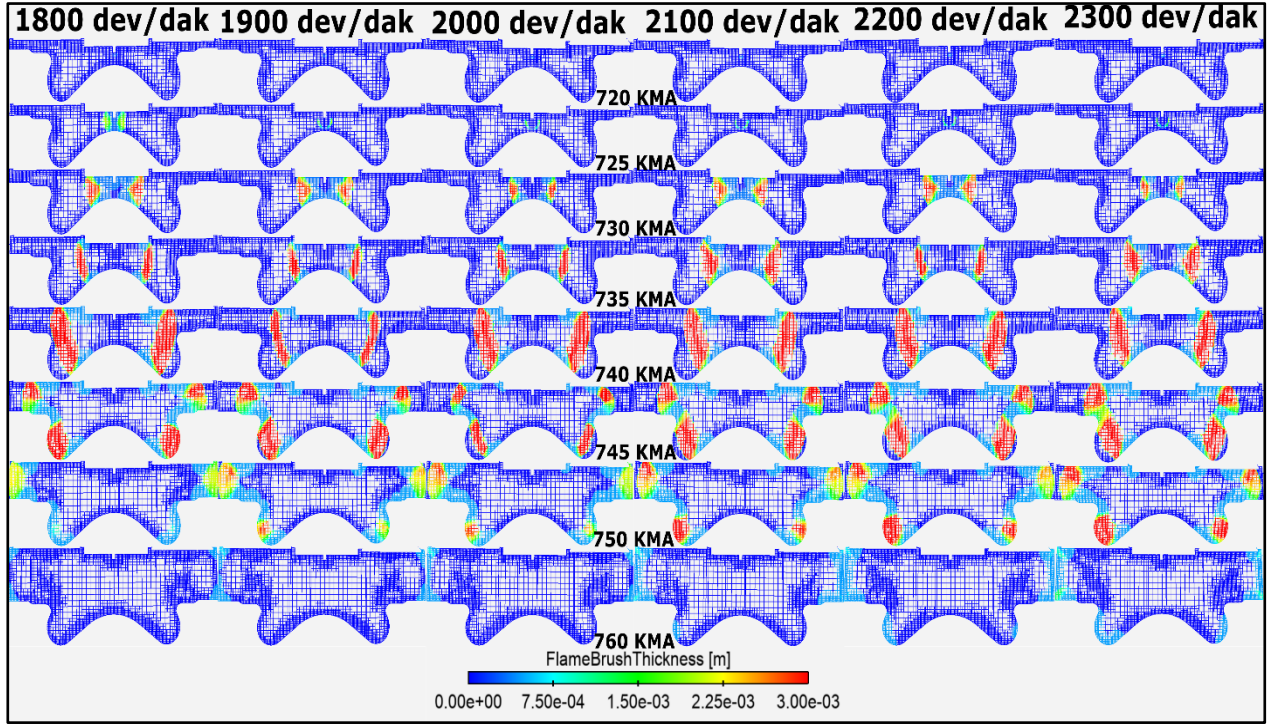
devrinde çalışılması sonucunda türbülanslı alev hızını artıran daha yüksek türbülans değerleri elde edilmesine rağmen, daha hızlı hareket eden piston, kimyasal reaksiyonlar için mevcut süreyi azaltarak alev yayılma hızını yavaşlatmıştır. Bu aynı zamanda alev cephesinin yüksek motor devrinde çalışmasında toroidal girintiye ulaştığı zamanı da geciktirmiştir. Bu nedenle, hızlı yanma periyodunun süresi daha uzamış ve yüksek hızlı çalışma için yanma performansı azalmıştır.



Şekil 6. Farklı motor devirleri için silindir içi kimyasal ısı salınım oranının kontur görüntüsü



Şekil 7. Farklı motor devirleri için silindir içi türbülans alev hızı kontur görüntüsü



*Şekil 8. Farklı motor devirleri için silindir içi alev kalınlığı kontur görüntüsü*

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Yapılan çalışmada geleneksel 3 silindri ağır hizmet dizel motorunun buji ateşlemeli doğalgaz ile çalışan bir motora dönüşümü sonrası 6 farklı hız değerinde motor performansı ve silindir içi yanma karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir. Genel olarak elde edilen sonuçlar ise aşağıdaki gibidir:

1. Motor hızındaki artış motor gücünü, yakıt tüketimini arttırırken ortalama efektif basıncı ve ısıl verimi azaltmıştır.
2. Buji ateşleme zamanının geç olmasından dolayı silindir içi basınç diyagramında iki adet tepe oluşum formasyonu görülmüştür. Artan motor hızı ile silindir içi maksimum basınç değeri azalmıştır.
3. Artan motor hızı ile birlikte silindir içi maksimum ısı salınım değeri azalmış ve daha geç oluşmuştur ancak silindir içi açığa çıkan toplam ısı salınım miktarı artmıştır.
4. İlk değer, sınır şartları ve buji ateşleme zamanının sabit olarak kabul edilmesinden dolayı motor hızının artması ile tutuşma gecikme zamanı artmıştır.
5. Artan motor hızı ile ulaşılan maksimum alev hızı artmış ancak tutuşma ve yanma gecikmesinden kaynaklı daha geç maksimum değere ulaşmıştır. Alev kalınlığında ise fazla bir değişim gözlenmemiştir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Üniversite Ortaklığı Programı kapsamında AVL Boost yazılımı sağladığı için AVL LIST GmbH'ye şükranlarımı sunarım. Motor hakkında gerekli bilgileri verdiği için Türk Traktör Ziraat Makine A.Ş.'ye teşekkür ederim. Ayrıca, ANSYS Forte yazılımını sağladığı için Gazi Üniversitesi'ne teşekkürlerimi sunarım.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)



- [1] Liu J, Dumitrescu CE. Flame development analysis in a diesel optical engine converted to spark ignition natural gas operation, Applied Energy, 230(1205-1217), (2019).

- [2] Reitz RD, Ogawa H, Payri R, Fansler T, Kokjohn S, Moriyoshi Y, Zhao H. IJER editorial: The future of the internal combustion engine. *International Journal of Engine Research*, 21(1), (3-10), (2019).
- [3] Reyes M, Tinaut FV, Giménez B, Pérez A. Characterization of cycle-to-cycle variations in a natural gas spark ignition engine. *Fuel*, 140, (752-761), (2015).
- [4] Reddy H, Abraham J. Ignition kernel development studies relevant to lean-burn natural-gas engines. *Fuel*, 89, (3262–71), (2010).
- [5] Cengiz C, Ayyıldız A, Karagöz S, Coşkun A, Berk S. Combustion Visualization of Partially Premixed and Non Premixed Diesel Fuel on Single Cylinder Optical Engine. *European Mechanical Science*, 3(1), (24-31), (2019). DOI: 10.26701/ems.385475
- [6] Kocakulak T, Solmaz H.. HCCI MENZİL ARTTIRICI MOTOR KULLANILAN SERİ HİBRİT BİR ARACIN MODELLENMESİ. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8(2), (279-292), (2020). DOI: 10.29109/gujsc.670564
- [7] Uyumaz A, Solmaz H. RCCI BİR MOTORDA ENJEKSİYON ZAMANLAMASI VE LAMDANIN YANMA VE PERFORMANS KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 4 (4), (299-308), (2016).
- [8] Liu J, Bommisetty HK, Dumitrescu CE. Experimental Investigation of a Heavy-Duty Compression-Ignition Engine Retrofitted to Natural Gas Spark-Ignition Operation. *ASME. J. Energy Resour. Technol.*, 141(11), (1-12), (2019).
- [9] U.S. Energy Information Administration (EIA)., *Annual Energy Outlook 2016 (AEO 2016)*, accessed January 1, 2022, from <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/er/>, 2016.
- [10] Meyer R, Meyers D, Shahed SM, Meyer R, Meyers D, Shahed SM. Development of a Heavy Duty On-Highway Natural Gas-Fueled Engine. *SAE Technical Paper 922362*, (1992).
- [11] Liu J, Szybist J, Dumitrescu C. Choice of Tuning Parameters on 3D IC Engine Simulations Using G-Equation. *SAE Technical Paper 2018-01-0183*, (2018).
- [12] Liu J, Dumitrescu CE. Methodology to separate the two burn stages of natural-gas lean premixed-combustion inside a diesel geometry. *Energy Conversion and Management*, 195, (21-31), (2019).
- [13] Liu J, Dumitrescu CE. Experimental Investigation of Combustion Characteristics in a Heavy-Duty Compression-Ignition Engine Retrofitted to Natural-Gas Spark-Ignition Operation. *SAE Technical Paper 2019-24-0124*, (2019).
- [14] Liu J, Dumitrescu CE. Lean-Burn Characteristics of a Heavy-Duty Diesel Engine Retrofitted to Natural-Gas Spark Ignition, *J Eng Gas Turbines Power*, 141, (1–12), (2019).
- [15] Liu J. Investigation of Combustion Characteristics of a Heavy-Duty Diesel Engine Retrofitted to Natural Gas Spark Ignition Operation, PhD, West Virginia University, 2018.
- [16] Liu J, Dumitrescu C. Experimental investigation of a natural gas lean-burn spark ignition engine with bowl-in-piston combustion chamber, *SAE Technical Paper 2019-01-0559*, (2019).
- [17] Liu J, Dumitrescu C. Methodology to Determine the Fast Burn Period Inside a Heavy-Duty Diesel Engine Converted to Natural Gas Lean-Burn Spark Ignition Operation, *SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobilit*, 2(1), (346-356), (2020).
- [18] Heywood, J. B. (1988). "Internal Combustion Engine Fundamentals." New York: McGraw-Hill.

- [19] Aktas F, Karyeyen S. Colorless distributed combustion (CDC) effects on a converted spark-ignition natural gas engine. *Fuel*, 317, 123521, (2022).
- [20] Aktas F. Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Simulation and Mesh Size Effect of the Conversion of a Heavy-Duty Diesel Engine to Spark-Ignition Natural Gas Engine. *J Eng Gas Turbines Power*; 144. Epub ahead of print 21 March 2022. DOI: 10.1115/1.4053717.
- [21] Aktas F. (2022). Spark ignition timing effects on a converted diesel engine using natural gas: A numerical study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. <https://doi.org/10.1177/09544070221081671>
- [22] Aktas F. (2022). A 0/1-Dimensional Numerical Analysis of Performance and Emission Characteristics of the Conversion of Heavy-Duty Diesel Engine to Spark-Ignition Natural Gas Engine. *International Journal of Automotive Science And Technology*, 6(1),1-8. DOI: 10.30939/ijastech..980338
- [23] Aktas F, Numerical investigation of the effects of the use of propane-diesel as a dual fuel in a diesel engine on the combustion regime, engine performance and emission values, PhD, Gazi University, 2021.
- [24] Liu J, Dumitrescu CE. 3D CFD simulation of a CI engine converted to SI natural gas operation using the G-equation, *Fuel*, 232, (833-844), (2018).
- [25] Noor, M. M., Aziz, H. A., Wandel, A.P., 2012, "Modelling of non-premixed turbulent combustion of hydrogen using conditional moment closure method," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*; 36. Epub ahead of print 2012. DOI: 10.1088/1757-899X/36/1/012036.
- [26] Aktas, F. "Numerical Investigation of Equivalence Ratio Effects on a Converted Diesel Engine Using Natural Gas." *ASME. J. Energy Resour. Technol.*, 144(9), (2022). <https://doi.org/10.1115/1.4054404>
- [27] ANSYS Forte, User Guide, Release 2020 R2, 2020.
- [28] ANSYS Forte, Theory Guide, Release 2020 R2, 2020.
- [29] Liang L, Reitz RD. Spark ignition engine combustion modeling using a level set method with detailed chemistry, *SAE Technical Paper 2006-01-0243*, (2006).
- [30] Firat M. Investigation of multistage injection strategies in a DISI engine fueled with methane under stratified charge lean combustion conditions. *Environ Prog Sustain Energy*, 39, (5–7), (2020).
- [31] Han Z, Reitz RD. Turbulence modeling of internal combustion engines using RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  models, *Combustion Science and Technol*, 106(4-6), (267-295), (1995).
- [32] Yakhot V, Orszag SA. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory, *Journal of Scientific Computing*, 1(1), (3-51), (1986).
- [33] Verma I, Bish E, Kuntz M, Meeks E, Puduppakkam K, Naik C, Liang L. CFD Modeling of Spark Ignited Gasoline Engines-Part 1: Modeling the Engine under Motored and Premixed-Charge Combustion Mode. *SAE Technical Paper 2016-01-0591*, (2016).
- [34] Verma I, Bish E, Kuntz M, Meeks E, Puduppakkam K, Naik C, Liang L. CFD Modeling of Spark Ignited Gasoline Engines-Part 2: Modeling the Engine in Direct Injection Mode. *SAE Technical Paper 2016-01-0579*, (2016).

- [35] Stocchi I, Liu J, Dumitrescu CE, Battistoni M, Grimaldi CN. Effect of Piston Crevices on the Numerical Simulation of a Heavy-Duty Diesel Engine Retrofitted to Natural-Gas Spark-Ignition Operation. *Journal of Energy Resources Technology*, 141(11), (2019).
- [36] Han Z, Reitz RD. A Temperature Wall Function Formulation for Variable-density Turbulence Flows with Application to Engine Convective Heat Transfer Modeling, *International Journal of Heat Mass Transfer*, 40(3), (613-625), (1997).
- [37] Liu J, Dumitrescu CE. Numerical Investigation of Methane Number and Wobbe Index Effects in Lean-Burn Natural Gas Spark-Ignition Combustion. *Energy & Fuels*, 33(5), (4564-4574), (2019).

## Design Concept and Valuation of Design

Reyyan Pınar SÖZBİLEN<sup>1,\*</sup>  Hüdayim BAŞAK<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, the concepts of design and design valuation are discussed; design valuation methods, advantages and disadvantages of these methods are examined in detailed. In addition, the design valuation report and the sections of the report are also mentioned.

### Article Info:

Research article  
Received: 13.01.2022  
Revision: 12.02.2022  
Accepted: 21.03.2022

### Highlights

- Design Valuation.
- Design Valuation Methods.
- Design Valuation Report.

### Keywords

Design  
Design Valuation  
Design Valuation Methods  
Design Valuation Report

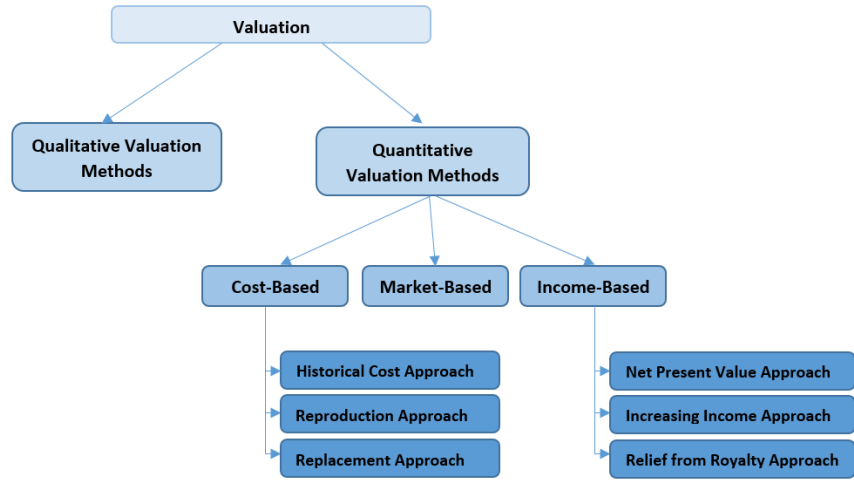


Figure A. Valuation methods chart

**Purpose:** The importance of design in the daily life has become significant in recent years. Thus, the value of the product in which design is used has become increased. Design valuation allows this value to be calculated in monetary terms. The calculated monetary value provides convenience in financial transactions for companies. The value of the design can be calculated using different methods according to the data of the design.

**Theory and Methods:** There are three main methods and related approaches of the methods that are frequently used in design valuation. The three common methods are; the cost-based, the market-based and the income-based valuation methods. These methods and related approaches are explained in detail. The Design Valuation Report consists of five main sections. The valuation of the design in this report is explained in detailed with the methods and the data.

**Results:** Design valuation is carried out by choosing the most appropriate method according to the state of the design and the available data. The selected methods, approaches and the accuracy of the data used are important for a healthy calculation of the value of the design. The data and methods used in the design evaluation report are explained in the evaluation and valuation sections. The calculated design value is included in the conclusion section.

**Conclusion:** This study is a compilation study of my thesis. Although brand and patent valuation is frequently applied in global literature, design valuation and its importance among the world has been recently noticed. Likewise, design valuation studies in our country is also scarce. Because of that, the applied methods are generally adapted versions of industrial property valuation methods. Design valuation is important in terms of clarifying the financial values of designs. These design valuation reports are among the elements that strengthen the hand of the design owner in financial transactions. Therefore, making the valuation with correct data and methods will positively affect the accuracy of the report result.



## Design Concept and Valuation of Design

Reyyan Pınar SÖZBİLEN<sup>1,\*</sup> Hüdayim BAŞAK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 13.01.2022*  
*Düzeltilme: 12.02.2022*  
*Kabul: 21.03.2022*

### Keywords

*Design*  
*Design Valuation*  
*Design Valuation Methods*  
*Design Valuation Report*

### Anahtar Kelimeler

*Tasarım*  
*Tasarım Değerleme*  
*Tasarım Değerleme*  
*Yöntemleri*  
*Tasarım Değerleme*  
*Raporu*

### Abstract

Today, a small design change in product design makes that product different from other similar products. The design, which increases the preferability of the product day by day, adds value to the product. It is inevitable that the design should be protected because of the value it adds to the product. Design valuation is carried out in order to materially determine the value of the design protected by registration. An example of design valuation studies is not yet seen in our country, and it is considered as the subject of recent years in the world. Studies on the subject are very recent studies. Design valuation gains importance as the design gains value. In this study, by explaining what design and design valuation are in general and which methods are used, it has been revealed which sections the design valuation report should consist of basically.

## Tasarım Kavramı ve Tasarım Değerleme

### Öz

Günümüzde, ürün tasarımında meydana gelen ufak bir tasarımsal değişiklik o ürünü benzer diğer ürünlerden farklı kılmaktadır. Ürünün tercih edilebilirliğini günden güne artıran tasarım, ürüne bir değer katmaktadır. Tasarımın ürüne kattığı değerden dolayı koruma altına alınması kaçınılmaz olmaktadır. Tescil ile korunan tasarımın değerinin maddi olarak belirlenebilmesi amacıyla tasarım değerlendirme gerçekleştirilmektedir. Tasarım değerlendirme çalışmalarının örneği ülkemizde henüz görülmemekte, dünyada ise son yılların konusu olarak ele alınmaktadır. Konu ile ilgili çalışmalar çok yeni çalışmalardır. Tasarım değerlendirme, tasarım değer kazandıkça önem kazanmaktadır. Bu çalışmada genel olarak tasarımın ve tasarım değerlemenin ne olduğu ve hangi yöntemlerin kullanıldığı açıklanarak tasarım değerlendirme raporunun temel olarak hangi bölümlerden oluşması gerektiği ortaya konulmuştur.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tasarım ilk bakışta yalnızca estetik bir unsur olarak düşünülse de günümüzde ticari amaçlar için sıkça kullanılmaktadır. Tescilli bir tasarım, tescili elinde tutan firmaya pek çok fayda sağlamaktadır. Marka ve patentin firmalara finansal getirileri daha alışıldık bir durum olsa da tasarım da marka ve patent gibi bir değerdir. Hazırlanan tasarım değerlendirme raporları tasarımı estetik bir kaygıdan ticari bir değere dönüştürmektedir.

Ülkemizde ve dünyada bu durum hali hazırda yeni yeni şekillenmeye başlamış olup literatürde konu ile ilgili yeterli sayıda çalışmalar tam anlamıyla oluşmamıştır. Literatürde yer alan kaynakların pek çoğu ise yalnızca tasarım değerlemeye odaklı çalışmalar olmayıp genellikle fikri ve sınai mülkiyet değerlendirme alanındaki genel çalışmalardır. Bu durum bu çalışmayı daha önemli kılmaktadır.

Bu çalışmada, tasarım kavramı, tasarım değerlemede kullanılan yaygın yöntemler, tasarım değerlendirme raporu içerisinde olması gereken bölümler ve içerikleri de ele alınmıştır.

## 2. TASARIM (DESIGN)



Önerilen sistem farklı teknolojilerinin bir arada kullanılmasını gerektirmektedir. Bu nedenle önerilen sistemin geliştirilmesinde kullanılan materyal ve metotlar farklı başlıklar altında detaylı olarak açıklanmıştır.

## 2.1. Fikri ve Sınai Haklar (Intellectual Property Rights)

Fikri mülkiyet hakları, bir düşünce ürününün korunması için fikir sahiplerine verilen haklar olarak tanımlanmakta olup, Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu m. 1/B(a) uyarınca “Sahibinin hususiyetini taşıyan ve ilim ve edebiyat, musiki, güzel sanatlar veya sinema eserleri olarak sayılan her nevi fikir ve sanat mahsulleri eser olarak kabul edilmektedir.”[1] [2]. Bu haklar eserin izinsiz kullanımının önüne geçmekte ve eserin ortaya çıkmasıyla birlikte başlamaktadır [3]. Söz konusu eser oyun, film veya müzik alanlarından birinde ise eser sahibinin bilinmesi için zorunlu kayıt ve tescil gereklidir [4]. Bu alanlar dışında ortaya konulan eserler için kayıt ve tescil eser sahibinin isteğine bağlıdır [5]. Eser sahibi gerçek kişi ise koruma süresi eser sahibinin hayatı boyunca ve ölümünden itibaren 70 yıldır. Eser sahibinin tüzel kişi olduğu ya da bilinmediği durumlarda eserin ortaya çıkışından itibaren 70 yıldır. Koruma süresi sona erdiğinde ise eser herhangi bir izin söz konusu olmaksızın kullanılabilir [6].

Sınai mülkiyet hakları ise piyasaya sunulan ürün ve hizmetlerin üretici ve/veya satıcılarının diğerlerinden ayrılmasını sağlayan, ürün sahibine tekel hakkı veren haklardır [7].

## 2.2. Tasarım Kavramı (Design Concept)

Tasarım, ürünlerin dış görünüşlerindeki renk, desen, doku, şekil gibi farklılar olup, sınai mülkiyet hakları içerisinde yer almaktadır [8]. En ufak bir farklılıkla ürünün tercih edilebilirliğini artırması sebebiyle tasarımın korunması bir ihtiyaç haline gelmektedir. Ülkemizde tasarımlar tescilli ve tescilsiz tasarım olmak üzere iki şekilde korunmaktadır [9]. Koruma süresi tescilsiz tasarımlar için 3 yıldır. Tasarım tescilli ise 5 yıl süre ile korunmakta, 5 yılda bir yapılan yenilemeler ile toplamda 25 yıla kadar korunabilmektedir [10]. Koruma süresinin sonunda ise, söz konusu tasarım kamuya mal olmaktadır.

Tasarım sınıflandırmak için kullanılan Locarno sınıflandırılması ülkemizin de kullanmış olduğu sınıflandırmadır [11].

Tasarım tescili bölgesel bir hak olup tasarım, başvuru yapılan ülkenin yasaları ile korunmaktadır. Söz konusu koruma hakkı yalnızca başvuru yapılan ülke ile sınırlıdır. [12]

Tasarımların pek çok ülkede korunması amacıyla kurulmuş olan Lahey sistemi, tek bir ücret sistemi ve tek bir başvuru yapılması yoluyla uluslararası tescili sağlamaktadır [13]. Uluslararası tescilde ise başvuru sahibi, koruma talep ettiği ülkeleri tek tek kendisi seçmektedir [14].

Bunların yanı sıra, bölgesel tasarım tescili olarak Hollanda, Belçika ve Lüksemburg ülkelerinde tek bir başvuru ile ortak koruma sağlayan Benelux Tescil Tasarım Sistemi ve de Avrupa Birliği Fikri Haklar Ofisine yapılan tek bir başvuru ile Avrupa Birliği ülkelerinde koruma sağlayan bir topluluk tasarım tescili de mevcuttur [14] [15].

Tasarım araştırmaları ülkemiz Türk Patent ve Marka Kurumu'nun veri tabanı üzerinden yapılırken, uluslararası araştırmalar Lahey sistemine kayıtlı tüm tasarımlara erişebilmek için Hague Express veri tabanı kullanılmaktadır [16][17]. Global veri tabanı ise Lahey sistemine kayıtlı tüm uluslararası tasarımlar ile birlikte ulusal koleksiyonların simultane bir şekilde taranmasını mümkün kılmaktadır [18].

## 3. TASARIM DEĞERLEME (VALUATION OF DESIGN)

Değer, ticari amaçla kullanılan bir varlığın gelecekteki getirisi göz önünde bulundurularak bu getirinin günümüzdeki karşılığıdır [19]. Değerleme ise, faydalı bir şey için ekonomik bir değer belirleme işlemleri bütünüdür [20].

Mali, maddi ve maddi olmayan duran varlıkların tamamı değerlemeye konu olabilir. Tasarım ise, Türkiye Muhasebe Standardı (TMS 38) Hakkında Tebliğ'de “Fiziksel niteliği olmayan tanımlanabilir parasal olmayan varlık” olarak tanımlanan maddi olmayan duran varlıklar sınıfına girdiğinden değerlemeye konu olmaktadır [21].

Tasarımın değerlemesinin yapılması; tasarımı, tasarıma dair finansal işlemlerde daha güçlü kılmaktadır. Devir, lisanslama, satış, haciz, birleşme ve devralma, bağış, sermaye artırımı gibi durumlarda, taraflardan birinin mağduriyetinin önüne geçilmekte olup, tescilli tasarımın kopyalanması durumunda ortaya çıkacak tecavüz davalarında ise zararın belirlenmesini kolaylaştıracaktır. Tasarım değerlemenin kullanım alanları Şekil 3.1 ile verilmiştir.



Şekil 1. Tasarım Değerlemenin Kullanım alanları

### 3.1. Değerlemenin Önemi (Importance of Valuation)

Son 10 yılın istatistiksel bilgilerine bakıldığında yıllık ortalama 40.000-50.000 arasında tasarım başvurusu yapılmaktadır [22]. Bu tasarımların tescillenmesi firmaların maddi olmayan varlıkları arasında değerlendirilmektedir. Söz konusu varlıklar, yapılan araştırmalara göre Amerika'daki en büyük 500 şirketin toplam varlığının %80'ini, Avrupa Birliği üyesi ülkeler ve Çin Halk Cumhuriyeti şirketlerinin de toplam varlığının %70'ini oluşturmaktadır [23].

İstatistiklere bakıldığında şirketlerin mal varlıklarının büyük bir çoğunluğunu maddi olmayan varlıkların oluşturduğu göz önünde bulundurulduğunda bu mal varlığının daha verimli bir şekilde yönetilmesi önem arz etmektedir. Bu sebeple, değerlendirme raporları hazırlanması esnasında muhtemel rakipler, kritik pazarlar gibi kritik pazar verilerinin toplanması vesilesiyle şirketlerin bu verileri değerlendirerek hangi pazarlara girip hangilerine girmeyeceğinin kararını vermesi, stratejik planlarını yapması, gereksiz maliyetlerden kurtulması ve IP portföyünü en doğru yönetmesi kolaylaşmaktadır [24].

Ülkemizde ise bu tarz çalışmaların artırılmasını teşvik amacıyla Cumhurbaşkanlığı ikinci 100 günlük ekonomik planı dâhilinde 2018 yılı Nisan ayında Türk Patent ve Marka Kurumu'nun iştiraki olarak TÜRKSMMD A.Ş. kurulmuştur [25].

### 3.2. Tasarım Değerlemeye Etki Eden Faktörler (Factors Affecting Design Valuation)

Tasarımın değerlendirilmesi esnasında tasarımın değerine doğrudan ya da dolaylı olarak etkisi bulunan pek çok faktör bulunmaktadır.

Bunlardan en önemlisi zaman faktörü olup, tasarım değerlendirilmesinin yapıldığı tarih kullanılacak yöntem ve verilerin tercihini doğrudan etkileyecektir [26]. Zaman faktörünün bir diğer etkisi ise tasarımın kullanım ömrüdür. Günümüzde aktif bir şekilde rolü olan moda kavramı sebebiyle her gün yeni tasarımlar ortaya çıkmakta olup, bu durum mevcut tasarımların ömrünü kısaltmaktadır. Gelir tabanlı değerlendirme metodunun kullanıldığı değerlendirme hesaplarında bu unsurun etkisi özellikle göz önünde bulundurulur. İstisnai olarak

zamansız tasarım olarak adlandırılan her daim zarafet, şıklık ve tarzlarını koruyan tasarımlar her zaman zamana ve modaya uygundurlar [27].

Seçilen değerlendirme metodolojisi değerlendirme sonucunu doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Metodolojisinin seçiminde ise en önemli unsur eldeki verilerdir. Maliyet metodu daha çok eldeki verilerin yetersizliği durumunda kullanılırken eldeki veriler yeterli olması ise gelir veya pazar metodunun kullanımını mümkün kılmaktadır. [28].

Pazara ilişkin veriler, seçilen değerlendirme metodolojisini etkileyeceğinden değerlendirme sonucunda büyük oranda etkisi vardır. Tasarım sahibi ile üçüncü kişiler arasında imzalanan bir lisans sözleşmesi söz konusu tasarımın üçüncü kişiler tarafından kullanımını mümkün kılacaktır [29]. Üçüncü kişilerin tasarımın kullanımından dolayı elde edecekleri gelir için lisans verene belirli bir oranda yaptıkları ödemeye ise telif oranı denmektedir. Telif oranı sabit bir ücret olabileceği gibi elde edilen gelirden belirli bir yüzde şeklinde de anlaşılabilir [30].

Yüzde 25 kuralı (Rule of Thumb), lisans alan tarafın lisans veren tarafa tasarımın kullanılmasından dolayı elde ettiği gelirin %25'ini telif olarak verdiği sistem olup, telif oranının belirlenmesi için kullanılan en basit yöntem olduğundan sıklıkla tercih edilmektedir [31].

Telif oranları doğrudan sektörlerin brüt marjlarına bağlı olduğundan farklı sektörler farklı telif oranlarına sahip olabilirler. Geleneksel sektörler düşük kâr marjı ile çalışırken teknoloji ağırlıklı çalışan sektörlerin brüt kâr marjı daha yüksektir. Bu durum lisansa sözleşmelerinde telif oranlarını doğrudan etkilemekte, brüt kâr marjı yüksek olan sektörler daha büyük telif oranları ile çalışabilmektedirler [32].

Gelir tabanlı değerlendirme metodu kullanıldığı durumlarda değerlemeye etki eden bir diğer faktör yıllık büyüme oranıdır. Gelecek yılların tahmini büyüme oranları belirlenirken yıllık büyüme oranı kullanılır. Yıllık büyüme oranı ise, yıllık bazda satışlardaki değişim oranıdır ve bir takvim yılı için yapılan bir hesaplamadır [33].

Yasal düzenlemeler ve yasaklamalar da tasarımın değerini ani bir şekilde değiştirebilecek bir faktördür. Yapılan bir yasal düzenleme ile tasarım değer kazanabileceği gibi değer de kaybedebilir. 2015 yılında yapılan Özel Kreş ve Gündüz Bakımevi ve Çocuk Kulüpleri Güvenlik Önlemlerinde yapılan yasal düzenleme ile oyuncakların öncelikli olarak ahşap ya da plastik malzemeden olması bahçe oyuncaklarının ise sivri uçlu kırık ya da paslı olmaması uygun görülmüştür [42]. Bu durum ahşap ya da plastik malzemelerden üretilen oyuncakların değerini artırırken diğer malzemelerden üretilen oyuncakların değer kaybına sebep olmuştur. Bir diğer örnek olarak, elektronik sigaraların satış ve ithalatının yasaklanması da tasarımın değerini bir anda kaybettiren bir düzenleme olarak ele alınabilir [35].

Tasarımın, pazara sunulduğunda herhangi bir ihlale sebep olup olmayacağının anlaşılması amacıyla faaliyet serbestliği araştırması yapılmaktadır [36]. Herhangi bir ihlalin söz konusu olduğu durumlarda uygulanan yasal işlemler oldukça maliyetli olduğundan faaliyet serbestliği raporunun düzenlenmesi ürün piyasaya sunulmadan önce alınacak tedbirler açısından önem arz etmektedir [37]. Bu sebeple, faaliyet serbestliği raporunun hazırlanıp hazırlanmaması da değerlemeye etki eden bir faktördür.

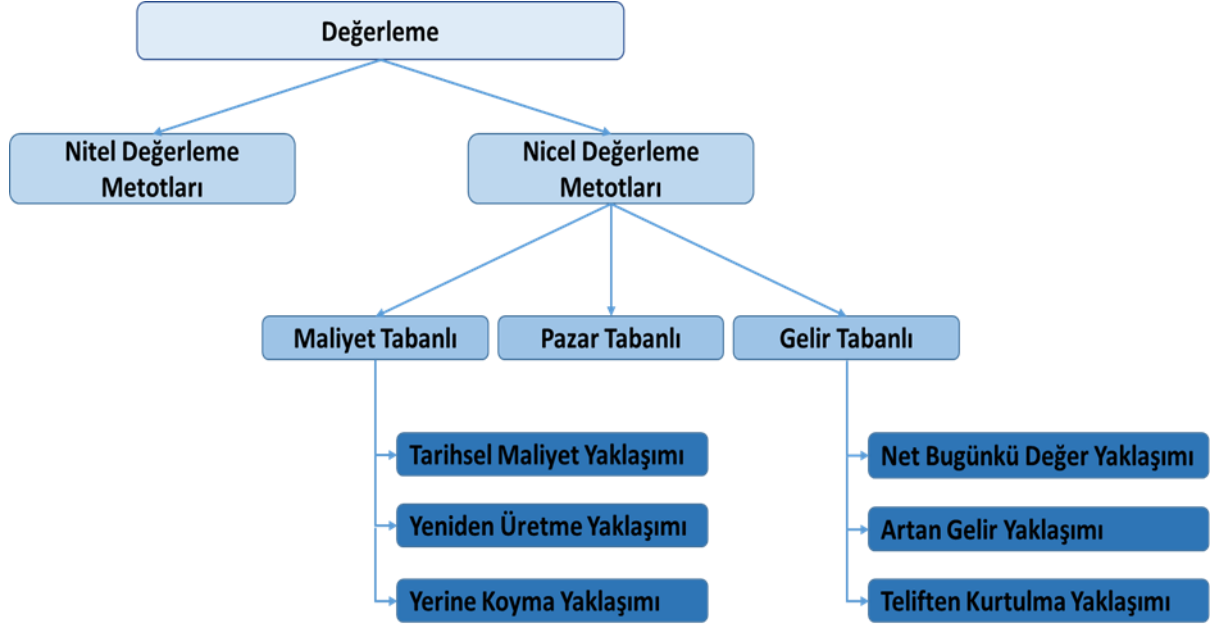
Tasarımın gerçek değerine en yakın değer elde edilmesi için tüm faktörler dengeli bir şekilde kullanılmalıdır [28].

### 3.3. Değerleme Metotları (Methods of Valuation)

Değerleme yapılırken kullanılacak pek çok metot mevcuttur. Değerleme, nicel ve nitel metotlar olarak iki genel metot kullanılarak gerçekleştirilmekte olup, her iki yöntemin de kullanım amaçları farklı olup kendi içlerinde avantaj ve dezavantajları mevcuttur [38]. Nitel metotlar genel bir skora ile ilgilenirken nicel metotlar genellikle üç ana metottan oluşur. Bu üç ana metot kendi içinde içerisinde alt yaklaşımlar içerebilmektedir [39]. Yaygın kullanılan metot ve yaklaşımlar Şekil 3.2 ile gösterilmiştir.

Bu metotların seçimi yapılırken söz konusu tasarıma göre eldeki veriler dikkate alınmalıdır, bu veriler söz konusu değerlendirme metodu için pek çok değişkeni oluşturmaktadır. Bu verilerin çeşitliliği yöntemin gücünü belirlemektedir [40]. Bu verilerin dışında seçilecek metodun belirlenmesi değerlendirme yapan uzmana, değerlendirme sebebine bağlıdır. Her yöntemin kısıtlı olduğu alanlar ve zayıflıklar söz konusudur. Seçilen yöntem bütün bu kriterler göz önünde bulundurularak yapılmaz, zira sağlıklı bir sonuç alınması için bu

unsurlar önemli unsurlardır [41]. Değerleme yapılırken tercih edilecek metot, eldeki veriler ve pazarlama stratejisine göre belirlendiğinden seçim metodolojisi değerlendirme sonucunu doğrudan etkileyecektir [42].



Şekil 2. Değerleme metodları şeması

### 3.3.1 Nitel Değerleme Metodları (Qualitative Valuation Methods)

Genel olarak bir skor tablosu yapılarak tasarımın diğer tasarımlar ile kıyaslanmasını temel alan yöntemdir. Kontrol listesi yapılması suretiyle yapılan skorlamalar ile gerçekleştirilir. Bu yöntem ile tasarımın potansiyel getirisi ve yahut rakiplerin önünün kesilme ihtimali öngörülebilmektedir [43].

Yöntemin bir diğer avantajı ise söz konusu tasarım sahibinin portföyünü yönetmeyi kolaylaştırmasıdır. Gerekli durumlarda yönelmesi gereken tasarımların belirlenmesi ya da uygun durumlarda önemi az tasarımların terk edilmesi konusunda yardımcı olmaktadır [44]. Bu sayede gereksiz ekonomik giderler azaltılabilmektedir [45].

Nitel değerlendirme metodları, tasarım değerlendirme raporları içerisinde genel olarak değerlendirme kontrol listesi şeklinde yer almakta olup, bu kısımda herhangi bir hesaplama bulunmamaktadır. Tasarıma ait ve/veya tasarımın çıkacağı pazara ait verilerin değerlendirilmesi puanlamalar yoluyla yapılmaktadır. Söz konusu skorlamalar için 1-5, 1-10 ya da 1-100 arasında puanlamalar tercih edilebilmektedir.

### 3.3.2 Nicel Değerleme Metodları (Quantitative Valuation Methods)

Nicel Değerleme metodları ise skorlamaların aksine hesaplamaların yer aldığı parasal değer belirlendiği yöntemlerdir [39]. Nicel değerlendirme metodları arasında 3 temel yöntem bulunmakla birlikte bu yöntemlere ait alt yaklaşımlar da bulunmaktadır [39]. Bu yaklaşımların birlikte kullanıldığı, yeni karma yaklaşımlar da söz konusudur.

Her yöntemin kullanılan verilere göre sağlamış olduğu kolaylıklar ve kısıtlılıklar mevcuttur. Bu sebeple kullanılacak yöntemin seçiminde eldeki verilerin çok iyi değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunun yanında değerlemeyi yapacak uzmanın deneyimi ve bu deneyimin eldeki veriler ile uyumlu bir şekilde birleştirilmesi de değerlendirme sonucunun sağlıklı bir sonuç olması açısından önem arz etmektedir [22].

#### 3.3.2.1 Maliyet Tabanlı Değerleme Metodu (Cost Based Valuation Method)

Tasarımın oluşturulabilmesi için katlanılması gereken masrafların baz alındığı tasarım değerlendirme yöntemi olup tasarımın gerçekleştirilmesi için yapılmış olan harcamalar ve giderlerin bir araya getirilmesi ve söz konusu tasarımın eskime payının da hesaba katılması ile söz konusu değer elde edilir [46]. Kendi içerisinde Tarihsel Maliyet Yaklaşımı, Yeniden Üretim Yaklaşımı ve Yerine Koyma Yaklaşımı olmak üzere 3 temel yaklaşıma ayrılmaktadır. Maliyet tabanlı değerlendirme metoduna ait yaklaşımlar, kısaca Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Maliyet Tabanlı Değerleme Yaklaşımları

Tarihsel Maliyet Yaklaşımı	Yeniden Üretim Yaklaşımı	Yerine Koyma Yaklaşımı
Minimum değer amaçlar. Tüm harcamalar göz önünde bulundurulur.	Tasarımın, bugün yeniden yapılması halindeki maliyetini ifade eden bir yaklaşımdır.	Tasarımın eşdeğerinin yapılması halindeki maliyeti ifade eden bir yaklaşımdır.
Fiili maliyeti ölçer [45]. Böylece zarar edilmesinin önüne geçilir.	Yeniden üretilen tasarım, birebir aynı tasarım olmalıdır [43].	Amacı tasarımın değerini ölçmektir [9].

Maliyet tabanlı değerlendirme metodu, tasarımın değerinin hesaplanması yalnızca maliyetler toplamına dayandığından hesaplaması nispeten daha kolay değerlendirme metottur [47]. Bu sebeple hesaplama oranında hata yapılma ihtimali azdır. Hesaplamalar esnasında pazar verisi kullanılmadığından, pazar verisine ulaşılamayan durumlarda ve satışa hiç çıkmamış yeni ürünler için gelir verisine ihtiyaç olmadığından en uygun değerlendirme metodudur [26][46]. Ayrıca maliyet verileri toplanması en kolay veri tipi olduğundan, hesaplama için verilerin toplanma süreci daha kısa olacaktır. Fakat hesaplamalar esnasında yalnızca maliyetler kullanıldığından ve tasarım maliyetinin diğer işletme maliyetlerinden ayrılması zor olduğundan tasarımın değeri gerçek değerinden farklı çıkabilmektedir [26].

### 3.3.2.2 Pazar Tabanlı Değerleme Metodu (Market Based Valuation Method)

Pazar tabanlı değerlendirme metodunda ise tasarım ile aynı değerdeki başka bir tasarımın piyasadaki satış değerine dayanan değerlendirme metodudur. Tescilli bir tasarıma eş değerde başka bir tasarımın bulunma ihtimali düşük olduğundan diğer yaklaşımlara oranla daha az tercih edilen bir yaklaşımdır. Bu yöntemin uygulanabilmesi için eş bir tasarımın var olup, satışının yapılması gerekliliğinin yanı sıra bu eş tasarıma dair lisanslama, satış devir gibi finansal işlemlerin bütün detayları ile bilinmesi gerekmektedir. Bu işlemlerde kullanılan sözleşmelerin ise çoğunlukla gizli olması da bu yöntemin kullanılmasını zorlaştıran faktörlerdendir [45].

Pazar tabanlı değerlendirme metodunda hesaplamalar yapılırken kullanılan bütün veriler objektif verilerdir. Varsayımlar söz konusu değildir [48]. Ayrıca benzer bir tasarımın daha önce değerinin hesaplanmış olduğu durumlarda en kullanışlı değerlendirme yöntemi bu yöntem olacaktır [48]. Pazar tabanlı değerlendirme metodu diğer metodlar ile gerçekleştirilen değerlendirme sonucunun teyit edilmesi kullanılabilir [26]. Tasarımın mevcut pazardaki fiyatlar baz alınarak hesaplama yapıldığından dolayı elde edilen değer sapması en az olan değer olacaktır. [49].

Tasarım tescilli olduğundan piyasada benzer tasarımın bulunma ihtimali düşüktür; eşdeğer tasarım bulursa dahi, pazar verileri gibi veriler şirketlerin özel verileri olduğundan ulaşılması zordur. Bu durumun bu metodun kullanımını zorlaştırmakta, kullanım olasılığını düşürmektedir [26] [48]. Bunların yanında, tasarımın değeri belirlenirken kullanılacak veriler tasarıma sahip olan şirketin mevcut durumundan etkilenmektedir. İflas etmiş bir şirketin elinde tuttuğu bir tasarımın gerçek değerinden daha farklı çıkabilmektedir [50]. Ayrıca, tasarımların değerleri, ülkelerin gelişmişlik düzeyleriyle orantılıdır. Bu

sebeple, tasarımın korunduğu ülkenin gelişmişlik düzeyine yakın gelişmişlikte bir ülkedeki satış verilerinin elde edilmesi zor olmaktadır [51].

### 3.3.2.3 Gelir Tabanlı Değerleme Metodu (Income Based Valuation Method)

Bu yöntem, tasarımın girmek istediği pazarda getireceği gelir üzerinden gelecekte elde edeceği değere ve bunun için gerekli maliyete odaklanan değerlendirme yöntemidir [47]. Genel anlamda üç gelir tabanlı değerlendirme metodu kullanılmakta olup bunlar; net bugünkü değer yaklaşımı, artan gelir yaklaşımı ve teliften kurtulma yaklaşımıdır.

**Net bugünkü değer yaklaşımının** en çok tercih edilen yaklaşım olmasının sebebi, gelir odaklı değerlendirme yapılırken giderlerin de dikkate alınmasıdır. Bu sayede daha sağlıklı bir değerlendirme sonucu elde edilmiş olmaktadır.

Net bugünkü değer; yatırımın getirdiği bugünkü değer ile yatırma yapılan maliyetlerin bugünkü değerinin arasındaki farkın bulunması ile elde edilir. Net Bugünkü Değerin formülü, Eş. 1.1 ile verilmiştir [52].

$$NBD = \sum_{n=0}^d \frac{NNA_n}{(1+k)^n} \quad (1.1)$$

NNA: Döneme ait net nakit akışı

k: İşletmenin beklediği kazanç oranı

d: Yatırımın gider ve gelirlerinin gerçekleştiği toplam dönem sayısı

n: Dönem sıra numarası

**Artan gelir yaklaşımı** ise, tasarımın kullanıldığı durumda elde edilecek getirinin tasarım kullanılmadığı durum ile karşılaştırılma yapılarak elde edildiği değer yaklaşımıdır. Bu hesaplama sonucunda elde edilen getiriler üzerinden belirli bir iskonto faktörü kullanılarak tasarımın bugünkü değerine ulaşılır [45].

Artan gelir yaklaşımı için gerekli veriler;

- Tasarım yaratacağı tahmini dönemsel kar, nakit akışı ya da maliyet tasarrufu
- Tasarım kullanılmaksızın elde edilecek tahmini dönemsel kar, nakit akışı ya da maliyet tasarrufu
- Uygun bir iskonto oranı [45].

Artan gelir yaklaşımı ile değer hesabı yapılırken tasarımdan elde edilen kardan vergiler ve tasarıma bağlı diğer faaliyetlerin karı çıkarılarak bir yıllık kar bulunur. Ardından bu bir yıllık kar üzerinden; tasarımın tahmini ömrüne göre hesaplanan kara iskonto değeri uygulanır. Böylece, tasarımın gelecekteki karının bugünkü eşdeğeri hesaplanmış olur. [53].

**Teliften kurtulma yaklaşımı**, tescilli tasarımın tescilinin elde bulundurulması sebebiyle telif ücretinden elde edilecek kara odaklanan yaklaşım olup; telif oranı ve tasarımın ömrü boyunca getireceği getiri üzerinden hesaplanır. Elde edilen bu değer, belirli bir iskonto değeri ile çarpılarak tasarımın bugünkü değeri elde edilir [54]. Fikri mülkiyetten elde edilen kazanç ve bu kazancın lisans sahibi ve tasarım sahibi arasında nasıl paylaşıldığı telif oranını etkileyen en önemli iki etkidir. [55] Bir diğer deyişle, telif oranı hak sahi ile lisans sahibinin kar paylaşımı olarak tanımlanabilir. [56] Telif oranı, farklı ölçütler kullanılarak hesaplanabilir;

- gelirin bir yüzdesi olarak telif oranı
- karın bir yüzdesi olarak telif oranı
- satılan ürün başına parasal olarak ödenen telif
- üretilen ürün başına parasal olarak ödenen telif
- bir zaman içindeki parasal olarak ödenen telif [50].

Değerlemenin hesaplanması sırasında pek çok veri kullanılmakta ve bu veriler teker teker açıklanmaktadır. Bu durum değerlemeyi daha şeffaf ve daha sağlıklı yapmaktadır. Bu sebeple diğer metotlar arasında en tercih edilen değerlendirme metodu gelir tabanlı değerlendirme metodudur [46]. Aynı zamanda, gelir tabanlı değerlendirme metodu, değerlemede kullanılan yöntemler içerisinde gelecekteki risklerin göz önünde bulundurulması sebebiyle daha diğer metotlara oranla sağlıklı sonuçlar sunmaktadır [57].

Gelecekte tasarım sayesinde elde edilecek gelirler üzerinden hesaplama yapıldığından kullanılacak verilerin tahmini ve hesaplanması kolay olmamaktadır. [49]. Bu durum gelir tabanlı değerlendirme metodunun dezavantajı olarak ele alınabilir. Ayrıca diğer değerlendirme metotlarına oranla daha fazla veri kullanılması hesaplamayı karmaşıktırılmaktadır. Bundan dolayı hesaplamalarda yapılacak hata, değerlendirme sonucunun hatalı olmasına neden olabilmektedir [57]. Bunların yanı sıra, tasarımın tahmini ekonomik ömrünün net belirlenememesi elde edilen değerlendirme sonucunun sağlıklı olmasına sebep olmaktadır [47].

#### 4. TASARIM DEĞERLEME RAPORU (DESIGN VALUATION REPORT)

Tescillenmiş ya da tescil aşamasında bir tasarımın parasal değerini belirlediği, bu değerin belirlenmesi esnasında kullanılan verilerin ve yöntemlerin açıklandığı raporlara tasarım değerlendirme raporu adı verilmektedir. Genel olarak beş ana bölümden oluşmaktadır:

- 1- Özet
- 2- Değerlendirme Bölümü
- 3- Değerleme Bölümü
- 4- Ekler
- 5- Sonuç Bölümü

Değerleme raporlarının en başında bulunan bu özet kısmı, yönetici özeti olarak da geçmek olup; raporun kısa zamanda değerlendirme raporu ile ilgili önemli noktaları konusunda bilgi veren kısımdır. Kısaca değerlemeye konu olan tasarımın değerine, hangi veriler çalışılıp hangi yöntemin hangi yaklaşımın kullanıldığını değinmektedir.

Değerlendirme bölümü raporun önemli bir bölümünü oluşturmakta, hesaplama esnasında kullanılması düşünülen değişkenlerin belirlendiği, bu değişkenlere ait kullanılacak verilerin, varsa varsayımsal değerlerin açıklandığı; bu varsayımların nasıl yapıldığına dair bilgi verildiği bölümdür. Kullanılan tüm değişkenlerin neden tercih edildiği sorusunun da yanıtlandığı kısım, değerlendirme bölümüdür [45] [58].

Kullanılan bu değişkenler, tasarıma dair süreler, yasal kısıtlılıklar, yasal düzenlemeler, tasarım değerlendirme metodolojisi, faaliyet serbestisi, coğrafi koruma kapsamı, pazar verileri... gibi örneklendirilebilir.

Raporun asıl işinin yapıldığı, hesaplamaların olduğu bölüm ise değerlendirme bölümüdür. Bir önceki bölümle belirlenen değişkenler bu bölümde gerekli hesaplamalarda kullanılarak tasarımın parasal değeri hesaplanmaktadır. Bu bölümde öncelikle hangi yöntemin kullanıldığı konusunda bilgi verilmekte, daha sonra grafikler/tablolara kullanılarak kullanılacak yöntem detaylandırılmaktadır.

Ekler bölümü ise değerlendirme için gerekli verilerin elde edilmesi için yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen kaynakların bulunduğu bölümdür. Bu bölüm, kaynakların dışında kaynaklara ulaşılabilmesi için gerekli sorgulamaları da içerebilmektedir.

Değerleme raporunun sonuç bölümü, tasarımın değerini içeren kısımdır.

Elde edilen değer gerçeğe değerden farklı çıkması da muhtemeldir. Bu durum raporu hazırlan uzmana, kullanılan verilere, tercih edilen yöntemle bağlıdır. Bu sebeple, değerlendirme raporu incelenirken sonuç bölümüne odaklanılmaması, raporun tamamının değerlendirilmesi gerekmektedir [46].

#### 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma, aynı adlı tez çalışmaya dair bir değerlendirme çalışmasıdır. Tasarım değerlemesi; patent değerlemesi ve marka değerlemesi gibi sınai mülkiyet değerlemesinin alt dalı olarak incelenmektedir. Ancak Patent ve

marka değerlemenin aksine literatürde yeni yeni yer edinmeye başlamış, dünyada uygulaması son yıllarda başlamıştır. Ülkemizde ise örneği henüz bulunmamaktadır. Bu sebeple, uygulanan metotlar, genel olarak sınai mülkiyet değerlendirme metotlarının tasarıma uyarlanmış versiyonlarıdır. Bu çalışmanın, ilerleyen süreçlerde gerçekleştirilmesi muhtemel tasarım değerlendirme işlemleri için bir örnek, bir referans teşkil edebilmesi amaçlanmıştır.

Özetle tasarımın değerlemesi, tasarımı elinde bulunduran ticari işletmenin mevcut değerini doğrulamaktadır. Tasarımın değerinin belirlenmiş olması ter türlü birleşme, devralma, lisanslama, satın alma, satış gibi finansal işlemlerde kolaylık sağlamakta, hak kaybının ve de zararın önüne geçilmesine yardımcı olmaktadır. Tasarım değerlendirme, tasarımın değerinin söz konusu bu işlemler esnasında net bir şekilde ele alınmasını sağlamaktadır. Tasarım değerlendirme için mevcut metotlar arasından tasarıma ve piyasa koşullarına en uygun değerlendirme metodunun seçilerek uygulanması, tasarımın değerinin en doğru şekilde elde edilmesini sağlayacaktır. Tasarım sahibi ise, bu sayede, sahip olduğu tasarımı en verimli şekilde kullanabilecektir.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Erzurumlu, N. (2017). Türk Hukukunda Fikrî Mülkiyete Konu Malların Cebri İcrası. *YBHD*, 2017(3). 167-191.
- [2] 5846 Sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu. Resmî Gazete, 13.12.1951, S. 7981.
- [3] İnternet: T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı Telif Hakları Genel Müdürlüğü. Telif Hakkı Nedir?. URL: <http://www.telifhaklari.gov.tr/Telif-Hakki-Nedir>, Son Erişim Tarihi: 28.01.2020.
- [4] İnternet: T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı Telif Hakları Genel Müdürlüğü. Zorunlu Kayıt-Tescil. URL: <https://www.telifhaklari.gov.tr/Kayit-Tescil-Zorunlu-Kayit-Tescil>, Son Erişim Tarihi: 28.01.2020.
- [5] İnternet: T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı Telif Hakları Genel Müdürlüğü. İsteğe Bağlı Kayıt-Tescil. URL: <http://www.telifhaklari.gov.tr/Istege-Bagli-KayitTescil>, Son Erişim Tarihi: 28.01.2020.
- [6] İnternet: T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı Telif Hakları Genel Müdürlüğü. Telif Hakkı Kaç Yıl Süreyle Korunur?. URL: <https://www.telifhaklari.gov.tr/Telif-Hakki-Kac-Yil-Sureyle-Korunur>, Son Erişim Tarihi: 28.01.2020.
- [7] İnternet: T.C. Ticaret Bakanlığı. Fikri Mülkiyet Hakları. URL: <https://ticaret.gov.tr/gumruk-islemleri/sikca-sorulan-sorular/ticari/fikri-mulkiyet-haklari>, Son Erişim Tarihi: 28.01.2020.
- [8] İnternet: World Intellectual Property Organisation. Industrial Designs. URL: <https://www.wipo.int/designs/en/>, Son Erişim Tarihi: 06.05.2021.
- [9] Tasarım İnceleme Kılavuzu (2020). Türk Patent ve Marka Kurumu, s.6. URL: <https://www.turkpatent.gov.tr/TURKPATENT/resources/temp/C87B16A4-A331-43BF-A21D-08867EB09FB5.pdf>, Son Erişim Tarihi: 15.05.2021
- [10] 6769 Sayılı Sınai Mülkiyet Kanunu. Resmî Gazete, 10.01.2017, S. 29944.
- [11] İnternet: World Intellectual Property Organisation. Locarno Classification. URL: <https://www.wipo.int/classifications/locarno/en/>, Son Erişim Tarihi: 06.05.2021.
- [12] İnternet: World Intellectual Property Organisation. Frequently Asked Questions: Industrial Designs, Is the industrial design protection granted in one country valid in every country?. URL: [https://www.wipo.int/designs/en/faq\\_industrialdesigns.html](https://www.wipo.int/designs/en/faq_industrialdesigns.html), Son Erişim Tarihi: 20.12.2019.



- [13] İnternet: World Intellectual Property Organisation. Hague – The International Design System. URL: <https://www.wipo.int/hague/en/>, Son Erişim Tarihi: 06.05.2021.
- [14] İnternet: Bizmark Intellectual Property. Yurtdışı Hizmetlerimiz. URL: <http://bizmarkpatent.com.tr/yurtdisi-hizmetlerimiz/>, Son Erişim Tarihi: 07.05.2021.
- [15] İnternet: Ankara Patent. Tasarım. Yurt Dışı Tasarım Tescil Sistem Seçenekleri URL: <http://www.ankarapatent.com/yazi/28/yurt-disi-tasarim-tescil-sistem-secenekleri>, Son Erişim Tarihi: 20.11.2019.
- [16] İnternet: Türk Patent ve Marka Kurumu. Tasarım Araştırma. URL: <https://online.turkpatent.gov.tr/EDESIGN/servlet/IDSearchRequestManager>, Son Erişim Tarihi: 07.05.2021.
- [17] İnternet: World Intellectual Property Organisation. Hague Express Database. URL: [https://www.wipo.int/hague/en/design\\_search/](https://www.wipo.int/hague/en/design_search/), Son Erişim Tarihi: 06.05.2021.
- [18] İnternet: World Intellectual Property Organisation. Global Design Database. URL: <https://www.wipo.int/reference/en/designdb/>, Son Erişim Tarihi: 06.05.2021.
- [19] Sözer, M, N. (2008). Patent Değerlemesi ve Türkiye'deki Uygulamaları. T.C. Türk Patent Enstitüsü Patent Dairesi Başkanlığı Uzmanlık Tezi, Ankara.
- [20] Tonisson, L., Maicher, L. (2012). Patents, Their Importance and Valuation Methods. Working Paper Nr. 3/2012. URL: [https://www.imw.fraunhofer.de/content/dam/moez/de/documents/Working\\_Paper/WorkingPaper-3.pdf](https://www.imw.fraunhofer.de/content/dam/moez/de/documents/Working_Paper/WorkingPaper-3.pdf), Son Erişim Tarihi: 06.05.2021.
- [21] Maddi Olmayan Duran Varlıklara İlişkin Türkiye Muhasebe Standardı (TMS 38) Hakkında Tebliğ Sıra No: 26. Resmî Gazete, 17.03.2006, S. 26111. Paragraf 8-17.
- [22] İnternet: Türk Patent ve Marka Kurumu. İstatistikler. URL: <https://www.turkpatent.gov.tr/TURKPATENT/statistics/>, Son Erişim Tarihi: 06.05.2021.
- [23] Özdemir, M, N. (2014). Fikri Mülkiyet Haklarının Ticarileştirilmesi. Yayın No: TÜSİAD-T/2014-10/558. 11.
- [24] İnternet: Canadian Intellectual Property Office, Intellectual Property Valuation. URL: [https://www.ic.gc.ca/eic/site/cipointernet-internetopic.nsf/eng/h\\_wr04688.html](https://www.ic.gc.ca/eic/site/cipointernet-internetopic.nsf/eng/h_wr04688.html), Son Erişim Tarihi: 20.04.2021.
- [25] İnternet: Türk Sınai Mülkiyet Değerleme, Mühendislik ve Danışmanlık Hizmetleri A.Ş Resmi Sitesi. URL: <https://www.turksmd.com.tr/noticeDetail/3>, Son Erişim Tarihi: 08.07.2021.
- [26] Bendzsel, M. (2011) IP Valuation At Research Institutes: An Essential Tool For Technology Transfer. Hungarian Intellectual Property Office. URL: [https://www.sztnh.gov.hu/hirek/kapcsolodo/IP\\_Valuation\\_for\\_Technology\\_Transfer\\_EN\\_web.pdf](https://www.sztnh.gov.hu/hirek/kapcsolodo/IP_Valuation_for_Technology_Transfer_EN_web.pdf), Son Erişim Tarihi: 16.10.2020.
- [27] İnternet: Finney, N. (2014). Timeless Design. URL: <https://www.designindaba.com/articles/point-view/timeless-design>, Son Erişim Tarihi: 08.07.2021.

- [28] Peters, D. (2021). Intellectual Property Valuation: What You Should Know. URL: <https://www.valentiam.com/newsandinsights/ip-valuation>, Son Erişim Tarihi: 08.07.2021.
- [29] İnternet: Özümark Patent. Hizmetlerimiz. Tasarım Lisansı. URL: <http://www.ozumarkpatent.com.tr/hizmetler/Tasarim-Lisansı-s3089311070.html>, Son Erişim Tarihi: 23.11.2019.
- [30] İnternet: Royalty Range. What are patent licensing royalty rates?. URL: <https://www.royaltyrange.com/home/blog/what-are-patent-licensing-royalty-rates>, Son Erişim Tarihi: 23.11.2019.
- [31] Heberden, T. (2018). Chapter 4. Determination of Royalty Rates. *International Licensing and Technology Transfer: Practice and the Law*. Wolters Kluwer. 12. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/au/Documents/finance/deloitte-au-fas-royal-rate-determination-290719.pdf>, Son Erişim Tarihi: 06.05.2021
- [32] Kemmerer, J.E., Lu, J. J. (2012) Profitability and royalty rates across industries: Some preliminary evidence. 16. KPMG Global Valuation Institute. URL: <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/pdf/2015/09/gvi-profitability.pdf>, Son Erişim Tarihi: 23.11.2019.
- [33] İnternet: Wikipedia. Annual Growth Rate. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Annual\\_growth\\_rate](https://en.wikipedia.org/wiki/Annual_growth_rate), Son Erişim Tarihi: 25.04.2021
- [34] Özel Kreş Ve Gündüz Bakımevi Ve Çocuk Kulüpleri. Güvenlik Önlemleri Bilgilendirme Formu. Resmî Gazete, 30.04.2015, S. 29342, Ek-1.
- [35] İnternet: NTV Elektronik sigara Türkiye’de yasak mı?. URL: <https://www.ntv.com.tr/saglik/elektronik-sigara-turkiyede-yasakmi,C1sZbSqfmEmuV Mrc--LxLw>, Son Erişim Tarihi: 20.11.2019.
- [36] İnternet: Patrocode Empowering Your Intellect. Freedom to Operate search for an Industrial design URL: <https://www.patrocode.com/freedom-to-operate-search-for-industrial-design-or-design-patent-fto-search/>, Son Erişim Tarihi: 16.12.2019.
- [37] İnternet: Ponti Strategic Intellectual Property Services. Freedom To Operate. URL: <https://www.ponti.pro/en/services/patents/freedom-to-operate-fto/>, Son Erişim Tarihi: 24.12.2019.
- [38] IP4INNO STUDENTS HANDBOOK – Valuation Of Intellectual Property. “Module 4” (2008). Pro Inno Europe. (Institution) URL: <http://www.ipcentar.uns.ac.rs/pdf/IP.pdf>, Son Erişim Tarihi: 08.07.2021.
- [39] İnternet: APEC Intellectual Property Experts Group. (2018). Intellectual Property (IP) Valuation Manual: A Preliminary Guide URL: <https://www.apec.org/Publications/2018/04/IP-Valuation-Manual---A-Preliminary-Guide>, Son Erişim Tarihi: 08.07.2021. 15-17.
- [40] Handbook on Valuation of Intellectual Property Assets: Main Approaches Steps to Follow Points to Consider. International Chamber of Commerce. URL: <https://iccwbo.org/content/uploads/sites/3/2019/06/icc-handbook-valuation-ip-assets-we.pdf>, Son Erişim Tarihi: 06.05.2021
- [41] Wirtz, H. (2012). Valuation of intellectual property: A review of approachs and methods. *International Journal of Business and Management*, 7(9), 40-48.

- [42] Consor IP Consulting and Valuation. (2014). Intellectual property valuation methods. *The Licensing Journal*. URL: <https://www.consor.com/articles/value-of-intellectual-property-and-intangible-assets/>, Son Erişim Tarihi: 16.10.2020.
- [43] Lagrost, C., Martin, D., Dubois, C. and Quazzotti, S. (2010). Intellectual property valuation: how to approach the selection of an appropriate valuation method. *Journal of Intellectual Capital*, 11(4), 481-503.
- [44] İnternet: Danish Patent and Trademark Office. Valuation - Methods for Valuation. URL: <http://ip-tradeportal.com/valuation/methods-for-valuation.aspx>, Son Erişim Tarihi: 06.05.2021.
- [45] İnternet: European Commission. (2013). Final Report From the Expert Group on Intellectual Property Valuation. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/797124c6-08cb-4ffb-a867-13dd8a129282>, Son Erişim Tarihi: 04.05.2021.
- [46] İnternet: World Intellectual Property Organisation. “Module 11”. URL: [https://www.wipo.int/export/sites/www/sme/en/documents/pdf/ip\\_panorama\\_11\\_learning\\_points.pdf](https://www.wipo.int/export/sites/www/sme/en/documents/pdf/ip_panorama_11_learning_points.pdf), Son Erişim Tarihi: 06.05.2021.
- [47] IP Finance Toolkit. Intellectual Property Office. URL: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/478929/ip-finance-toolkit.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/478929/ip-finance-toolkit.pdf), Son Erişim Tarihi: 15.10.2020.
- [48] European IPR Helpdesk (2015) Fact Sheet Intellectual Property Valuation. URL: <https://silo.tips/download/fact-sheet-intellectual-property-valuation>, Son Erişim Tarihi: 08.07.2021.
- [49] Kasznik, E. (2015). IP Valuation – Understanding the Financial Value of IP Assets. URL: <https://www.slideshare.net/Patexia/ip-valuation-understanding-the-financial-value-of-ip-assets-51609623>, Son Erişim Tarihi: 23.04.2021.
- [50] Ishii, Y. (2017). Valuation of Intellectual Property, Japan Patent Office. URL: [https://www.jpo.go.jp/e/news/kokusai/developing/training/textbook/document/index/Valuation\\_of\\_Intellectual\\_Property.pdf](https://www.jpo.go.jp/e/news/kokusai/developing/training/textbook/document/index/Valuation_of_Intellectual_Property.pdf), Son Erişim Tarihi: 06.05.2021.
- [51] Altinkurt, M. (2017). Patent Değerleme. *Kalkınmada Anahtar Verimlilik*. 344. Son Erişim Tarihi: 20.01.2020.
- [52] Demir, U. Ankara Üniversitesi Açık Ders Malzemeleri. Finansal Yönetim, 13. Hafta, Net Bugünkü Değer. URL: [https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/70651/mod\\_resource/content/0/13%20Net%20Bug%C3%BCnk%C3%BC%20De%C4%9Fer.pdf](https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/70651/mod_resource/content/0/13%20Net%20Bug%C3%BCnk%C3%BC%20De%C4%9Fer.pdf), Son Erişim Tarihi: 11.05.2021.
- [53] İnternet: Danish Patent and Trademark Office. Valuation - Calculation of the value. URL: <http://ip-tradeportal.com/valuation/methods-for-valuation/quantitativevaluation/income-methods/premium-profits-method/calculation-of-the-value.aspx>, Son Erişim Tarihi: 06.05.2021.
- [54] Perek, A. A. (2008). Değerlemede İsim Hakkı Telif Ücreti Ödemekten Kurtulma Yöntemi. *Yaklaşım*, 216-223.
- [55] Heberden, T. (2011). Intellectual Property Valuation and Royalty Determination. *International Licensing and Technology Transfer: Practice and the Law*. Alphen Aan Den Rijn: Kluwer Law International. 3-24.

- [56] RICS. (2020). Rics Professional Standards and Guidance, Global Valuation of Intellectual Property Rights (2. ed.). 11-31.
- [57] Koc, A. B., Yildirim, N. (2018). A hidden challenge for fostering innovation: selection of IP valuation methods. *Research Journal of Business Management (RJBM)*, 5(3), 251-268. URL: <http://www.pressacademia.org/archives/rjbm/v5/i3/8.pdf>, Son Erişim Tarihi: 08.07.2021.
- [58] Nasution, S. (2017). Analysis of IP Valuation Product of LIPI IDP000040604 as Marketing Strategy for Promotion of Innovative and Inventive Activities. *The Asian Journal of Technology Management (AJTM)*. 10. 30-40.

## Parametric Investigation of Theoretical Cycles of Two-Stroke Gasoline Engines

Recep Çağrı ORMAN<sup>1,\*</sup> <sup>1</sup>Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Machinery and Metal Technologies, 06374 Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

This study includes the parametric analysis and numerical application of the theoretical cycles of two-stroke gasoline engines.

#### Article Info:

Research article  
Received: 04.08.2022  
Revision: 26.08.2022  
Accepted: 29.08.2022

#### Highlights

- Theoretical two-stroke engine model.
- Ternary performance graphs.
- Dimensional design parameters.

#### Keywords

Two-stroke engine  
Engine performance  
Thermodynamic cycle

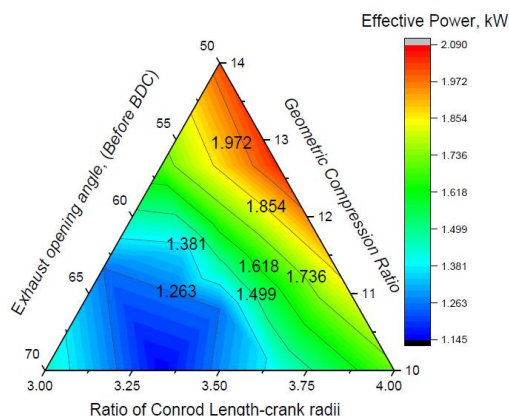


Figure A. Effect of design parameters on effective power

**Purpose:** In this study, a thermodynamic model was created for a two-stroke spark ignition engine and connecting rod (conrod) length-crank radius ratio, geometric compression ratio and exhaust opening angle were chosen as variable parameters. Depending on the change of these parameters, graphs were obtained for the change of engine performance.


**Theory and Methods:** For this study, a PV diagram of a two-stroke engine was created and then thermodynamic equations were derived. Port timing for crank exhaust and transfer is also used in the modeling. In addition, the kinematic relations between the crank and connecting rod are also included in the modeling. The specific heats were accepted as a constant value.

**Results:** A numerical example is presented to evaluate the results obtained. Ternary graphs are used to display the results. The effects of exhaust opening angle, conrod length/crank radius and geometric compression ratio are shown in a single graph and their effects on performance parameters are examined. Accordingly, it has been seen that the conrod length/crank radius value should be around 3.25-3.50, the exhaust opening angle should be around 70 degrees and the geometric compression ratio should be around 10 in order for the engine power to be high.

**Conclusion:** In this study, a simple model for a two-stroke spark ignition engine is presented and a numerical example is made and the effects of exhaust opening angle, connecting rod length-crank radius and geometric compression ratio parameters on engine performance are investigated. In the analysis of these effects, ternary graphs were used. Triple charts have been quite effective for examining the effect of such three parameters. Effective compression ratio, maximum temperature, maximum pressure and effective power values were investigated as engine performance. In the model presented here, a simple comparison method is presented by ignoring the effects of parameters such as the variation of specific heats depending on temperature, heat transfer loss, friction loss, isentropic efficiencies, combustion efficiency. However, this model is stable enough to clearly reveal the effect of design parameters on engine performance. Therefore, the results presented here are particularly useful to engine designers.



## Parametric Investigation of Theoretical Cycles of Two-Stroke Gasoline Engines

Recep Çağrı ORMAN<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup>Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Machinery and Metal Technologies, 06374 Yenimahalle/ANKARA

### Abstract

Two-stroke engines, which are frequently preferred especially in small agricultural machines, small transportation vehicles and low-capacity power generators, have been used since the 19th century. In this study, a simple thermodynamic model was created and the effects of geometric compression ratio, exhaust opening angle and connecting rod length-crank length ratio parameters, which are design parameters affecting engine performance, were numerically investigated for the performance of an engine with 50 cc stroke volume. Accordingly, the effects of these three parameters on the effective compression ratio, maximum temperature, maximum pressure and effective power parameters were examined with triple graphs. Thus, the effects of all three design parameters were examined with a single graphic. As a result of the numerical analysis, it has been seen that the design parameter that most affects the engine performance is the geometric compression ratio. In addition, increasing the connecting rod length-crank length ratio significantly improves engine performance. It has been observed that choosing a low exhaust opening angle improves engine performance. The results presented here are particularly useful to engine designers.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 04.08.2022*  
*Düzeltilme: 26.08.2022*  
*Kabul: 29.08.2022*

### Keywords

*Two-stroke engine*  
*Engine performance*  
*Thermodynamic cycle*

### Anahtar Kelimeler

*İki zamanlı motor*  
*Motor performansı*  
*Termodinamik çevrim*

### İki Zamanlı Benzinli Motorların Teorik Çevrimlerinin Parametrik İncelenmesi

#### Öz

Özellikle küçük tarım makinelerinde, küçük ulaşım araçlarında ve düşük kapasiteli güç jeneratörlerinde sıklıkla tercih edilen iki zamanlı motorlar 19. yüzyıldan bu yana kullanılmaktadır. Bu çalışmada basit bir termodinamik model oluşturulmuş ve motor performansını etkileyici tasarım parametrelerinden geometrik sıkıştırma oranı, egzoz açılma açısı ve biyel uzunluğu-krank yarıçapı oranı parametrelerinin etkileri 50 cc kurs hacmine sahip bir motorun performansı için sayısal olarak incelenmiştir. Buna göre bu üç parametrenin efektif sıkıştırma oranı, maksimum sıcaklık, maksimum basınç ve efektif güç parametrelerine etkileri üçlü grafiklerle incelenmiştir. Böylelikle her üç tasarım parametresinin etkisi tek bir grafikte incelenmiştir. Yapılan sayısal inceleme neticesinde motor performansını en etkileyen tasarım parametresinin geometrik sıkıştırma oranı olduğu görülmüştür. Bununla birlikte biyel uzunluğu-krank yarıçapı oranının artırılması da motor performansını belirgin bir biçimde iyileştirmektedir. Egzoz açılma açısının düşük tercih edilmesinin motor performansını iyileştirdiği görülmüştür. Burada sunulan sonuçlar özellikle motor tasarımcılarının kullanabileceği niteliktedir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde yaygın olarak kullanılan dört zamanlı motorlar kadar eski bir tarihi olmasına rağmen iki zamanlı motorlar dört zamanlı motorlar kadar yaygın olarak kullanılamamıştır. İki zamanlı çevrimli motorun 19. yüzyılın sonunda İngiltere’de Sir Dugald Clerk tarafından icat edildiği genel olarak kabul edilmektedir. Egzozun zamanlamasının ve alanının, piston tarafından transfer ve giriş portlarının kontrolü de dahil olmak üzere, indüksiyon işlemi için karter sıkıştırması kullanan motorun formu, 1891’de İngiltere’de Joseph Day tarafından patentlenmiştir [1]. İki zamanlı motorların hafiflik ve yüksek özgül güç performansı göz önüne alınarak motorlu testereler, motorlu tırpanlar, çim biçme makineleri, zirai ilaçlama

makinaları, mobiletler ve jeneratörlerde sıklıkla tercih edilmektedir. Bununla birlikte çok büyük hacimlere sahip gemi motorlarında da iki zamanlı motorları görmek mümkündür [2].

İki zamanlı motorlar bilindiği gibi her krank turunda çevrimi tamamlayan motorlardır. Genel yapı itibarıyla iki zamanlı motorlarda gaz değişim süreci portlar vasıtasıyla yapılmaktadır [2]. Bununla birlikte çok yaygın olmasa da gaz değişim sürecinin valfler yardımıyla yapıldığı iki zamanlı motorlar da bulunmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan iki zamanlı motorlarda piston üst ölü noktaya doğru hareket ederken dolgu (hava veya hava-yakıt karışımı) öncelikle kartere emilir ve piston alt ölü noktaya doğru hareket ederken karterdeki dolgu bir miktar (1.3-15 atm) sıkıştırılır. Sıkıştırılan dolgu transfer portu yardımıyla silindir içerisine alınarak sıkıştırılır ve yanma meydana gelir. Piston alt ölü noktaya doğru yaklaşırken egzoz portu açılarak blowdown süreci meydana gelerek silindir basıncı düşürülür ve ardından egzoz portu açık haldeyken transfer portu açılarak dolgu içeriye alınır ve kalan egzoz gazlarının çıkması sağlanır. İki zamanlı motorlarda gerçek sıkıştırma (veya genişleme) oranı geometrik sıkıştırma oranından yaklaşık %30 daha düşüktür. Bununla birlikte gaz değişim sürecinde dört zamanlı motorlara kıyasla daha fazla hacimsel verim kaybı yaşanmaktadır [3]. Ayrıca iki zamanlı motorlarda herhangi bir yağlama sistemi bulunmadığından dolayı yağlama yağı yakıt ile karıştırılarak motorda kullanılır. Bu da egzoz emisyonlarının kötüleşmesine neden olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı iki zamanlı motorlar her ne kadar tasarımsal olarak yapısal basitliği ve yüksek güç yoğunluğuna sahip olsalar da dört zamanlı motorların kullanıldığı yerler için iyi bir alternatif olarak görülmemektedir.

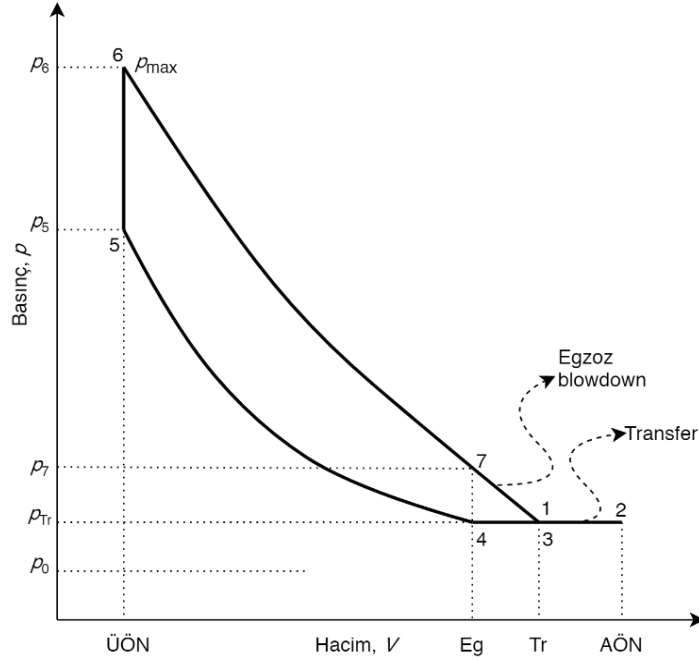
İki zamanlı motorların çevrimleri ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Zhu ve ark. yapmış oldukları çalışmada iki zamanlı motorlarda süpürme havası kontrolü ile ilgili detayı bir çalışma yapmışlardır. İki zamanlı motorlarda Miller kaybının azaltılabilmesi için egzoz zamanlamasının optimize edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır [4]. Ji ve ark. düşük hızdaki iki zamanlı dizel bir motor için yapmış oldukları çalışmada EGR, emme havası nemlendirmesi ve enjeksiyon stratejisi Miller çevrimi üzerinden modellenmiştir [5]. Theotokatos ve ark. iki zamanlı marine motorları için yapmış oldukları çalışmada değişken enjeksiyon zamanlaması ve türbin alanına göre sıfır-boyutlu bir model geliştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar analiz edilerek, incelenen motor parametreleri arasındaki ilişkiler kurulmuştur [6]. Xu ve ark. iki popet valfli iki zamanlı dizel bir motor için süpürme verimliliği için yapmış oldukları çalışmada girdap döngüsü süpürme konfigürasyonu önerisi modellenmiştir [7]. Choe ve ark. iki zamanlı karter süpürmeli buji ateşlemeli motor çalışma sürecinin matematiksel modellemesini yaparak transfer portlarının açılma açısının değişimine göre motor performans değişimi detaylı bir örnekle anlatılmıştır [8]. Zhu ve ark. iki zamanlı dizel motorunda uygulanan yeni bir buhar enjeksiyonlu turbo-bileşik sisteminin enerji ve ekserji analizi yapmışlar ve bu yeni sistem ile yakıt tüketimi nominal hızda %5,1 oranında azaltılmıştır [9]. İçten yanmalı motorların modellenmesi ile ilgili literatürde birçok çalışma bulmak mümkündür. Ancak özellikle parametrik çalışmalar için ideal veya idealleştirilmiş çevrimlerin kullanımı oldukça pratiktir. Arabacı, yapmış olduğu çalışmada dört zamanlı buji ateşlemeli bir motor için benzin ve LPG kullanımının motor performansına etkisini içten tersinmezliklerin olduğu bir otto çevrimi modelini kullanmıştır [10]. Chen ve ark. yapmış oldukları çalışmada tersinmez ikili çevrim için optimum performans parametrelerini detaylı olarak incelemiştir [11]. Arabacı, yapmış olduğu çalışmada artık gaz kesri ve kurs oranının tersinmez Otto çevriminin performansına ve entropi üretimine etkilerini incelemiştir [12]. Ding ve ark. yapmış oldukları çalışmada altı farklı tersinmez ısı motoru çevrimi için sonlu zaman ekserji analizi yapmışlardır [13].

Özellikle parametrik çalışmalarda herhangi bir motor parametresi değişiminin motor performansına etkisinin gözlenmesi için basit bir termodinamik kullanmak literatürde de her zaman tercih edilmiştir. Bu çalışmada iki zamanlı buji ateşlemeli bir motor için basit bir termodinamik model oluşturulmuş ve biyel uzunluğu-krank yarıçapı oranı, geometrik sıkıştırma oranı ve egzoz açılma açısı değişken parametre olarak seçilmiştir. Bu parametrelerin değişimine bağlı olarak motor performansının değişimi için grafikler elde edilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

Buji ateşlemeli iki zamanlı motorlar için Şekil 1’de gösterilen basınç-hacim diyagramı kullanılabilir. Egzoz portunun kapanmasından üst ölü noktaya (ÜÖN) ulaşıncaya kadar (4’ten 5’e) sıkıştırma süreci meydana

gelir. Sıkıştırma sürecinin ardından ısı girişi ile sabit hacimde basınç artışı (5'ten 6'ya) meydana gelir. Isı girişinin ardından egzoz portunun açılmasına kadar gerçekleşen süreçte (6'dan 7'ye) genişleme süreci meydana gelir. Genişleme sürecinin ardından egzoz portu açık olduğundan dolayı egzoz blowdown (7'den 1'e) meydana gelir. Ardından transfer portu açılır ve karterdeki dolgu silindire transfer edilir (1'den 2'ye ve 2'den 3'e). Ardından transfer portu kapanır ve egzoz portu kapanıncaya kadar (3'ten 4'e) egzoz temizleme süreci gerçekleşir. Bu diyagramda emme kartere dolgunun alınmasından dolgunun basıncının artırılarak silindire transfer edilmesi başlangıcına kadar olan süreç gösterilmemiştir.



Şekil 1. İki zamanlı bir buji ateşlemeli motorun ideal çevrimi

Modellemenin yapılabilmesi için Şekil 2'deki şematik kullanılmıştır. Bu şematikte krank hareketinin üzerinde egzoz ve transfer için port zamanlaması da Şekil 1'e uygun olarak gösterilmiştir. Transfer portunun ve egzoz portunun sırasıyla piston alt ölü noktaya gelmeden  $\theta_{Tr}$  ve  $\theta_{Eg}$  açısında açılmakta ve piston alt ölü noktayı geçtikten  $\theta_{Tr}$  ve  $\theta_{Eg}$  açısında kapanmaktadır.

Biyel uzunluğu  $L$  ile krank yarıçapı  $r$  arasındaki ilişki krank-biyel mekanizması kinematikliği nedeniyle efektif sıkıştırma oranını da etkilemektedir. Burada efektif sıkıştırma aşağıdaki gibi tanımlanabilir [3]:

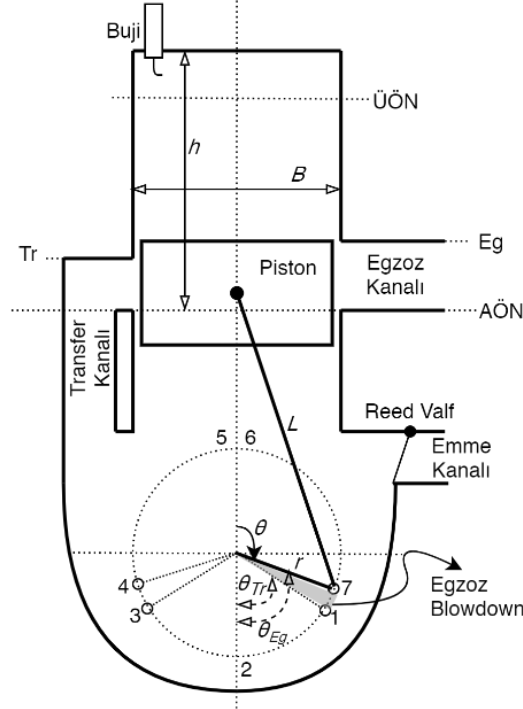
$$r_e = 1 + 0.5(r_{Geo} - 1) \left[ \frac{L}{r} + 1 - \cos(\alpha) - \sqrt{\left(\frac{L}{r}\right)^2 - \sin^2(\alpha)} \right] \quad (1)$$

Burada  $\alpha = \pi - \theta_{Eg}$  olmaktadır. Ayrıca gerçek sıkıştırma oranı,  $r_{Geo}$ ,  $L/r$  ve  $\theta_{Eg}$ 'ye bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada da bu üç parametrenin değişiminin motor performansına etkisi incelenmiştir. Buna göre Şekil 1 ve Şekil 2 referans alınarak iki zamanlı buji ateşlemeli motor çevrimi basit olarak modellenenabilir.

Geometrik sıkıştırma oranı  $r_{Geo}$  aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$r_{Geo} = \frac{v_2}{v_5} = \frac{v_2}{v_6} \quad (2)$$





**Şekil 2.** İki zamanlı bir buji ateşlemeli motorun ölçeklendirilmemiş şematik görünümü

İzentropik sıkıştırma ve izentropik genişleme süreci için termodinamiğin birinci ve ikinci yasası eşitlikleri kullanılarak ve özgül ısıların sıcaklığa bağlı değişmediği ( $\gamma = \text{sabit}$ ) kabul edilerek aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$T_5 = T_4 r_e^{\gamma-1} \quad (3)$$

$$T_7 = T_6 r_e^{\gamma-1} \quad (4)$$

$$p_5 = p_4 r_e^{\gamma} \quad (5)$$

$$p_7 = p_6 r_e^{\gamma} \quad (6)$$

Isı girişi için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m} c_v (T_6 - T_5) = \dot{Q}_f - \dot{Q}_{ht} \quad (7)$$

Burada  $\dot{Q}_{ht}$  ısı transferi nedeniyle kaybedilen güçtür. Literatürde  $\dot{Q}_{ht}$ 'nin hesaplanması için birçok yöntem bulunmakla birlikte basit amprik ifadeler de kullanılabilir. Bunun için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$\dot{Q}_{ht} = h_{ht} A_{ht} \left( \frac{T_6 - T_5}{2} - T_w \right) \quad (8)$$

Burada  $h_{ht}$  ısı transfer katsayısıdır ve bu çalışma için  $70 \text{ W/m}^2\text{K}$  olarak kabul edilebilir.  $A_{ht}$  ise ısı transferi alanıdır ve aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$A_{ht} = \frac{\pi B^2}{2} + \frac{\pi B h r_{geo}}{r_{geo} - 1} \quad (9)$$

$\dot{m}$  ise silindire transfer edilen toplam dolgu miktarıdır ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\dot{m} = \frac{p_5 V_5 N}{60 R T_5} \quad (10)$$

Genel olarak buradaki  $\dot{m}$  değeri hava, yakıt ve artık gaz karışımıdır. Buradaki yakıt miktarı  $\dot{Q}_f$  değerini etkilemektedir. Başka bir ifade ile  $T_6$  değeri direkt olarak belirlenebilen bir değer değildir ve iterasyonla bulunabilir. Ancak bu çalışmayı basitleştirmek amacıyla  $T_6 = 3T_5$  ilişkisi verilmiştir.

Motor efektif gücünün belirlenmesi için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır:

$$P_e = P_i \eta_{mek} \quad (11)$$

$$P_i = \dot{m}(w_{67} - w_{45}) \quad (12)$$

Burada  $\eta_{mek}$  amprik eşitliklerden de hesaplanabileceği gibi iki zamanlı motorlar için ortalama bir değer olarak 0,75 olarak kabul edilebilir. Efektif verim ise aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{Q}_f} \quad (13)$$

Burada sunulan iki zamanlı motor modeli sabit olarak sunulan değerler için amprik ifadeler kullanılarak geliştirilebilir. Ancak bu çalışma kapsamında incelenen parametreler için daha karmaşık bir modele ihtiyaç duyulmamıştır.

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

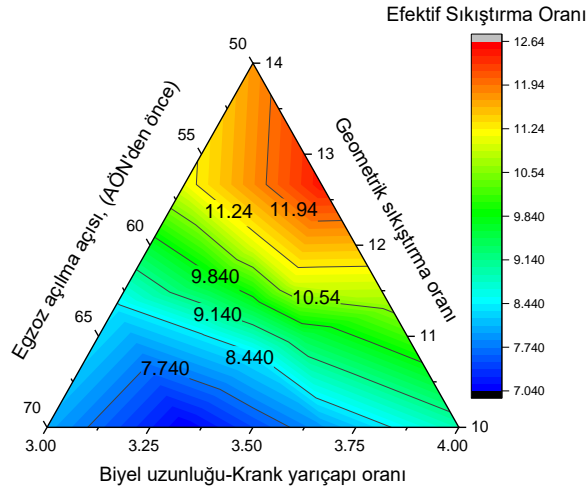
Bu çalışmada 50 cc kurs hacmine sahip 2 zamanlı bir motorda,  $r_{Geo}$  için 10, 12 ve 14,  $L/r$  için 3,0-3,5-4,0 ve  $\theta_{Eg}$  için  $50^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $70^\circ$  (ÜÖN'den önce) olmak üzere hesaplamalar yapılmıştır.  $P_{tr} = 140$  kPa,  $2r/B = 1,0$ ,  $N = 3000$  rpm,  $c_v = 0,717$  kJ/kg,  $\gamma = 1.4$  olarak kabul edilmiştir. Ayrıca sıkıştırma ve genişleme süreçleri için izentropik verimlerin %100 olduğu kabul edilmiştir.

Bu çalışma için incelenen egzoz açılma açısı ( $\theta_{Eg}$ ), geometrik sıkıştırma oranı ( $r_{Geo}$ ) ve biyel uzunluğu-krank yarıçapı ( $L/r$ ) parametrelerinin değişiminin efektif sıkıştırma oranına, maksimum sıcaklığa, maksimum basınca ve efektif güce etkileri üçlü (ternary) grafiklerle gösterilmiştir.

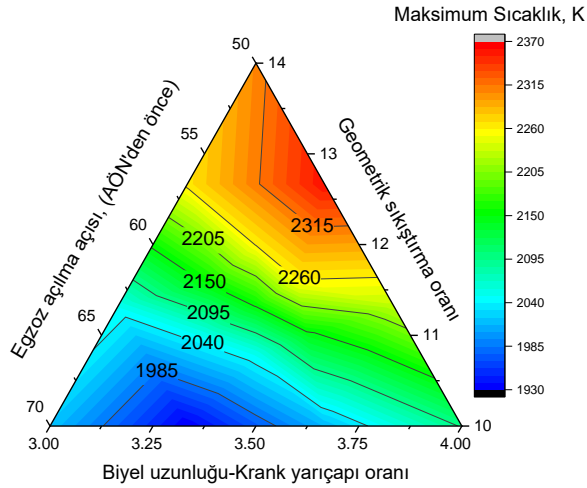
Şekil 3'te efektif sıkıştırma oranının değişimi görülmektedir. Burada  $\theta_{Eg}$  değerinin artması efektif sıkıştırma oranını azaltmaktadır. Bununla birlikte  $L/r$ 'nin artması efektif sıkıştırma oranını artırmaktadır.

Ancak efektif sıkıştırma oranını en çok etkileyen parametre  $r_{Geo}$  olduğu görülmektedir. Efektif sıkıştırma oranının yüksek olması istendiğinde yüksek  $r_{Geo}$  ve düşük  $\theta_{Eg}$  seçilmelidir. Böyle bir durumda efektif sıkıştırma oranı için maksimum değerler elde edilebilmektedir. Bilindiği gibi efektif sıkıştırma oranı motor performansını etkileyen önemli parametrelerden biridir.  $r_{Geo}$ 'nun 13 civarında olması,  $\theta_{Eg}$ 'nin 50 civarında olması ve  $L/r$ 'nin 4 civarında olması efektif sıkıştırma oranının 11,94 kontur çizgisi ile sınırlandırılmış turuncu-kırmızı bölgede olmasını sağlamaktadır.

Şekil 4'te maksimum sıcaklığın değişimi Şekil 5'te ise maksimum basıncın değişimi görülmektedir. Yüksek efektif sıkıştırma oranının etkisiyle maksimum sıcaklıkta da bir artış meydana gelmektedir. Bu nedenle üçlü grafikteki renk dağılımı efektif sıkıştırma oranı grafiğiyle benzerlik göstermektedir. Motor gövde ve kapak malzemelerinin alüminyum alaşımlarından imal edildiği göz önüne alındığında alüminyumun erime sıcaklığı yaklaşık 950 K'dir ve burada hesaplanan değerlerden çok daha düşüktür. Her ne kadar burada hesaplanan değerler anlık sıcaklıklar olsa da bu sıcaklığın çok yüksek olması istenmez. Bu grafiğe göre anlık sıcaklık erime sıcaklığın 2,5 katı bir değer (2150 K) civarında seçilmek istendiğinde düşük  $L/r$ 'nin için  $\theta_{Eg}$ 'nin 60 civarında, yüksek  $L/r$ 'nin için ise  $\theta_{Eg}$ 'nin 65 civarında tercih edilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte  $r_{Geo}$  değerinin 12'den daha düşük olması tercih edilmelidir.



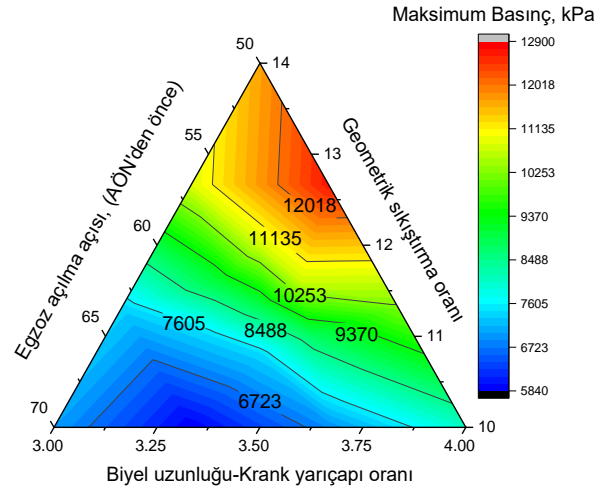
Şekil 3. Efektif sıkıştırma oranının parametrelere göre değişimi



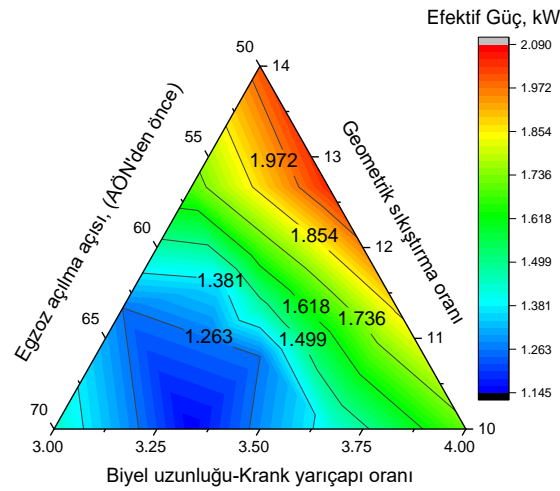
Şekil 4. Maksimum sıcaklığın parametrelere göre değişimi

Şekil 5 değerlendirildiğinde maksimum sıcaklığın 2150 K civarı seçildiği durumda maksimum basıncın 9370 kPa civarında (8488-10253 kontur çizgileri aralığında olduğu görülmektedir. Yüksek basınç her ne kadar motor performansını etkileyen bir parametre olsa da malzeme dayanımı göz önüne alındığında maksimum basınç parametresinin de maksimum sıcaklık parametresinde olduğu gibi optimize edilmesi gerekmektedir.

Şekil 6'da efektif gücün değişimi görülmektedir.  $L/r$ 'nin 3,25-3,50 aralığında,  $\theta_{Eg}$ 'nin 70 civarında ve  $r_{geo}$ 'nin 10 civarında olduğu durumda efektif gücün çok düşük olduğu görülmektedir.  $L/r$ 'nin yüksek olması efektif gücü artırmaktadır. Bununla birlikte efektif güç  $\theta_{Eg}$ 'nin veya  $r_{Geo}$ 'nin yüksek olduğu durumda da artmaktadır. Ancak maksimum sıcaklık ve maksimum basınç için optimizasyon yapılmak istendiğinde  $L/r$ 'nin 3,75-4,0 aralığında tercih edilmesi efektif gücün de optimize edilmesini sağlamaktadır. Literatürde  $L/r$  değerinin 3-4 aralığında olduğu ve genel olarak 3,2-3,5 aralığında seçildiği görülmektedir. Ancak yapılan bu çalışmada daha yüksek  $L/r$  değerlerinde daha yüksek efektif güç eldesinin meydana geldiği görülmektedir. Ancak  $L/r$  parametresi motorun fiziksel boyutlarını değiştireceğinden dolayı  $L/r$  yükseldikçe motorun boyu da kurs hareketi doğrultusunda uzayacaktır. Daha kompakt bir motor tasarımı için efektif güçten feragat edilerek  $L/r$  değerinin biraz düşük seçilmesi daha uygun olabilir. Bununla birlikte özellikle yüksek hızda çalışan motorlar için  $L/r$  değeri genellikle daha düşük tercih edilir.



Şekil 5. Maksimum basıncın parametrelere göre değişimi



Şekil 6. Efektif gücün parametrelere göre değişimi

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan bu çalışmada iki zamanlı buji ateşlemeli bir motor için basit bir model sunulmuş ve sayısal bir örneği yapılarak egzoz açılma açısı, biyel uzunluğu-krank yarıçapı ve geometrik sıkıştırma oranı parametrelerinin motor performansına etkileri incelenmiştir. Bu etkilerin incelenmesinde üçlü (ternary) grafikler kullanılmıştır. Üçlü grafikler bu tür üç parametrenin etkisinin incelenmesi için oldukça etkili olmuştur. Motor performansı olarak efektif sıkıştırma oranı, maksimum sıcaklık, maksimum basınç ve efektif güç değerleri incelenmiştir. Buna göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Motor performans parametrelerinde en etkili parametre  $r_{Geo}$ 'dur.  $r_{Geo}$ 'nun yüksek tercih edilmesi motor performans parametrelerini iyileştirdiği belirgin olarak görülebilmektedir.

$L/r$ 'nin artırılması motor performansını artırmaktadır. Ancak yüksek  $L/r$  değerlerinde motor boyutlarında problem olabilme ihtimali yüksektir.

$\theta_{Eg}$ 'nin mümkün olduğunca düşük seçilmesi motor performans parametrelerini iyileştirmektedir.  $\theta_{Eg}$ 'nin yüksek olması yanma sonrasında elde edilen faydalı enerjinin daha büyük bir kısmının egzoz yoluyla dışarıya atılması anlamına gelmektedir.

Burada sunulan modelde özgül ısıların sıcaklığa bağlı değişimi, ısı transferi kaybı, sürtünme kaybı, izentropik verimler, yanma verimi gibi parametrelerin etkileri göz ardı edilerek basit bir karşılaştırma

metodu sunulmuştur. Ancak bu model tasarım parametrelerinin motor performansına etkisini net olarak ortaya koyabilecek kadar kararlıdır. Bu nedenle burada sunulan sonuçlar özellikle motor tasarımcılarının kullanabileceği niteliktedir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Blair, G. P. (1996). Design and simulation of two-stroke engines. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.
- [2] Heywood, J. B., & Sher, E. (2017). The two-stroke cycle engine: its development, operation, and design. Routledge.
- [3] Pulkrabek, W. W. (2000). Engineering fundamentals of the internal combustion engine. Prentice hall of India.
- [4] Zhu, S., Gu, Y., Yuan, H., Ma, Z., & Deng, K. (2020). Thermodynamic analysis of the turbocharged marine two-stroke engine cycle with different scavenging air control technologies. *Energy*, 191, 116533.
- [5] Ji, W., Li, A., Lu, X., Huang, Z., & Zhu, L. (2019). Numerical study on NO<sub>x</sub> and ISFC co-optimization for a low-speed two-stroke engine via Miller cycle, EGR, intake air humidification, and injection strategy implementation. *Applied Thermal Engineering*, 153, 398-408.
- [6] Theotokatos, G., Guan, C., Chen, H., & Lazakis, I. (2018). Development of an extended mean value engine model for predicting the marine two-stroke engine operation at varying settings. *Energy*, 143, 533-545.
- [7] Xu, Z., Ji, F., Ding, S., Zhao, Y., Wang, Y., Zhang, Q., ... & Zhou, Y. (2021). Simulation and experimental investigation of swirl-loop scavenging in two-stroke diesel engine with two poppet valves. *International Journal of Engine Research*, 22(6), 2021-2034.
- [8] Choe, T. H., Ryu, Z. R., Kang, S. G., & Ri, J. P. (2021). Mathematical modeling of the two-stroke crankcase scavenged spark ignition engine working process. *Energy Conversion and Management: X*, 10, 100086.
- [9] Zhu, S., Ma, Z., Zhang, K., & Deng, K. (2020). Energy and exergy analysis of a novel steam injected turbocompounding system applied on the marine two-stroke diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 221, 113207.
- [10] Arabacı, E. (2021). Yakıt olarak benzin ve LPG kullanılan buji ateşlemeli bir motorun simülasyonu ve performans analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(1), 447-458.
- [11] Chen, L., Sun, F., & Wu, C. (2004). Optimal performance of an irreversible dual-cycle. *Applied Energy*, 79(1), 3-14.
- [12] Arabacı, E. (2018). Artık gaz kesri ve kurs oranının tersinmez Otto çevriminin performansına ve entropi üretimine etkileri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (14), 83-89.
- [13] Ding, Z., Chen, L., & Sun, F. (2011). Finite time exergoeconomic performance for six endoreversible heat engine cycles: Unified description. *Applied Mathematical Modelling*, 35(2), 728-736.



## Improved Knowledge Distillation with Dynamic Network Pruning

Eren ŞENER<sup>1</sup> Emre AKBAŞ<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Middle East Technical University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, 06800, Çankaya/ANKARA

### Article Info

Research article  
Received: 06.07.2022  
Revision: 20.08.2022  
Accepted: 31.08.2022

### Keywords

Knowledge Distillation  
Neural Network  
Compression  
Image Classification  
Deep Neural Networks

### Abstract

Deploying convolutional neural networks to mobile or embedded devices is often prohibited by limited memory and computational resources. This is particularly problematic for the most successful networks, which tend to be very large and require long inference times. Many alternative approaches have been developed for compressing neural networks based on pruning, regularization, quantization or distillation. In this paper, we propose the “Knowledge Distillation with Dynamic Pruning” (KDDP), which trains a dynamically pruned compact student network under the guidance of a large teacher network. In KDDP, we train the student network with supervision from the teacher network, while applying L1 regularization on the neuron activations in a fully-connected layer. Subsequently, we prune inactive neurons. Our method automatically determines the final size of the student model. We evaluate the compression rate and accuracy of the resulting networks on an image classification dataset, and compare them to results obtained by Knowledge Distillation (KD). Compared to KD, our method produces better accuracy and more compact models.

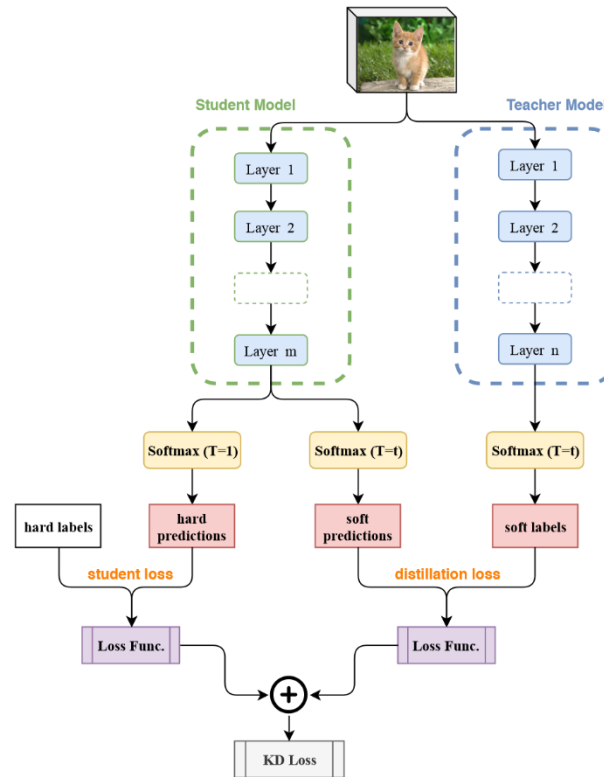
## 1. INTRODUCTION

Deep neural networks have enabled many applications in a diverse set of domains including vision, language, medicine and robotics. However, these models require large amounts of processing power and memory, which severely limits their deployability in limited-resource computers. New possibilities would emerge if such models can be deployed in embedded platforms, mobile and edge devices. Therefore, research on “neural network compression”, that is reducing the processing and memory requirements of neural networks, is important.

Early work on neural network compression aimed to make a large network smaller by removing redundant structures. These can be weights, neurons, blocks, etc. LeCun et al. proposed one of the pioneering network compression methods, the Optimal Brain Damage method [1], which was followed by many magnitude-based network pruning methods [2, 3]. These approaches work by removing weights that are close to zero. To prune more structures and make the models smaller, regularization can be used to enforce sparsity. Han et al. proposed one of the first regularization-based model compression methods. Following this work, some other methods [5-7] that use regularization on different structures were also proposed. For convolutional networks, researchers have designed novel convolutional filters to save parameters which decrease redundancy [8-10]. Research on low-rank factorization methods [11-13] tries to find informative parameters by using matrix or tensor decomposition. Another major body of work [14-16] reduces the number of bits that represent each weight.

A prominent approach to network compression is the “knowledge distillation” (KD) method [17], where a large, cumbersome model called the teacher guides the training of a much smaller model called the student (Figure 1). The student network is trained with two losses: (i) the usual cross-entropy loss coming from the training set, (ii) the “softened” class probabilities output by the teacher, computed via a hyper-parameter

called temperature. The aim of “softened” probabilities is to increase the information about the target class by introducing uncertainty into the probability distribution. Softened probabilities contain similarity information on different classes, which is absent in the one-hot labels coming from the training set.



**Figure 1.** Illustration of the standard Knowledge Distillation method [17]. In KD, student model is trained with a linear combination of two losses. One loss comes from the one-hot (or hard) labels and the other from the “softened” labels. The architecture of the student model in KD is pre-determined and does not change during or after training. However, in our method, we prune fully-connected layers in the student network based on neuron activations to get a more compact model whose size is determined dynamically and automatically.

KD based methods [18, 19] yield good performance on computer vision tasks and have had a significant impact on model compression. However, a major disadvantage of KD is that the user has to specify the student network architecture and this architecture does not change during or after training. While KD can successfully distill the knowledge of the teacher into the student, we do not know whether the student model is unnecessarily large or smaller than it should be. In this paper, we address this disadvantage by dynamically pruning the student network based on neuron activations, to obtain a more compact student model. For pruning, we target the largest fully-connected layer of the student model, which typically contain the largest percentage of neurons in the student model. Specifically, during the KD training, we apply L1 regularization on the activations of the neurons in a selected fully-connected layer of the student model to impose sparsity. Then, we calculate the average activation over training examples, of each neuron in this layer. We prune those neurons having an average activation below a certain threshold by directly removing them from the network. To the best of our knowledge, our compression technique is the first method that combines KD and L1 regularization in this way. We name our method as Knowledge Distillation with Dynamic Pruning, or KDDP for short. Since our method can only prune fully-connected layers, its typical targets are Multilayer Perceptrons (MLP) or CNNs with large fully-connected (fc) layers.

We extensively analyze and compare standard training from scratch, knowledge distillation and our proposed method, KDDP, on the CIFAR10 dataset [20]. Experiments show that our method performs better than the baselines (standard training and KD), while also significantly compressing the student model. Furthermore, we find that setting hyper-parameters is crucial for KD based methods. Temperature,  $T$ ,

distillation weight,  $\alpha$ , and L1 regularization penalty should be tuned to find a good balance between the model size and the classification performance. In summary, when the hyper-parameters are chosen carefully, our method works well.

Our contributions in this paper can be summarized as follows.

- We propose a new dynamic compression method based on KD. It dynamically prunes inactive neurons in selected fully-connected layers from the student network. Unlike KD, our method does not require the final size of the compressed model as input; it is determined dynamically.
- We experimentally analyze our method and compare against standard training from scratch and KD. We make extensive experiments on our hyper-parameters to find meaningful relations with the accuracy of the compressed model.
- We test our method on the CIFAR10 dataset. We get better accuracies than both standard training and KD methods with much fewer parameters.

In the rest of the paper, we first summarize the neural network model compression literature in Section 2. We describe our proposed method and its implementation details in Section 3. Then, we analyze the effectiveness of our approach with experiments performed on the CIFAR10 dataset in Section 4, and finally conclude in Section 5.

## 2. BACKGROUND AND RELATED WORK

Here we review the literature on model compression in deep neural networks in two main categories: (i) parameter pruning and sharing, (ii) knowledge distillation. We give more detailed information about the parameter pruning and sharing due to its direct relation to our method.

### 2.1. Parameter Pruning And Sharing

Parameter pruning attracted many researchers since the early development of neural networks due to its effectiveness on reducing model complexity and over-fitting. It is also shown that pruning redundant parameters from the network improves generalization, which is an important side-effect.

Early works to prune parameters are Optimal Brain Damage [1] (OBD) and Optimal Brain Surgeon [2]. In their work, the authors remove redundant parameters after sorting them by their saliencies. Saliency is measured based on the Hessian of the objective function. Recently, Srinivas and Babu also showed how similar neurons, which have similar weight sets, are redundant [3]. Since Hessian computation is heavy, they propose a more systematic way than OBD and data-free method to remove them.

Most of the follow-up works use sparsity constraints (L0, L1-norm, etc.) in the optimization problems to obtain redundancy. Researchers use these constraints on different elements (e.g. weights, blocks, etc.). Han et al. are one of the first to propose a regularization-based method on model compression [4]. They apply L2 regularization during the training phase in order to have near zero-valued parameters. Then they prune all lowweight connections from the network. The deep compression method [15] uses the same procedure as [4] for removing redundant connections. The authors also add quantization and Huffman coding on top of the pruned network to have a more compact one.

Recently, redundancy in convolutional networks also has been explored. Lebedev and Lempitsky [21] apply the idea of Optimal Brain Damage [1] to convolutional filters. They remove entries of L2,1-norm regularization applied convolution filters, which are below a threshold, in a group-wise fashion. Similarly, work by Zhou et al. [5] enforce low-rank constraints on tensors and L2,1-norm regularization on the objective function during the training stage to achieve compact CNNs with reduced neurons. Another study which uses L2,1-norm is Wen et al.'s work [6]. They apply regularization to big baseline models to learn more compact CNNs. With their structured sparsity method, they regularize filters, channels, filter shapes and layer depth of CNNs. Huang and Wang [22] improve the method of Wen et al. [6] and propose a more general end-to-end method for network pruning. Their method contains a factor to scale the output of a



specific neurons, groups or blocks. They apply L1-norm sparsity regularization to the scaling factors. Structures having scaling factors below a threshold are removed from the network while training. Unlike the previous works, Ullrich et al. [23] base their regularization on the soft weight-sharing method [24]. They compress weights of the pre-trained model into clusters by fitting mixtures of Gaussian models. After retraining the model with new weights concentrated on the cluster means, they obtain a layer-wise-pruned compact network.

There are also methods which focus on sparsity in batch-normalization (BN) layers. Liu et al. [7] add a scaling factor after BN layers. L1 regularization is applied on these scaling factors during training for the purpose of identifying redundant filters. Then, they prune channels with near-zero scaling factors. Another recent study [25] uses the method proposed by Beck and Teboulle [26] to enforce sparsity on the  $\gamma$ -parameter in BN operator. During training, this method makes some  $\gamma$  values zero and helps these channels to block sample-wise (for each sample in the training set) information flow. After the training is completed, they remove these constant-valued channels from the original network. The study MorphNet [27] uses a combination of three ideas above: first, an L1-norm-based regularization of the neurons, second, the idea of multipliers of Howard et al. [28] for reducing the floating point operations and model size, and third, the paradigm introduced by Han et al. [4] for retraining of the pruned network.

There has also been some research for measuring the redundancy in the networks. Guo et al. present a feedback mechanism named splicing which re-establishes mistakenly removed parameters after the pruning operation [29]. With this work, they show that measuring the redundancy of the parameters is an extremely difficult task. Researchers use different techniques for measuring redundancy. In [30], L1-norm of kernels are calculated. After sorting kernels by their L1 norm values, small valued kernels and corresponding feature maps were pruned. ThiNet does filter-level pruning based on filter statistics computed from the following layer, not the current layer [31]. In spite of their success, the compression rate of the filters had to be predefined, which is another difficult problem for pruning methods. Moreover, He et al. exploit feature maps for redundancy [32]. The authors select the most representative channels of the feature maps and prune the redundant ones. After pruning, in order not to damage accuracy, they reconstruct the outputs with the remaining channels using linear least squares.

Recently, several methods proposed to measure the importance of structures. Yu et al. propose that layer-by-layer network pruning leads to significant reconstruction error propagation [33]. They introduce a global neuron importance measuring algorithm which uses information at the Final Response Layer (FRL, the second-to-last layer before classification). The algorithm obtains the importance of all neurons in the network with a single backward pass after a feature ranking operation on the FRL. Subsequently, the trimming of the whole network is performed considering the pruning ratio per layer as a pre-defined hyper-parameter. Prakash et al. propose a novel inter-filter orthogonality metric for ranking filter importance and a new training strategy [34]. Their method consists of temporarily dropping (some) of the least important convolutional filters (ranked by their metric), and reintroducing dropped filters with new weights. They repeat this process cyclically. With this strategy, they improve generalization and reduced overlap of learned features. Unlike the traditional deterministic methods, Wang et al. approach pruning weights of convolutional layers in a probabilistic manner [35]. They specify a pruning probability for each weight group. At each iteration, these probabilities are updated with the L1 norm as an importance criterion of each weight group. The pruning is guided by sampling from the pruning probabilities. He et al. use a novel pruning method instead of norm-based pruning approaches [36]. They calculate the geometric median Fletcher et al. of the filters within the same layer, and prune the filter(s) near to the geometric median [37]. In addition to above works, Dong et al. [38] improve the idea in previous works [1, 2]. Their pruning method is based on second order derivatives of a layer-wise error function.

There are also some recent and novel compression techniques used for pruning. In SplitNet [39], the goal is to find a tree-structured network that contains a set or a hierarchy of subnetworks, where the leaf-level subnetworks are associated with a specific group of classes. Since each group uses a subset of features that are completely disjoint from the ones used by other groups, the splitting algorithm prunes out inter-group

connections while optimizing the cross entropy loss and the group regularization. At the end, the weight matrix can be explicitly split into block diagonal matrices to reduce the number of parameters. Similarly, Yang et al. approach the network compression from energy consumption of the network [40]. They sort layers by their energy consumption, and pruned weights, which have small magnitudes, of the layers that consume the most energy first. Similar to the idea of “network slimming” [7], Zhao et al. modify the BN layer and add a new parameter called channel saliency to the BN layer [41]. They try to find approximate gamma distributions over these channel saliency parameters. They then remove redundant channels with mean and variance of their gamma distributions less than predefined thresholds.

## 2.2. Knowledge Distillation

Knowledge Distillation is a simple way to have compact deep learning models. In this method, a large (i.e. cumbersome) network or an ensemble model is trained, first. This model is called the “teacher”, which typically produces accurate predictions. Then, a smaller network, called the “student”, is trained using the guidance coming from the teacher model. This guidance is obtained using “temperature softmax” applied on the logits of the teacher. The goal is to provide a better training for the student model than using only the labels from the dataset. Trained in this way, the final student network was shown to produce comparable results to the teacher’s [18].

Similar ideas to knowledge distillation has been explored before. Bucilua et al. approach the idea of knowledge transfer from a different point of view [42]. Instead of training a neural network on an original small set, they use an ensemble of base-level classifiers to label a large unlabeled dataset and then train the network on this much larger dataset. Ba and Caruana propose using L2 loss on the logits to mimic the teacher network [43].

FitNets [18] use knowledge distillation to yield deep and thin student networks that perform on par with or better than the teacher. They achieve this by training some student layers using the teacher’s supervision for better initialization. Luo et al. show that using L2 loss to match the features of top hidden layers from both teacher and student is effective [19]. Yim et al. distill knowledge from the teacher by generating a matrix from feature maps at each layer [44]. Then, they transfer the knowledge from teacher to student, which has the same depth as the teacher, by applying L2 loss to these matrices.

## 2.3. Other Approaches

There are also other approaches to neural network compression and pruning that are orthogonal to our method. These include low-rank factorization methods, quantization and binarization methods and methods that aim to obtain compact convolutional filters.

## 2.4. Summary

Given the context of existing work, although  $L_1$  regularization to enforce sparsity is commonly used for the purposes of pruning/compression, it has not been applied in the context of KD to obtain a student model whose size is determined dynamically and automatically.

## 3. METHOD

Before we present our method in detail, we first describe the knowledge distillation (KD) method [17] for completeness. In KD, there are two models: teacher and student. Given a supervised dataset, the teacher model is trained first. Then, the student model is trained using a linear combination of two losses: (i) the regular crossentropy loss coming from the supervised dataset, and (ii) “softened” cross-entropy loss coming from the teacher’s prediction. To better explain these two losses, let us consider an example input image  $x$  with its ground-truth label  $y$ , which is a one-hot vector. A neural network outputs a raw score, or logit,  $z_i$  for quantifying the degree that the input  $x$  belongs to class  $i$ . These logits are normalized using the “softmax” function so that the resulting vector can be considered as a probability distribution:

$$q_i = \frac{\exp(z_i/T)}{\sum_{c=1}^C \exp(z_c/T)} \quad (1)$$

where  $C$  is the number of classes and  $T$  is called the “temperature” parameter, which by default equals to 1. Then, cross-entropy between  $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_C]$  and  $\mathbf{y}$  is computed as

$$\text{CE}(\mathbf{y}, \mathbf{q}) = \sum_{c=1}^C y_c \log(q_c). \quad (2)$$

When  $T > 1$ , we call the loss as “softened” cross-entropy, as it softens the effect of the exponential function in softmax as  $T$  gets larger.

Let  $\mathbf{q}^{\text{tch},T}$  denote the softmax output of the teacher model with temperature  $T$ . Similarly, let  $\mathbf{q}^{\text{std},T}$  be the student’s softmax output with temperature  $T$ . First, the teacher model is trained to minimize the regular cross-entropy loss:

$$L^{\text{tch}} = \sum_{(\mathbf{x}, \mathbf{y})} \text{CE}(\mathbf{y}, \mathbf{q}^{\text{tch},1}). \quad (3)$$

And, the knowledge-distillation loss, by which the student model is trained, can be written as

$$L^{\text{std}} = \sum_{(\mathbf{x}, \mathbf{y})} (1 - \alpha) \text{CE}(\mathbf{y}, \mathbf{q}^{\text{std},1}) + \alpha \text{CE}(\mathbf{q}^{\text{tch},T}, \mathbf{q}^{\text{std},T}). \quad (4)$$

The first term is the regular cross-entropy loss with one-hot ground-truth labels. The second term is the cross-entropy between temperature-softmax outputs. It is this second term, which brings in new information about class similarities predicted by the teacher.  $\alpha$  is an hyperparameter to adjust the contribution of the two terms. Figure 1 illustrates the KD method.

In KD, both the teacher and the student model architectures are determined before training and are fixed during and after training. So, essentially, one has to decide on the size of the student beforehand and KD attempts to distill the knowledge of the teacher into this student. However, there is no way of knowing the optimal size for the student architecture beforehand. Our method addresses this problem by dynamically pruning (removing) neurons from the student. By doing so, our method both finds an optimal size for the student model and slightly improves the final accuracy of the student model. In the following we describe our method.

### 3.1. Knowledge Distillation With Dynamic Pruning (KDDP)

As done in standard KD, we first train the teacher model, or it is provided as an already trained model. Then, we add L1 regularization to the largest fullyconnected layer of the student — let us call this layer  $\text{fc1}$ . The rationale behind this choice is that this layer typically contains a large percentage (up to 83% in our experiments) of all parameters in the model (Table 1). Next, we train the student using the KD loss defined in Equation (4). After the student is trained, we run it on the training set to calculate the average activation (i.e. output) of each neuron at  $\text{fc1}$ . If the activation of a neuron is below  $10^{-6}$ , we prune (i.e. kill or remove) that neuron and delete the corresponding weight set in its next layer. After testing all neurons at  $\text{fc1}$ , we re-train the pruned student network using Equation (4), this time without any L1 regularization on  $\text{fc1}$ .

### 3.2. Teacher And Student Models

As the teacher, we use a ResNet model [45]. ResNet and its variants proved their success on many computer vision tasks. Specifically, our teacher model is a ResNet-56 which achieves 6.97% error rate on CIFAR10 and has 850K learnable parameters. Details of ResNet-56 can be found in the original ResNet paper [45].

**Table 1.** Student networks differ only in the number of neurons in the fc1 layer. Percentages in parenthesis indicate the ratio of the parameters in fc1 to the total number of parameters.

Model	# of neurons in fc1	# of parameters at fc1	total # of parameters
SN <sub>50</sub>	50	29k (34%)	85k
SN <sub>100</sub>	100	58k (50%)	114k
SN <sub>500</sub>	500	289k (83%)	349k

We choose our student network to have a very simple architecture in order to efficiently analyze the performance of our method. Our student network architecture starts with an input layer for  $32 \times 32 \times 3$  sized images. It is followed by a convolutional layer with a kernel size of  $7 \times 7$  with a stride of 1, with 64 convolution filters. This result in an output of size  $16 \times 16 \times 64$ . The convolutional layer is followed by a Batch Normalization (BN) layer and a ReLU non-linear activation function. We later use a max-pooling layer which has a window size of  $3 \times 3$  with stride 2 that produces an output of size  $7 \times 7 \times 64$ . This layer followed by an identity-block of the ResNet architecture [45]. ResNet's identity block is composed of 3 convolutional layers, each followed by a BN and a ReLU layer. The first and third convolutional layers have a kernel size of  $1 \times 1$ , and the middle layer has a kernel size of  $3 \times 3$ . The stride of all convolutions of the identity blocks is 1 and the number of filters used in each layer is 64. Before the ReLU layer of the last convolutional layer inside the residual block, there is a skip connection that allows the flow of information from the initial layers to the last layers by adding the input of the identity block and the output of the ReLU layer. The identity-block is followed by an average pooling layer which outputs a  $3 \times 3 \times 64$ -dimensional tensor. This layer is followed by a fully-connected layer, fc1, and a ReLU layer. Finally, the ReLU layer is followed by another fully connected layer, fc2, as a bridge to a softmax layer at the end.

In our experiments, we create three different variant of this student model. The only difference between these student models are the neuron counts in the first fully-connected layer, fc1. We use 50, 100 and 500 neurons for this layer to explore the effect of the increasing number of neurons. We set the number of neurons in the second fully-connected layer, fc2, to the number of classes in the classification task at hand. The total number of parameters and percentage of parameters in fc1 for these networks are presented in Table 1. Figure 2 illustrates the architecture of our student network.

### 3.3. Baseline Methods

We compare our method with the following models.

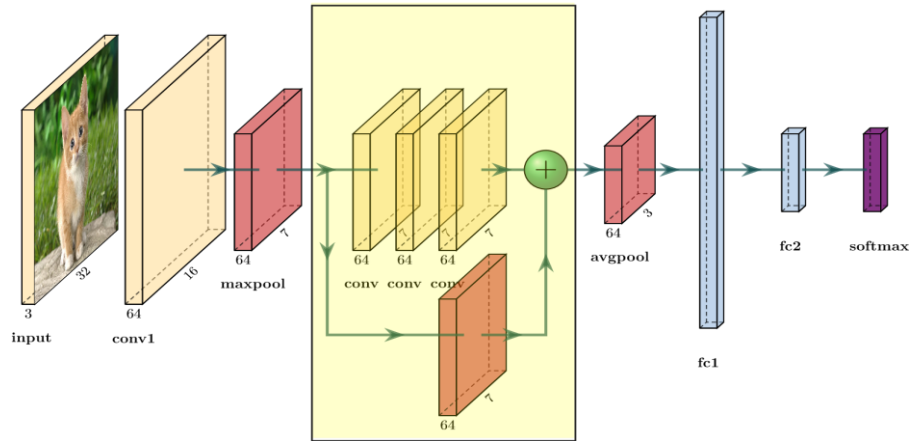
**Vanilla SN:** We train the student network from scratch without any teacher guidance or regularization penalty. We use this model to find out the baseline performance of our student networks.

**Vanilla-KD SN:** We train the student network with standard Knowledge Distillation [17] at different temperature values ( $T$ ) but without regularization penalty.

### 3.4. Implementation Details

**Teacher Network (TN):** We train a ResNet-56 model from scratch. The learning rate is  $10^{-4}$ , the mini-batch size is 64, and the optimization algorithm is Adam [46].

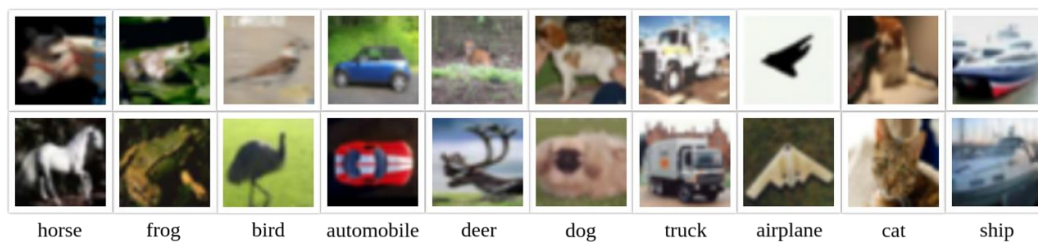
**Student Networks (SN):** We use the same hyper-parameters while training all student models. All models are trained from scratch. Weights and biases are initialized with Xavier's initialization [47]. Network architectures are implemented using the Keras framework [48]. Adam [46] is used for training. The learning rate is set to  $10^{-4}$ , and the mini-batch size is 64. An  $L_1$  regularization penalty is applied on fc1 during the training of the KDDP student networks. The training is stopped early if there is no improvement in the accuracy on the validation set for 50 epochs.



**Figure 2.** Student Network overview. The network takes an image and outputs a class label. It is composed of an input layer followed by a convolutional layer, max pooling, an identity-block of ResNet(He et al., 2016), average pooling, two fully connected layers, and a softmax layer. ResNet's identity block is highlighted with the yellow rectangle. This layer is composed of three convolutional layers and a skip connection which adds the input of the identity block and the output of the last convolutional layer in the identity block.

#### 4. EXPERIMENTS

In this section, we describe the experimental evaluation and validation of our method. We evaluate it by comparing against the two baselines and then, provide extensive experiments on hyper-parameters in Section 4.3.



**Figure 3.** Example images from the CIFAR10 dataset.

##### 4.1. Dataset

We use the CIFAR10 dataset [20] in our experiments. It contains 60000 32x32 color images in 10 classes, with 6000 images per class. Example images can be seen in Figure 3). There are 50000 training images and 10000 test images. We randomly sample (using stratified sampling, i.e., by preserving class frequencies) 10000 images from the training set to form a validation set. We report our results after observing no improvements on the validation set for 50 epochs during training. As data augmentation, we only use horizontal flip. We use this setup in all experiments.

##### 4.2. Analysis of the Proposed Method

We present our main results in Table 2, where we compare the performances and parameter counts of the teacher model, vanilla SN model, vanilla KD SN model and our KDDP model.

**Table 2.** Main results on the CIFAR10 test set.

Model	Acc.	# Params.
Teacher	0.8808	1,673,738
Vanilla SN <sub>50</sub>	0.8048	85,104
Vanilla KD SN <sub>50</sub>	0.8141	85,104
KDDP SN <sub>50</sub> (final  fc1 =45)	<b>0.8193</b>	<b>82,169</b>
Vanilla KD SN <sub>45</sub>	0.8145	<b>82,169</b>
Vanilla SN <sub>100</sub>	0.8075	114,454
Vanilla KD SN <sub>100</sub>	0.8197	114,454
KDDP SN <sub>100</sub> ( fc1 =83)	<b>0.8219</b>	<b>104,475</b>
Vanilla KD SN <sub>83</sub>	0.8146	<b>104,475</b>
Vanilla SN <sub>500</sub>	0.8128	349,254
Vanilla KD SN <sub>500</sub>	0.8264	349,254
KDDP SN <sub>500</sub> ( fc1 =264)	<b>0.8281</b>	<b>210,722</b>
Vanilla KD SN <sub>264</sub>	0.8267	<b>210,722</b>

We use the same teacher logits in for all experiments (i.e.  $z$  in Eq. (1)). We train our teacher once. We use the same initial weights for all student network trainings with hyper-parameters:  $L1 = 1e-4$  and  $\alpha = 0.5$ . We also train Vanilla SNs and Vanilla-KD SNs for each model to explore the capacity of these networks and compare with our model.

The teacher network has 1.7M parameters and yields an accuracy of 88.08% on the test set. This score is lower than other ResNet results on the same set, e.g. Cai et al. achieve 97.92% [49]. This is because we hold out 10K examples from the training set as validation data to have a solid early stopping criterion. Also, we only use horizontal-flip augmentation.

The “Vanilla SN” (student network), which is the SN trained from scratch without any teacher guidance or regularization, has three versions. These versions differ only in the number of neurons in the fc1 fully connected layer. For 50, 100 and 500 neurons, Vanilla SN achieves 80.48%, 80.75%, 81.28% test set accuracy, respectively. Increasing the number of neurons in fc1 has a positive effect on model performance. However, this causes an increase in the number of parameters, as well. When the student model is trained using standard knowledge distillation method, we obtain the “Vanilla KD SN” models. Compared to the Vanilla SNs, they achieve around 1% better accuracy for all models.

Our method, KDDP, achieves 81.93%, 82.19%, 82.81% accuracies on the test set for student networks SN50, SN100, SN500, respectively. We observe that our method works better than both Vanilla SN and Vanilla KD SN, and improves the accuracies around 0.5% for SN50, SN100, SN500 with 3%, 9%, 40% fewer parameters than their original networks. It dynamically removes 10%, 17%, 48% of the parameters at fc1.

We conduct further experiments to compare our method against KD to provide fair comparisons based on the total number of neurons in the network. We record the number of final neurons in KDDP and we train smaller Vanilla KD SNs that have the same neuron counts at fc1 with the final KDDP SNs. We denote these models with “Vanilla KD SN<sub>n</sub>” where  $n$  is equal to 45, 83 or 264. We use the same softmax temperature for both bases. We observe that with the same fc1 size, KDDP outperforms Vanilla KD.

From these results, we conclude that our dynamic pruning method both improves accuracy and reduces computational cost of inference. In the following, we analyze the sensitivity of our method to its hyper-parameters, and also conduct statistical significance analysis.

### 4.3. Hyper-parameter Analysis

#### 4.3.1. L1 Regularization Penalty Analysis

We use  $L_1$  regularization on the activations of fc1 layer neurons to increase sparsity.  $L_1$  regularization penalizes the absolute value of the activations of the neurons. We present results for different  $L_1$  penalties in Table 3. We set  $\alpha$  to 0.5 in these experiments.

We observe that larger values of  $L_1$  penalty result in fewer active neurons at the fc1 layer and therefore decreases the performance of the models. For example, when  $L_1$  is  $1e^{-3}$  and  $T = 32$  at KDDP  $SN_{100}$  experiment, the model gets stuck at some local minima and cannot even reach the vanilla model's performance. However, when there are fewer parameters it helps the model to get acceptable performances. For example, for hyperparameters  $L = 1e^{-3}$ ,  $T = 2$ , our KDDP  $SN_{50}$  model achieves better performance than the other  $SN_{50}$  models. We also observe that using smaller values for  $L_1$ , e.g.  $L_1 = 1e^{-5}$ , does not work for our pruning method in all student models. Therefore,  $L_1$  penalty should be tuned to strike a good balance between the model size and the classification performance. In our experiments, we set the  $L_1$  regularization to  $1e^{-4}$ .

**Table 3.** Effect of  $L_1$  regularization penalty. Results for models  $SN_{50}$ ,  $SN_{100}$ ,  $SN_{500}$ . Hyper-parameter  $\alpha = 0.5$ .

	T	$L_1 = 1e^{-3}$		$L_1 = 1e^{-4}$		$L_1 = 1e^{-5}$	
		Acc.	fc1 size	Acc.	fc1 size	Acc.	fc1 size
50 neurons	2	<b>0.8198</b>	<b>15</b>	<b>0.8193</b>	<b>45</b>	<b>0.8162</b>	<b>49</b>
	4	0.8054	10	0.8123	40	0.8146	48
	8	0.7638	7	0.7891	41	0.7968	47
	12	0.7707	7	0.7913	38	0.7918	47
	16	0.7761	8	0.7902	33	0.7948	46
	20	0.7802	8	0.8011	37	0.7961	47
	32	0.7607	5	0.8010	37	0.8049	48
	64	0.7776	7	0.8078	37	0.8034	44
	100	0.7871	6	0.8088	32	0.8038	49
	200	0.7966	7	0.8053	41	0.8077	47
	1000	0.7877	8	0.8065	35	0.8078	46
	5000	0.7616	5	0.8032	40	0.8069	43
100 neurons	2	<b>0.8132</b>	<b>18</b>	<b>0.8219</b>	<b>83</b>	<b>0.8219</b>	<b>97</b>
	4	0.7913	9	0.8156	79	0.8192	93
	8	0.7655	7	0.8037	61	0.8099	92
	12	0.7931	10	0.7952	59	0.7941	92
	16	0.7970	76	0.7922	59	0.7931	92
	20	0.7802	7	0.7978	59	0.7935	89
	32	0.6900	3	0.8085	61	0.8001	93
	64	0.7779	6	0.8095	59	0.8012	91
	100	0.7594	4	0.8077	54	0.8121	91
	200	0.7800	6	0.8003	54	0.8055	90
	1000	0.7609	4	0.8171	53	0.8058	95
	5000	0.8063	89	0.8087	54	0.8010	88
500 neurons	2	0.8211	103	<b>0.8281</b>	<b>264</b>	0.8185	467
	4	<b>0.8213</b>	<b>330</b>	0.8186	156	<b>0.8196</b>	<b>453</b>
	8	0.8175	400	0.8106	113	0.8101	441
	12	0.8017	140	0.8079	118	0.8110	432
	16	0.8010	235	0.7952	109	0.8089	429
	20	0.7991	151	0.8003	91	0.8075	425
	32	0.8047	98	0.8147	111	0.8063	425
	64	0.8050	17	0.8121	109	0.8025	417
	100	0.8040	90	0.8114	101	0.8030	431
	200	0.8062	185	0.8146	112	0.8076	423
	1000	0.8059	15	0.8140	116	0.8040	425
	5000	0.8123	17	0.8093	105	0.8070	423

#### 4.3.2. $\alpha$ Analysis

$\alpha$  in Eq. (4) sets the contribution of the two objective functions (i.e. the weight of distillation). In other words, using bigger  $\alpha$  values means giving more importance to soft targets in the objective function. We

present results for different  $\alpha$  values in Table 4. We can see that too small and large  $\alpha$  values don't lead to good performances.  $\alpha$  also should be tuned carefully to have a good balance between the model size and classification performance. In our experiments, we observe that setting  $\alpha$  to 0.5 gives the best results.

#### 4.3.3. T Analysis

Setting the value of  $T$ , which “softens” the softmax output, is not a trivial task. To find its optimal value, we did a grid search over the temperatures values of [2, 4, 8, 12, 16, 20, 32, 64, 100, 200, 1000, 5000]. If we keep increasing  $T$ , at some point, logits will be saturated and no information will flow from the teacher to the student network. We present our results in Table 4. We can see that when we train the network with 100 neurons solely with the loss coming from the soft targets (the second term in Eq. (4)) with a temperature of 5000, we get an accuracy of 10%, which is equal to the random guess for CIFAR10. For all models, we observe that the accuracy fluctuates depending on  $T$ . Therefore, we conclude that the temperature parameter should also be tuned carefully.

**Table 4.** Distillation loss weight ( $\alpha$  in Eq. (4)) and temperature analysis. Results for models  $SN_{50}, SN_{100}, SN_{500}$ . Hyperparameters:  $L_1 = 1e^{-4}$ .

		$\alpha = 0.2$		$\alpha = 0.5$		$\alpha = 0.8$		$\alpha = 1$	
T		Acc	fc1 size	Acc	fc1 size	Acc	fc1 size	Acc	fc1 size
50 neurons	2	0.8046	48	<b>0.8193</b>	<b>45</b>	0.8093	49	0.7955	45
	4	0.8003	44	0.8123	40	<b>0.8147</b>	<b>39</b>	<b>0.8034</b>	<b>32</b>
	8	0.7987	42	0.7891	41	0.8031	26	0.7967	8
	12	0.7945	43	0.7913	38	0.7843	28	0.5061	25
	16	0.8093	43	0.7902	33	0.7726	23	0.5844	46
	20	0.8081	45	0.8011	37	0.7761	25	0.5882	45
	32	0.8058	39	0.8010	37	0.7872	23	0.5101	42
	64	0.8060	42	0.8078	37	0.7961	25	0.5850	42
	100	0.8021	44	0.8088	32	0.8069	24	0.5835	42
	200	0.8057	42	0.8053	41	0.8018	22	0.5526	39
	1000	0.8072	44	0.8065	35	0.8088	26	0.6277	40
5000	<b>0.8106</b>	<b>42</b>	0.8032	40	0.8040	26	0.1000	12	
100 neurons	2	0.8077	76	<b>0.8219</b>	<b>83</b>	<b>0.8239</b>	<b>87</b>	0.8078	66
	4	0.8082	75	0.8156	79	0.8177	69	<b>0.8108</b>	<b>49</b>
	8	0.8042	66	0.8037	61	0.8041	33	0.7948	8
	12	0.8041	75	0.7952	59	0.7880	30	0.6685	88
	16	0.8005	69	0.7922	59	0.7733	26	0.5931	63
	20	0.8010	79	0.7978	59	0.7689	31	0.5886	40
	32	0.8075	69	0.8085	61	0.7889	25	0.5764	49
	64	0.8065	79	0.8095	59	0.7962	33	0.5835	51
	100	0.7963	72	0.8077	54	0.7985	33	0.5890	85
	200	0.8047	67	0.8003	54	0.8037	29	0.5748	85
	1000	0.8039	71	0.8171	53	0.8000	34	0.5864	86
5000	<b>0.8096</b>	<b>75</b>	0.8087	54	0.8073	31	0.1000	14	
500 neurons	2	<b>0.8170</b>	<b>247</b>	<b>0.8281</b>	<b>264</b>	<b>0.8255</b>	<b>262</b>	<b>0.8158</b>	<b>212</b>
	4	0.8138	205	0.8186	156	0.8215	126	0.8157	57
	8	0.8100	204	0.8106	113	0.8133	44	0.6642	407
	12	0.8065	177	0.8079	118	0.7863	28	0.5768	256
	16	0.8092	181	0.7952	109	0.7872	27	0.5890	319
	20	0.8070	187	0.8003	91	0.7734	24	0.5843	397
	32	0.8112	184	0.8147	111	0.7925	29	0.6397	123
	64	0.8087	178	0.8121	109	0.8017	28	0.6458	394
	100	0.8072	183	0.8114	101	0.8068	27	0.7257	389
	200	0.8110	189	0.8146	112	0.8085	36	0.6410	135
	1000	0.8069	189	0.8140	116	0.8070	36	0.6374	395
5000	0.8116	176	0.8093	105	0.8039	33	0.1001	120	

#### 4.4. Statistical Analysis of the Results

We use Welch's T-test to measure the significance of our method's results. We train Vanilla SN, Vanilla KD and KDDP models with 100 fc1 neurons, starting with different initial weights for 11 times. We set our



hyper-parameters as  $L_1 = 1e^{-4}$ ,  $\alpha = 0.5$ . We present these results in Table 5.

**KDDP & Vanilla Analysis:** We start with assuming a null hypothesis that the mean of the results of the KDDP is equal to the mean of the results of the Vanilla network. Then, we calculate the T-score of these sets (classification results) using Eq. 5. We get a T-score of 9.91. For two-tailed hypothesis and 10 degrees of freedom, this T-score corresponds to  $p < .00001.$ , which indicates statistical significant. Therefore, it is safe to reject the null hypothesis that there is no difference between the means of results.

**KDDP & Vanilla-KD Analysis:** We follow the same computations for comparing our KDDP with the Vanilla-KD. We get a T-score of 2.9730, which corresponds to  $p = .013974$  for two-tailed hypothesis with 10 degrees of freedom. Since  $p < .05$ , it is again safe to reject the null hypothesis. We conclude that our KDDP model's performance has intrinsic differences from Vanilla SN and Vanilla KD results, and they are strong and are not by chance.

*Table 5. Results of 11 different trainings for Vanilla SN, Vanilla KD and KDDP models with 100 neurons in fc1. Hyper-parameters for KDDP are  $L_1 = 1e^{-4}$ ,  $\alpha = 0.5$ . Although the difference in mean accuracies are small, they are statistically significant.*

Run #	Vanilla Acc.	Vanilla-KD Acc.	KDDP Acc.
0	0.8075	0.8197	0.8219
1	0.8041	0.8156	0.8226
2	0.8089	0.8182	0.8234
3	0.7975	0.8125	0.8166
4	0.8051	0.8172	0.8183
5	0.8101	0.8167	0.8175
6	0.7998	0.8210	0.8221
7	0.8080	0.8193	0.8212
8	0.8033	0.8163	0.8210
9	0.8098	0.8139	0.8152
10	0.7980	0.8169	0.8233
<b>Mean</b>	0.8047	0.8170	0.8203
<b>Var</b>	$1.9522e^{-5}$	$5.6783e^{-6}$	$7.5033e^{-6}$
<b>KDDP &amp; Vanilla T-score: 9.9177</b>			
<b>KDDP &amp; Vanilla-KD T-Score: 2.9730</b>			

## 5. CONCLUSION

In this paper, we propose a new method based on Knowledge Distillation (KD) [17]. We use  $L_1$  regularization on the activities of the neurons in a fully-connected layer and remove the inactive neurons. There is no need to provide the final size of the student model as input; our method determines it automatically. Our method performs better than the standard KD method with much fewer parameters.

In our extensive experiments, we show that KD based methods including ours are highly hyperparameters dependent. Temperature,  $T$ , and distillation weight,  $\alpha$  selection determine the performance of the trained model. We observe that the accuracy varies significantly between low and high values for different  $T$  values. Moreover,  $\alpha$  constrains us to decide to what extent we should rely on the teacher network's logits. However, when the hyper-parameters are chosen carefully, our method works well. It performs better than the baselines.

In conclusion, our method can be used when there is a need for a much smaller network that performs comparably. Moreover, considering the benefits such as comparable accuracy with fewer parameters, one should expect that the hyper-parameter selection is vital for the performance.

Although we did not explore the use of our method for convolutional layers, we expect that similar gains (higher accuracy with fewer parameters) would be obtained. We leave this as future work.

## REFERENCES

- [1] Y. LeCun, J. S. Denker, S. A. Solla, R. E. Howard, and L. D. Jackel, "Optimal brain damage.," in *Advances in Neural Processing Systems (NIPS Conference)*, vol. 2, pp. 598–605, 1989.
- [2] B. Hassibi and D. Stork, "Second order derivatives for network pruning: Optimal brain surgeon," in *Advances in Neural Information Processing Systems 5 (NIPS Conference)*, pp. 164–171, 1992.
- [3] S. Srinivas and R. V. Babu, "Data-free parameter pruning for deep neural networks," in *Proceedings of the British Machine Vision Conference 2015, BMVC 2015, Swansea, UK, September 7-10, 2015*, pp. 31.1–31.12, 2015.
- [4] S. Han, J. Pool, J. Tran, and W. Dally, "Learning both weights and connections for efficient neural network," in *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS Conference)*, pp. 1135–1143, 2015.
- [5] H. Zhou, J. M. Alvarez, and F. Porikli, "Less is more: Towards compact cnns," in *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pp. 662–677, Springer, 2016.
- [6] W. Wen, C. Wu, Y. Wang, Y. Chen, and H. Li, "Learning structured sparsity in deep neural networks," in *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS Conference)*, pp. 2074–2082, 2016.
- [7] Z. Liu, J. Li, Z. Shen, G. Huang, S. Yan, and C. Zhang, "Learning efficient convolutional networks through network slimming," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 2736–2744, 2017.
- [8] J. Jin, A. Dundar, and E. Culurciello, "Flattened convolutional neural networks for feedforward acceleration," in *3rd International Conference on Learning Representations, ICLR, San Diego, CA, USA, May 7-9, 2015, Workshop Track Proceedings*, 2015.
- [9] F. N. Iandola, M. W. Moskewicz, K. Ashraf, S. Han, W. J. Dally, and K. Keutzer, "Squeezenet: Alexnet-level accuracy with 50x fewer parameters and <1mb model size," *CoRR*, vol. abs/1602.07360, 2016.
- [10] T. Li, B. Wu, Y. Yang, Y. Fan, Y. Zhang, and W. Liu, "Compressing convolutional neural networks via factorized convolutional filters," in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 3977–3986, 2019.
- [11] E. L. Denton, W. Zaremba, J. Bruna, Y. LeCun, and R. Fergus, "Exploiting linear structure within convolutional networks for efficient evaluation," in *Advances in Neural Information Processing Systems 27 (NIPS Conference)*, December 8-13, Montreal, Quebec, Canada, pp. 1269–1277, 2014.
- [12] H. Kim, M. U. K. Khan, and C.-M. Kyung, "Efficient neural network compression," in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 12569–12577, 2019.
- [13] B. Minnehan and A. Savakis, "Cascaded projection: End-to-end network compression and acceleration," in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 10715–10724, 2019.

- [14] M. Courbariaux, Y. Bengio, and J. David, “Binaryconnect: Training deep neural networks with binary weights during propagations,” in *Advances in Neural Information Processing Systems 28 (NIPS Conference)*, Montreal, Quebec, Canada, pp. 3123–3131, 2015.
- [15] S. Han, H. Mao, and W. J. Dally, “Deep compression: Compressing deep neural network with pruning, trained quantization and huffman coding,” in *4th International Conference on Learning Representations, ICLR*, 2016.
- [16] I. Hubara, M. Courbariaux, D. Soudry, R. El-Yaniv, and Y. Bengio, “Binarized neural networks,” in *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS Conference)*, pp. 4107–4115, 2016.
- [17] G. Hinton, O. Vinyals, and J. Dean, “Distilling the knowledge in a neural network,” in *Deep Learning Workshop, Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS Conference)*, 2014.
- [18] A. Romero, N. Ballas, S. E. Kahou, A. Chassang, C. Gatta, and Y. Bengio, “Fitnets: Hints for thin deep nets,” in *3rd International Conference on Learning Representations, ICLR, San Diego, CA, USA, May 7-9, 2015, Conference Track Proceedings*, 2015.
- [19] P. Luo, Z. Zhu, Z. Liu, X. Wang, and X. Tang, “Face model compression by distilling knowledge from neurons,” in *Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2016.
- [20] A. Krizhevsky, G. Hinton, et al., “Learning multiple layers of features from tiny images,” *Technical Report*, 2009.
- [21] V. Lebedev and V. Lempitsky, “Fast convnets using group-wise brain damage,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 2554–2564, 2016.
- [22] Z. Huang and N. Wang, “Data-driven sparse structure selection for deep neural networks,” in *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pp. 304–320, 2018.
- [23] K. Ullrich, E. Meeds, and M. Welling, “Soft weight-sharing for neural network compression,” in *5<sup>th</sup> International Conference on Learning Representations, ICLR, Toulon, France, April 24-26, 2017, Conference Track Proceedings*, 2017.
- [24] S. J. Nowlan and G. E. Hinton, “Simplifying neural networks by soft weight-sharing,” *Neural Computation*, vol. 4, no. 4, pp. 473–493, 1992.
- [25] J. Ye, X. Lu, Z. Lin, and J. Z. Wang, “Rethinking the smaller-norm-less-informative assumption in channel pruning of convolution layers,” in *6th International Conference on Learning Representations, ICLR, Vancouver, BC, Canada, April 30 - May 3, 2018, Conference Track Proceedings*, 2018.
- [26] A. Beck and M. Teboulle, “A fast iterative shrinkage-thresholding algorithm for linear inverse problems,” *SIAM journal on imaging sciences*, vol. 2, no. 1, pp. 183–202, 2009.
- [27] A. Gordon, E. Eban, O. Nachum, B. Chen, H. Wu, T.-J. Yang, and E. Choi, “Morphnet: Fast & simple resource-constrained structure learning of deep networks,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 1586–1595, 2018.
- [28] A. G. Howard, M. Zhu, B. Chen, D. Kalenichenko, W. Wang, T. Weyand, M. Andreetto, and H. Adam, “Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications,” *arXiv preprint arXiv:1704.04861*, 2017.
- [29] Guo, A. Yao, and Y. Chen, “Dynamic network surgery for efficient dnns,” in *Advances in Neural Information Processing Systems 29: Annual Conference on Neural Information Processing Systems, Barcelona, Spain*, pp. 1379–1387, 2016.

- [30] H. Li, A. Kadav, I. Durdanovic, H. Samet, and H. P. Graf, "Pruning filters for efficient convnets," in 5th International Conference on Learning Representations, ICLR, Toulon, France, April 24-26, 2017, Conference Track Proceedings, 2017.
- [31] J.-H. Luo, J. Wu, and W. Lin, "Thinet: A filter level pruning method for deep neural network compression," in Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, pp. 5058–5066, 2017.
- [32] Y. He, X. Zhang, and J. Sun, "Channel pruning for accelerating very deep neural networks," in Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 1389–1397, 2017.
- [33] R. Yu, A. Li, C.-F. Chen, J.-H. Lai, V. I. Morariu, X. Han, M. Gao, C.-Y. Lin, and L. S. Davis, "Nisp: Pruning networks using neuron importance score propagation," in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 9194–9203, 2018.
- [34] A. Prakash, J. Storer, D. Florencio, and C. Zhang, "Repr: Improved training of convolutional filters," in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 10666–10675, 2019.
- [35] H. Wang, Q. Zhang, Y. Wang, and H. Hu, "Structured probabilistic pruning for convolutional neural network acceleration," in British Machine Vision Conference 2018, BMVC, Northumbria University, Newcastle, UK, September 3-6, 2018, p. 149, 2018.
- [36] Y. He, P. Liu, Z. Wang, Z. Hu, and Y. Yang, "Filter pruning via geometric median for deep convolutional neural networks acceleration," in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 4340–4349, 2019.
- [37] P. T. Fletcher, S. Venkatasubramanian, and S. Joshi, "Robust statistics on riemannian manifolds via the geometric median," in 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1–8, IEEE, 2008.
- [38] X. Dong, S. Chen, and S. Pan, "Learning to prune deep neural networks via layer-wise optimal brain surgeon," in Advances in Neural Information Processing Systems, pp. 4857–4867, 2017.
- [39] J. Kim, Y. Park, G. Kim, and S. J. Hwang, "Splitnet: Learning to semantically split deep networks for parameter reduction and model parallelization," in Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning-Volume 70, pp. 1866–1874, JMLR. org, 2017.
- [40] T.-J. Yang, Y.-H. Chen, and V. Sze, "Designing energy-efficient convolutional neural networks using energy-aware pruning," in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 5687–5695, 2017.
- [41] C. Zhao, B. Ni, J. Zhang, Q. Zhao, W. Zhang, and Q. Tian, "Variational convolutional neural network pruning," in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 2780–2789, 2019.
- [42] C. Bucilua, R. Caruana, and A. Niculescu-Mizil, "Model compression," in Proceedings of the 12<sup>th</sup> ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, pp. 535–541, ACM, 2006.
- [43] J. Ba and R. Caruana, "Do deep nets really need to be deep?," in Advances in neural information processing systems, pp. 2654–2662, 2014.
- [44] J. Yim, D. Joo, J. Bae, and J. Kim, "A gift from knowledge distillation: Fast optimization, network minimization and transfer learning," in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 4133–4141, 2017.

- [45] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, “Identity mappings in deep residual networks,” in European Conference on Computer Vision (ECCV), pp. 630–645, Springer, 2016.
- [46] D. P. Kingma and J. Ba, “Adam: A method for stochastic optimization,” arXiv preprint arXiv:1412.6980, 2014.
- [47] X. Glorot and Y. Bengio, “Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks,” in Proceedings of the thirteenth international conference on artificial intelligence and statistics, pp. 249–256, 2010.
- [48] F. Chollet et al., “Keras.” <https://keras.io>, 2015.
- [49] H. Cai, L. Zhu, and S. Han, “Proxylessnas: Direct neural architecture search on target task and hardware,” in 7th International Conference on Learning Representations, ICLR, New Orleans, LA, USA, May 6-9, 2019, 2019.