
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Editör: Prof.Dr. Mustafa BOZDEMİR

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Editör

Prof. Dr. Mustafa BOZDEMİR

yaz
yayınları

2024

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Editör: Prof. Dr. Mustafa BOZDEMİR

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-6104-66-2

Ekim 2024 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

Farklı Delme Operasyonlarında Karbon Fiber Takviyeli Kompozitlerdeki Termoset ve Termoplastik Matris Etkilerinin İncelenmesi	1
<i>Doğancan ERASLAN, Fırat KAFKAS</i>	
Araç Zırhı Uygulamaları ve İlgili Uluslararası Balistik Testler	24
<i>Yılmaz KÜÇÜK, Şeref Güvenç DESTERECİ</i>	
Topoloji Optimizasyonu ile İlgili Lisansüstü Tezlerin Bibliyometrik Analizi.....	63
<i>Funda KAHRAMAN, Mehmet KÜÇÜK</i>	
Karbon Yakalama, Depolama (CCS) ve Gelişmiş Petrol Geri Kazanımı (EOR) Teknolojilerinin Türkiye’ de Uygulanabilirliği Üzerine Bir Fizibilite Çalışması	77
<i>Nuri CEYLAN, Hasan Donat YILDIZAY, Özer AYDIN, Emine FELEK</i>	
Additive Manufacturing Technologies and Artificial Intelligence Application: Integration of Smart Systems in Digital Manufacturing Processes.....	99
<i>Koray ÖZSOY</i>	
Investigation Of Tensile Stress and Percentage Elongation Relationships in Alloys Depending on The Alloy Elements	116
<i>Can GÖNENLİ, Okan DUymazlar</i>	

Farklı Geometrilili Elektronik Eleman İçeren Dikey Kanaldaki Isı Transferinin Akış Yönlendirici Kullanılarak İyileştirilmesinin Araştırılması	134
<i>Koray KARABULUT, Yeliz ALNAK</i>	
Düşük Güçlü Motorlar İçin Basit Bir Motor Test Dinamometresi.....	156
<i>Gökçe Hilal YAVUZ, Emre ARABACI</i>	
Additive Advantage: Redefining Machine Elements through 3D Printing Technology	177
<i>Onat Halis TOTUK</i>	
Analysis of the Extrapolation Capabilities of Physics-Informed Neural Networks on Damped and Undamped Vibration Cases.....	198
<i>Okan DUymAZLAR, Can GÖNENLİ</i>	
Plastik Enjeksiyon Hacim Kalıpcılığı İçin Kalıp Setlerinin Aşamalı Olarak Oluşturulması	215
<i>Harun YAKA, Harun AKKUŞ</i>	
Interaction of AI-Supported Simulation Tools in Engineering Design Processes	231
<i>Aysu AKILLI ARI, Harun YAKA</i>	
Adaptive Control of Dynamic and Dead Zone Uncertainties in Teleoperation Robotic System	253
<i>Tayfun ABUT, Servet SOYGÜDER</i>	
Analysis of Mechanical Properties of Lignocellulosic Fiber Filled Polypropylene Composites for Engineering Application	290
<i>Mustafa ÖNCÜL</i>	

**Structure of Industry 4.0-Based Production
Technologies and Evaluation of Adaptation to
Manufacturing Industry305**
Erman ZURNACI

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

FARKLI DELME OPERASYONLARINDA KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDEKİ TERMOSET VE TERMOPLASTİK MATRİS ETKİLERİNİN İNCELENMESİ¹

Doğancan ERASLAN²

Fırat KAFKAS³

1. GİRİŞ

Farklı özelliklere sahip ve bileşenleri arasında net sınırlar bulunan iki veya daha fazla bileşenden oluşan her tür malzeme, kompozit malzeme olarak tanımlanabilir. Yüksek dayanım, hafiflik ve ısıl stabilite gibi üstün özellikleriyle son yıllarda geleneksel mühendislik malzemelerinin yerini almaya başlamışlardır. Kompozitler takviye ve matris olarak iki temel elemandan oluşmaktadır. Takviye elemanı, yüksek dayanım ve sertlik sağlayan fiberlerlerdir. Fiberleri bir arada tutan ve gerilmeleri yapısal olarak dağıtma özelliği sağlayan matris elemanı ile birlikte bir kompozit malzeme oluşur [1]. Kompozit malzemeler, sahip oldukları üstün özelliklerin yanında çeşitli üretim zorluklarını da getirir. Soğuk zincir, ham madde

¹ Bu çalışma yüksek lisans tezinden türetilmiştir. Eraslan, Doğancan. “Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Su Jeti ve Frezeleme İle Delinmesinde Termoset Ve Termoplastik Matris Etkilerinin DeneySEL Olarak İncelenmesi”. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara.

² Yüksek Lisans Öğrencisi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, dogancan.eraslan@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2996-1396.

³ Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, fkafkas@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3257-7413.

depolama, kalifiye personel, sertifikasyon ve ileri teknolojik tezgahlar gibi birçok maliyet yükselten unsur mevcuttur. Bu durumda, üretim giderlerini düşürebilmek amacıyla proses boyunca optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Bunun yanında geri dönüştürülebilir veya tekrar kullanılabilir kompozit malzemelerin elde edilmesi de yaygınlaşan bir trenddir.

Kompozit malzemeler karbon, cam ve aramid fiberlerden oluşan takviye elemanına ve metal, polimer ve seramikten matris elemanına sahiptir. Karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler havacılık ve savunma sanayi uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Polimer matris olarak termoset (TS) veya termoplastik (TP) esaslı polimerler kullanılabilir. Uzun yıllardır ispatlanmış yüksek performanslarıyla karbon fiber takviyelerle beraber termoset matrisler kullanılmaktadır [2]. Termoset polimerler bir kez kürlendiğinde eritilemez ve tekrar şekillendirilemezler. Bu sebeple, ısı uygulamasıyla tekrar şekillendirilebilen ve geri dönüşüm avantajı sunan termoplastik polimerlerin matris malzeme olarak kullanılması kompozit üretiminde önem kazanmış bir konudur.

Her ne kadar net şekle yakın üretim metotları geliştirilmiş olsa da polimer matrisli kompozitlerin bir ürün haline gelene kadarki üretim sürecinde işlenme gereksinimi kaçınılmazdır. Kompozit malzemedan üretilen komponentlerin montaj operasyonlarıyla kullanılabilir hale getirilebilmesi için delik delme operasyonları olmazsa olmazdır ve kompozit malzemelerde en sık uygulanan şekillendirme yöntemidir. [3]. Delik delme operasyonlarında kullanılan takım tezgâhı ve ekipmanların verimli kullanılmak üzere optimize edilmesi önem arz etmektedir. Bunun yanında, delik delme operasyonlarında matris ve takviye elemanın birbirine olan bağını korumak ve malzemede olabildiğince düşük hasar ile operasyonu tamamlamak hedeflenir.

Bu çalışmada, endüstriyel uygulamalarda yıllardır yaygın olarak kullanılan ve performansı kanıtlanmış termoset matris ile günümüzde gittikçe geri dönüşümünün mümkün olması ve üretim maliyetleri düşük olmasıyla ünlenen termoplastik matrisin, delik delme operasyonlarında gösterdiği performans incelenmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada, kat sayıları ve serim yönleri eşit karbon fiber takviyeli kompozit plakalar kullanılmıştır. Plakalardan biri termoset matrise, diğeri termoplastik matrise sahiptir. Deney malzemelerine ait görseller Şekil 1’ de paylaşılmış ve deney malzemelerine ait teknik özellikler Tablo 1’ de verilmiştir.

Şekil 1. Deney Malzemeleri

	
(a) Termoset Matirslı Kompozit Levha	(b) Termoplastik Matirslı Kompozit Levha

Tablo 1. Deney Malzemelerinin Fiziksel ve Teknik Özellikleri

Matris Tipi	Termoset	Termoplastik
Reçine tipi	Epoksi	PAEK
Takviye Elemanı	Karbon Fiber	Karbon Fiber
Örgü Tipi	2X2 Twill	5HS
Reçine Oranı	%40	%42
Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)	196	148
Reçine Yoğunluğu (g/cm ³)	1.29	1.30
Fiber Yoğunluğu (g/cm ³)	1.78	1.60
Kat Sayısı	16 Karbon + 1 Cam Elyaf	16 Karbon + 1 Cam Elyaf
Serim Açısı ve Düzeni	[[(+45)/(0,90)]4]S	[[(+45)/(0,90)]4]S
En * Boy* Kalınlık (mm)	450* 650*5.21	450*650*5.19
Kürlenmiş Kat Kalınlığı (mm)	0.285	0.310
Çekme Mukavemeti (MPa)	875	755
Basma Mukavemeti (MPa)	825	650

Deney malzemeleri üzerine eşit şartlarda matkap, freze ve su jeti metotları ile Ø10 mm ölçüsünde delikler açılmıştır. Deliklerin açılmasında delik delme, frezeleme ve su jeti işlemlerini yapma kabiliyetine sahip fonksiyonel bir tezgâh kullanılmıştır. Matkapla delik delme, freze ile delik genişletme ve su jeti ile delme işlemlerine ait çalışma parametreleri Tablo 2’ de verilmiştir.

Tablo 2. Çalışma Parametreleri ve Seviyeleri

Metot	Faktör /Kodu- Tanımı	Sembol	Level		
			1	2	3
Matkap	A- İş Mili Hızı	N (rev/min)	2000	10000	18000
	B- İlerleme Hızı	f (mm/min)	300	900	1800
Freze	A- İş Mili Hızı	N (rev/min)	1500	11500	17500
	B- İlerleme Hızı	f (mm/min)	200	800	1600
Su jeti	A- İlerleme Hızı	f (mm/min)	200	800	1600
	B- Nozul Yaklaşma Mesafesi	Ad (mm)	4	8	12

Deneyler, Taguchi L9 ortogonal düzenine göre gerçekleştirilmiştir. Taguchi deney düzeni çizelgesi Tablo 3’ te verilmiştir. Bu deney düzeninde matkap ve freze operasyonları için devir sayısı ve ilerleme hızı kontrol parametreleri olarak seçilmiştir. Aşındırıcı su jeti ile delik açma operasyonlarında yaklaşma mesafesi ve ilerleme hızı kontrol parametreleridir. Deneylerde güvenilirliği sağlayabilmek amacıyla her delik operasyonu üç defa tekrarlanmıştır. Taguchi metodu ideal kesme parametrelerini belirleyebilir, ancak kesme parametrelerinin kalite kriterlerine etki seviyesini sunamaz. Bu sebeple istatistiksel analiz yöntemlerinden Varyans Analizi (ANOVA) kullanılmıştır [4]. Buna ek olarak, varyans analizi gruplar arasındaki farkı belirleyebilirken, hangi grupların birbirinden farklı olduğunu belirleyemez. Gruplar arasındaki farkın da tespit edilebilmesi için Tukey Test kullanılmıştır. Tukey Test ile çoklu karşılaştırmalar yapılarak, ANOVA sonuçları daha sağlıklı yorumlanabilir.

Delik açma operasyonları, matkap ile, parmak freze ile ve aşındırıcı su jetiyle gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan

kesici takım ve takım tezgahına ait görseller Şekil 2’ de sunulmuştur.

Tablo 3. L₉ Taguchi Deney Düzeni

Taguchi L ₉ Ortogonal Deney Düzeni		
Deney No	N	<i>f</i>
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	2	1
5	2	2
6	2	3
7	3	1
8	3	2
9	3	3

Şekil 2. Deney Takımları



Açılan deliklerde 1 µm hassasiyete sahip iç çap mikrometresiyle deliğin giriş, orta ve çıkış konumlarından çap ölçümleri alınmıştır. Kompozit levhalarda montajlama ve birleştirme faaliyetleri açısından farklı imalat metotlarıyla açılan deliklerde çap ölçümleri arasındaki ilişki önemli bir kalite kriteridir [5]. Numuneler üzerinde açılan deliklerden alınan çap ölçümlerine ait görsel Şekil 3’ te paylaşılmıştır.

Şekil 3. İç Çap Ölçümü



3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Elde edilen ölçü değerlerin güvenilirliğini analiz etmek amacıyla varyans analizi (ANOVA) metodu kullanılmıştır. Gruplar içinde seviyeler arası farklılıkları belirlemek amacıyla Tukey Test’ ten faydalanılmıştır [6]. Gerçekleştirilen analizler Genel Analiz ve Parametrik Analiz olarak iki gruba ayrılmıştır. Genel Analizlerde tekrarların güvenilirliği, metot, konum ve çap ölçüleri arasındaki ilişkiler ve farklar incelenmiştir. Parametrik Analizlerde kesme parametrelerinin çap ölçülerine etkileri üzerine çalışılmıştır. Tekrarların güvenilirliğini gözlemlemek amacıyla gerçekleştirilen ANOVA analizlerine ait sonuçlar Tablo 4- 9’ da sırasıyla Termoset ve Termoplastik matris tipi için verilmiştir.

Tablo 4-9 incelendiğinde karşılaştırılan tekrar ölçümlerine ait veri setleri arasında %95 güven aralığında anlamlı bir farklılık olmadığı görülmektedir. Tukey Test gruplar arası karşılaştırmalarda da tüm konumlar için aynı harfin paylaşılmasıyla anlamlı bir fark olmadığı kanıtlanmaktadır. Şekil 4 ve 5’ te grafiksel olarak çap ölçüm tekrarlarının metotlar ve konumlar arası ilişkileri verilmiştir.

Tablo 4. TS, Matkap, ANOVA ve Tukey Sonuçları

Loc	Par	Overall ANOVA						Tukey Test		
		DF	SS	MS	F	Prob>F*	Sig.	Rep	Mean	Grp
In	Model	2	1.84667E-4	9.23333E-5	0.21739	0.80619	No	3	10.03206	A
	Error	24	0.01019	4.24743E-4				1	10.02972	A
	Total	26	0.01038					2	10.02572	A
Mid	Model	2	0.00169	8.45898E-4	0.94873	0.40128	No	3	10.01583	A
	Error	24	0.0214	8.91613E-4				2	10.00744	A
	Total	26	0.02309					1	9.9965	A
Out	Model	2	2.20389E-4	1.10194E-4	0.18414	0.83298	No	3	10.00617	A
	Error	24	0.01436	5.98428E-4				2	10.00344	A
	Total	26	0.01458					1	9.99922	A

* Prob>F, 0,05 seviyesinden küçük olduğunda ölçüm değerlerinin ortalamaları önemli ölçüde farklıdır.

Tablo 5. TS, Freze, ANOVA ve Tukey Sonuçları

Loc.	Par.	Overall ANOVA						Tukey Test		
		DF	SS	MS	F	Prob>F*	Sig.	Rep.	Mean	Grp
In	Model	2	0.00307	0.00153	0.03393	0.96669	No	1	9.69011	A
	Error	24	1.08436	0.04518				3	9.672	A
	Total	26	1.08742					2	9.66478	A
Mid	Model	2	0.04795	0.02398	0.49451	0.61595	No	3	9.66611	A
	Error	24	1.16363	0.04848				1	9.60867	A
	Total	26	1.21158					2	9.56311	A
Out	Model	2	0.00672	0.00336	0.06404	0.93813	No	3	9.67578	A
	Error	24	1.25855	0.05244				1	9.64989	A
	Total	26	1.26526					2	9.638	A

Tablo 6. TS, Su Jeti, ANOVA ve Tukey Sonuçları

Loc.	Par.	Overall ANOVA						Tukey Test		
		DF	SS	MS	F	Prob>F*	Sig.	Rep.	Mean	Grp
In	Model	2	0.01645	0.00823	0.03606	0.96464	No	2	10.2755	A
	Error	24	5.47575	0.22816				1	10.25672	A
	Total	26	5.49221					3	10.21633	A
Mid	Model	2	0.00537	0.00269	0.01248	0.9876	No	1	10.05872	A
	Error	24	5.16686	0.21529				3	10.03189	A
	Total	26	5.17223					2	10.02644	A
Out	Model	2	0.00468	0.00234	0.01101	0.98906	No	1	9.96489	A
	Error	24	5.10052	0.21252				3	9.95433	A
	Total	26	5.1052					2	9.93322	A

Tablo 7. TP, Matkap ANOVA ve Tukey Sonuçları

Loc.	Par.	DF	Overall ANOVA				Sig.	Tukey Test		
			SS	MS	F	Prob>F*		Rep.	Mean	Grp
In	Model	2	5.31685E-4	2.65843E-4	0.07902	0.92426	No	1	10.04372	A
	Error	24	0.08074	0.00336				2	10.03711	A
	Total	26	0.08127					3	10.03294	A
Mid	Model	2	0.00331	0.00165	0.59014	0.56209	No	2	10.04672	A
	Error	24	0.0673	0.0028				3	10.02539	A
	Total	26	0.07061					1	10.02156	A
Out	Model	2	1.34074E-5	6.7037E-6	0.0028	0.9972	No	1	10.01661	A
	Error	24	0.0574	0.00239				3	10.01617	A
	Total	26	0.05742					2	10.01494	A

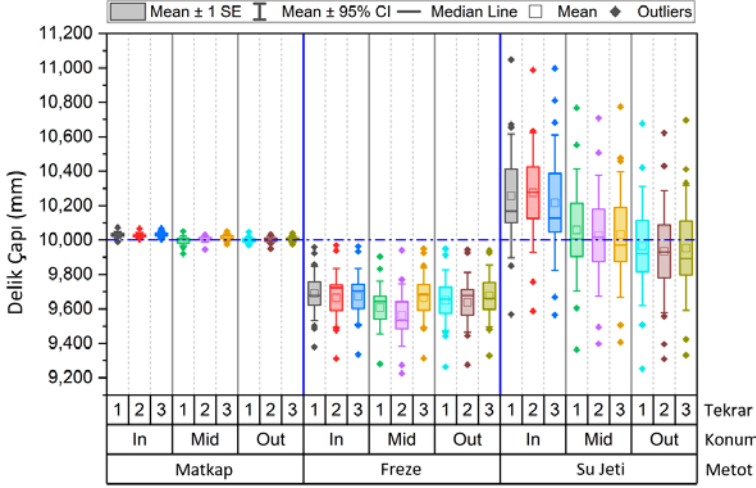
Tablo 8. TP, Freze ANOVA ve Tukey Sonuçları

Loc.	Par.	DF	Overall ANOVA				Sig.	Tukey Test		
			SS	MS	F	Prob>F*		Rep.	Mean	Grp
In	Model	2	3.67185E-4	1.83593E-4	0.00438	0.99563	No	3	9.70344	A
	Error	24	1.00624	0.04193				2	9.69644	A
	Total	26	1.00661					1	9.695	A
Mid	Model	2	0.00135	6.76593E-4	0.01664	0.98351	No	3	9.69222	A
	Error	24	0.9761	0.04067				2	9.684	A
	Total	26	0.97745					1	9.67489	A
Out	Model	2	0.00172	8.62037E-4	0.02162	0.97863	No	3	9.69956	A
	Error	24	0.95674	0.03986				1	9.68289	A
	Total	26	0.95847					2	9.68233	A

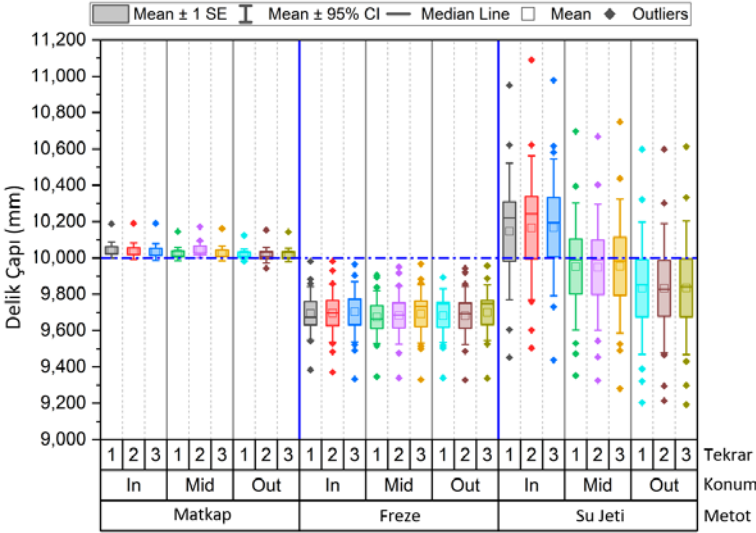
Tablo 9. TP, Su Jeti ANOVA ve Tukey Sonuçları

Loc.	Par.	DF	Overall ANOVA				Sig.	Tukey Test		
			SS	MS	F	Prob>F*		Rep.	Mean	Grp
In	Model	2	0.00276	0.00138	0.00555	0.99446	No	3	10.16822	A
	Error	24	5.96629	0.2486				2	10.16633	A
	Total	26	5.96906					1	10.14589	A
Mid	Model	2	1.59185E-4	7.95926E-5	3.72105E-4	0.99963	No	3	9.95411	A
	Error	24	5.13356	0.2139				1	9.95244	A
	Total	26	5.13372					2	9.94833	A
Out	Model	2	1.91852E-5	9.59259E-6	4.30574E-5	0.99996	No	3	9.83511	A
	Error	24	5.34687	0.22279				1	9.83367	A
	Total	26	5.34689					2	9.83311	A

Şekil 4. TS, Konum ve Metotlara Göre Çap Ölçüm Sonuçları



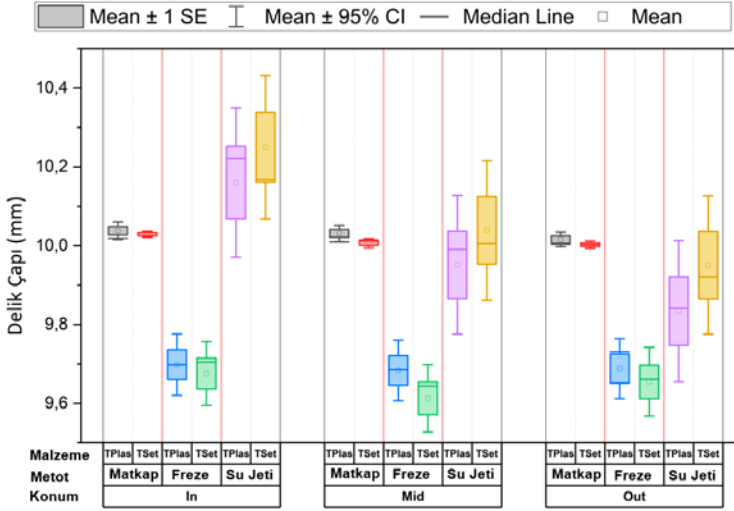
Şekil 5. TP, Konum ve Metotlara Göre Çap Ölçüm Sonuçları



Her metot kendi arasında anlamlı bir küme oluşturmuştur. Tekrarlar boyunca en küçük sapma Matkap metodunda gerçekleşmiştir. Tekrarlar arasındaki en büyük sapma ise su jeti metodundadır. Bu sonuç, su jeti yönteminin diğer yöntemlere

göre düşük hassasiyetli olduğunu meydana çıkarmıştır [7]. Bu durumda, tekrarlar arsında fark yoksa metotlar ve konumlar arasındaki ortalama çap farklılıklarının incelenmesi gerekir. Her iki matris tipindeki malzeme üzerinde açılan deliklere ait konum ve metotlar arası ortalama çap ölçülerinin karşılaştırılması grafik Şekil 6’ da verilmiştir.

Şekil 6. Konuma ve Metoda Bağlı Ortalama Çap Ölçülerinin Matris Tipine Göre Karşılaştırılması



Termoset plakalarda açılan delikler termoplastik plakalardaki deliklere göre matkap yönteminde orta ve çıkış konumlarında daha istikrarlı bir sonuç vermiştir. Bu durum TS matrisin kimyasal bağ moleküler yapısının, kuvvetli bağlara sahip olmasıyla açıklanabilir [8]. Her iki matris tipi için de genel olarak matkap ve freze operasyonlarında delik boyunca konuma göre ölçülerin çok değişmediğini ancak, su jetinde konumlar arasında fark olabileceğini grafiksel olarak göstermektedir. Su jeti metodunda TS matris yapısının kuvvetli bağlardan oluşmasıyla OUT konumunda aşındırıcı jetin kinetik enerjisini TP’ ye göre daha fazla kayba uğratarak, kaldırılan malzeme miktarının daha az miktarda olduğu gözlemlenmiştir. Su jeti için ise Mid

konumunda çap ortalaması, In ve Out konumlarından önemli derecede farklı değildir, ancak In ve Out konumlarına ait çap ortalamaları arasında önemli bir farklılık vardır. Bu durum kerf açısı oluşumuna işaret etmektedir [9]. En düşük sapmaya sahip delik açma yönteminin matkap olduğu söylenebilir. Freze metodunun ondalık mertebede termoplastik matrisli plakalarda daha büyük çapta delikler oluşturduğu gözlemlenmektedir. Konuma ve metoda bağlı ortalama çap ölçülerinin matris tipine göre kıyaslandığı grafiğin sayısal karşılığı tek yönlü ANOVA ve karşılaştırmalı Tukey test analizleriyle Tablo 10-12’ de görülebilir.

Tablo 10. In Konumunda Metoda Bağlı Ortalama Çap Ölçülerinin ANOVA ve Tukey Test Sonuçları

Loc		Overall ANOVA						Tukey Test		
		DF	SS	MS	F	Prob>F*	Sig	Mat	Mean	Grp
Matkap	Model	1	0.00104	0.00104	0.58768	0.44678	NO	TP	10.03793	A
	Error	52	0.09165	0.00176				TS	10.02917	A
	Total	53	0.09269							
Freze	Model	1	0.00694	0.00694	0.17224	0.67984	NO	TP	9.6983	A
	Error	52	2.09403	0.04027				TS	9.67563	A
	Total	53	2.10097							
Su Jeti	Model	1	0.10783	0.10783	0.48921	0.4874	NO	TS	10.24952	A
	Error	52	11.46126	0.22041				TP	10.16015	A
	Total	53	11.56909							

Tablo 11. Mid Konumunda Metoda Bağlı Ortalama Çap Ölçülerinin ANOVA ve Tukey Test Sonuçları

Loc		Overall ANOVA						Tukey Test		
		DF	SS	MS	F	Prob>F*	Sig	Mat	Mean	Grp
Matkap	Model	1	0.00819	0.00819	4.54499	0.03776	YES	TP	10.03122	A
	Error	52	0.0937	0.0018				TS	10.00659	B
	Total	53	0.10189							
Freze	Model	1	0.0682	0.0682	1.61997	0.20876	NO	TP	9.6837	A
	Error	52	2.18903	0.0421				TS	9.61263	A
	Total	53	2.25723							
Su Jeti	Model	1	0.1031	0.1031	0.52019	0.47399	NO	TS	10.03902	A
	Error	52	10.30596	0.19819				TP	9.95163	A
	Total	53	10.40905							

Tablo 12. Out Konumunda Metoda Bağlı Ortalama Çap Ölçülerinin ANOVA ve Tukey Test Sonuçları

Loc		Overall ANOVA						Tukey Test		
		DF	SS	MS	F	Prob>F*	Sig	Mat	Mean	Grp
Matkap	Model	1	0.00227	0.00227	1.63838	0.20623	NO	TP	10.01591	A
	Error	52	0.072	0.00138				TS	10.00294	A
	Total	53	0.07427							
Freze	Model	1	0.01534	0.01534	0.3586	0.55188	NO	TP	9.68826	A
	Error	52	2.22373	0.04276				TS	9.65456	A
	Total	53	2.23906							
Su Jeti	Model	1	0.18433	0.18433	0.91708	0.34268	NO	TS	9.95081	A
	Error	52	10.45209	0.201				TP	9.83396	A
	Total	53	10.63642							

Tablo 10- 12 incelendiğinde Matkap metodunun Mid konumunda ortalama çap ölçülerinin anlamlı derecede farklılığa sahip olduğu görülmektedir. Bu durum Tukey Test sonuçlarıyla da desteklenmektedir.

Kesme parametrelerinin çap ölçülerine etkilerinin analizi parametrik analizler olarak isimlendirilmiştir. Tüm metotlar ve matris tipleri için 9 tam faktöriyel deney tablosu kullanılmıştır ve deney düzeni Tablo 13’ te verilmiştir.

Genel analizlerde deney tekrarlarının güvenilirliği onaylandığından bu aşamada her bir koşul için istatistiksel olarak özdeş veri grupları mevcuttur. Her bir malzeme grubunda delik konumlarına bağlı olarak delik çaplarının değişimi üzerine kesme parametrelerinin etkisi Tablo 14- 19’ da gösterilmektedir.

Tablo 13. Deney Tablosu

			Matkap		Freze		Su Jeti	
			A	B	A	B	A	B
Run	A	B	N	f	N	f	f	Ad
1	1	1	2000	300	1500	200	200	4
2	1	2	2000	900	1500	800	200	8
3	1	3	2000	1800	1500	1600	200	12
4	2	1	10000	300	11500	200	800	4
5	2	2	10000	900	11500	800	800	8
6	2	3	10000	1800	11500	1600	800	12
7	3	1	18000	300	17500	200	1600	4
8	3	2	18000	900	17500	800	1600	8
9	3	3	18000	1800	17500	1600	1600	12

Tablo 14. TS, Matkap Konuma Göre Delik Çaplarının ANOVA Sonuçları

Loc	Par	DF	TS				
			SS	MS	F	P	Sig
IN	N	2	0.0026	0.0013	114.330	6.24E-04	YES
	f	2	0.0016	0.0008	71.608	5.15E-03	YES
	Interaction(Nxf)	4	0.0041	0.0010	89.630	3.64E-04	YES
	Model	8	0.0083	0.0010	91.299	5.65E-05	
	Error	18	0.0021	0.0001			
	Corrected Total	26	0.0104				
MID	N	2	0.0089	0.0044	68.679	6.07E-03	YES
	f	2	0.0007	0.0003	0.5056	6.11E-01	NO
	Interaction (Nxf)	4	0.0025	0.0006	0.9483	4.59E-01	NO
	Model	8	0.0120	0.0015	23.175	6.61E-02	
	Error	18	0.0116	0.0006			
	Corrected Total	26	0.0236				
OUT	N	2	0.0055	0.0028	112.682	6.71E-04	YES
	f	2	0.0031	0.0016	64.069	7.92E-03	YES
	Interaction (Nxf)	4	0.0015	0.0004	15.186	2.39E-01	NO
	Model	8	0.0102	0.0013	51.781	1.83E-03	
	Error	18	0.0044	0.0002			
	Corrected Total	26	0.0146				

Tablo 15. TP, Matkap Konuma Göre Delik Çaplarının ANOVA Sonuçları

Loc.	Par.	DF	TP				
			SS	MS	F	P	Sig
IN	N	2	0.0204	0.0102	473.997	6.71E-08	YES
	f	2	0.0185	0.0092	428.619	1.43E-07	YES
	Interaction(Nxf)	4	0.0385	0.0096	447.651	4.06E-09	YES
	Model	8	0.0774	0.0097	449.479	2.45E-10	
	Error	18	0.0039	0.0002			
	Corrected Total	26	0.0813				
MID	N	2	0.0130	0.0065	106.854	8.73E-04	YES
	f	2	0.0202	0.0101	165.904	8.23E-05	YES
	Interaction (Nxf)	4	0.0264	0.0066	108.268	1.19E-04	YES
	Model	8	0.0596	0.0075	122.323	7.39E-06	
	Error	18	0.0110	0.0006			
	Corrected Total	26	0.0706				
OUT	N	2	0.0101	0.0051	230.723	1.08E-05	YES
	f	2	0.0158	0.0079	358.884	5.24E-07	YES
	Interaction (Nxf)	4	0.0276	0.0069	313.708	6.83E-08	YES
	Model	8	0.0535	0.0067	304.256	6.32E-09	
	Error	18	0.0040	0.0002			
	Corrected Total	26	0.0574				

Tablo 16. TS, Freze Konuma Göre Delik Çaplarının ANOVA Sonuçları

Loc	Par	DF	TS				
			SS	MS	F	P	Sig
IN	N	2	0.2790	0.1395	1.265.775	2.50E-11	YES
	f	2	0.7786	0.3893	3.531.962	3.61E-15	YES
	Interaction (Nxf)	4	0.0100	0.0025	22.729	1.01E-01	NO
	Model	8	10.676	0.1335	1.210.799	4.69E-14	
	Error	18	0.0198	0.0011			
	Corrected Total	26	10.874				
MID	N	2	0.2200	0.1100	42.181	3.15E-02	YES
	f	2	0.4244	0.2122	81.375	3.04E-03	YES
	Interaction (Nxf)	4	0.0977	0.0244	0.9365	4.65E-01	NO
	Model	8	0.7422	0.0928	35.572	1.21E-02	
	Error	18	0.4694	0.0261			
	Corrected Total	26	12.116				
OUT	N	2	0.3586	0.1793	854.527	6.48E-10	YES
	f	2	0.8425	0.4212	2.007.447	4.93E-13	YES
	Interaction (Nxf)	4	0.0264	0.0066	31.448	3.99E-02	YES
	Model	8	12.275	0.1534	731.217	3.82E-12	
	Error	18	0.0378	0.0021			
	Corrected Total	26	12.653				

Tablo 17. TP, Freze Konuma Göre Delik Çaplarının ANOVA Sonuçları

Loc	Par	DF	TP				
			SS	MS	F	P	Sig
IN	N	2	0.1902	0.0951	825.885	8.54E-10	YES
	f	2	0.7651	0.3826	3.321.595	6.19E-15	YES
	Interaction (Nxf)	4	0.0306	0.0076	66.305	1.84E-03	YES
	Model	8	0.9859	0.1232	1.070.022	1.39E-13	
	Error	18	0.0207	0.0012			
	Corrected Total	26	10.066				
MID	N	2	0.1834	0.0917	994.989	1.86E-10	YES
	f	2	0.7393	0.3696	4.009.841	1.18E-15	YES
	Interaction (Nxf)	4	0.0382	0.0095	103.474	1.57E-04	YES
	Model	8	0.9609	0.1201	1.302.945	2.46E-14	
	Error	18	0.0166	0.0009			
	Corrected Total	26	0.9775				
OUT	N	2	0.2201	0.1101	1.215.604	3.51E-11	YES
	f	2	0.6598	0.3299	3.643.403	2.75E-15	YES
	Interaction (Nxf)	4	0.0622	0.0156	171.783	5.82E-06	YES
	Model	8	0.9422	0.1178	1.300.643	2.50E-14	
	Error	18	0.0163	0.0009			
	Corrected Total	26	0.9585				

Tablo 18. TS, Su Jeti Konuma Göre Delik Çaplarının ANOVA Sonuçları

Loc	Par	DF	TS				
			SS	MS	F	P	Sig
IN	f	2	36.444	18.222	1.291.525	2.11E-11	YES
	Ad	2	14.405	0.7202	510.485	3.82E-08	YES
	Interaction (fxAd)	4	0.1534	0.0384	27.183	6.24E-02	NO
	Model	8	52.383	0.6548	464.094	1.87E-10	
	Error	18	0.2540	0.0141			
	Corrected Total	26	54.922				
MID	f	2	40.286	20.143	12.199.197	6.06E-20	YES
	Ad	2	10.361	0.5180	3.137.419	1.02E-14	YES
	Interaction (fxAd)	4	0.0779	0.0195	117.917	7.03E-05	YES
	Model	8	51.425	0.6428	3.893.113	1.48E-18	
	Error	18	0.0297	0.0017			
	Corrected Total	26	51.722				
OUT	f	2	41.566	20.783	9.408.219	6.16E-19	YES
	Ad	2	0.8709	0.4354	1.971.186	5.77E-13	YES
	Interaction (fxAd)	4	0.0379	0.0095	42.926	1.30E-02	YES
	Model	8	50.654	0.6332	2.866.314	2.27E-17	
	Error	18	0.0398	0.0022			
	Corrected Total	26	51.052				

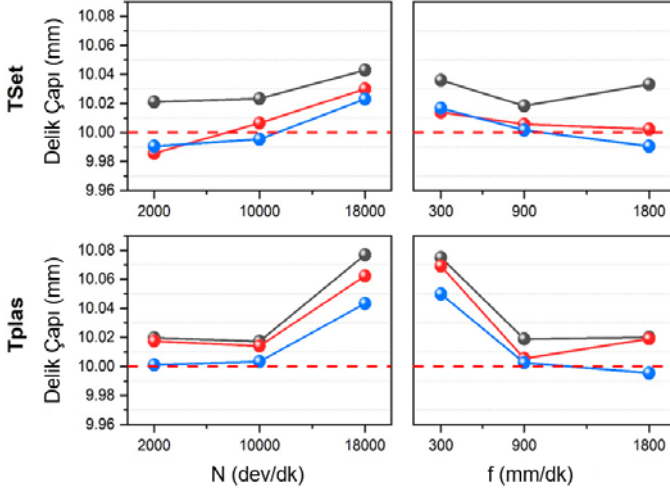
Tablo 19. TP, Su Jeti Konuma Göre Delik Çaplarının ANOVA Sonuçları

Loc	Par	DF	TP				
			SS	MS	F	P	Sig
IN	f	2	43.601	21.801	8.560.149	1.43E-18	YES
	Ad	2	14.284	0.7142	2.804.277	2.72E-14	YES
	Interaction (fxAd)	4	0.1348	0.0337	132.291	3.37E-05	YES
	Model	8	59.232	0.7404	2.907.252	2.00E-17	
	Error	18	0.0458	0.0026			
	Corrected Total	26	59.691				
MID	f	2	43.382	21.691	32.568.819	9.17E-24	YES
	Ad	2	0.6904	0.3452	5.183.145	1.23E-16	YES
	Interaction (fxAd)	4	0.0932	0.0233	349.747	2.92E-08	YES
	Model	8	51.217	0.6402	9.612.865	4.51E-22	
	Error	18	0.0120	0.0007			
	Corrected Total	26	51.337				
OUT	f	2	47.460	23.730	82.290.718	2.22E-27	YES
	Ad	2	0.5299	0.2650	9.187.808	7.61E-19	YES
	Interaction (fxAd)	4	0.0658	0.0164	570.109	5.61E-10	YES
	Model	8	53.417	0.6677	23.154.686	1.68E-25	
	Error	18	0.0052	0.0003			
	Corrected Total	26	53.469				

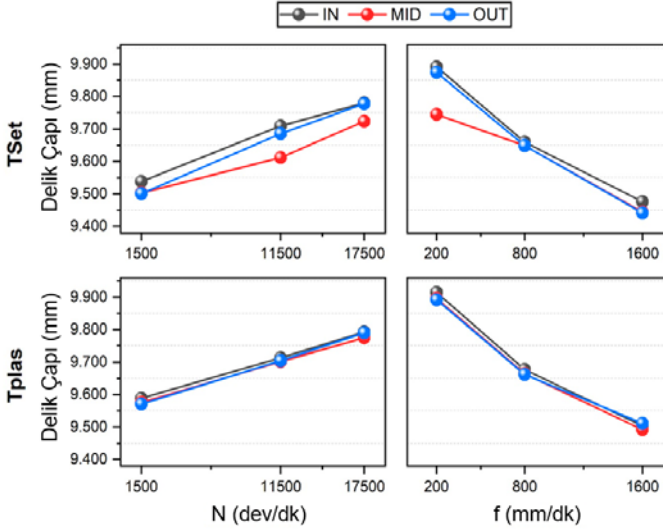
Matkap ve freze metotlarında iş mili hızı ve ilerleme hızı seviyelerinin önemli ölçüde birbirinden farklı olduğu, su jeti yönteminde yaklaşma mesafesi ve ilerleme hızı değerlerinin önemli derecede farklı olduğu görülmektedir. Şekil 7, 8 ve 9’ da kesme parametrelerinin çap ölçüsüne etkisi matris tipine göre verilmiştir.

Matkap yöntemi için ana etki grafiğinde görüldüğü üzere her iki malzeme için de İş Mili Hızının yükselmesiyle çap değerleri artmıştır. Takım salgısının artmasıyla bu durum yaşanıyor olabilir. Her iki matris tipi için de orta seviyedeki iş mili hızının tercih edilmesi, nominal çap ölçüsünün sağlanmasına katkı verebilir. Sonuçlara bakarak, İlerleme hızının çap ölçüsü için önemli bir kesme parametresi olduğu söylenebilir. İlerleme hızının düşük seviyelerinde delik çapının büyüdüğü gözlemlenmektedir. Freze yönteminde yüksek iş mili hızının nominal çapa ulaşmada her iki malzeme tipi için de etkisi olduğu söylenebilir. Buna ek olarak, ilerleme hızının düşük seviyelerinde nominal çap değerlerinin sağlanabildiği söylenebilir. Freze yöntemi her iki malzeme tipi için de kesme parametreleri bakımından yakın sonuçlar vermiştir. Freze metoduyla delik açmanın karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin delinmesi için umut verici bir delik açma tekniği olduğu literatürde de dile getirilmektedir [10]. Su jeti metodunda her iki matris tipi için de ilerleme hızının düşük seviyelerinde yüksek çap, düşük seviyelerinde yüksek çap elde edilmiştir. Bu durum, birim zamanda talaş kaldırma kabiliyetiyle ilişkilendirilebilir. Yaklaşma mesafesinin malzeme yüzeyine olan mesafesinin artmasıyla, delik çapın artması, nozuldan çıkmış olan jetinin, parça yüzeyine ulaşana kadar asıl formunu yitirmesiyle açıklanabilir. Bu durum, jetin kinetik enerjisini malzeme kalınlığıyla doğru orantılı olarak kaybettiğini göstermektedir [11].

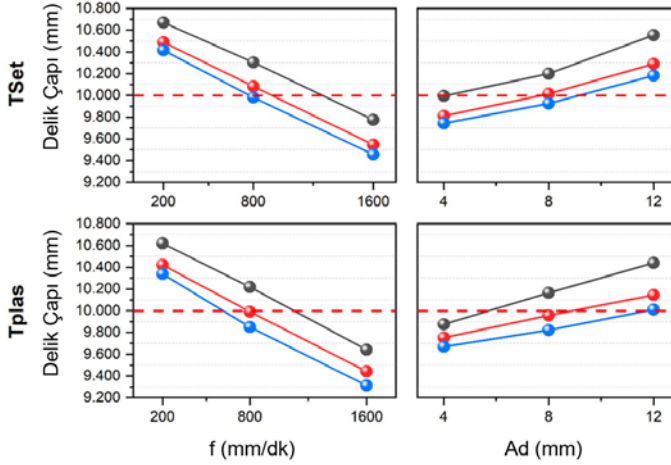
Şekil 7. Matkap Metodunda Kesme Parametrelerine Göre Çap Ölçülerinin Değişimi



Şekil 8. Freze Metodunda Kesme Parametrelerine Göre Çap Ölçülerinin Değişimi



Şekil 9. Su Jeti Metodunda Kesme Parametrelerine Göre Çap Ölçülerinin Değişimi



Yapılan analizler ve incelemeler sonucunda kesme parametrelerinde Matkap metodunda her iki matris tipi için iş mili hızının optimum değerden yukarı yönde artması nominal delik çapından uzaklaşmaya neden olmaktadır. Bunun yanında düşük ilerleme hızları matkabın merkezlenmesini sağlayamayarak çap ölçüsünü büyüttüğü düşünülmektedir. Termoplastik matrisli malzemenin olumsuz etkilerden kolay etkilenebilir. Freze metodunda yüksek iş mili hızı ve düşük ilerleme hızı değerleriyle nominal çap ölçüsüne yakın delikler elde edilebileceği görülmektedir. Her iki matris tipi için de Freze metodunda kesme parametrelerinin etkisi benzerlik göstermektedir. Su jeti operasyonlarında düşük ilerleme hızlarında birim hacimde aşındırma miktarı arttığından dolayı çap ölçüleri yüksek çıkmaktadır. İlerleme hızı optimum değere getirilerek nominal çap ölçüsünün yakalanabileceği görülmektedir. Bunun yanında yaklaşma mesafesinin ideal ölçüde ayarlanmasının önemi grafiklerde göze çarpmaktadır. Yaklaşma mesafesi arttıkça su jetinin formu bozulduğu için aşındırma çapı artmaktadır. Her iki

malzeme tipi için de çap değerleri arasında dikkate değer fark gözlemlenmemiştir [12-15].

4. SONUÇ

Bu çalışmada uzun yıllardır tecrübe birikimi yüksek termoset matrisli kompozit malzemelerde delik delme sürecinin termoplastik matrisli kompozitlerle karşılaştırılması üzerine çalışılmıştır. Termoplastik matrisin avantajlarının yanında getirdiği zorlukları hangi imalat metodu ve çalışma parametreleriyle ideal çapta delikler çıkarmak üzere kullanılabileceği araştırılmıştır. Yapılan analizler neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Matkap yöntemi ideal çap ölçüsüne en yakın sonuçların elde edilebileceği yöntemdir. Freze yöntemi, özel çapta matkap ucu gibi maliyet arttırıcı gereksinimleri ortadan kaldırarak, istenilen çap ölçüsünü çıkarabilecek gelecek vaat eden yöntemdir. Su jeti yöntemi, fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerde kerf açısı oluşumu gözlenmesi sebebiyle dar toleranslı delik operasyonlarında tercih edilmemelidir.
- Çalışma parametreleri elde edilecek çap ölçüleri için önemli bir belirleyicidir. Optimum çalışma parametrelerinin belirlenmesi sürecin maliyetini düşürürken, kaliteyi arttırmaktadır.
- Su jeti operasyonlarında yaklaşma mesafesinin önemi bu çalışma sayesinde ortaya konmuştur. Nozul parça yüzeyinden uzaklaştıkça, elde edilen delik çaplarında tolerans dışı değerler görülmektedir.
- Aynı çalışma parametrelerinde termoset ve termoplastik matris arasında dikkate değer bir çap farkı gözlemlenmemiştir.

- o Matkap ve Freze metotlarında devir sayısının artmasıyla delik çapının büyümesi takım salgısı ile ilişkilendirilebilir.
- o Deneyler esnasında termal kamera kullanılarak sıcaklık takibi yapılması termoplastik matrisin yüksek sıcaklıklardaki davranışını yorumlamada faydalı olabilirdi. Gelecekte yapılacak araştırmalarda bu durum göz önünde bulundurulabilir.
- o Deneylerde daha kalın plakalar kullanılarak, metotlar ve çalışma parametreleri için daha farklı yorumlar ortaya çıkabilir. Deneyler kuru şartlarda gerçekleştirilmiştir. Islak, minimum miktarda yağlama, kriyojenik vb. şartlarda deneyler tekrarlanarak matris davranışlarını görmek faydalı olabilir.

KAYNAKÇA

1. Vasiliev, V. V., & Morozov, E. V. (2001). *Mechanics and analysis of composite materials*. Elsevier.
2. Pulikkalparambil, H., Rangappa, S. M., Siengchin, S., & Parameswaranpillai, J. (2021). Epoxy Composites: Fabrication, Characterization and Applications.
3. Ahmad, F., Manral, A., & Bajpai, P. K. (2019). Machining of thermoplastic composites. *Processing of green composites*, 107-123.
4. Köse, İ. A., & Öztemur, B. (2014). Kayıp veri ele alma yöntemlerinin t-testi ve ANOVA parametreleri üzerine etkisinin incelenmesi. *Abant İzzet Baysal Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*.
5. Senthil Kumar, N., Ramakrishna, M., & Balan, A. S. (2013). Drilling behavior of sisal fiber-reinforced polypropylene composite laminates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(20), 1569-1576. <https://doi.org/10.1177/0731684413492866>
6. Köse, İ. A., & Öztemur, B. (2014). Kayıp veri ele alma yöntemlerinin t-testi ve ANOVA parametreleri üzerine etkisinin incelenmesi. *Abant İzzet Baysal Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*.
7. Saravanan, S., Vijayan, V., Suthahar, S. J., Balan, A. V., Sankar, S., & Ravichandran, M. (2020). A review on recent progresses in machining methods based on abrasive water jet machining. *Materials Today: Proceedings*, 21, 116-122.
8. Chang, I. Y., & Lees, J. K. (1988). Recent development in thermoplastic composites: a review of matrix systems and processing methods. *Journal of thermoplastic composite materials*, 1(3), 277-296.

9. Potom, B., Madhu, S., Kannan, S., & Prathap, P. (2019, July). Performance analysis of abrasive water jet cutting process in carbon fiber epoxy polymer composite. In IOP conference series: Materials science and engineering (Vol. 574, No. 1, p. 012014). IOP Publishing.
10. Ahmad, N., Khan, S. A., & Raza, S. F. (2019). Influence of hole diameter, workpiece thickness, and tool surface condition on machinability of CFRP composites in orbital drilling: a case of workpiece rotation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(5), 2007-2015.
11. MM, I. W., Azmi, A. I., Lee, C. C., & Mansor, A. F. (2018). Kerf taper and delamination damage minimization of FRP hybrid composites under abrasive water-jet machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(5), 1727-1744.
12. Phapale, K., Singh, R., Patil, S., & Singh, R. K. P. (2016). Delamination characterization and comparative assessment of delamination control techniques in abrasive water jet drilling of CFRP. *Procedia Manufacturing*, 5, 521-535.
13. Connelly, L. (2019). Chi-Square Test. *Medsurg Nursing*, 28(2).
14. Ahmad, N., Khan, S. A., & Raza, S. F. (2019). Influence of hole diameter, workpiece thickness, and tool surface condition on machinability of CFRP composites in orbital drilling: a case of workpiece rotation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(5), 2007-2015.
15. Yang, X., Lin, X., Li, M., & Jiang, X. (2020). Experimental study on surface integrity and kerf characteristics during

abrasive waterjet and hybrid machining of CFRP laminates. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 21, 2209-2221.

ARAÇ ZIRHI UYGULAMALARI VE İLGİLİ ULUSLARARASI BALİSTİK TESTLER

Yılmaz KÜÇÜK¹

Şeref Güvenç DESTERECİ²

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun varoluş mücadelesindeki başlıca unsur daima tehlikelere karşı kendini koruma içgüdüğü olmuştur. Geçen yüzyıllar içerisinde hızla yeni buluşlara ve gelişmelere imza atan insanoğlu korunma dürtüsünün de etkisiyle kullandığı silahlarda ve korunma malzemelerinde hızlı bir ilerleme sağlamıştır. Günümüzde devlet güvenlik güçlerinin, özellikle sıcak temaslarda vazgeçilmezi olan koruyucu zırhların geçmişi bu yüzden neredeyse insanlığın varoluşuna kadar dayanmaktadır. İlk başlarda tahtadan yapılan ilkel kalkanlar ile kendini korumaya çalışan insanoğlu; özellikle demir, bronz, bakır ve alaşımlarının keşfi ile zırh ustalarının geliştirdiği çok daha güçlendirilmiş kalkanları, miğferleri ve giyilebilir zırhları da kullanmaya başladı. Birinci dünya savaşı sürecinde motorun icat edilmesiyle, tanklar ve zırhlı araçlar tarih sahnesindeki yerlerini ilk defa almış oldular (Tsirogiannis, Daskalakis, Vogiatzis, et al., 2024). Her defasında daha iyisini hedefleyen insanoğlu, özellikle son yüzyıllık süreçte mühendislik ve malzeme bilimi alanlarında kat edilen yol ve teknolojik

¹ Doç. Dr., Bartın Üniversitesi, Müh. Mim. ve Tas. Fak., Makine Müh. Böl., ykucuk@bartin.edu.tr, ORCID: 0000-0002-7559-8794.

² Yüksek Lisans Öğrencisi, Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Fakültesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, serefguvenç.destereci@ogrenci.bartin.edu.tr, ORCID: 0009-0009-7917-9595.

gelişmeler ile beraber balistik konusunda önemli ilerlemeler kaydetmiştir.

Dünyada değişen jeopolitik gelişmelerle birlikte terörizmde artış, ülke hükümetlerinde istikrarsızlıklar ve iç karışıklıklar meydana gelmekte, bu durum da iç güvenlik ve askeri savunma alanlarında kullanılan koruyucu ekipmanlarda sürekli gelişen ve yüksek performansla sahip ürünler gerektirmektedir(Ash, 2016). Özellikle gelişmiş dünya ülkelerinin ordularını güçlendirme ve geliştirme çalışmalarında hedefledikleri iki önemli unsur vardır; en etkili saldırı yöntemlerini geliştirerek karşı tarafı maksimum zarara uğratmak, ikincisi ise en iyi savunma sistemlerini geliştirerek olası bir çatışmadan sıfır can kaybı ve en az zararla ayrılmaktır (Sánchez Gálvez & Sánchez Paradela, 2009).

Günümüzde gittikçe artan mermi balistik performansı, aynı zamanda zırhların koruyucu özelliklerinin artmasını da zorunlu hale getirmiştir. Zırhların balistik dirençlerinde beklenen bu artışın yanında, zırh yapımında kullanılan mühendislik malzemeleri, bu malzemelerin kütleleri ve üretim maliyetleri de büyük önem arz etmektedir(Tsirogiannis, Daskalakis, Hassan, et al., 2024). Özellikle askeri araç zırhlarında kullanılan balistik malzemelerde olması beklenen iki önemli özellik, yüksek koruma kabiliyeti ve hafifliktir. Araç zırhında kullanılan çelikler iyi derecede koruma sağlamaktadır, ancak sahip oldukları yüksek özgül ağırlık nedeniyle aracın manevra kabiliyetini sınırladığı ve yakıtı önemli ölçüde artırdığı için çoğu zaman ilk ve tek tercih değildir. Son yıllarda balistik alanında duyulan bu ihtiyacı üretim teknolojilerindeki büyük atılımlar ile birlikte mühendislik malzemelerine yeni bir bakış açısı getiren kompozit malzemeler karşılamaktadır.

Bu bölümde günümüzde kullanılan araç zırhı uygulamaları ve geçerli uluslararası balistik test standartları hakkında bilgilere yer verilmiştir.

2. BALİSTİK KAVRAMI

2.1.Balistik Bilimi ve Tarihsel Gelişimi

Balistik kelimesinin kökeni Roma İmparatorluğu'na dayandığı düşünülmektedir. Roma ordusunda kuşatmalarda kullanılan mancınığa Latince **“Balista”** denilmektedir. Hedefi isabetle vurmak için yapılan hesaplama ve silah ayarları modern balistiğin ilk uygulamalarını oluşturmuştur (Kriminal Daire Başkanlığı, n.d.).

Balistik sözcüğünün Yunanca **ballein** (fırlatmak) ve Fransızca **balistique** sözcüklerinden geldiği bilinmektedir. Balistik, merminin silah içi ve dışı hareketlerini ve nihai olarak hedef üzerinde oluşturduğu hasarı inceleyen bir bilim dalıdır (Özgüder et al., 2017). 10.yy'dan önce Çinlilerin barutu kullanımı ile balistik biliminin temellerinin atıldığı düşünülebilir. 1742'de Benjamin Robins, silahların namlu ağzı çıkış hızlarını tespit etmek için bir balistik sarkaç geliştirmiştir. Daha sonra hız belirleme çalışmalarına yönelik olarak 1792'de Count Rumfort tarafından barut gazının basıncı ölçülerek, basınç/atış mesafesi değişimi, mühimmat uçuş yörüngesi ve namlu ağzı çıkış hızı hesaplanmıştır. 19.yy'ın başlarından itibaren bugünkü anlamda balistik bilimindeki gelişmeler hız kazanmıştır. 1839'da Fransız Piobert barutun yanması ve namlu içindeki gaz hareketinden silah sistemindeki etki-tepki kuvvetini belirleme üzerine çalışmalar yapmıştır. 1857'de Rodman, gaz basıncıyla kurşunun ezilmesinden maksimum gaz basınç kuvvetini hesaplamıştır. 1860'da Andrew Noble doğru basınç ölçümü için masterlar geliştirmiştir. 1864'te Resal tarafından barutun yanma enerji eşitliğinin bulunmasıyla balistiğin

termodinamik modeli oluşmuştur (Özer, 2008). Bilgi düzeyinin ve mevcut prensiplerin daha sonraki yıllarda daha da geliştirilmesi sonucu 20. yy'ın başlarında balistik bir bilim olarak ortaya çıkmıştır (Çelikel, 2008).

2.2.Balistik Tipleri

Balistik genel olarak iç balistik, dış balistik ve terminal balistiği olmak üzere üç bölüme ayrılmaktadır. İç balistik, ateşleme sonrası mermi kovan ve çekirdeğinin namlu ağzını terk edinceye kadar geçen süredeki durumunu incelemektedir. Barut haznesi boyut hesabı ve yanmayla oluşan basınçtan namlu içi mermi hızını hesaplamayı kapsamaktadır. Dış balistik, merminin namluyu terk ettikten sonra havadaki hareketini inceleyen bölümdür. Mermi çekirdeğinin maruz kaldığı hava direnci ve yerçekimi etkisiyle uçuş yörüngesindeki hareketi, sapması, dengesi ve düşüşü gibi konular dış balistiğin alanına girmektedir. Mermi çekirdeğinin hedefe enerjisini iletmesi, hedef-mermi etkileşimi, hedef darbe dinamiği ve merminin hedefe verdiği hasar ise terminal balistiğin konusudur (Yıldırım et al., 2009).

2.3.Zırhın Tanımı ve Balistik Zırh Çeşitleri

Zırh, her türlü mermi ve patlayıcı etkisine karşı koruyucu giysilerin ve kara, hava ve deniz araçlarının dışını kaplamak için kullanılan koruyucu levhaların genel adıdır (Türk Dil Kurumu, 2024). Balistik zırhlar kullanılan malzemelerin durumuna göre bütüncül (tek parça – tek malzeme) ve çok katmanlı-hibrit kompozit zırhlar olmak üzere iki alanda incelenmektedir (Yıldırım et al., 2009). Bütüncül zırh malzemeleri çok fazla tercih edilmezler çünkü tek başına bütüncül bir malzemenin hem yüksek koruma sağlaması hem de hafif olması neredeyse imkânsız bir olasılıktır. Bu yüzden hem yüksek koruma özellikleri hem de sahip oldukları düşük yoğunlukları nedeniyle kompozit malzemeler günümüz modern zırh üretiminde daha

çok tercih edilmektedir. Buradan hareketle mevcut araç zırhı uygulamalarının büyük bir bölümünde modern mühendisliğin bir ürünü olan eklemeli/çok katmanlı hibrit kompozit zırh tasarımları kullanılmaktadır (Hazell, 2023).

Araç zırhı uygulamaları temel olarak sivil ve askeri amaçlı kullanıma yönelik geliştirilmektedir. Sivil amaçlı kullanım, daha çok devlet yetkililerinin kullandığı makam araçları, banka-kargo araçları ile sivil vatandaşların kullanımına yönelik araçlarda, koruyucu seviyeleri standartlarla belirlenmiş zırhlar kullanılmaktadır. Askeri amaçlı kullanımlarda ise hem araçları hem de içindeki askeri personeli her türlü mermi, patlayıcı etkisi, şarapnel parçası vb. etkilerden korumak için yine özellikleri ilgili standartlar ile belirlenmiş yüksek koruma özelliğine sahip zırhlar tercih edilmektedir (Wikipedia, 2024).

3. ARAÇ ZIRHI UYGULAMALARI

Bu alandaki uygulamalar ve zırh yapımında kullanılacak malzemeler aracın kullanılacağı görevin tehlike derecesine ve tehdit unsurların durumuna (kullanılacak mühimmatın çeşidine) göre belirlenmektedir. Geri planda veya taktik çalışmalar için kullanılan askeri araçlarda yüksek koruma özellikli zırhlar gerekli olmasa da kırmızı hatta görev yapan veya özel operasyonlara katılan araçların maksimum korumaya sahip ve düşük yoğunluklu zırhlarla donatılmış olması büyük önem arz etmektedir. Askeri araçlarda balistik koruma çalışmaları üç ana alanda yürütülmektedir: kara araçları, deniz araçları ve hava araçları. Bu çalışmada daha çok kara araçları üzerinde durulacaktır.

Sürekli gelişen teknoloji sayesinde, malzeme bilimi ve mühendislik alanlarında geline son noktada birçok yeni üretim metoduyla beraber üstün özelliklere sahip birçok malzeme üretilerek insanlığın hizmetine sunulmaktadır. Üretilen bu

malzemeler ile yaşamın her alanında olduğu gibi balistik alanında da büyük atılımlar gerçekleştirilmektedir. Özellikle son yıllarda üretimi gerçekleşen kompozit malzemeler ile yüksek korumalı ve düşük yoğunluklu zırhlar üretilebilmektedir. Bu durum özellikle askeri araçların manevra kabiliyetlerinin kısıtlanmaması açısından büyük bir öneme sahiptir. Ayrıca çok parçalı zırh sistemleri sayesinde hasar alan bölge anlık müdahaleler ile değiştirilerek oluşan güvenlik zafiyetleri ortadan kaldırılabilmektedir.

3.1.Araç Zırhı Uygulamalarında Kullanılan Malzemeler

3.1.1.Metal Malzemeler

Zırh uygulamalarında yaygın olarak kullanılan dört metal malzeme bulunmaktadır: çelik, alüminyum ve alaşımları, titanyum ve magnezyum (Hazell, 2023). Bu alanda en çok kullanılan metal malzeme ise çeliktir. Keşfi, ucuz maaliyeti ve işlenebilirliği ile çok fazla tercih sebebi olmuştur. Özellikle I. Dünya Savaşı sırasında kullanılan tanklarda zırh malzemesi olarak (5-10 mm kalınlıklarında) dökme çelik kullanılmıştır. Her ne kadar II. Dünya Savaşı döneminde zırh malzemesi olarak haddelenmiş çelik (50-60 mm kalınlıklarında) kullanılmaya başlansa da 1970'lere kadar düşük üretim maliyetine ek olarak üretim çeşitliliği ve üretim kapasitesi gibi sebeplerden ötürü dökme çelik kullanılmaya devam etmiştir (Ash, 2016).

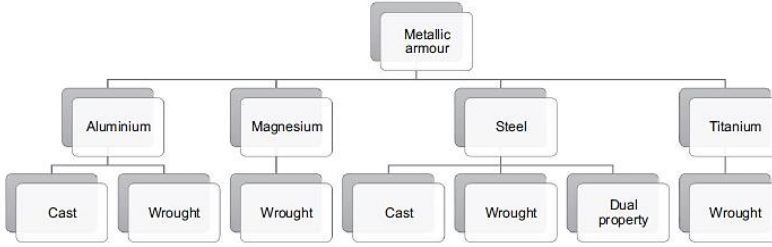
Şekil 1. (a) I. Dünya Savaşında Kullanılan Bir Tank

(b) II. Dünya Savaşında Kullanılan Bir Tank



Özellikle tank gibi ağır askeri araçlarda kullanılan zırh plakaları 100 mm kalınlığa kadar düşük alaşımlı çelikten üretilmektedir. Bu çelik plakalar 1½% CrNiMo BS970 - 709M40 sınıfı (EN19), su verme ile sertleştirilmiş ve UTS (çekme dayanımı) 850 MPa seviyesine kadar tamamen temperlenmiştir. 100 mm'den kalın levhalar için ise yine düşük alaşımlı (1½%NiCrMo BS970 - 817M 40 kalite (EN24)), su verme ile sertleştirilmiş ve tam temperlenmiş çelik malzemeler tercih edilmektedir (Doig, 2002).

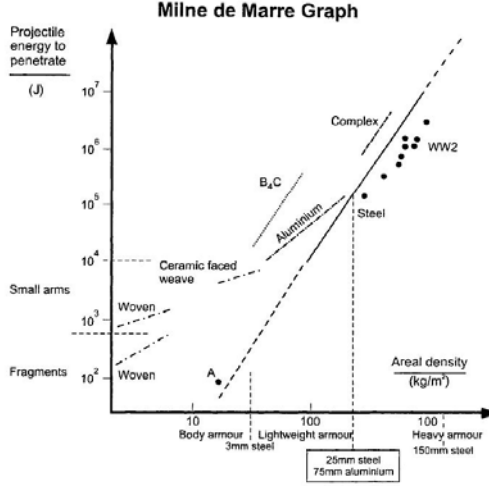
Şekil 2. Zırh Uygulamalarında Kullanılan Metallerin Sınıflandırılması



Kaynak: (Hazell, 2023)

Hızla gelişen teknoloji ve artan ihtiyaçlar doğrultusunda araç koruma düzeylerini arttırabilmek ve özellikle de araç ağırlıklarını belirli bir seviyede kontrol altında tutabilmek için 20.yy'ın ortalarından itibaren alüminyum alaşımlı balistik malzemeler kullanılmaya başlanmıştır (Bao et al., 2021). Alüminyum ve alaşımları da zırh yapımında en çok tercih edilen ikinci malzemedir.

Şekil 3. Çeşitli Zırh Malzemelerinin KE Penetrasyonunu Gösteren Milne de Marre Grafiği



Kaynak: (Doig, 2002)

Alman araştırmacı Alfred Wilm'in yürüttüğü çalışmalar esnasında alüminyum alaşımlarının ısıtma işlemi görmeye yeteneğini bir tesadüf sonucu keşfetmesi ile alüminyum alaşımlı zırh çalışmaları da başlamıştır. Alfred Wilm yaptığı bilimsel çalışmalar sonucunda diğer malzemelere kıyasla yüksek mukavemet-ağırlık oranı, tokluk ve yorulma direncine sahip yaşlanmaya bağlı sertleştirilebilen bir alaşım olan “**duralumin**”i geliştirmiştir. Duralumin durable ve aluminium kelimelerinden türetilmiş olup *dayanıklı alüminyum* anlamına gelmektedir(Wikipedia, n.d.). Bu malzeme beklenenden çok daha hızlı bir şekilde uçak endüstrisi ve zeplinlerde kullanılmaya başlanmıştır. 2017 olarak adlandırılan bu alaşım 2xxx serisi alüminyum alaşımlarının atası olarak kabul edilmektedir. Bu keşfin ardından yapılan geliştirme çalışmaları sonucu alüminyum-magnezyum-silikon'dan oluşan 6xxx serisi alaşımlar, yine alüminyum-magnezyum-bakır'dan oluşan 2xxx serisi alaşımlar ve alüminyum-

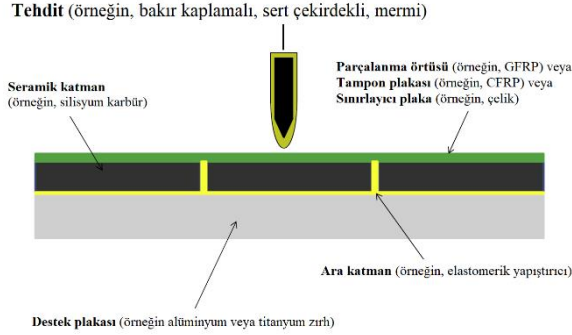
magnezyum-çinko'dan oluşan 7xxx serisi alaşımlar üretilmeye başlanmıştır (Macar, 2014).

Düşük özgül ağırlıkları ve uygun maliyetleri ile titanyum (Ti) ve alaşımları, sahip oldukları mükemmel mekanik, balistik ve korozyon özellikleri ile zırh yapımında tercih edilen bir başka önemli malzemedir (Wang et al., 2015). Bu alanda özellikle Ti-6Al-4V (Ti-64) alaşımı yüksek özgül mukavemeti, mükemmel korozyon direnci ve yüksek kütle verimliliği nedeniyle balistik testlerde önemli bir ilgi görmektedir. Titanyum elementi ve alaşımlarının sahip oldukları bu yüksek balistik performansın dinamik deformasyon davranışları ve adyabatik kesme bantlarının oluşumu ile ilişkili olduğu bilinmektedir (Lee et al., 2005). Titanyum alaşımlara uygulanan bir dizi ısıtıl işlem sayesinde mekanik özelliklerinde dolayısıyla da balistik özelliklerinde artış sağlanmaktadır. Tüm bu özelliklerinden ötürü titanyum ve alaşımları özellikle hava ve uzay araçları ile sıcak temas kurulan bölgelerde kullanılan askeri araçlarda çok fazla tercih edilmektedir.

3.1.2. Seramik Malzemeler

Seramik malzemeler zırh yapımında kullanılan en önemli materyallerden biridir. Metalik ve kompozit zırhlardan farklı olarak, seramikler genellikle izotropiktir, bu da seramik malzemelerle yapılan çalışmalarda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu avantajlarının yanında kırılğan (gevrek) malzemeler olması ve bazı ilginç hacim özelliklerine yol açan önceden var olan üretim kusurları içermeleri sahip oldukları bazı dezavantajlarıdır (Deans, 2017).

Şekil 4. Hafif Seramik Kompozit Bir Zırhın Örnek Kesit Şeması



Kaynak: (Deans, 2017)

Seramik katmanlı zırhlar, ilk uygulamalarda sadece kurşungeçirmez yelekler ve helikopterlerdeki koltuk zırhlarının üretimi için geliştirilmiştir. Günümüzde ise seramik zırhlar esas olarak askeri kuvvetlerde ve taktik polis ekiplerinde personel ve araç balistik koruması, uçak ve helikopterlerin bazı kritik parçalarının korunması ve kara mayınlarına karşı patlama koruması için kullanılmaktadır. Seramik malzemeler zırh uygulamalarında, öncelikle hafif zırh sistemlerinde küçük silahlara ve makineli tüfek tehditlerine karşı koruma sağlamak için kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistemlerin tasarımı tipik olarak seramiğin mermiyi deforme etmek için yeterli sertliğe sahip olmasına ve arkasına eklenecek uyumlu bir katmanın mermi döküntülerini ve hasarlı seramik malzemeyi yakalama yeteneğine dayanmaktadır (Bless et al., 2002).

Balistik koruma için farklı özelliklere sahip seramik malzemeler kullanılır; bunlar arasında bazı oksit seramikler (çoğunlukla farklı Al_2O_3 içeriklerine sahip alümina seramikler) ve oksit olmayan seramikler (çoğunlukla karbürler, nitrürler, borürler ve bunların kombinasyonları) bulunmaktadır. Seramik zırh sistemleri genellikle, balistik naylonla kaplanmış monolitik seramik veya kompozit seramik-metal bir gövdeden oluşmaktadır. Diğer bir yaygın uygulama olarak Kevlar™,

Twaron™, Spectra™, Dyneema™ gibi yüksek çekme mukavemetli bir fiber astar veya lamine polietilenle birleştirilerek elde edilen polimer katman daha sonra seramik veya seramik-metal kompozitin arkasına yerleştirilmektedir (Medvedovski, 2010).

3.1.3. Fiber Malzemeler

Fiber malzemeler genellikle balistik yelek üretiminde kullanılan mühendislik malzemeleridir. Balistik yelek, kurşun geçirmez yelek veya bir başka deyişle vücut zırhı yeleği olarak da bilinen koruyucu ekipman, mermi çekirdeğinin etkisini absorbe eden ve bunun sonucunda merminin gövdeye nüfuz etmesini azaltan veya durduran bir vücut koruma ekipmanıdır. Balistik uygulamalarda kullanılan başlıca fiber(elyaf) türleri mineral (karbon fiber, cam fiber ve bazalt fiber), organik (aramid elyaf, polietilen elyaf, para-fenilen benzobisoksazol-PBO elyaf) ve doğal (jüt elyaf, Curaua elyaf, Ramie elyaf) elyaflardır (Barhoumi et al., 2023) Tablo 1’de balistik uygulamalarda kullanılan bazı elyafların mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Bazı Organik Elyaf Türlerinin Fiziksel ve Mekaniksel Özellikleri

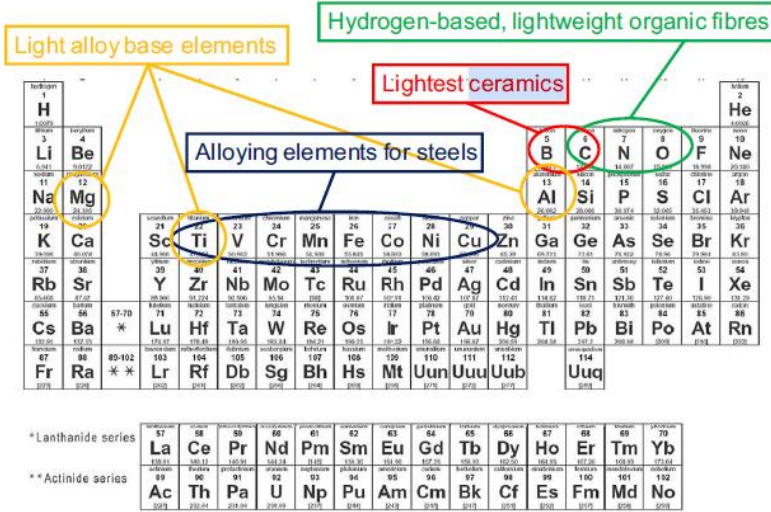
Fiber	Density (g/m ³)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Strain to failure (%)
Kevlar	1.43–1.47	2965–3300	70–113	2.6–4.2
Nomex	1.38	330–630	140	22
Technora	1.39	3400	72	4.3
Twaron	1.44	2400–3600	70–110	3.6
Dyneema	0.97	3600	110	3.5
Spectra	0.97	3400	117	2.7–3.6
PBO	1.54–1.65	5800	180–270	2.5–3.5

Kaynak: (Barhoumi et al., 2023)

Aramid elyaf takviyeli fenolik-poli-vinil-bütiral reçinesi ve 0°/90° çapraz katlı yönlendirilmiş polietilen elyaf takviyeli vinil-ester reçinesi esaslı zırh sınıfı kompozit laminatlar, özellikle patlayan mühimmatlardan kaynaklanan parçalara karşı koruma sağlamak amacıyla sert personel zırh sistemlerinde

(örneğin koruyucu kasklar) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, fiber takviyeli bu kompozitler hafif zırhlı araçlarda, helikopterlerde, devriye botlarında ve mobil barınaklarda balistik koruma amacıyla giderek daha fazla kullanılmaya başlanmıştır (Grujicic et al., 2009). Şekil 5'te zırh yapımında kullanılan malzemelerin periyodik tablodaki gösterimi verilmiştir.

Şekil 5. Zırh Yapımında Kullanılan Malzemeler Gösteren Periyodik Tablo



Kaynak: (Crouch, 2017)

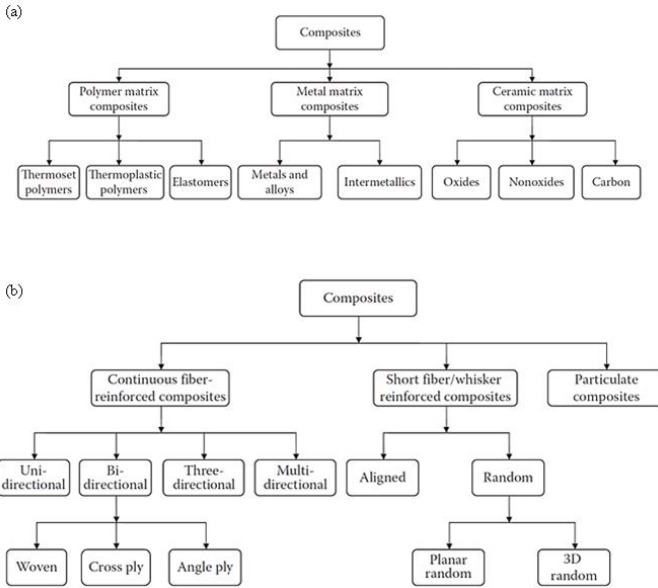
3.1.4. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme, iki veya daha fazla malzemenin makro yapıda bir araya getirilmesiyle oluşturulan ve kendine özgü üstün mekanik ve kimyasal özelliklere sahip yeni malzemeye verilen addır (Bitlisli, 2019). Kompozit malzemelerde amaç bir malzemenin tek başına karşılayamadığı mekanik özelliklerini (mukavemet, tokluk, elastisite vb.) birkaç malzemeyi belirli fazlarda birleştirerek sağlamaktır, böylece

daha dayanıklı ve üstün özelliklere sahip yeni bir malzemenin ortaya koyulmasıdır.

Kompozit malzemeler, matris ve takviye malzemeleri olmak üzere temel iki yapıdan oluşmaktadır. Takviye malzemesi olarak adlandırılan malzemeler genelde taşıyıcı görevi üstlenir. Matrisin görevi ise, fiziksel olarak ayrı parçalar halindeki takviye fazını/fazlarını birleştirerek bir arada tutmak, dış etkilere karşı korumak ve dış yüklemeleri takviye fazına iletmektir. Bu yüzden matris ile takviye fazı arasındaki bağ mukavemetinin kuvvetli olması gerekmektedir. Şekil 6'da matris ve takviye elemanına göre kompozit malzemelerin sınıflandırması verilmiştir.

Şekil 6. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması (a)Matris'e Göre (b)Takviye Elemanına Göre



Kaynak: (Vijay, Rajkumara, & Bhattacharjee, 2016)

Tablo 2’de kompozit yapısında yer alan matris ve takviye elemanının görevleri ile kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları özet olarak verilmiştir.

Tablo 2. Kompozit Malzemelerde Yapı Elemanlarının Görevleri ile Kompozitlerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozit yapı elemanının görevleri		Kompozit malzemelerin üstünlük ve sınırlı yönleri	
Matris	Takviye elemanı	Avantaj	Dezavantaj
Kompozit parçaya şeklini vermek	Kompozite dayanım, rijitlik ve diğer üstün mekanikler sağlamak	Düşük yoğunluk, yüksek spesifik dayanım ve yüksek spesifik sertlik, yüksek kırılma dayanımı ve düşük termal genleşme	Malzeme maliyetinin fazla olabilmesi
Takviye elemanlarını çevresel etkilerden korumak	Termal genleşme katsayısı, iletkenlik ve termal taşınım gibi özellikleri belirlemede önemli rol oynamaktadır	Anizotropik yapı, karmaşık şekillerde üretim kolaylığı, parçalı üretim ile düşük maliyet,	Belirlenmiş tasarım kurallarının eksikliği (metal ve kompozit tasarımları nadiren değiştirilebilir) Uzun geliştirme süreleri
Takviye elemanına yük aktarmak		Kolay bağlanabilirlik	Birleştirici vida/cıvata v.b. varlığı/maliyeti
Tokluğu artırmak			Solvent/nem etkisi, kullanım sıcaklığının sınırlı olması. Gizli hasarlar (iç çatlak v.b.)

Tablo 3'te ise zırh yapımında kullanılan bazı malzemelerin sağladığı yararlar ve sınırlayıcı yönleri verilmiştir.

Tablo 3. Zırh Yapımında Kullanılan Bazı Malzemelerin Karşılaştırılması

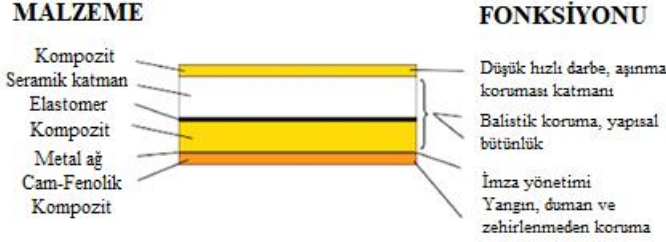
MALZEME	FAYDALARI	DEZAVANTAJLARI
Yüksek sertlikte çelik	Düşük maliyet, düşük hacim, iyi çoklu vuruş performansı	Ağır
Delikli çelik	Hafif, sağlam, iyi çoklu vuruş performansı	Büyük hacimli gereksinim
Yüksek mukavemetli metal alaşımları (Ti, Al)	İşlenebilir, orta maliyetli, çok yönlü kullanım	Çelikten daha büyük hacimli,
Alumina seramik	Hafif, düşük hacimli	Zırh efektlerinin arkasındaki artış
Silisyum karbür seramik	Yüksek dereceli Zırh Delici (AP) mühimmata karşı oldukça etkili	Çok pahalı, çoklu vuruşlara karşı zayıf
Cam takviyeli plastik	Hafif, düşük maliyetli	Zırh delici (AP) mermilere karşı etkili değil
Aramid	Hafif	Zırh delici (AP) mermilere karşı çok zayıf
Polietilen	Çok hafif	Yüksek maliyet

Kaynak: (Alankaya, 2015)

3.2.Araç Zırhı Uygulamaları

Araçlara yönelik tasarlanan zırh sistemlerinde dikkat edilmesi gereken bazı önemli hususlar vardır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir; aracın büyüklüğü, aracın karşılaşması muhtemel tehdit veya tehditler ve en az bunlar kadar önemli olan aracın kaldırabileceği maksimum zırh ağırlığı. Kişisel kullanım için tasarlanan zırhlarda olduğu gibi araç zırhları da genellikle malzeme katmanlarının karmaşık bir şekilde sıralanmasından oluşmaktadır ve her katman genel koruma programında farklı ve önemli bir rol oynamaktadır (Thomas, 2011).

Şekil 7. Araç Zırhlarının Katmanları ve Bu Katmanların Görevlerinin Şematik Gösterimi



Kaynak: (Thomas, 2011)

Zırh tasarımı, zırhın koruma seviyesi, performans durumu ve ağırlığı dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Ağırlık, zırhlı aracın manevra kabiliyetini, hızlanmasını ve yakıt tüketimini de etkilediği için dolayısıyla aracın operasyonel menzili ile de doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, zırh tasarımında mümkün olduğunca hafif ve en üst düzeyde koruma sağlayan zırh modellerini geliştirmek öncelikli hedeftir (Alankaya, 2015).

Konsept araç zırhı tasarım çalışmaları araç içerisindeki yolcu kabinlerinin ve personel taşıma veya silah koyma amaçlı bırakılması planlanan boş alanların belirlenmesiyle başlamaktadır. Ana bölme, şasinin ön cephesini ve aksların yerlerini belirlerken, tırmanma kabiliyetini kısıtlayan şasi ön açısı ve yerden yükseklik kararları hakkında ön bilgilendirme yapacak şekilde tanımlanmıştır. Ön konsept çalışmalarında dikkat edilmesi gereken bir başka husus pencere ve kapı bağlantı noktaları gibi olası sorun yaşanabilecek yerlerin özellikle ele alınarak çok dikkatli bir tasarım yapılması gerektiği gerçeğidir (Alankaya, 2015).

Bir aracın ne kadar düzgün ve profesyonelce zırhlandığını belirlemedeki bir diğer önemli nokta aracın ağırlık merkezinin (center of gravity) dönüşümden önce ve sonra doğru bir şekilde ölçülmesi ve yerinin belirlenmesi işlemidir. Bu

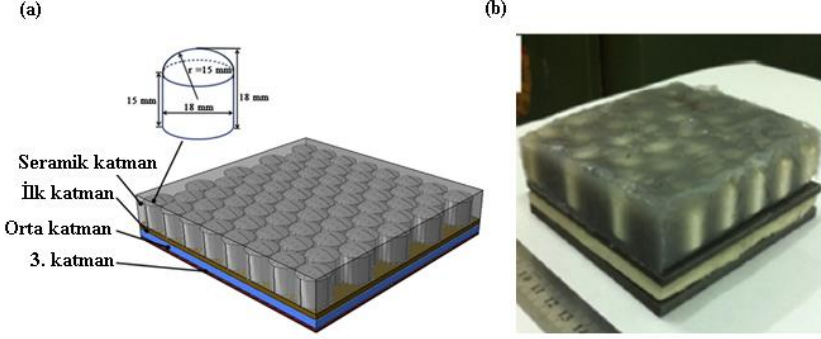
noktadaki amaç, araç ister asfaltta ister arazide kullanılsın kullanıcılara en istikrarlı zırhlı aracı sunarken en iyi performansı ve kullanımı elde etmektir (*Alpine Armoring, Design & Engineering*, 2024).

3.2.1. Eklemeli (Add-on) Zırh Tasarımı

Eklemeli zırh tasarımları balistik alanında yeni bir oluşuma ışık tutmuş, farklı bir bakış açısını yansıtan uygulamalardır. Eklemeli zırhlar yeni bir koruma felsefesini temsil ettiklerinden farklı savunma seviyelerini ifade etmek için tasarlanmış ayrı ayrı kitlerden oluşan bir sistem olarak karşımıza çıkmaktadır. Kompozit eklemeli zırhların amacı, aracın mevcut yapısına ekstra bir savunma katmanı sağlayarak, saldırılara karşı dayanıklılık ve korunma kabiliyetini güçlendirmektir (Watcharamaisakul et al., 2023). En önemli avantajlarından bir tanesi zırh paneli ve aracın ayrı ayrı taşınmasıdır. Gerekli durumlarda mürettebat tarafından araç gövdesine vidalanmak veya yapıştırılmak suretiyle aktif hale getirilebilen bu zırhlar kolayca onarılabilir ve değiştirilerek koruma seviyesi yükseltilebilmektedir (Sánchez Gálvez & Sánchez Paradela, 2009).

Askeri araçlarda kullanılmak üzere belirlenen ve eklemeli kompozit zırhlarda kullanılan malzemeler, belirli tehditlere dayanma ve onların üstesinden gelme yeteneklerine göre seçilmektedir. Eklemeli kompozit zırhlarda yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında seramikler, kinetik enerjiyi absorbe etme yeteneği yüksek olan malzemeler, yüksek sertlikte çelik ve fiber takviyeli malzemeler bulunmaktadır (Liu et al., 2016).

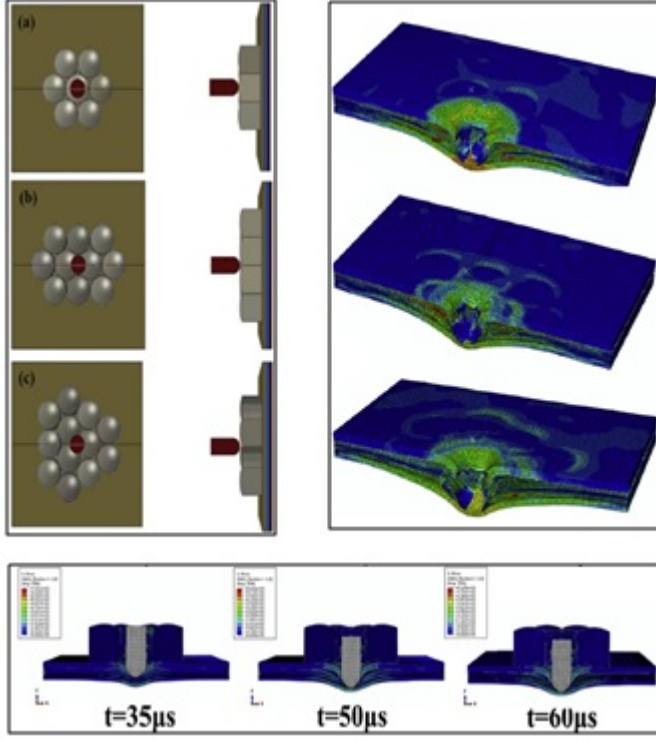
**Şekil 8. Eklemeli Zırh Sistemlerinde Kullanılan Kompozit Zırh
Tasarımına Bir Örnek (a) Şematik Gösterim (b) Aynı Panelin
Üretilmiş Hali**



Kaynak: (Liu et al., 2016)

Eklemeli zırhların tasarımı, malzeme seçimi, farklı malzeme kalınlıkları, darbe eğimi, toklukları, mukavemetler gibi çok sayıda parametrenin göz önünde bulundurulması gerektiğinden dolayı karmaşık ve zor bir iştir. Bu nedenle, yalnızca deneysel testlere dayalı bir zırh tasarımı uygulaması, para ve zaman açısından yüksek maliyetli olacaktır. Söz konusu yüksek maliyet ve zaman kaybının önüne geçmek için zırh tasarımcıları, deneysel deneme ve test aşamalarından önce çeşitli analiz programlarında (Abaqus/Explicit, ansys vb.) gerçeğine yakın simülasyonlar yaptıktan sonra istenilen amaca en uygun malzemeleri bir araya getirerek oluşturdukları numunelere balistik testler uygulamakta ve test sonuçları ile simülasyon sonuçlarını karşılaştırarak en uygun zırh tasarımı yapmayı hedeflemektedirler. Şekil.9’da bir eklemeli kompozit zırh uygulamasına ait simülasyon çalışmasının ekran görüntüleri verilmiştir.

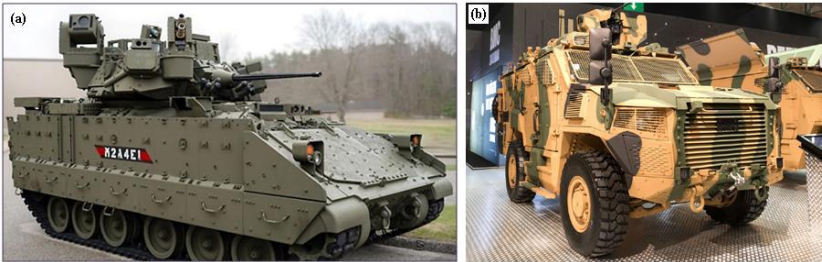
**Şekil 9. Abaqus Programında Yapılmış Bir Simülasyon
Örneğinden Ekran Görüntüleri**



Kaynak: (Liu et al., 2016)

Eklemeli zırh uygulamasının askeri araçlarda kullanıldığı uygulamalara ait fotoğraflar Şekil.10’da verilmiştir.

**Şekil 10. (a) Amerika Ordusuna Ait Eklemeli Zırhlı Bir Araç
(AMPV) (b) Türk Ordusu’nun Envanterinde Bulunan Yerli
Kompozit Zırhlı Araç (VURAN)**

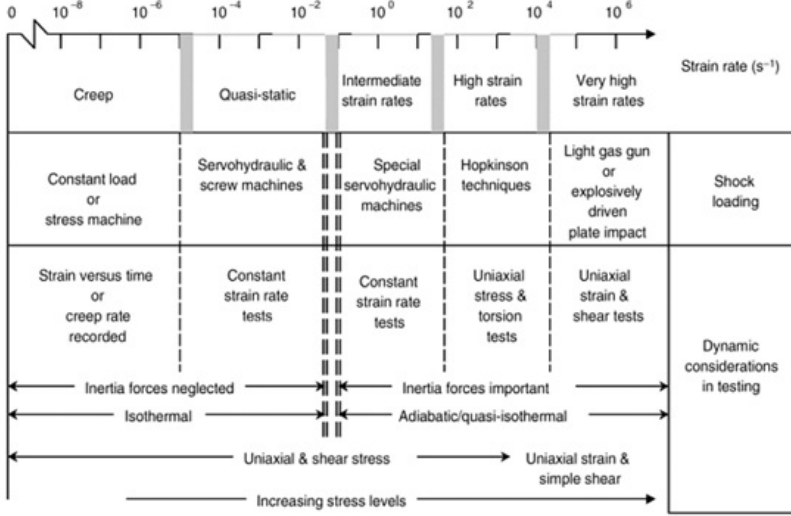


4. BALİSTİK TESTLER

Balistik testler zırh üretiminde kullanılacak balistik materyallerin özelliklerinin belirlenmesi ve geliştirilmesi ile ilgili ilk uygulamalardan, sahaya sürülen zırhların kullanım ömrü sonu testlerine kadar uygulanan ve zırhın tüm yaşam döngüsünü içeren testlerdir (Cronin et al., 2016). Mühendislik uygulamalarında kullanılan malzemelerin çeşitli yükler altında ne tür davranışlar göstereceklerini test ederek tasarımı ona göre yapmak uygulamanın başarısı açısından son derece önemlidir. İnsan hayatının gelecek tehditlere karşı en üst seviyede korunmasını hedefleyen balistik zırh tasarım ve üretim alanlarında kullanılacak malzemelere uygulanacak balistik testler daha da büyük önem arz etmektedir. Herhangi bir malzemenin temel karakteristik özelliklerini (akma, çekme, basma, tokluk, elastisite vb.) belirlemek için yapılan testlerde uygulanan (malzemenin maruz bırakıldığı) yük miktarı, yükün uygulama hızı, temas anındaki sıcaklık gibi parametreler balistik testlerde malzemelerin maruz kalacağı değerlerden çok daha düşüktür. Dolayısıyla mühendislik malzemelerinin düşük deformasyon hızları altındaki mekanik davranışları ile yüksek deformasyon hızları altındaki davranışları kesinlikle aynı olmayacaktır.

Şöyle ki, deformasyon hızında meydana gelen artış ile malzemelerin akma dayanımları, süneklikleri, deformasyon sertleşmesi vb. gibi mekanik özelliklerinde önemli oranda değişiklikler olduğu bilinmektedir (Şimşek, 2011). Şekil.11’de birim deformasyon hızına göre deneysel koşullar ve ilgili rejimler verilmiştir.

Şekil 11. Birim Deformasyon Hızı (Strain Rate) Rejimleri, İlişkili Araçlar ve Deneysel Koşullar



Kaynak: (Nemat-Nasser, 2000)

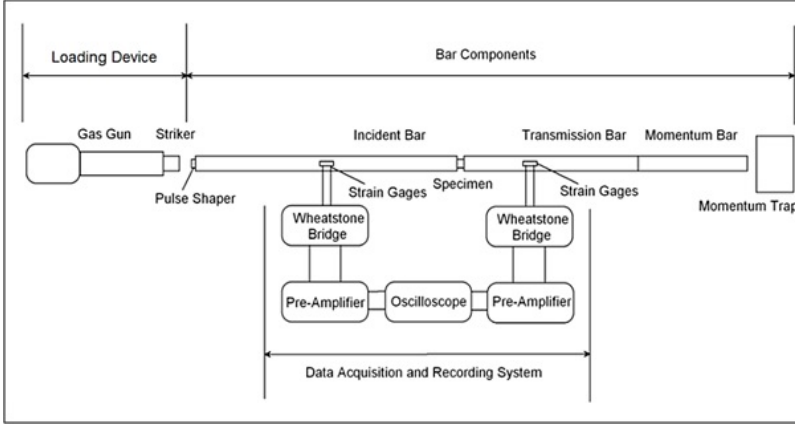
Balistik uygulamalarda kullanılacak malzemelerin bilinen tipik davranışlarının dışında yüksek gerinim altında nasıl davranacaklarının belirlenmesi ve zırh tasarımlarının bu doğrultuda yapılması gerekmektedir. Bunun için alışlagelmiş testlerin (basma, çekme, çentik testleri vb.) dışında numuneleri yüksek hızlarda, basınçlarda ve sıcaklıklarda sınayacak metotlar uygulanmalıdır.

Balistik malzemelere uygulanan testler temel olarak iki aşamadan oluşur. İlk olarak kompozit zırh yapımında kullanılacak malzemelerin yüksek gerinim altındaki davranışlarını incelemek ve dinamik özelliklerini ortaya koyma adına malzemeler teker teker testlere tabi tutulurlar. Bu testler sonucunda elde edilen veriler malzemelerin yüksek gerinim, yüksek sıcaklık, yüksek basınç gibi normal dışı şartlar altında karakteristik özellikleri hakkında bilimsel değerler veren Johnson Cook ve Johnson Holmquist parametreleridir.

Viskoplastik mukavemet modellerinden en çok kullanılan Johnson – Cook mukavemet modelidir. Metal malzemelerin özelliklerini belirlemede kullanılan bu model, malzemenin akma mukavemeti ve pекleşme özelliklerini, yüksek şekil değıştirme hızındaki ve yüksek sıcaklıktaki davranışlarını ifade eden üç ana çarpan ve beş parametreden oluşmaktadır. Belirtilen parametreler çeşitli testler ile belirlenmektedir. Standart statik (çok düşük deformasyon hızlarında) çekme ve basma testleri ile malzemenin akma mukavemeti ve pекleşme özellikleri kolaylıkla belirlenebilmektedir. Çekme testlerinin belirlenen yüksek sıcaklık ortamında gerçekleştirilmesi ile yüksek sıcaklıkla ilgili parametre tespit edilmektedir. Seramik malzemeler için ise bu parametreler Johnson Holmquist hata modeli ile belirlenmektedir. Malzemenin yüksek şekil değıştirme hızındaki davranışı ise özel bir test düzeneğı olan Split Hopkinson Pressure Bar (Kolsky Bar) dinamik test düzeneğı ile tespit edilmektedir (Yegin, 2013).

Split Hopkins Pressure Bar Test düzeneğinin orijinal versiyonu dinamik sıkıştırma deneyleri için tasarlanmıştır. Bu düzeneğinin orijinal ilk hali 1949 yılında Herbert (Harry) Kolsky tarafından kurulan ve sıkıştırma mantığıyla çalışan düzenektir. Kolsky bu düzeneğı John Hopkinson (1849-1898) ve oğlu Bertram tarafından geliştirilen ve Bertram Hopkinson tarafından 1914 yılında hayata geçirilen düzenekten esinlenerek tasarlamıştır. Bu yüzden onların anısına düzeneğın son haline Split Hopkinson Pressure Bar ismini vermiştir (Chen & Song, 2011).

Şekil 12. Split Hopkinson Basınç (Kolsky) Barı Test Düzeneği



Kaynak: (Chen & Song, 2011)

Kolsky Bar test düzeneğini diğer geleneksel malzeme test yöntemlerinden ayıran çok önemli iki özelliği vardır. Bunlardan birincisi, nispeten küçük çaplı Kolsky çubuğunun, hidrolik veya vidalı test makinelerinde tipik olarak görülen büyük yükleme eksenli sertliğinin aksine, numuneden çok daha sert olmamasıdır. Fark yaratan diğer özellik ise Kolsky çubuğunun, numuneye uygulanan yükleme koşullarının gerçek zamanlı izlenmesi ve ayarlanması için kapalı devre geri besleme kontrol sistemine sahip olmamasıdır (Chen & Song, 2011).

Kolsky Bar test düzeneği Şekil.13'te görüldüğü üzere temel olarak üç bölümden oluşur. Bunlar, etki dalgasını yaratan bir yükleme bölümü (genellikle gaz itişli etki yaratan bir mekanizma kullanılır), numunenin yerleştirildiği çubuklardan oluşan bölüm ve gerekli verilerin elde edilmesini sağlayan bir veri toplama ve kaydetme bölümüdür. Split Hopkinson Basınç Barı düzeneği tek boyutlu dalga yayılımı prensibiyle çalışır. Vurucu (striker) giriş çubuğunun arayüzüne belirli bir hızla çarptığında, giriş çubuğunda (incident bar) sıkıştırma gerilimi/gerinim dalgası (olay dalgası, ϵ_i) oluşturur. Giriş çubuğunda oluşturulan bu dalga, giriş çubuğu boyunca yayılır ve

numuneyi sıkıştırma altında yükler. Dalga numuneye ulaştığında, olay dalgasının (ϵ_i) bir kısmı yansıyan dalga (ϵ_r) olarak giriş çubuğuna geri yansır; kalan dalga iletilen dalga (ϵ_t) olarak çıkış çubuğuna (transmission bar) iletilir. Çubuklara takılı gerinim ölçerler (strain gages) tarafından elde edilen sinyaller, test örneğinin gerinim hızını ($\dot{\epsilon}_s$), gerinim (ϵ_s) ve stresini (σ_s) hesaplamak için kullanılır (Gupta, 2021).

$$\dot{\epsilon}_s(t) = -\frac{2C_0}{L_s}\epsilon_r(t) \quad \epsilon_s(t) = -\frac{2C_0}{L_s} \int_0^t \epsilon_r(t) dt \quad \sigma_s(t) = E_b \frac{A_b}{A_s} \epsilon_t(t)$$

Verilen eşitliklerdeki C_0 - dalganın barda ilerleme hızı, E_b - çubukların elastisite modülü, L_s - numune boyu, A_b - çubukların kesit alanı ve A_s - numunenin kesit alanını ifade etmektedir.

Split Hopkinson Basıncılı Bar deneyinde elde edilen veriler ile metal malzemelerin yüksek gerinim/gerilim altında davranışı hakkında net bilgiler veren Johnson Cook Model parametreleri hesaplanmaktadır.

$$\sigma = [A + B\epsilon^n][1 + C\ln\dot{\epsilon}^*][1 - (T^*)^m]$$

Bu eşitlikte, σ gerçek gerilimi; ϵ ise gerçek gerinimi ifade etmektedir. A , B , C , n , m ise malzeme parametreleridir. ϵ^* eşdeğer gerinim oranının referans gerinim oranına bölünmesiyle hesaplanır. T^* ise homolog sıcaklığı temsil etmektedir. (Gupta, 2021) Malzeme parametreleri olan A , B , C , n , m değişkenlerinin değerleri mekanik testler ve Split Hopkinson Basıncı Barı testinden elde edilen veriler ile hesaplanmaktadır.

$$C = \frac{\frac{\sigma}{\sigma^0} - 1}{\ln \frac{\epsilon_p}{\epsilon_0}}$$

Örneğin C parametresi için uygulanan testler sonucunda elde edilen datalar yardımıyla bir grafik çizilir. Elde edilen bu grafiğin eğimi malzemenin C değişkenini vermektedir. m parametresi içinde ana formülde bu değişken yalnız bırakılarak elde edilen formül ışığında bir grafik çizilerek, grafiğin eğiminden ilgili parametre hesaplanır.

Zırhların performanslarını ölçmek için genellikle balistik sınır (V_{50}) ve delinmeye karşı direnç isimli iki tür test daha kullanılmaktadır. Balistik limit (V_{50}), bir zırhın delinme olasılığının %50 olduğu hızdır. Bu hız, istatistiksel prosedür kullanılarak belirli bir zırh ve belirli bir tehdit için hesaplanmaktadır. Delinmeye karşı direnç testi ise, tehdidin zırhı delmediğinden veya parçalamadığından emin olmak için önceden belirlenmiş bir hızda çok sayıda kez ateşlenmesinden oluşur (V_0). Bazen zırhın darbelerden kaynaklanan arka yüz deformasyonu gibi başka veriler de toplanır. Arka yüz deformasyonu, tehditten zırha, zırhın korumaya çalıştığı şeye ne kadar enerji aktarıldığına dair bir veri akışı sağlar. Bu genellikle yaralanma olasılığının bir göstergesi olarak kabul edilmektedir (Cronin et al., 2016).

Malzemelere uygulanan bu testlerin ardından çeşitli yazılımlarda sonlu elemanlar yöntemine göre simülasyonlar yapılmakta ve böylece düşünülen tasarımların beklenen etkiler karşısında nasıl bir davranış sergileyeceği tahmin edilmektedir. Yapılan bu ön hazırlıklar sonrasında test numuneleri hazırlanarak akredite olmuş balistik test laboratuvarlarında çeşitli hızlarda ve farklı mesafelerden atışlar yapılarak zırh test numunelerinin yüksek basınç, yüksek hız, yüksek sıcaklık altındaki davranışları tecrübe edilmiş olur. Son olarak simülasyon sonuçları ile gerçek test sonuçları karşılaştırılarak gerekli yorumlar ve düzeltme işlemleri yapılmaktadır. Şekil.13'te çeşitli balistik test düzenekleri verilmiştir.

Şekil 13. Çeşitli Balistik Test Düzenekleri



Kaynak: (Roketsan, 2024)

5. ULUSLARARASI KABUL GÖREN BALİSTİK STANDARTLAR

Zırh test yöntemlerine ve/veya standartlarına ihtiyaç duyulmasının temel nedeni gerçek bir tehdit altında zırhın balistik koruma performansının belirlenmesidir. Diğer taraftan ticari bir ürün olarak üretilen bir zırhın pazarlanması için gerekli yeterliliğe ve izinlere sahip olunması uluslararası kabul görmüş test standartlarına göre ilgili testlerden başarıyla geçtiğinin belgelendirilmesi gerekmektedir (Gotts, 2016).

Belirli standartlar çerçevesinde uygulanan testlerin ve dikkat edilmesi gereken standartların da bazen mutlak korumayı sağlamadığı durumlar olabilmektedir. Bunun nedenlerini aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz.

- Test senaryoları ile gerçek senaryolar arasındaki fark
- Tekrarlanabilirlik ve gerçeklik arasındaki denge/dengesizlik
- Uygun test mühimmatının ve cihazlarının mevcudiyeti/eksikliği
- Yüksek gerilim oranlı tehditlere karşı insan tepkisindeki değişkenlik
- İnsanlar ve test vekilleri (test mankenleri) arasındaki farklar

Balistik standartlar zırhlı araçların farklı bölümleri için ayrı ayrı belirlenmiştir. Bu alanda belirlenen uluslararası standartları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

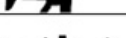
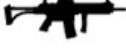
5.1.Transparent Zırh Malzemeleri İçin Belirlenen Standartlar (CEN BR 1063)

Avrupa Standardizasyon Komitesi tarafından kurşun geçirmez camın koruyucu gücünü ölçmek için oluşturulan EN 1063 veya CEN 1063 olarak bilinen bir güvenlik camı standardı vardır. Camlı bir kalkanın bu koruyucu gücü, dayanabileceği mühimmat türüne veya tehdit seviyesine göre derecelendirilmektedir. Bu nedenle, her biri farklı bir küçük silah ateşi türüne karşılık gelen yedi ana standart tehdit seviyesi vardır; BR1-BR7, ayrıca B1-B7 olarak da yazılır. Ek olarak, av tüfeği mühimmatlarına karşılık gelen iki başka tehdit seviyesi (SG1 ve SG2) daha vardır. Ancak, SG (av tüfeği) sınıfları BR sınıflarına uymak zorunda değildir (GmbH, 2024). Şekil.14'te BS EN 1063 standartlar tablosu verilmiştir.

Şekil 14. EN 1063 Transparent Malzemeler İçin Test Standartları Tablosu

BS EN 1063 (2000)

Test & Classification for Ballistic Security Glazing in Buildings

	Class Threat Level	Type of Weapon	Calibre	Ammunition	No of Shots	Velocity (m/s)	Test Range (m)	Spacing (mm)
	BR1	Rifle	.22 LR	L/RN	3	360 +/- 10	10	120 +/- 10
	BR2	Hand Gun	9mm Luger	FJ1/RN/SC	3	400 +/- 10	5	120 +/- 10
	BR3	Hand Gun	.357 Magnum	FJ1/CB/SC	3	430 +/- 10	5	120 +/- 10
	BR4	Hand Gun	.44 Rem Magnum	FJ2/FN/SC	3	440 +/- 10	5	120 +/- 10
	BR5	Rifle	5.56x45	FJ2/PB/SCP1	3	950 +/- 10	10	120 +/- 10
	BR6	Rifle	7.62x51	FJ1/PB/SC	3	830 +/- 10	10	120 +/- 10
	BR7	Rifle	7.62x51	FJ2/PB/HC1	3	820 +/- 10	10	120 +/- 10
	SG1	Shot Gun	12/70	Solid Slug 3	1	420 +/- 20	10	-
	SG2	Shot Gun	12/70	Solid Slug 3	3	420 +/- 20	10	125 +/- 10

Ammunition Legend:

L - lead

CB - coned bullet

FJ - full metal jacket bullet

FN - flat nose

HC1 - steel hard core

PB - pointed bullet

RN - round nose

SC - soft core (lead)

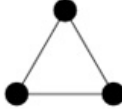
SCP1 - soft core (lead) and steel penetrator (type SS109)

Notes:

1) Full Steel Jacket (plated)

2) Full Copper Alloy Jacket

3) Brenneke 12G solid slug



Kaynak: (Arthitectoral Armour, n.d.)

5.2.Opak Zırh Malzemeleri İçin Belirlenen Standartlar (CEN FB 1522)

Standardın kodundaki "FB" kısaltması DIN EN 1522 standardında tanımlanmış olup zırh çeliği, kevlar, twaron, aramid, UHMWPE (Dyneema veya Spectra gibi Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen), seramik vb. opak malzemelerin koruma seviyesini belirtmek için kullanılmaktadır (GmbH, 2024). Tablo 4’de EN1522 Avrupa standart tablosu verilmiştir.

Tablo 4. Avrupa EN 1522 standartları

Class	Type of Weapon	Caliber	Type	Weight (g)	Test Range (m)	Bullet Velocity (m/s)
FE1	Rifle	.22 LR	Lead Round Nose	2.6± 0.1	10± 0.5	360± 10
FE2	Hand Gun	9mm Luger	Full Steel Jacket Round Nose Soft Core (Lead)	8.0± 0.1	5.0± 0.5	400± 10
FE3	Hand Gun	.357 Magnum	Full Steel Jacket Coned Bullet Soft Core (Lead)	10.2± 0.1	5.0± 0.5	430± 10
FE4	Hand Gun	.357 Magnum	Full Steel Jacket Coned Bullet Soft Core (Lead)	10.2± 0.1	5.0± 0.5	430± 10
	Hand Gun	.44 Rem. Magnum	Full Metal Jacket Flat Nose Bullet Soft Core (Lead)	15.6± 0.1	5.0± 0.5	440± 10
FE5	Rifle	5.56 x 45*	Full Metal Jacket Pointed Bullet Soft core (lead) and Steel Penetrator	4.0± 0.1	10± 0.5	950± 10
FE6	Rifle	5.56 x 45*	Full Metal Jacket Pointed Bullet Soft core (lead) and Steel Penetrator	4.0± 0.1	10± 0.5	950± 10
	Rifle	7.62 X51	Full Metal Jacket Pointed Bullet Soft Core (Lead)	9.5± 0.1	10± 0.5	830± 10
FE7	Rifle	7.62 x 51**	Full Metal Jacket Pointed Bullet Steel Hard Core	9.8± 0.1	10± 0.5	820± 10

Kaynak: (Armat Armour, n.d.)

5.3.VPAM Standartları

VPAM, 1999 yılında kurulan kurşungeçirmez malzeme ve yapıların test edilmesine ilişkin deneyim alışverişini teşvik etmek ve ortak kurallar geliştirmek amacıyla çok sayıda sertifikasyon merkezi tarafından Kurşun Geçirmez Malzemeler ve Yapılar Test Laboratuvarları Derneği (VPAM - Vereinigung der Prüfstellen für angriffshemmende Materialien und Konstruktionen'in)'nın kısaltmasıdır. Mellrichstadt, Münih, Ulm, Viyana ve diğer bazı Avrupa ülkelerinde VPAM kapsamında akredite edilmiş test merkezleri bulunmaktadır. VPAM'ın en büyük avantajı merminin kinetik enerjisine göre sıralanan ek sınıflardır, ancak VPAM sapma (yaw-yiv) açısını belirtmemektedir (Sapma açısı – merminin malzemeye temas ettiği zamanki eğiklik açısı). VPAM 2006 yılında, 14 koruma seviyesini tanımlayan ve malzemelerin, yapıların ve nesnelerin balistik testlerinin temeli olarak tasarlanan yeni bir standart olan APR 2006'yı tanıtmıştır (GmbH, 2024). Şekil.15'te VPAM APR standartlar tablosu verilmiştir.

Şekil 15. VPAM'ın APR 2006 Standartları Tablosu

Anwendung bei			Waffentyp (Beispiele)	Patrone	Angaben zur Prüfmunition				Auszüge aus den Prüfbedingungen		
Prüfstufen	VPAM	APR 2006			Kaliber	Art	Masse [g] Hülse [mm]	Hersteller / Typ	Schuss- entfernung [m]	Geschos- geschwindigkeit V [m/s]	Geschoss- energie [Joules]
1	VPAM 1	VPAM 1	StG 1	StG 1	22	LRN	2,60 ± 0,1	Winchester	10 ± 0,5	380 ± 10	188
2	VPAM 2	VPAM 2	StG 2	StG 2	StG 2	StG 2	8,00 ± 0,1	DAZ DM 41	5 ± 0,5	380 ± 10	518
3	VPAM 3	VPAM 3	StG 3	StG 3	StG 3	StG 3	8,00 ± 0,1	DAZ DM 41	5 ± 0,5	410 ± 10	680
4	VPAM 4	VPAM 4	StG 4	StG 4	StG 4	StG 4	10,20 ± 0,1	Geser	5 ± 0,5	430 ± 10	943
5	VPAM 5	VPAM 5	StG 5	StG 5	44 Rem. Mag.	FMJ/PSWC	15,80 ± 0,1	Speer	5 ± 0,5	440 ± 10	1510
6	VPAM 6	VPAM 6	StG 6	StG 6	307 Mag.	FMJ/PSWC	7,10 ± 0,1	DAZ Spezial	5 ± 0,5	580 ± 10	1194
7	VPAM 7	VPAM 7	StG 7	StG 7	7,62 x 39	FMJ/PSWC	8,00 ± 0,1 5,08 x 40	M 43	10 ± 0,5	720 ± 10	2074
8	VPAM 8	VPAM 8	StG 8	StG 8	308 Win. (7,62 x 51)	FMJ/PSWC	9,05 ± 0,1	MEN DM 111	10 ± 0,5	880 ± 10	3289
9	VPAM 9	VPAM 9	StG 9	StG 9	7,62 x 39	FMJ/PSWC	7,70 ± 0,1 5,08 x 40	B2	10 ± 0,5	740 ± 10	2108
10	VPAM 10	VPAM 10	StG 10	StG 10	308 Win. (7,62 x 51)	FMJ/PSWC	12,70 ± 0,2 6,40 ± 0,1	MEN/CBC FN 80	10 ± 0,5	820 ± 10	3281
11	VPAM 11	VPAM 11	StG 11	StG 11	7,62 x 54 R.	FMJ/PSWC	12,40 ± 0,1 6,40 ± 0,1	B 32	10 ± 0,5	880 ± 10	3846
12	VPAM 12	VPAM 12	StG 12	StG 12	308 Win. (7,62 x 51)	FMJ/PSWC	12,70 ± 0,2 6,40 ± 0,1	Hammo AP 8	10 ± 0,5	930 ± 10	3633
13	VPAM 13	VPAM 13	StG 13	StG 13	308 Win. (7,62 x 51)	FMJ/PSWC	12,70 ± 0,2 6,40 ± 0,1	Rug SWISS P AP	10 ± 0,5	870 ± 10	4198
14	VPAM 14	VPAM 14	StG 14	StG 14	30 Browning (12,7 x 40)	FMJ/PSWC	40,00 ± 0,5 12,7 x 40	Rug SWISS P	10 ± 0,5	930 ± 20	18565
					14,5 x 114	FMJ/PSWC	62,40 ± 0,5	B 32	10 ± 0,5	970 ± 20	20328

Beschussamt Ulm - Albstraße 74 - D-89081 Ulm

0731/96851-0 beschussamt@rpt.bwl.de www.beschussamt-ulm.de www.vpam.eu

Kaynak: (VPAM, 2015)

5.4.STANAG 4569 Standartları

NATO standardizasyon anlaşması tarafından yayımlanan “Lojistik ve Hafif Zırhlı Araçların Yolcuları İçin Koruma Seviyeleri” standartlarını kapsayan STANAG 4569 standardı, anlamlı karşılaştırma için farklı tehditleri birleştirmek amacıyla oluşturulan bir standarttır. STANAG 4569, sadece kinetik enerji ve topçu saldırılarının standartlarını değil aynı zamanda IED (Improvised Explosive Device - El Yapımı Patlayıcı) patlamalarını da kapsamaktadır. STANAG 4569 altı koruma seviyesi ile ifade edilmektedir (GmbH, 2024).

a) Seviye 1: 30 metre mesafeden 833 m/s hızla atılan 7.62 x 51 boyutunda NATO Topu (Top M80) etkisini inceleyen standarttır. Bu seviye patlamamış topçu parçalayıcı alt mühimmatları, el bombaları ve aracın altında patlatılan diğer büyük olmayan anti personel patlayıcı cihazları da içermektedir.

b) Seviye 2: 30 metre mesafeden 695 m/s hızla atılan 7.62 x 39 API BZ boyutundaki mühimmatın etkisini araştırır. Bu seviyedeki El Bombası ve Mayın Patlaması Tehdidi 6 kg patlayıcı kütle olarak kabul edilir ve aşağıdaki gibi alt seviyelere ayrılmaktadır:

- 2a, herhangi bir tekerlek veya palet konumu altında etkinleştirilen mayın patlama basıncıyla ilgilidir
- 2b – mayın patlaması merkez altında meydana geldiğinde söz konusudur.

c) Seviye 3: 30 metre mesafeden 7.62 x 51 AP (WC-tungsten karbür çekirdeğe sahip) büyüklüğünde ve 930 m/s hızla hedefi bulan mühimmat etkisini araştıran standarttır. Bu seviyenin el bombası ve mayın patlaması tehdidi 8 kg patlayıcı kütle içerir ve iki alt seviyeye ayrılır:

- 3a – herhangi bir tekerlek veya palet konumunun altında etkinleştirilen mayın patlamalarının basıncı
- 3b – merkezin altında mayın patlaması.

d) Seviye 4: 200 metreden 911 m/sn'de 14.5x114AP/B32 boyutundaki mühimmat etkisini incelemektedir. Bu seviyedeki topçu, 30 m mesafede 155 mm yüksek patlayıcı olarak kabul edilir. El bombası ve mayın patlaması tehdidi ile ilgili olarak, bu seviye 10 kg patlayıcı kütlesi gerektirir ve ayrıca iki alt seviyede incelenir:

- 4a- herhangi bir tekerlek veya palet konumunun altında etkinleştirilen mayın patlamasının basıncı
- 4b – merkezin altındaki mayın patlaması.

e) Seviye 5: 500 metre mesafeden 1258 m/s hızla atılan 25 mm APDS-T(M791) veya TLB 073'ün etkisini incelemektedir. Bu seviyedeki topların 25 m mesafede 155 mm yüksek patlayıcı güce sahip olması gerekmektedir.

f) Seviye 6: 500 metre mesafeden 1330 m/s hızla atılan 30 mm 173 APFSDS-T veya 810 m/s hızla atılan 30 mm AP-T veya 1250m/s hızla atılan 20mm FSP mühimmatlarının etkisini incelemektedir.

Şekil 16. STANAG 4569’a Göre Zırhlı Araçların Dayanıklılık Dereceleri

Article I.	Level	Article II. Weapons, ammunition and conditions	Article III. Fragments from 155 mm grenades, simulation with ammunition
	1	Assault rifles 7.62mm×51 NATO ball (833 m/s) 5.56mm×45 NATO SS109 (900 m/s) 5.56mm×45 NATO M193 (937 m/s) Distance 30 m, angle of incidence 0° to 30°	Distance 100 m, angle of incidence 0° to 18° 12.7mm: 310 m/s 20mm: 520 m/s
	2	Assault rifles 7.62mm×39 API BZ (695 m/s) Distance 30 m, angle of incidence 0° to 30°	Distance 80 m, angle of incidence 0° to 22° 12.7mm: 420 m/s 20mm: 630 m/s
	3	Assault and sniper rifles 7.62mm×51 AP WC (930 m/s) 7.62mm×54R B32 API (854 m/s) Distance 30 m, angle of incidence 0° to 30°	Distance 60 m, angle of incidence 0° to 30° 12.7mm: 560 m/s 20mm: 770 m/s
	4	Heavy machine guns 14.5mm×114 API/B32 (911 m/s) Distance 200 m, angle of incidence 0°	Distance 25 m, angle of incidence 0° to 90° 20mm: 960 m/s
	5	Automatic cannons 25mm×137 APDS-T PMB 073 (1258 m/s) Distance 500 m, angle of incidence 0°	Distance 25 m, angle of incidence 0° to 90° 20mm: 960 m/s
	6	Automatic cannons 30mm x 165 AP-T (810 m/s) 30mm x 173 APFSDS-T (1330 m/s) Distance 500 m, angle of incidence 0°	Distance 10 m, angle of incidence 0° to 90° 20mm: 1250 m/s
Note: Shot impact velocities are given. Tolerance ±20 m/s.			

Kaynak: (Coufal & Vnouček, 2022)

Şekil 17. STANAG 4569'a Göre Mermi ve Parçaların Darbe Enerjileri

Article V.		LEVEL 1		
Projectile / fragments	m [kg]	v [m.s ⁻¹]	Ed [J]	
5.56mm x45 M193	0.00356	937	1563	
5.56mm x45 NATO SS 109	0.004	900	1620	
7.62mm x 51 NATO Ball	0.00965	833	3348	
FSP 20mm	0.0538	520	7274	
LEVEL 2				
Projectile / fragments	m [kg]	v [m.s ⁻¹]	Ed [J]	
7.62mm x 39 API BZ	0.00777	695	1877	
FSP 20mm	0.0538	630	10677	
LEVEL 3				
Projectile / fragments	m [kg]	v [m.s ⁻¹]	Ed [J]	
7.62mm x 54R B32 API	0.01004	854	3661	
7.62mm x 51 AP (WC core)	0.0084	930	3633	
FSP 20mm	0.0538	720	13945	
LEVEL 4				
Projectile / fragments	m [kg]	v [m.s ⁻¹]	Ed [J]	
14.5mm x 114 API / B32	0.064	911	26557	
FSP 20mm	0.0538	960	24791	
LEVEL 5				
Projectile / fragments	m [kg]	v [m.s ⁻¹]	Ed [J]	
25mm x 137 APDS-T	0.13	1258	102867	
FSP 20mm	0.0538	960	24791	
LEVEL 6				
Projectile / fragments	m [kg]	v [m.s ⁻¹]	Ed [J]	
30mm x 165 AP-T	0.403	810	132204	
30mm x 173 APFSDS-T	0.23	1330	203424	
FSP 20mm	0.0538	1250	42031	

Kaynak: (Coufal & Vnouček, 2022)

KAYNAKÇA

- Alankaya, V. (2015). Success Story of Armored Multitask Vehicle Design. *Journal of Military and Information Science*, 3(1), 17. <https://doi.org/10.17858/jmisci.28673>
- Alpine Armoring, Design & Engineering*. (2024). <https://www.alpineco.com/design-engineering/>
- Armat Armour. (n.d.). *CEN 1522 Standards*. Retrieved August 31, 2024, from <https://armatarmor.com/ballistic-standards/cen-1522-standards/>
- Arthitectural Armour. (n.d.). *Bulletproof / Resistant Glass*. Retrieved August 31, 2024, from <https://www.architecturalarmour.com/security-products/security-glass/bullet-resistant-glass>
- Ash, R. A. (2016). Vehicle armor. In *Lightweight Ballistic Composites: Military and Law-Enforcement Applications: Second Edition*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100406-7.00009-X>
- Bao, Y., Gao, X., Wu, Y., Sun, M., & Li, G. (2021). Research progress of armor protection materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 1855(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1855/1/012035>
- Barhoumi, H., Bhouri, N., Feki, I., Baffoun, A., Hamdaoui, M., & Ben Abdessalem, S. (2023). Review of Ballistic Protection Materials: Properties and Performances. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 42(13–14), 685–699. <https://doi.org/10.1177/07316844221137920>
- Bartın Üniversitesi - Mühendislik Fakültesi- Kompozit Malzemeler Ders Notları*. (n.d.). <https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/d7ee7cd9-f063-4669-8e1c-393503ed6ffb/kompozitmalzemellersunu1giris.pdf>

- Bitlisli, B. (2019). *Zırhlı Araçlarda Kullanılan Kompozit Zırh Malzemelerinin Balistik Performanslarının İncelenmesi*. Uludağ Üniversitesi.
- Bless, S. J., Logan, K. V., Normandia, M., & Wax, S. (2002). *Ceramic Armor Materials by Design* (J. W. McCauley & A. Crowson (Eds.); Issue 112). The American Ceramic Society.
- Çelikel, A. (2008). *Av Tüfeği Namlu Uzunluğunun Saçma Dağılımına Etkisi Ve Atış Mesafesinin Belirlenmesinde Önemi*. Osmangazi Üniversitesi.
- Chen, W., & Song, B. (2011). *Split Hopkinson (Kolsky) Bar; Design, Testing and Applications*. Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7982-7>
- Coufal, V., & Vnouček, M. (2022). Ballistic Resistance of ARMOX Advance According to NATO Standard AEP-55 STANAG 4569. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1243(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1243/1/012002>
- Cronin, J., Kinsler, R., & Allen, J. (2016). Testing of Armor Systems. In *Lightweight Ballistic Composites: Military and Law-Enforcement Applications: Second Edition* (Issue 23558). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100406-7.00010-6>
- Crouch, I. G. (2017). Introduction to armour materials. In *The Science of Armour Materials*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100704-4.00001-3>
- Deans, M. (2017). The Science of Armour Materials. In *Woodhead Publishing in Materials* (Vol. 35, Issue 2). <https://doi.org/10.14429/dsj.35.6014>

- Doig, A. (2002). Military Metallurgy. In *Military Metallurgy*.
<https://doi.org/10.1201/9781003059400>
- GmbH, A. S. (2024). *Ballistic Standarts*. <https://www.aurum-security.de/en/standards/ballistic-standards>
- Gotts, P. (2016). International Ballistic and Blast Specifications and Standards. In *Lightweight Ballistic Composites: Military and Law-Enforcement Applications: Second Edition* (pp. 115–156). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100406-7.00005-2>
- Grujicic, M., Glomski, P. S., He, T., Arakere, G., Bell, W. C., & Cheeseman, B. A. (2009). Material Modeling and Ballistic-Resistance Analysis of Armor-grade Composites Reinforced with High-Performance Fibers. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 18(9), 1169–1182. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9370-5>
- Gupta, M. K. (2021). Numerical Simulation of AA7075 Under High Strain Rate with Different Shape of Striker of Split Hopkinson Pressure Bar. *Materials Today Communications*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102178>
- Hazell, P. J. (2023). *Armour: Materials, Theory and Design* (second). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003322719>
- Kriminal Daire Başkanlığı. (n.d.). *Balistik*. Retrieved August 11, 2024, from <https://www.egm.gov.tr/kriminal/balistikuzmanlik>
- Lee, D. G., Kim, Y. G., Nam, D. H., Hur, S. M., & Lee, S. (2005). Dynamic Deformation Behavior and Ballistic Performance of Ti-6Al-4V Alloy Containing fine α_2 (Ti₃Al) Precipitates. *Materials Science and Engineering:*

- A, 391(1-2), 221-234.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.08.076>
- Liu, W., Chen, Z., Cheng, X., Wang, Y., Amankwa, A. R., & Xu, J. (2016). Design and Ballistic Penetration of The Ceramic Composite Armor. *Composites Part B: Engineering*, 84, 33-40.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.071>
- Macar, M. (2014). *Investigation of Dynamic Behavior Of Aluminum Alloy Armor Materials*. ODTU (Doktora Tezi).
- Medvedovski, E. (2010). Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1. *Ceramics International*, 36(7), 2103-2115.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.05.021>
- Nemat-Nasser, S. (2000). Mechanical Testing and Evaluation. In *ASM International* (Vol. 8). ASM International.
- Özer, G. (2008). Dış Balistik Analizinde İzdüşüm Alanı Etkilerinin Araştırılması. In *Yüksek Lisans Tezi*. Kırıkkale Üniversitesi.
- Özgüder, O., Özbay, M., & Adin, H. (2017). Namı İçerik Balistik Davranışın Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 8(3), 609-620.
- Roketsan. (2024). *Balistik Testler Kataloğu*.
- Sánchez Gálvez, V., & Sánchez Paradela, L. (2009). Analysis of failure of add-on armour for vehicle protection against ballistic impact. *Engineering Failure Analysis*, 16(6), 1837-1845.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.09.007>
- Şimşek, Z. Ö. (2011). *Parçalı Hopkinson Basma Çubuğu Deney Düzenek Kurulumu*. İstanbul Teknik Üniversitesi.

- Thomas, E. L. (2011). Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications. In *Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13157>
- Tsirogiannis, E. C., Daskalakis, E., Hassan, M. H., Omar, A. M., & Bartolo, P. (2024). Ballistic design and testing of a composite armour reinforced by CNTs suitable for armoured vehicles. *Defence Technology*, 32, 173–195. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.04.013>
- Tsirogiannis, E. C., Daskalakis, E., Vogiatzis, C., Psarommatis, F., & Bartolo, P. (2024). Advanced composite armor protection systems for military vehicles: Design methodology, ballistic testing, and comparison. *Composites Science and Technology*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110486>
- Türk Dil Kurumu. (2024). *Zırh*. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Zırh>
- Vijay, N., Rajkumara, V., & Bhattacharjee, P. (2016). Assessment of Composite Waste Disposal in Aerospace Industries. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 563–570
- VPAM. (2015). *APR 2006*. <https://www.vpam.eu/pruefrichtlinien/aktuell/apr-2006/>
- Wang, Y. L., Hui, S. X., Liu, R., & Ye, W. J. (2015). Evaluation of Dynamic Performance and Ballistic Behavior of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr Alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 25(2), 429–436. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63620-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63620-2)
- Watcharamaisakul, S., Saidarasamoot, S., Chaiyarit, M., & Gositanon, A. (2023). *Ballistic Simulation and*

Experimental Test of 14.5 mm Armor Piercing Projectile Impact on Composite Add-On Armor with A Double-Layered High Hardness Steel. 6(1), 353–360.

Wikipedia. (n.d.). *Duralümin*. Retrieved August 28, 2024, from <https://tr.wikipedia.org/wiki/Duralümin>

Wikipedia. (2024). *Vehicle Armour*. https://en.wikipedia.org/wiki/Vehicle_armour

Yegin, M. B. (2013). *High Strain Rate Characterization of Engineering Materials* (Issue June). Istanbul Technical University.

Yıldırım, P. D. O., Ögel, P. D. B., Übeyli, D. D. M., Demir, T., Öztürk, G., & Deniz, T. (2009). *Metal Zırh Malzemelerin Balistik Performanslarının Araştırılması* (TUBİTAK Projesi, Proje No: 106M211).

TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU İLE İLGİLİ LİSANSÜSTÜ TEZLERİN BİBLİYOMETRİK ANALİZİ

Funda KAHRAMAN¹

Mehmet KÜÇÜK²

1. GİRİŞ

Topoloji optimizasyonu uygulama örnekleri, farklı mühendislik alanlarında (makine, otomotiv, uzay ve havacılık, inşaat vb.) görülmektedir. Topoloji optimizasyonu, bir yapısal optimizasyon türüdür. Topoloji optimizasyonu, tasarım alanında malzeme yerleşiminin optimizasyonudur. Topoloji optimizasyonu ve katmanlı imalat, endüstride yüksek performanslı ve yenilikçi tasarımların ortaya çıkmasını sağlayan iki güçlü araçtır.

Bibliyometrik analiz, mevcut literatürü analiz etme amacıyla kullanılan nicel bir yöntemdir.

Bu çalışmada, Türkiye’de Yükseköğretim Kurulu (YÖK) Ulusal Tez Merkezi veri tabanında kayıt altına alınan Yüksek Lisans ve Doktora tezleri arasında topoloji optimizasyonu ile ilgili çalışmalar bibliyometrik olarak incelenmiştir. YÖK Tez merkezi tarafından arşivlenen ve mühendislik alanında topoloji optimizasyonu ile ilgili olan lisansüstü tezlerin dağılımı izlenmiştir. Çalışmada ulaşılan veriler karşılaştırılmıştır.

¹ Prof. Dr., Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, fkahraman@tarsus.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1661-3376.

² Tarsus Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği ABD, mehmetkucuk1985@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9196-0784.

Son yıllarda Türkiye’de yayınlanan bibliyometrik çalışmalar değerlendirildiğine farklı alanlarda birçok konunun incelendiği görülmektedir. Ülkemizde yayınlanan bibliyometrik analiz araştırmalar çoğunlukla fen bilimlerinde görülmekle birlikte sosyal ve sağlık bilimlere yönelik çalışma sayılarında önemli artış görülmektedir. Çalışmalarda eser türü olarak makaleler ve tezler dikkate alınmıştır.

Makalelere yönelik çalışmalarda Web of Science ve Scopus gibi veri tabanları kullanılmaktadır. Yaygın olarak; atıf, ortak-atıf, ortak-yazar, kaynakça eşleşmesi, ortak-kelime vb. analizler gerçekleştirilmektedir. “Bilim haritalama” ve “veri görselleştirme” çalışmaları VOSviewer, CiteSpace, BibExcel, SciMat, Bibliometrix ... vb. programlar kullanılarak yapılmaktadır.

Türkiye’de üniversitelerin lisansüstü eğitim programlarında üretilen tezler 1987 yılından itibaren YÖK Yayın ve Dokümantasyon Daire Başkanlığı (Merkezi) olarak ve 1996 sonrasında “Ulusal Tez Merkezi” olarak kayıt altına alınmakta ve araştırmacıların kullanımına sunulmaktadır. 2007 ile tezler internet üzerinden erişime açılmıştır (Tonta ve Akbulut, 2019; Yılmaz, 2002).

Tezlere yönelik bibliyometrik çalışmalarda YÖK Tez veri tabanı kullanılmaktadır. Genellikle yapılan analizler; tezlerin yıllara göre dağılımı, tez türü (Yüksek Lisans – Doktora), sayfa sayısı, yazım dili, çalışmanın yapıldığı kurum ve ana bilim dalı vb. olduğu görülmektedir.

1.1. Bibliyometrik Analiz

Bibliyometri terimi “biblio:kitap” ve “metric:ölçüm” terimlerinden türetilmiştir. Bibliyometri terimi, ilk olarak (1934’te) Paul Otlet tarafından kullanılmıştır. “Bibliyometri” terimi Alan Pritchard tarafından 1969 yılında, E.W. Hulme’nin

ilk kez 1922 yılında kullandığı, “İstatiksel Bibliyografya” yerine kullanılması önerilmiştir.

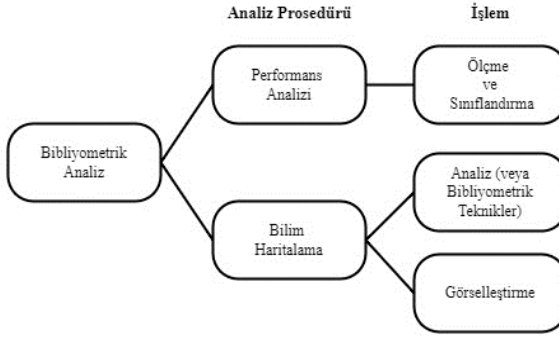
Bibliyometri, belirli bir zamanda veya bölgede üretilen akademik çalışmaların istatistiksel olarak analizidir. Bibliyometrik analiz, günümüzde farklı bilim alanında uygulanan nicel araştırma yöntemlerinden biri olmuştur (ULAKBİM, Cahit Arf Bilgi Merkezi, t.y.).

Bibliyometrik analiz yardımıyla araştırılan konunun potansiyeli ve gelişim yönü izlenmektedir. İncelenen konunun tarihsel gelişimi, aldığı atıflar, yazar ve ortak yazarlar, kullanılan anahtar kelimeler, çalışılan ülkeler ve kurumlar hakkında kapsamlı ve stratejik bakış açısına ulaşılmaktadır.

Bibliyometrik analiz, iki temel türü tanımlayıcı ve değerlendirici olarak gerçekleştirilmektedir.

Bibliyometrik analiz yöntemin kullanım amaçları performans analizi ve bilim haritalamadır (Öztürk, Kocaman ve Kanbach, 2024).

Şekil 1. Bibliyometrik Analiz Prosesi



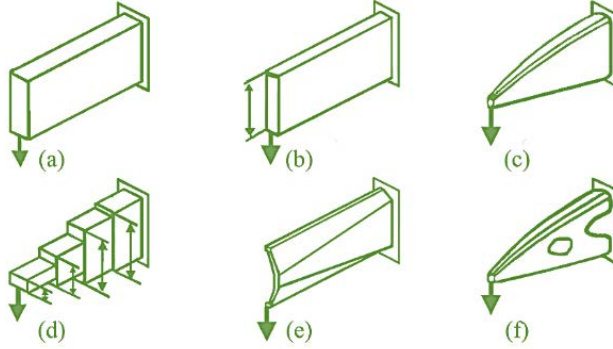
Kaynak: (Öztürk, Kocaman ve Kanbach, 2024).

1.2. Topoloji Optimizasyonu

Bir sistem ya da sürecin ideal duruma getirilmesi “optimizasyon” olarak ifade edilmektedir. Optimizasyon kavramı birçok alanda kullanılmaktadır (Okudan ve Şen, 2023).

Yapısal optimizasyon çok önemli bir mühendislik sürecidir. Tasarımlarının değiştirilmesi ve malzeme düzenlerinin optimizasyonu yoluyla yapıların performansını, verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmayı amaçlamaktadır. Şekil 2’de yapısal optimizasyon türleri gösterilmiştir.

Şekil 2. Yapısal optimizasyon Türleri (a) Tasarım Bölgesi (b) Boyut Optimizasyonu (c) Şekil Optimizasyonu (d) Topometri Optimizasyonu (e) Topografya Optimizasyonu (f) Topoloji Optimizasyonu



Kaynak: (Fernandez, 2013)

Topoloji optimizasyonunda, seçilen tasarım alanı içinde belirlenen kısıtlara göre yapıda malzemenin en uygun dağılımını aranmaktadır. Topoloji optimizasyonu yapısal tasarımda inovasyona daha fazla imkânı sağlaması nedeniyle birçok alanda ilgi görmüştür (Zhong vd. 2023). Topoloji optimizasyonu ve katmanlı imalat teknolojisinin birlikte kullanımı gelecekte tasarım ve imalat alanında kritik değişiklikler sağlayacaktır (Okudan ve Şen, 2023).

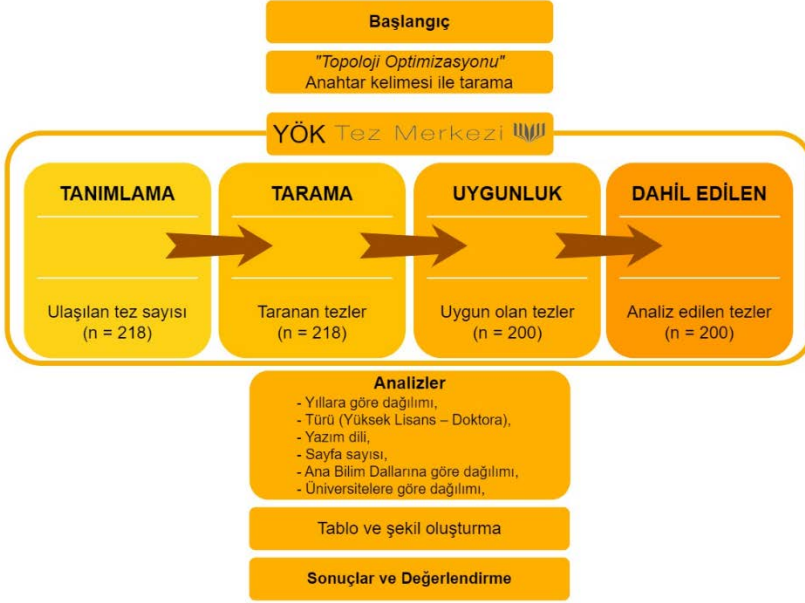
1.3. Kaynak Araştırması

Topoloji optimizasyonu ile ilgili olan bibliyometrik araştırmalar incelenmiş ve özetlenerek sunulmuştur. Literatür çalışmaları değerlendirildiğinde topoloji optimizasyonu ile ilgili derleme çalışmalar olmasına karşı bibliyometrik olarak incelendiği çalışma sayısı kısıtlıdır. Guo (2023) 2000-2022 yılları arasında yapısal topoloji optimizasyonu ile ilgili yayınların bibliyometrik analizini gerçekleştirmiştir. Yayın sayısının son yirmi yılda önemli oranda arttığını tespit etmiştir. Ribeiro, Bernardo ve Andrade (2021) topoloji optimizasyonu konusunda son yöntemler ve güncel uygulama alanları ile ilgili olarak 2015-2020 yılları arasında üretilen yayınları incelemiştir. Solorzano ve Plevris (2022) yapıların modellenmesi ve simülasyonu ile ilgili olan hesaplamalı zekâ (computational intelligence) ve güncel araştırma teknikleri için 1990-2020 yılları arasında üretilen çalışmaların bibliyometrik analiz gerçekleştirmiştir. Zhong vd. (2023) son 20 yılda Çin Ulusal Bilgi Altyapısı (CNKI: China National Knowledge Infrastructure) ve Web of Science (WoS) çekirdek koleksiyonunda yapısal topoloji optimizasyonu ile ilgili üretilen çalışmaları istatistiksel yöntemle incelemiştir. Obi vd. (2021) 2010-2020 yılları arasında Scopus veri tabanında yer alan katmanlı imalat için tasarım (DfAM: Design for Additive Manufacturing) çalışmaları konusunda bibliyometrik analiz sonuçlarını paylaşmıştır. Topoloji optimizasyonu 74 anahtar kelime ile bağlantılıdır. Wang vd. (2021)'e göre topoloji optimizasyonu eriyik yığıma modelleme/imalat (fused deposition modeling/fused filament fabrication) konusunda morfoloji, 3D baskıda karbon nano tüp kullanımı gibi kritik noktalar (hotspots) arasındadır. Çalışmalardaki eğilim eriyik yığıma modelleme için topoloji ve şekil optimizasyonunun araştırma potansiyeli olduğunu göstermektedir. Kılıç (2023) WoS veri tabanında 1981-2022 arasında üretilen eserlerde eklemeli imalatın gelişim sürecinin bibliyometrik olarak incelenmiştir.

2. YÖNTEM

Topoloji optimizasyonu ile ilgili YÖK Tez merkezine kayıt edilen lisansüstü tezlerin genel özelliklerini tespit etmek amaçlanmıştır. Çalışmanın iş akış şeması Şekil 3'te gösterilmiştir.

Şekil 3. Bibliyometrik Analiz İş Akış Şeması



Mühendislik çalışmalarında tasarım özelliklerinin geliştirilmesi için uygulanan “*topoloji optimizasyonu*” yöntemi ile ilgili üretilen Yüksek Lisans ve Doktora tezleri incelenmiştir.

YÖK Tez merkezinde “topoloji optimizasyonu” anahtar kelimesi taranmıştır. Yapılan tarama sonucunda 218 tane lisansüstü tez çalışması olduğu görülmüştür.

Mühendislik araştırma alanında yürütülen tezler dikkate alınmıştır. İlgili olmayan tezler listeden çıkartılmış ve 200 tez seçilmiştir. YÖK Tez Merkezi veri tabanında ulaşılan tezlere ait künye bilgilerine göre veri seti oluşturulmuştur. Tezlerin yayın yılı, yazım dili, çalışıldığı üniversite, hazırlandığı ana bilim dalı, sayfa sayıları, tezin türü ve benzeri bilgileri kullanılmıştır.

Veri seti, 2024-Ağustos tarihine yapılan tarama sonrasında oluşturulmuştur. Erişilen lisansüstü tezler için “bibliyometrik analiz” yapılmıştır.

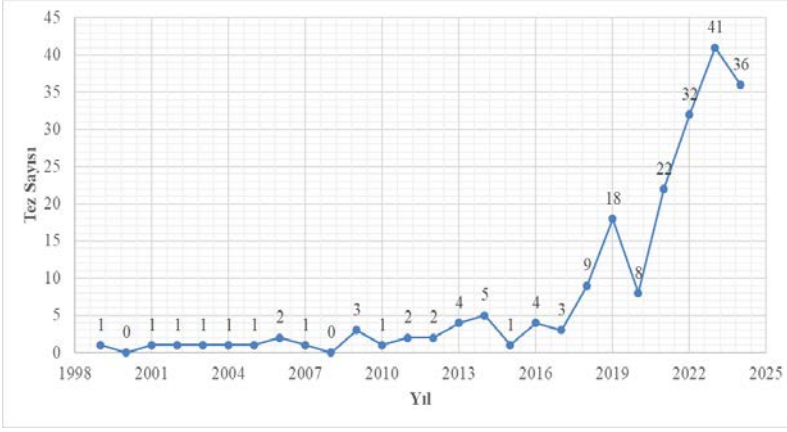
- Tezlerin yıllara göre dağılımı,
- Türü (Yüksek Lisans – Doktora),
- Yazımında kullanılan dil,
- Sayfa sayısı dağılımı,
- Çalışmanın ana bilim dallarına göre dağılımı,
- Çalışmanın yapıldığı üniversiteler,

araştırma sorularına cevap aranmıştır.

3. BULGULAR

Topoloji optimizasyonu ile ilgili 200 lisansüstü tezin bibliyometrik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ulaşılan sonuçlar değerlendirilmiş ve sunulmuştur. Tezlerin yıllara göre dağılımı Şekil 4’te gösterilmiştir. Grafikler ve tablolar, 2024 Ağustos tarihine yapılan tarama sonrası ulaşılan verilerin analizi ile oluşturulmuştur. İlk çalışma 1999 yılında yapılmıştır. 2000 ve 2008 yıllarında tez yayınlanmamıştır. 2017 yılından itibaren yapılan çalışmalar artış göstermiştir. 2018’de 9 ve 2019’da 18 çalışma yapılmış olmasına karşı 2020’de yapılan çalışma sayısı 8’e düşmüştür. Sonraki yıllarda çalışma sayılarında belirgin artış görülmüştür. 2024 yıl sonuna kadar yeni veri girişleri ile tez sayısının artacağı öngörülmektedir.

Şekil 4. Yıllara Göre Üretilen Tez Sayısı (2024 Ağustosuna kadar)



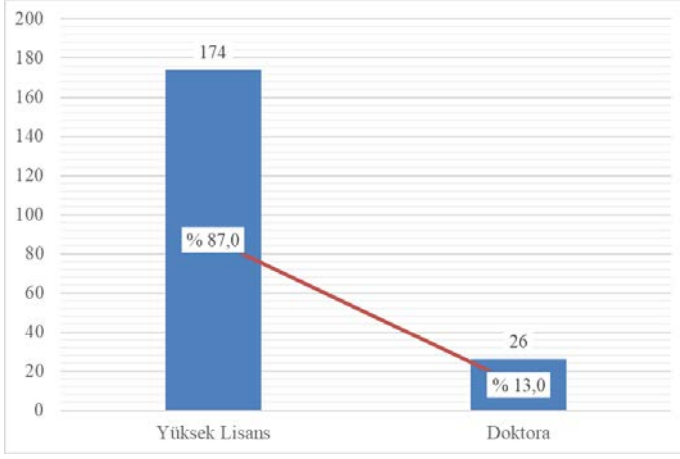
Lisansüstü tezlerin türlerine göre yazım dilleri dağılımı Tablo 1’de gösterilmiştir. Yüksek Lisans tezlerinin 52 tanesi (%29,9) İngilizce iken 122 tanesi (%70,1) Türkçe yazılmıştır. Doktora tezlerinin 10 tanesi (%38,5) İngilizce iken 16 tanesi (%61,5) Türkçe yazılmıştır.

Tablo 1. Tez Türü ve Yazım Dilleri

Tez Türü	Tez Sayısı	İngilizce	%	Türkçe	%
Yüksek Lisans	174	52,0	29,9	122,0	70,1
Doktora	26	10,0	38,5	16,0	61,5
Toplam	200	62,0	31,0	138,0	69,0

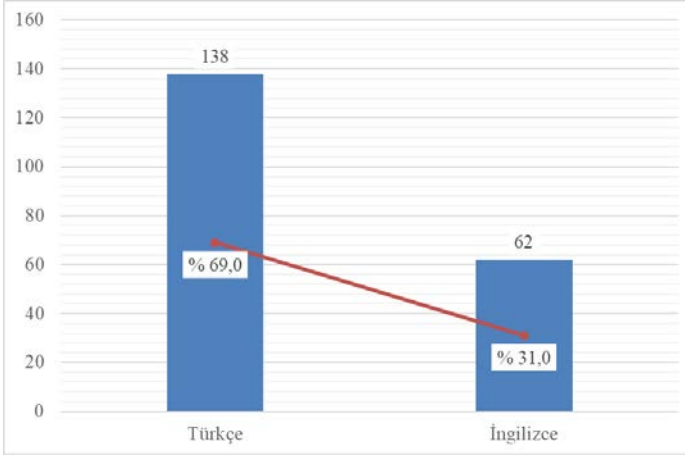
Tezler türüne göre dağılımı Şekil 5’te gösterilmiştir. Tezlerin 174 tanesi Yüksek Lisans (%87,0) ve 26 tanesi Doktora (%13,0) olduğu görülmüştür.

Şekil 5. Tez Türleri



Tezlerin yazım diline göre dağılımı Şekil 6'da gösterilmiştir. Tüm tezlerin %69,0'ı (138 tanesi) Türkçe iken %31,0'ı (62 tanesi) İngilizce yazılmıştır.

Şekil 6. Tezin Dili



Tezler sayfa sayısı dağılımı Tablo 2'de gösterilmiştir. Tezlerin %58'i 0-100 aralığında, %36'si 101-200 aralığında, %5,0'i 201-300 aralığında olduğu görülmüştür. Sayfa sayısı 300'den fazla olan 2 (%1,0) tane tez olduğu belirlenmiştir. Yüksek Lisans tezlerinin %65,5'i 0-100 aralığında ve %31,0'ı

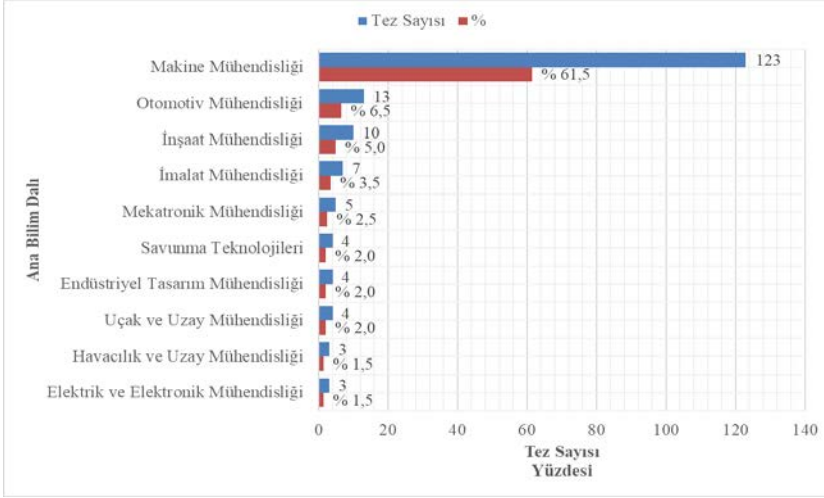
101-200 aralığında hazırlanmıştır. Doktora tezlerinde %69,2'si 101-200 aralığında ve %23,1'i 201-300 aralığında yazılmıştır.

Tablo 2. Tez Sayfa Sayısı Dağılımı

Sayfa Sayısı	Tez Sayısı	%	Yüksek Lisans	%	Doktora	%
0-100	116	58,0	114	65,5	2	7,7
101-200	72	36,0	54	31,0	18	69,2
201-300	10	5,0	4	2,3	6	23,1
300<	2	1,0	2	1,1	0	0,0
TOPLAM	200	100,0	174	100,0	26	100,0

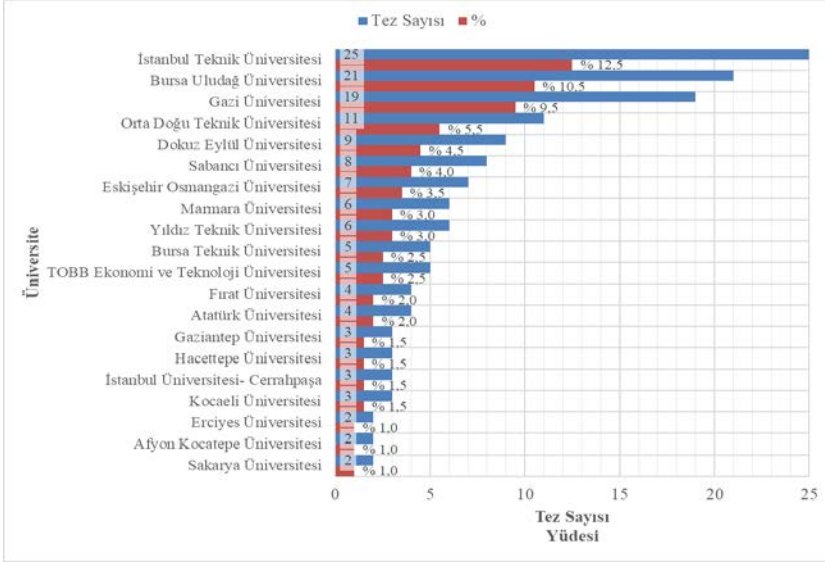
Tezlerin yapıldığı ana bilim dallarına göre dağılımı Şekil 7'de gösterilmiştir. Oluşturulan verilerde yaklaşık 30 farklı ana bilim dalında çalışılan tezler topoloji optimizasyonu ile ilgilidir. En fazla çalışma 123 tane ile (%61,5) Makine Mühendisliğinde yapılmıştır. Bunların 13 tanesi (6'sı İngilizce ve 7'si Türkçe olarak) Doktora tezi, 110 tanesi (29'u İngilizce ve 81'i Türkçe olarak) Yüksek Lisans tezidir. İkinci sırada Otomotiv Mühendisliği alanında 13 tane (%6,5) tez çalışmasının 1 tanesi Doktora ve 12 tanesi Yüksek Lisans olarak Türkçe yazılmıştır. İnşaat Mühendisliği 10 (%5) 2 Doktora (1'i İngilizce ve 1'i Türkçe) ve 8 Yüksek Lisans (3'ü İngilizce 5'i Türkçe) hazırlanmıştır. İmalat Mühendisliği alanında 7 tane (%3,5) tez yazılmış, 1'i Türkçe Doktora ve 6 tanesi (2'si İngilizce ve 4'ü Türkçe) Yüksek Lisans tezidir. Makine ve İmalat Mühendisliği alanında 1 tane Doktora ve 1 tane Yüksek Lisans tezi olduğu görülmüştür. Bunlar Makine Mühendisliği ve İmalat Mühendisliği değerlerine dahil edilmemiş ve ayrı olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 7. Tez Sayılarına Göre İlk 10 Ana Bilim Dalı



Lisansüstü tezler incelendiğinde 60 farklı üniversite olduğu görülmüştür. Tez çalışmasının yapıldığı kurumlar Şekil 8’te gösterilmiştir. Üniversiteler arasında ilk sırada İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) 25 tane (%12,5) 2’si Doktora ve 23’si Yüksek Lisans tezidir. İkinci sırada Bursa Uludağ Üniversitesi (BUÜ) 21 tane (%10,5) 2’si Doktora ve 19’u Yüksek Lisans tezidir. Üçüncü sırada Gazi Üniversitesi (GÜ) 19 tane (%9,5) 1’i Doktora ve 18’i Yüksek Lisans tezidir. Tez sayılarına bakıldığında 28 (%46,7) üniversitede 1 tane, 15 (%25) üniversitede 2 tane, 4 (%6,7) üniversitede 3 tane tez çalışıldığı tespit edilmiştir.

Şekil 8. Tez Sayılarına Göre İlk 20 Üniversite



4. SONUÇ

Bu çalışmada, YÖK Tez Merkezi veri tabanında arşivlenen lisansüstü tezler içinde topoloji optimizasyonu ile ilgili olanlar incelenmiştir. Çalışmada 200 tez değerlendirilmiştir. İlk çalışma 1999'da yapılmış, 2000 ve 2008'de çalışma yapılmamış, 2018'e kadar ve 2020'de tez sayıları 10'dan az olduğu, 2020 yılından itibaren çalışılan tez sayılarında artış tespit edilmiştir. Tezlerin çoğunluğunu Yüksek Lisans (%87)'dir. Tez yazım dili %69 oranında Türkçe'dir. Sayfa sayısı değerlendirildiğinde %58'i 0-100 aralığındadır. Makine mühendisliği en fazla tez yazılan ana bilim dalıdır. Üniversiteler arasında ilk sırada İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) 25 tane (%12,5), ikinci sırada Bursa Uludağ Üniversitesi (BUÜ) 21 tane (%10,5) ve üçüncü sırada Gazi Üniversitesi (GÜ) 19 tane (%9,5) yer almaktadır.

KAYNAKÇA

- Fernandez, L. (2013). Topology optimization using a level set penalization with constrained topology features [Unpublished Master's Thesis]. Clemson University, Department of Mechanical Engineering, South Carolina, https://tigerprints.clemson.edu/all_theses/1700.
- Guo, Q. (2023). A scientometric review of structural topology optimization. (*Proceedings of the 2023 International Conference on Functional Materials and Civil Engineering*), *Applied and Computational Engineering*, 25(1), 43–49. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/25/20230731>
- Kılıç, S. (2023). Makine imalat teknolojileri ve eklemeli imalat literatürünün görselleştirilmesine dair bibliyometrik bir analiz. *Mühendis ve Makina*, 64(711), 352-385.
- Obi, M. U., Pradel, P., Sinclair, M., & Bibb, R. (2022). A bibliometric analysis of research in design for additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 28(5), 967-987. <https://doi.org/10.1108/rpj-11-2020-0291>
- Okudan, A., & Şen, B. (2023). Optimizasyon nedir ve türleri nelerdir?. *Mühendis ve Makina Güncel*, 84, 43-46. Erişim tarihi: 01.05.2024. <https://www.mmo.org.tr/arama/2023-sayi-84/makale/makale-optimizasyon-nedir-ve-turleri-nelerdir>
- Öztürk, O., Kocaman, R., & Kanbach, D. K. (2024). How to design bibliometric research: an overview and a framework proposal. *Review of Managerial Science*. <https://doi.org/10.1007/s11846-024-00738-0>
- Ribeiro, T. P., Bernardo, L. F. A., & Andrade, J. M. A. (2021). Topology optimisation in structural steel design for additive manufacturing. *Applied Sciences*, 11(5), 2112.

- MDPI AG. Retrieved from
<http://dx.doi.org/10.3390/app11052112>
- Solorzano, G., & Plevris, V. (2022). Computational intelligence methods in simulation and modeling of structures: A state-of-the-art review using bibliometric maps. *Frontiers in Built Environment*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1049616>
- Tonta, Y., & Akbulut, M. (2019). Türkiye’de Lisansüstü Tezlere Açık Erişim. *Türk Kütüphaneciliği*, 33(4), 219-248. <https://doi.org/10.24146/tk.620508>
- ULAKBİM, Cahit Arf Bilgi Merkezi, (t.y.). *Bibliyometrik Analiz* S.S.S.. (25.08.2024) tarihinde <https://cabim.ulakbim.gov.tr/bibliyometrik-analiz> adresinden erişilmiştir.
- Wang, Y., Mushtaq, R. T., Ahmed, A., Ahmed, A., Rehman, M., Rehman, M., Khan, A. M., Sharma, S., Ishfaq, D. K., Ali, H., & Gueye, T. (2021). Additive manufacturing is sustainable technology: citespace based bibliometric investigations of fused deposition modeling approach. *Rapid Prototyping Journal*, 28(4), 654–675. <https://doi.org/10.1108/rpj-05-2021-0112>
- Yılmaz, E. (2002). Yükseköğretim Kurulu Dokümantasyon Merkezi’nden Ulusal Tez Merkezi’ne Doğru, *Türk Kütüphaneciliği*, 16 (1): 41-60. <http://tk.org.tr/index.php/TK/article/view/196/191>.
- Zhong, Y., Jiang, X., Yang, Y., Xu, B., Zhu, Q., Wang, L., & Dong, X. (2023). Visualization analysis of research hotspots on structural topology optimization based on CiteSpace. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45447-y>

KARBON YAKALAMA, DEPOLAMA (CCS) VE GELİŞMİŞ PETROL GERİ KAZANIMI (EOR) TEKNOLOJİLERİNİN TÜRKİYE’DE UYGULANABİLİRLİĞİ ÜZERİNE BİR FİZİBİLİTE ÇALIŞMASI¹

Nuri CEYLAN²

Hasan Donat YILDIZAY³

Özer AYDIN⁴

Emine FELEK⁵

1. GİRİŞ

Kömür başta olmak üzere birçok fosil yakıtın güç santrallerinde yakılması, atmosferdeki karbondioksit (CO₂) oranının artmasına yol açmaktadır. Karbon Yakalama ve Depolama (Carbon Capture and Storage-CCS) teknolojileri, yakıt dönüşümünde, endüstride ve enerji üretiminde büyük ölçekli fosil yakıt kullanımından kaynaklanan karbondioksit gibi sera gazı emisyonlarını azaltmak için verimli bir teknolojidir. Karbon

¹ Sığırtmaç, E. 2022. Karbon Yakalama ve Depolama ile Petrol Geri Kazanımı Teknolojilerinin Birlikte Uygulanmasının Fizibilitesi, Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Kütahya

² Dr. Öğr. Üyesi, Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksek Okulu, Tavşanlı/Kütahya, nuri.ceylan@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9311-5418

³ Dr. Öğr. Üyesi, Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, hasan.yildizay@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2449-8056

⁴ Prof. Dr., Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, ozer.aydin@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6397-5601

⁵ Makine Yüksek Mühendisi, Antalya İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü (AFAD), Kepez/Antalya ilksgtr@hotmail.com, ORCID: 0000 0003 0611 1812

yakalama ve depolama (CCS) uygulamaları ile karbon yakalanabilmekte, depolanabilmekte ve petrol ve metan üretimi gibi birçok alanda kullanılabilmektedir. Enerji verimliliği, ormansızlaşmanın önlenmesi ve yenilenebilir enerji çalışmalarının yanı sıra karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojisinin daha geniş alanlara uyarlanması, Petrol Geri Kazanımı (Enhanced Oil Recovery-EOR) ve CCS teknolojilerinin bir arada değerlendirilmesi küresel ısınma ve çevre kirliliğini önleme açısından oldukça fayda sağlamaktadır. CO₂'nin en büyük endüstriyel kullanımı, jeolojik oluşumlarda sıkışıp kalan fosil yakıtı dışarı atmak için CO₂'nin tükenmiş veya yarı tükenmiş petrol ve gaz rezervuarlarına basınç altında enjekte edildiği, gelişmiş petrol geri kazanımı (OER) uygulamalarıdır. EOR, onlarca yıldır yaygın olarak kullanılan ve petrol ve gaz endüstrisine büyük ekonomik faydalar sağlayan olgun bir teknolojidir.

Bu çalışmada, kömür yakıtlı Adana İskenderun Sugözü ve İskenderun Atlas Termik Santrallerinden salınan karbondioksit emisyonlarının yakalanması ve depolanmasının Petrol Geri Kazanımı (EOR) teknolojisi ile birlikte uygulanması üzerine bir maliyet fizibilitesi çalışması yapılmıştır. Yakalanan karbondioksitin boru hattı ile Batman ilinde bulunan Batı Raman Bölgesine petrol geri kazanımı için nakledilmesi planlanmıştır. Adana ve İskenderun'da bulunan kömür yakıtlı termik santrallerinin tercih edilmesinin sebebi, bu santrallerin yoğun karbon emisyonuna sebep olması ve Batı Raman bölgesine yakın olmalarıdır. Termik santrallerden karbon depolama bölgesine ortak olacak şekilde en uygun karbondioksit taşıma boru hattı mesafesi tespit edilmiştir. İki santralin toplam CO₂ emisyon salım miktarına göre karbon yakalama, taşıma ve depolama için gerekli toplam maliyet hesaplanmıştır. Ayrıca CO₂'nin depolanması ile

üretilebilecek petrol miktarının en az değere göre hesabı yapıldığında, bir yıl zarfında harcanan maliyeti karşıladığı görülmüştür.

Küresel ısınma, çoğunlukla karbondioksit emisyonları olmak üzere sera gazı emisyonlarının neden olduğu günümüz toplumu için merkezi bir tehdittir. 1880–2020 yılları arasında en sıcak yedi yılın tamamı 2014'ten sonra ve en sıcak 10 yıl da 2005 itibariyle gerçekleşmiştir. 2011-2020 yılları arasında küresel kara ve okyanus yüzeyi ortalama sıcaklığı, 20. yüzyıl ortalama sıcaklığının $+0,82^{\circ}\text{C}$ üzerinde bir sıcaklıkla, dünya için kaydedilen en sıcak on yıl olmuştur. Bu, 2001–2010 yılları arasını kapsayan önceki on yıllık rekor değerini $+0,62^{\circ}\text{C}$ aşmıştır. 2020 yılında Kuzey Yarımkürede kara ve okyanus yüzey sıcaklığı, ortalamanın $+1,28^{\circ}\text{C}$ üzerine çıkarak son 141 yılın en yüksek rekor seviyesine ulaşmıştır. Bu, 2016'da kırılan önceki rekordan $0,06^{\circ}\text{C}$ daha yüksektir (NOAA,2020).

İnsan faaliyetlerinden iklim değişikliğine en büyük katkıyı yapan sera gazı CO_2 dir. Atmosfere salınan CO_2 emisyonlarını azaltmak için bir takım teknolojik seçenekler vardır. Bunlar; enerji dönüşümünün ve/veya kullanımının verimliliğini artırarak enerji tüketimini azaltmak, kömür yerine doğal gaz gibi daha az karbon yoğunluklu yakıtlara geçmek, çok az CO_2 yayan veya hiç CO_2 salmayan yenilenebilir enerji kaynaklarının veya nükleer enerjinin kullanımını arttırmak, ormanlarda ve topraklarda ağaç sayısını artırarak CO_2 'i tutmak ve CO_2 'i kimyasal veya fiziksel olarak yakalamak ve depolamaktır. CO_2 'nin termik santrallerden yakalanması ve sıkıştırılması, CO_2 'nin taşınması ve yüzlerce ila binlerce yıl boyunca atmosferden uzakta depolanması aşamalarından oluşan Karbon Yakalama ve Depolama süreci, elektrik enerjisi üretim tesislerine

ve diğer büyük endüstriyel emisyon kaynaklarına uygulanabilir (Sığırtmaç, 2022).

Karbondioksit fosil yakıtların termik santrallerde yakılması neticesinde açığa çıkmaktadır. Karbondioksit çeşitli depolama alanlarında depolanabilmektedir. Birçok jeolojik yapı CO₂ gazını tutma özelliğine sahiptir ve böylece bu jeolojik yapılarda CO₂ gazı yıllarca hareketsiz kalabilmektedir. (Karakurt, Aydın ve Aydın, 2009)

CCS' nin EOR ile birleştirilmesi, yakın vadede CCS projelerinin geliştirilmesini kolaylaştırmak için kritik bir finansal teşvik sağlayabilir. CCS Teknolojisiyle ilgili çalışmalarda ilk olarak 1970'lerde Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'nde EOR için karbon yakalama uygulaması başlamıştır. Bu uygulama; hem karbondioksit ile güçlendirilmiş petrol geri kazanımı sağlamakta hem de petrol üretimini artırırken, kömürle çalışan enerji santrallerinin ve diğer endüstriyel kaynakların karbon ayak izini azaltmaktadır. CO₂ yağ ile karıştığı ve yağın özelliklerini değiştirdiği için, ilave yağ üretmede etkilidir. Karbondioksit, tükenmiş rezervuarlardan petrol üretimini teşvik etme yeteneğine sahip olup ABD'de doğal kaynaklı CO₂'nin sınırlı hacimleri nedeniyle değerli hale gelmektedir. Bu nedenle, büyük ölçekli sanayi kuruluşlarında, EOR sırasında petrole üretilen CO₂ ayrılır, sıkıştırılır ve yeniden enjekte edilir ve defalarca geri dönüştürülür (Hill, Hovorka ve Melzer, 2013). CO₂ enjeksiyonu 80'li yıllarda ABD'den sonra ilk kez Türkiye'de kullanılmıştır ve halen kullanılmaktadır. Türkiye'nin en büyük doğal CO₂ sahası olan 90 km uzaklıktaki Dodan Sahası'ndan CO₂ boru hattı ile Batı Raman Sahası'na taşınmakta ve CO₂ enjeksiyonu gerçekleştirilmektedir (Esmaeili, 2018).

İlk defa 1991 yılında Norveç hükümeti CO₂ emisyonları için vergi oluşturmuştur. Kirleten öder ilkesine göre düzenlenen iklim değişikliğine ilişkin bu sistemde; madeni yağ ve petrol üzerindeki CO₂ vergileri; AB Emisyon Ticaret Planı' na dahil olan kıta sahanlığında petrol çıkarımından kaynaklanan emisyonlara ilişkin bir vergi ile birlikte sera gazı emisyonlarını etkin bir şekilde sınırlamak için 1991 yılında uygulamaya konmuştur. Norveç'te Doğal gaz ve LPG (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı) üzerindeki CO₂ vergileri ise 2010 yılında uygulamaya konulmuştur. (Norveç İklim ve Çevre Bakanlığı, Norveç Ulusal Planı, 2019)

İlk CCS projesi 1996'da hayata geçirilen Norveç'te bulunan Sleipner' dır. Sleipner CO₂ enjeksiyon projesi, 1996'dan beri 16 Mt CO₂'nin enjekte edildiği dünyanın ilk endüstriyel açık deniz CO₂ Yakalama ve Depolama projesidir (Furre, vd., 2017). 2014 yılında Kanada'da faaliyete geçen Boundary Dam Termik Santrali ise, dünyanın ilk büyük ölçekli CCS prosesli termik santralidir (Global CCS Institute, The global Status of CCS, 2014).

Tümü büyük ölçüde kömüre bağımlı olan enerji üretimi ve enerji yoğun endüstriyel sektörler için CCS, CO₂ emisyonlarında önemli bir azalma sağlayabilen tek seçenektir. Günümüzde en ümit verici seçenekler, son teknoloji ürünü pülverize kömür santralinde Monoetanolamin kullanılarak yanma sonrası yakalama ve Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrim (IGCC) biriminde ön yanmalı yakalamadır (Senior, vd., 2011).

Dünyada enerji üretimi için kullanılan fosil yakıtların büyük bir kısmını oluşturan kömürün enerji kaynağı olarak kullanımının devam etmesi için çevresel etkisinin azaltılması gerekmektedir. Bu nedenle, kömürle çalışan elektrik santrallerine

bağlı CO₂ yakalama ve depolama tesislerinin kurulumu, CO₂ emisyonlarını azaltırken kömür kaynaklarının kullanımına izin veren iklim değişikliğini azaltma yolunda bir çözüm stratejisi sunmaktadır.

Ağralı, Üçtuğ ve Türkmen (2018), karbon yakalama kapasiteleri üzerine çalışmışlar, kurulumun uygun olup olmadığının, yakalanan karbonun taşınması için kurulması gereken taşıma durumunun ve depolama alanlarının konumlarına karar veren bir karma tam sayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. Böylece ülkemizin farklı bölgelerinde bulunan iki kömürlü termik santral ile ilgili veriler kullanılarak Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (GAMS) uygulanmıştır. Yakalanan karbonu gelişmiş yağ geri kazanımında değerlendirmeyi, ayrıca EOR pazarında yeterli talep olduğu sürece CCS' nin tercih edilebilir olduğunu tespit etmişlerdir.

Karbondioksiti yakalamak için biyolojik yöntemler de mevcuttur. İklim değişikliğiyle mücadele etmenin en iyi yollarından biri ağaç dikmektir. Ağaçlar fotosentez yaparken atmosferdeki karbondioksiti yok ederken oksijen ve besin üretmektedir. Yeryüzünde özellikle çorak topraklarda 1 trilyon yeni ağaç dikmek atmosferdeki karbondioksit miktarını yaklaşık 750 milyar ton azaltabilecektir. Böylece, insanlar etkisiyle son 25 yılda salınan karbondioksit tüketilmiş olacaktır. (Ocak, 2019) Orman yangınlarından sonra kayıpları hızla geri kazandırmak ve mevcut ormanları korumak da karbon düzeyini azaltmada büyük önem taşımaktadır.

Karbondioksiti azaltmak için bir diğer biyolojik yöntem ise yakalanan CO₂ ile mikroalg yetiştiriciliğidir. Mikroalg biyolojik CO₂ tutma yöntemi, termik santraller gibi yüksek miktarda CO₂ salınımı yapan tesislerle birleştirilebilmektedir.

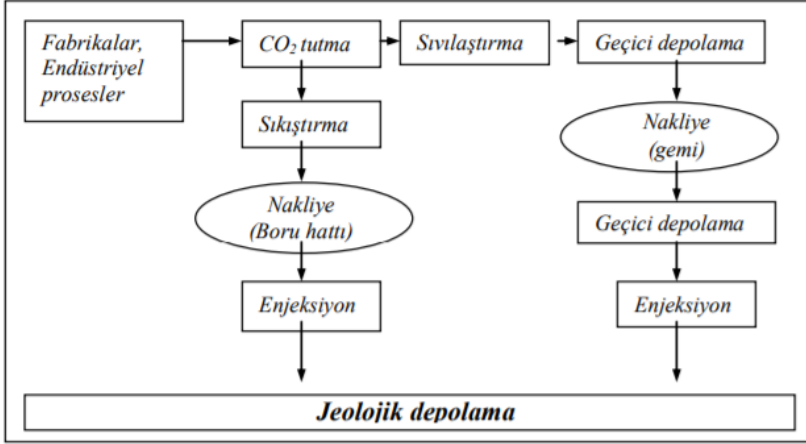
Mikroalgler, suda çözünmüş CO₂'yi kullanarak, CO₂ salınımlarını birim alanda daha fazla azaltabilmektedir. Daha sonra bu mikroalgler kurutulup öğütülebilmekte, biyoyakıt olarak kullanılabilir (Sayaner, 2013). Ayrıca alglerden gıda boyası ve mürekkep üretiminde ve moda sektöründe de yararlanılmaktadır.

Karbon azaltma seçenekleri arasında farklı bir yöntem ise yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlara göre daha az karbon emisyonu yaymaktadır. Özellikle jeotermal enerjiden kaynaklanan karbon salınımı yok denecek kadar azdır. Ayrıca yenilenebilir enerji seçeneklerinin uygulama alanları dünyada oldukça geniştir. Özellikle hidrolik enerji, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve jeotermal enerji teknolojileri Türkiye'de büyük potansiyele sahiptir (Şahbaz Kılınç ve Çoban, 2015).

İtalya' da karbon yakalama ve depolamanın (CCS) uygulanabilirliği araştırılmış olup, USC (ultra süper kritik), NGCC (doğalgaz kombine çevrim) ve IGCC (entegre gaz kombine çevrim) santrallerine yapılan yatırımlar değerlendirilmiştir. Mevcut İtalyan enerji santrallerinin güçlendirilmesinin uygunluğu incelenmiştir. Seviyelendirilmiş elektrik maliyeti (levelized cost of electricity-LCOE), Kaçınılan CO₂ maliyeti (cost of CO₂ avoided-CCAV) ve yakalanan CO₂ maliyeti (cost of CO₂ captured-CCAP) hesaplamasına dayalı tekno-ekonomik analiz ve CCS sistemlerinin karlılığı değerlendirilmiştir. CCS sistemi ile donatılmış santrallerin seviyelendirilmiş elektrik maliyeti, CCS' siz santrallere göre daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Sonuç olarak, CCS yatırımının, CCS' siz ultra süper kritik ve doğalgaz kombine çevrim tesisleri için uygun olduğu, ancak bu seçeneklerin minimum karbon vergisinin entegre gaz kombine çevrime göre daha yüksek olduğunu ortaya

koymuştur. Ayrıca karbon içermeyen rüzgar gücü de uygundur fakat kesintilidir (Fichera and Volpe, 2020). Karbon yakalama ve depolama aşamaları Şekil 1 de görüldüğü gibi proseslerden itibaren depolamaya kadar birçok işlem ve faktörlere bağlıdır.

Şekil 1. Karbondioksit Yakalama ve Depolama Aşamaları

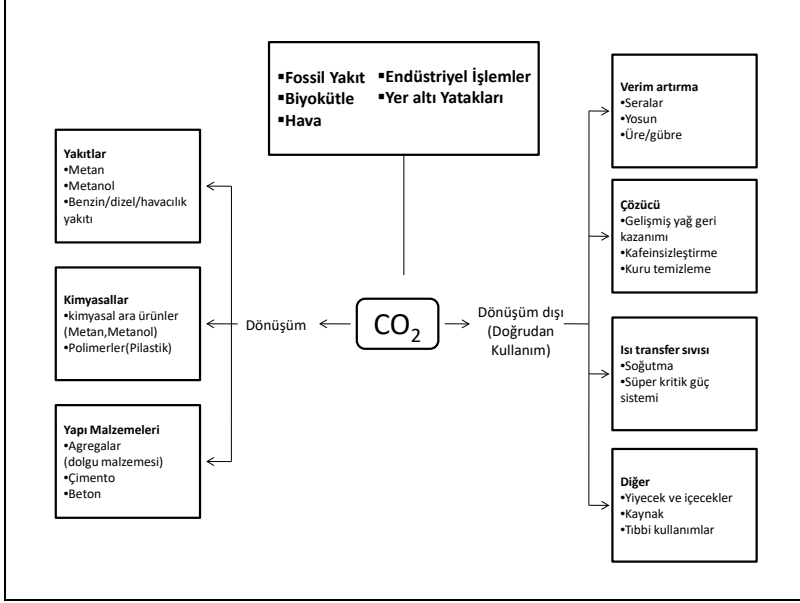


Kaynak: Karakurt vd., 2009

Günümüzde karbon yakalama teknolojileri olarak; Kimyasal Absorpsiyon, Fiziksel Ayırma, Oksi-Yakıt Ayırma, Membran Ayırma, Kalsiyum Döngüsü, Kimyasal Döngü, Doğrudan Ayırma ve Süper Kritik CO₂ Güç Çevrimleri yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada Kimyasal Absorpsiyon yöntemi seçilmiştir. Kimyasal Absorpsiyon yöntemi; CO₂ ile kimyasal bir çözücü (örneğin etanolamin bileşikleri) arasındaki reaksiyona dayanan yaygın bir işlemdir. Amin bazlı çözücüler kullanılan kimyasal absorpsiyon yöntemi, en gelişmiş CO₂ ayırma tekniğidir. En yaygın olarak kullanılan çözücü monoetanolamindir. Bu teknik uzun süredir yaygın olarak kullanılmaktadır ve şu anda dünya çapında elektrik üretimi, yakıt

dönüşümü ve endüstriyel üretim alanlarında bir dizi küçük ve büyük ölçekli projede uygulanmaktadır (IEA, 2021) (Şekil 2).

Şekil 2. Karbondioksit Kullanımı Yollarının Sınıflandırılması



Petrol Geri Kazanımı (EOR) yöntemi ise bir petrol sahasındaki petrolün büyük kısmını geri kazanmayı amaçlamaktadır. Petrol Geri Kazanımı (EOR) yöntemlerinden gaz enjeksiyonu, çoğunlukla CO₂, CH₄ ve N₂ enjeksiyonunu kapsamaktadır. Bu yöntem ham petrolün viskozitesini düşürmekte ve ham petrolü hareketlendirmektedir. Bir petrol rezervuarına CO₂ enjekte edildiğinde, petrolden gelen hafif hidrokarbonlar CO₂'de ve CO₂ de yağda çözündükçe, CO₂ ile artık ham petrol karşılıklı olarak reaksiyona girmektedir. Enjekte edilen CO₂ rezervuara girer ve kayanın gözenek boşluklarından geçerek artık ham petrol damlacıklarıyla karşılaşır, petrolle karışır ve üretim kuyularına doğru aktarılan konsantre bir petrol bankası oluşturur (www.netl.doe.gov, 2010). Türkiye, Kuzey

Amerika dışında ilk CO₂-EOR projesine sahiptir. Türkiye’de 1986 yılından itibaren Batı Raman petrol sahasında bir adet CO₂ enjeksiyonlu EOR projesi devam etmektedir (IEA, 2008).

2. CCS UYGULAMASININ MALİYET ANALİZİ

Bu çalışmada, Türkiye’de kömürlü enerji sektöründe CCS teknolojisinin uygulanmasına ilişkin özgün bir değerlendirme sağlamak için CCS' nin Entegre Tekno Ekonomik Değerlendirme Modeli (ekonomik işleyiş analizi) geliştirilmiştir. Termik santrallerde fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan CO₂'in yakalanması ve depolanması teknolojisinin uygulanabilirliği için ülkemizin güneyinde bulunan iki önemli termik santral seçilerek bir ön fizibilite çalışması yapılmıştır. Bu fizibilite düzeyindeki çalışma; enerji santrali tarama ve seçimini, depolama sahalarının uygunluk değerlendirmesini, entegre edilecek CCS projelerinin tekno-ekonomik modellemesini, kaynak-depolama eşleştirmesi ile maliyet tahminini içermektedir.

Çalışma için seçilen Adana İsken Sugözü Termik Santrali ve İskenderun Atlas Termik Santralleri Türkiye’nin güneyinde faaliyet gösteren kömür yakıtlı elektrik santralleridir. Santrallerin Adana ve İskenderun’da seçilmelerinin nedeni yüksek karbondioksit emisyonuna sahip olmaları, karbon depolama alanına yakın olmaları ve kömürle çalıştıkları için yüksek karbon salımı gerçekleştirmeleridir. İsken Sugözü Termik Santralinin kurulu gücü 1210 MW, yıllık CO₂ emisyonu 5,63 Mt. (Milyon-ton); İskenderun Atlas Termik Santrali kurulu gücü 1200 MW, yıllık CO₂ emisyonu 4,91 Mt’dir (Evans ve Pearce, 2020). Bu santrallerin kazanlarındaki yanma teknolojilerinin eski olması ve mevcut yeni teknolojilerin uygulanmasının zor ve maliyetli olması nedeniyle karbon salımını azaltmanın en iyi yolu yanma

sonrası karbon yakalama teknolojilerini kullanmak olacaktır. Karbon yakalama teknolojileri içinde en gelişmiş CO₂ ayırma tekniği; kimyasal absorpsiyon olup yaygın olarak çözücü monoetanolamini (MEA) tercih edilmektedir. Ayrıca, sulu Monoetanolamin yıkama yöntemi, Türk kömür yakıtlı elektrik santrallerinde de kanıtlanmış bir karbon yakalama teknolojisidir (Esmaili, 2018).

CO₂ yakalama maliyeti genellikle nakliye ve depolama maliyetinden daha fazla olsa da CO₂'in yakalandığı alan ile depolama/kullanım alanları arasındaki mesafe, maliyeti bir dereceye kadar etkileyebilir. En uygun ulaşım planını bulmak, ulaşım ile ilgili harcamaları kontrol altında tutmamıza yardımcı olacaktır. Başlıca CO₂ yayıcıları olan fosil yakıtlı enerji santralleri içerisinde yalnızca kömürle çalışan enerji santralleri dikkate alınmıştır ve çimento veya demir-çelik endüstrileri dahil edilmemiştir.

Yakalanan karbondioksitin boru hattı ile Batman ilinde bulunan Batı Raman Bölgesine veya Şırnak ilinde bulunan Batı Kozluca bölgesine EOR petrol geri kazanımı için nakledilmesi planlanmıştır. Burada CO₂'in Batı Raman bölgesine enjekte edilmesi; Adana ve İskenderun ile Batman arasındaki mesafenin daha kısa ve böylece maliyetin daha düşük olmasından dolayıdır.

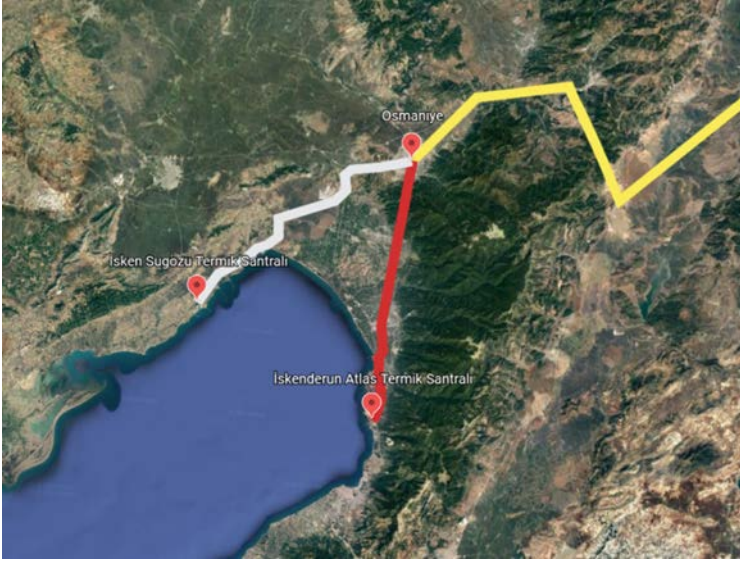
Boru hattı kabul edilebilir risk ile (yasal yükümlülüklerle ve İSG ye uygun) tasarlanmıştır. Boru hattının içeriği CO₂ ve boru hattı etrafındaki insan faaliyetleri göz önüne alınmış ve boru hattı tasarımı ileri güvenlik seviyesi dikkate alınarak oluşturulmuştur.

Boru hattında, serbest su oluşumunu önlemek ve CO₂ akışının su içeriğini kontrol edebilmek için en uygun olduğu

belirlenen 12 İnçlik Karbon-Manganez çelik hat borusu seçilmiştir.

Seçilen termik santrallerde inşa edilmesi düşünülen CO₂ boru hatlarının; her 350 m'de bir çatlak önleyici ve 16-32 km'de bir blok vanalı yalıtımlı 12 m'lik bölümlerden oluşacağı ve boru hatlarının yaklaşık 1 m derinlikte olması tasarlanmıştır. Yakalanan karbondioksitin enjeksiyon kuyusuna güvenli bir şekilde gönderilmesi için kuyu açılması gerekecektir.

Şekil 3. Termik Santrallerin CO₂ Boru Hatlarının Bir Boru Hattında Birleştirilmesi



Batı Raman petrol rezerv alanı ile İskenderun Sığoğlu Termik Santrali arasındaki boru hattı uzunluğu 529 km; Batı Raman petrol rezerv alanı ile İskenderun Atlas Termik Santrali arasındaki uzaklık 526 km'dir. İki termik santralin de birbirlerine yakın olmasından ve Batı Raman bölgesine olan uzaklıkları benzer olmasından dolayı her bir santralden ayrı ayrı döşenen boru hattını Osmaniye ilinde birleştirip tek boru hattı üzerinden

Batı Raman bölgesine CO₂'in ulaşmasının sağlanması düşünülmüştür. Adana İsken Sugözü Termik Santrali ile Osmaniye arası boru hattı uzunluğu 45 km, İskenderun Atlas Termik Santrali ile Osmaniye arası boru hattı uzunluğu 43 km ve birleşme noktası olan Osmaniye ile Batı Raman petrol rezerv alanı arasındaki boru hattı uzunluğu 483 km dir. Boru hattı güzergâhı belirlenirken zaman ve maliyet tasarrufu sağlamak için daha önceden döşenmiş olan Batman-Dörtyol Petrol Boru Hattı dikkate alınmıştır ve hattın büyük bir kısmının bu bölgelerden geçmesi planlanmaktadır. Daha önceden var olan Batman-Dörtyol Petrol boru hattı Batman Terminalinden başlamaktadır. Daha sonra Bismil, Diyarbakır Merkez, Pirinçlik Pompa İstasyonu, Siverek, Hilvan, Bozova, Araban, Sarıl Pompa istasyonu, Pazarcık, İslâhiye, Bahçe ve Osmaniye'den geçerek Hatay Dörtyol'da bitmektedir. Dörtyol ve İskenderun Atlas Termik Santrali arasında 16 km'lik küçük bir mesafe kalmaktadır (Şekil 3 ve 4).

Şekil 4. Batı Raman ile Termik Santraller Arasında Döşenecek Boru Hattı Görünümü



CO₂ yakalama ve depolama maliyetini hesaplamada aşağıdaki formüller kullanılmıştır.

$$\text{cost}_{\text{avoid}} = \frac{\text{LACOE}}{(\text{EF})_{\text{current}} - (\text{EF})_{\text{retrofit}}} = \frac{(\text{LACOE})_{\text{retrofit}} - (\text{LACOE})_{\text{current}}}{(\text{EF})_{\text{current}} - (\text{EF})_{\text{retrofit}}} \quad (1)$$

$$\text{LCOE} = \frac{(\text{fcf} \cdot \text{C}_{\text{TCR}} + \text{C}_{\text{FOM}})}{(\text{P}_{\text{net}} \cdot \text{Hrs}) + \text{VOM} + \text{HR} \cdot \text{FC}} \quad (2)$$

$$\text{cost}_{\text{levelized}} = \frac{\text{fcf} \cdot \text{C}_{\text{TCR_CCUS}} + \text{C}_{\text{FOM_CCUS}} + \text{P}_{\text{CCUS}} \cdot \text{Hr} \cdot \text{S}_{\text{CCUS}} \cdot \text{C}_{\text{ele}} + m_{\text{CO}_2, \text{cap}} \cdot \text{C}_{\text{T\&S}}}{m_{\text{CO}_2, \text{cap}}} \quad (3)$$

$$\text{LACOE} = \frac{(\text{cost}_{\text{levelized}} \cdot m_{\text{CO}_2, \text{cap}})}{(\text{P}'_{\text{net}} \cdot \text{Hrs})} \quad (4)$$

Tasarlanan projenin maliyet hesabını yapmak üzere Wei'nin (Wei, vd.,2021) çalışmasının alt ve üst sınır maliyet değerleri kullanılmıştır. Buna göre yapılan çalışmada santrallerde CO₂' i yakalamak için gereken tesislerin toplam kurulum maliyeti en az 316.200.000 USD/yıl, en fazla 527.000.000 USD/yıl; boru hattı ile toplam taşıma maliyeti en az 111.106.000 USD, en fazla 388.871.000 USD; toplam depolama maliyeti yıllık en az 632.400.000 USD, en fazla 1.054.000.000 USD'dir. Kurulum, taşıma ve depolama maliyetlerinin toplamı en az 1.059.706.000 USD, en fazla 1.969.871.000 USD'dir.

İki termik santralin yıllık toplam CO₂ emisyonu 10,54 Mt.'dur. Bu karbondioksitin depolanması ile 2.342.222 varil petrol üretilebilecektir. Üretilen petrolün toplam fiyatı yaklaşık 175.666.650 USD' a denk gelmektedir. Buradan çıkartılan

sonuca göre; üretilen petrol ile harcanan maliyet en az değere göre hesaplanırsa 6 yıl zarfında karşılanabilmekte, en fazla değere göre hesaplanırsa neredeyse 11 yıl zarfında karşılanabilmektedir.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kömürle çalışan iki termik santralin baca gazı üzerinde pilot ölçekte yanma sonrası yakalama projesi tasarlanmıştır. Yüksek kurulu güce sahip olan bu santraller İskenderun Sugözü Termik Santrali ve İskenderun Atlas Termik Santrali'dir. Hesaplamalar sonucunda bu iki santralden yıllık yakalanan toplam CO₂ emisyonu 10,54 Mt. dur. İskenderun Sugözü Termik Santralinden Batı Raman petrol rezerv alanına taşınan CO₂'nin boru hattı uzunluğu 529 km; İskenderun Atlas Termik Santralinden Batı Raman petrol rezerv alanına taşınan CO₂'nin boru hattı uzunluğu 526 km'dir. İki santralden döşenen boru hattının Osmaniye'de tek hat üzerinde birleştirilip taşınması en uygun seçenek olarak belirlenmiştir. EOR teknolojisi ile Batı Raman'da üretilen petrol miktarı 2.342.222 varildir. Bu proje dahilinde karbon yakalama, taşıma ve depolama toplam maliyeti ortalama 1.514.788.500 USD olarak hesaplanmıştır.

Sugözü Termik Santrali ve İskenderun Atlas Termik Santrali için hazırlanan yukarıdaki projeye göre Batı Raman bölgesine yakalanan CO₂'nin depolanması ve buradan petrol geri kazanımı oldukça geçerli bir seçenektir. Yapılan hesaplamalar dahilinde en az bir yıl zarfında harcanan maliyetin geri dönüşünün gerçekleşeceği, petrol üretiminin bu sayede artacağı ve böylece CO₂'nin atmosfere salınmayıp sera gazına sebep olmayacağı anlaşılmıştır. Türkiye'de CCS ve EOR teknolojilerinin birleşimi ile karbon emisyonunun azaltılması için ciddi engeller görünmemektedir. Elde edilen veriler, Ağralı vd.,

2018 çalışması ile karşılaştırıldığında bulunan sonuçlar birbiri ile uyumludur. Türkiye’de karbon emisyonlarını çevresel ve ekonomik olarak ödüllendirici bir şekilde azaltmanın bir yolu olarak karbon yakalama, depolama ve kullanımına öncelik verilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

Yerel nokta kaynaklarını potansiyel ticari CO₂-EOR ve CO₂-ECBM faaliyetleriyle eşleştirerek, ülkemizin hem yakalama hem de depolama alanlarında elde edilebilecek bazı fırsatlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Manisa Soma Linyit rezervi, İzmir, Manisa ve Aydın'daki termik santraller, demir-çelik ve çimento fabrikaları ile petrol rafinerilerinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını depolama potansiyeline sahiptir.
- Kütahya Tavşanlı linyit rezervi, Kütahya çevresindeki kömürlü termik santrallerden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını depolama potansiyeline sahiptir.
- Bursa linyit rezervi Bursa'daki kömürlü termik santraller, demir-çelik fabrikalarından kaynaklanan CO₂ emisyonlarını depolama potansiyeline sahiptir;
- Çayırhan ve Kırşehir linyit rezervi, Ankara'daki kömürlü termik santrallerden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını depolamak için kullanılabilir.
- Muğla-Yatağan linyit rezervi, Muğla çevresindeki kömürle çalışan termik santrallerden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını depolama potansiyeline sahiptir.
- Zonguldak taşkömürü rezervi, Zonguldak'taki kömürlü termik santraller, demir-çelik ve çimento fabrikalarından kaynaklanan CO₂ emisyonlarını depolama potansiyeline sahiptir.

- Trakya bölgesindeki doğal gaz ve petrol sahaları, Kırklareli çevresindeki kömüre dayalı termik santrallerden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını depolamak için kullanılabilir.
- Kahramanmaraş-Elbistan linyit rezervi, Kahramanmaraş santralleri ile Osmaniye ve Hatay'daki demir-çelik fabrikalarından kaynaklanan CO₂ emisyonlarının depolanmasında kullanılabilir.
- Güneydoğu Anadolu petrol ve doğal gaz sahaları, özellikle Batman'daki Batı Raman sahası, bu sahalardan yüksek yoğunluklu petrol üretimi nedeniyle EOR faaliyetlerine devam etmektedir. Şu anda Dodan sahasında CO₂ üretilmekte olup; bununla birlikte, Batman'daki bir petrol rafinerisinden ve Batman çevresindeki kömürle çalışan mobil elektrik santrallerinden de CO₂ emisyonları yakalanabilir. Batı Kozluca'da ticari CO₂ enjeksiyon faaliyetleri de devam halindedir (Kok ve Vural, 2012).

Sonuç olarak; Atmosferde fazla karbondioksit birikmesini önlemek üzere yapılan çalışmalar ve literatür araştırmalarından elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur:

- Karbon yakalama teknolojileri arasında en yaygın olarak kullanılan teknik; kimyasal absorpsiyondur.
- Günümüzde dünyada CCS teknolojisinden faydalanılarak en kısa vadede faydalı yakıt dönüşümü EOR teknolojisi ile petrol üretimi alanında gerçekleştirilmektedir. Türkiye, Kuzey Amerika dışında ilk CO₂-EOR projesini uygulayan ülkedir.
- Ülke ekonomisine ciddi yarar sağlayan Kütahya ilinde faaliyet gösteren Seyitömer, Tunçbilek ve Polat Termik

santrallerinden elde edilen karbon emisyonlarını EOR ile değerlendirilmesi düşünülmüştür. Fakat, CCS-EOR sisteminin kullanılmasının bu santraller için uygun olmadığı anlaşılmıştır. Çünkü, santrallerin kurulu güçleri 600 MW dan küçük ve toplam yakalanabilir CO₂ miktarı 10 Mtpa dan azdır. Ayrıca ülkemizdeki kaynak ve depolama eşleştirmesi, maliyet geri kazanımı vb. yönlerden uygun olmayan bu santraller için yakalanan CO₂ üre üretiminde değerlendirilebilir.

- ECBM teknolojisinin uygulanabilmesi için yeraltı kömür ve karbondioksit reaksiyonunun iyi anlaşılması gerekmektedir. ECBM ile metan geri kazanımı için çok uzun süreleri kapsayan laboratuvar süreçleri ve yetersiz literatür; bu seçeneğin kullanımında tereddüde sebep olmaktadır.
- Emisyon merkezi ile CO₂ depolama merkezi arasındaki uzaklık maliyetleri artırmaktadır. Bu nedenle kaynak ve depolama noktası arasındaki eşleşme iyi analiz edilmelidir.
- Potansiyel CO₂ sızıntısı, jeolojik depolama için büyük bir endişe kaynağıdır ve kapsamlı bir izleme programının geliştirilmesi gerekmektedir. Güvenli karbondioksit depolanması en önemli unsurlardan biridir. Karbondioksit enjeksiyon kuyusunun emniyetli bir şekilde çalıştırılmaması, çevresinde yer alan yaşam alanına olumsuz sonuçlar doğurabilir.
- Türkiye’de CCS teknolojisine ilişkin yeterli çalışma düzeyine ulaşılmamıştır. Ayrıca ülkemizde deprem riskinin yüksek olması teknik zorlukları ve yetersiz finansal mekanizmaları beraberinde getirmektedir. Türkiye ve dünyada karbon yakalama, depolama ve

değerlendirme konusunda araştırma çalışmalarına devam edilmektedir.

- Türkiye’de yeterince gelişmemiş durumda olan Karbon ticareti sistemi hakkında çalışmalar yapılmalı, bilinçlendirme sağlanmalıdır. Türkiye’de, Karbon yakalama ve depolama için yasal mevzuat bulunmamaktadır.

Tablo 1. Simgeler ve Kısaltmalar Dizini

Simge			
LACOE	Seviyelendirilmiş ek elektrik maliyeti	$m_{CO2/cap}$	Yıllık yakalanan CO ₂ miktarı (t/a)
VOM	Değişken yakıt dışı işletme ve bakım maliyetleri (USD/MWh)	P_{CCUS}	Elektrik tüketimi (MW) kaynaklı eşdeğer ve entegre CCUS sistemi kaynaklı enerji cezaları
EF	Karbondiyoksit emisyon faktörü (t/MWh)	FC	Birim yakıt maliyeti (USD/GJ)
HR	Net ısı oranı (GJ/MWh)	P'_{net} , P_{net}	CCUS olmadan net güç çıkışı (MW)
$cost_{levelized}$	CCUS projesinin seviyelendirilmiş maliyeti (USD/t)		Alt Simge
$cost_{avoid}$	Karbondiyoksit azaltımı maliyeti (USD/t)	retrofit	Güçlendirme
$C_{TCR-CCUS}$	CCUS sermaye maliyeti (USD)	current	Mevcut
$C_{FOM-CCUS}$	CCUS yıllık sabit işletme ve bakım maliyeti (USD)	C_{ele}	CCUS güçlendirmeleri için elektrik santralindeki LCOE veya iç elektrik fiyatı (USD/MWh)
Hrs_{CCUS} , Hrs	CCUS ve kömür santrallerinin yıllık işletme süreleri (saat/yıl)	$C_{T\&S}$	Elektrik tüketimi olmadan boru hattı taşımacılığı, jeolojik kullanım ve depolamanın seviyelendirilmiş maliyeti (USD/t)
LCOE	CCUS kaynaklı seviyelendirilmiş elektrik maliyeti (USD/MWh)		

KAYNAKÇA

- Ağralı, S., Üçtuğ, F.G. ve Türkmen, B.A. 2018. An optimization model for carbon capture & storage/utilization vs. carbon trading: A case study of fossil-fired power plants in Turkey. *Journal of Environmental Management*, 215, 305-315. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.054>
- Esmaeili, D. 2018, Haziran. Carbon Capture, Utilization and Storage in the Context of Turkish Energy Market. IICEC Energy and Climate Research Paper. Sabancı University. 1-17.
[carbon_capture_storage_and_utilization_in_turkey.pdf](https://www.sabanciuniv.edu/~carbon_capture_storage_and_utilization_in_turkey.pdf)
(sabanciuniv.edu)
- Evans, S. ve Pearce, R. 2020. Mapped: The world's coal power plants. <https://www.carbonbrief.org/mapped-worlds-coal-power-plants>
- Fichera, A. Ve Volpe, R. 2020. Investigating the competitiveness of Carbon and Storage in Italian power plants under different investment scenarios. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 93, 1-13
- Furre, A.K., vd. 2017. 20 years of monitoring CO₂-injection at Sleipner. *Energy Procedia*, 114, 3916–3926. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1523>
- Global CCS Institute. 2014 The global Status of CCS. <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/180923/global-status-ccs-2014.pdf>
- Hill, B., Hovorka, S. ve Melzer, S. 2013. Geologic carbon storage through enhanced oil recovery. *Energy Procedia*, 37, 6808–6830. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.614>

- Karakurt, İ. Aydın, G. ve Aydın, K. 2009. Yer altı Jeolojik Rezervuarlarında Karbondioksitin Depolanması. TUBAV Bilim Dergisi, 2(2), 175-184. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tubav/issue/21515/230852>
- Kok, M.V. ve Vural, A. 2012. The Clean Coal and Carbon Capture and Storage Technology of Turkey. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 34(6), 531-539. https://www.researchgate.net/publication/271937828_The_Clean_Coal_and_Carbon_Capture_and_Storage_Technology_of_Turkey
- NOAA. 2020. National Oceanic and Atmospheric Administration, Global Climate report. <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202013>
- Norveç İklim ve Çevre Bakanlığı. 2019. Norveç Ulusal Planı. https://www.regjeringen.no/contentassets/4e0b25a4c30140cfb14a40f54e7622c8/national-plan-2030_version19_desember.pdf
- Ocak, M. E., 2019. İklim Değişikliğiyle Savaşmanın En İyi Yolu: Ağaç Dikmek <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/>
- Sayaner, O., 2013. Mikroalg Yetiştiriciliği Yoluyla Baca Gazı Kaynaklı Karbondioksit Azaltımı, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul
- Senior, B., vd. 2011. Carbon Capture and Storage in China - Main Findings from ChinaUK Near Zero Emissions Coal (NZE) Initiative. Energy Procedia, 4, 5956–5965. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.598>
- Sığırtmaç, E. 2022. Karbon Yakalama ve Depolama ile Petrol Geri Kazanımı Teknolojilerinin Birlikte Uygulanmasının

Fizibilitesi, Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kütahya

- Solomon, S., Carpenter, M. ve Flach, T. 2008. Intermediate storage of carbon dioxide in geological formations: A technical perspective. International journal of greenhouse gas control 2, 2(4), 502-510. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.04.004>
- Şahbaz Kılınç, N. Ve Çoban, O. 2015. Yenilenebilir Enerji Tüketimi ve Karbon Emisyonu İlişkisi: TR Örneği. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi. 38, 195-208. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/219672>
- Wei, N., vd. 2021. Decarbonizing the Coal-Fired Power Sector in China via Carbon Capture, Geological Utilization, and Storage Technology. Environmental Science and Technology, 55, 13164–13173. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.1c01144>

ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATIONS: INTEGRATION OF SMART SYSTEMS IN DIGITAL MANUFACTURING PROCESSES

Koray ÖZSOY¹

1. OVERVIEW OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES

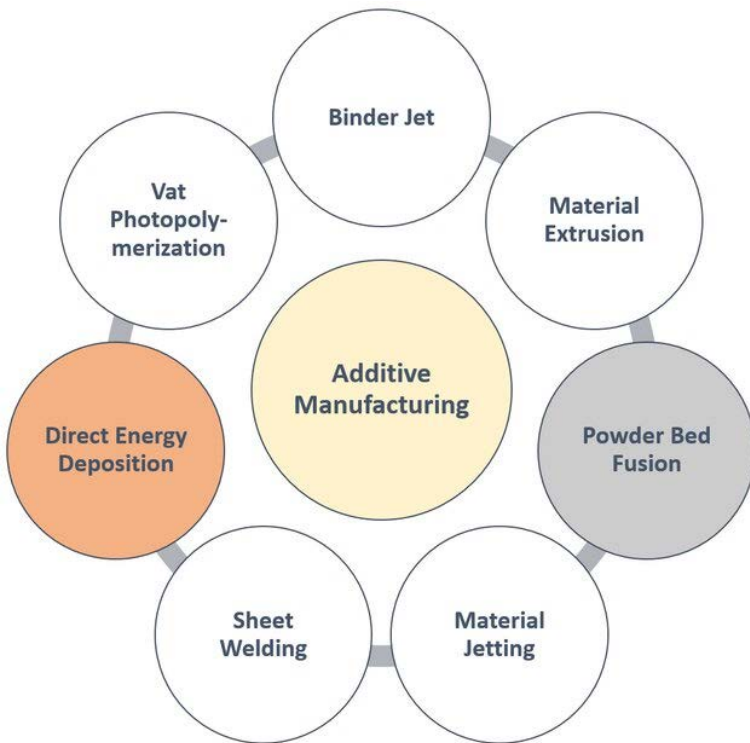
Additive manufacturing traces its origins to the 1970s but gained significant traction in the 1980s with Charles Hull's development of stereolithography (SLA). By the 1990s, technologies such as Fused Deposition Modeling (FDM) and Selective Laser Sintering (SLS) entered the commercial market, making additive manufacturing widely adopted for prototype production. During this period, the use of diverse materials expanded, and industries like biomedical, automotive, and aerospace began integrating these technologies (Rouf et al. 2022; Najmon et al. 2019).

In the 2000s and beyond, additive manufacturing evolved to handle metals, plastics, ceramics, and biomaterials, enabling the production of more intricate components. Today, with the integration of artificial intelligence, big data, cloud computing, and the Internet of Things, additive manufacturing has become a key player in digital manufacturing and is increasingly used for mass production. Its flexibility in design and cost-effectiveness

¹ Assoc. Prof. Dr., Isparta University of Applied Sciences, Isparta OSB Vocational School, Machine and Metal Technologies, korayozsoy@isparta.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8663-4466.

makes it appealing across various sectors (Blakey-Milner et al. 2021). The American Society for Testing and Materials (ASTM) committee ASTM F42-Additive Manufacturing categorized into seven types of AM technologies, as shown in Figure 1 (Abuabiah et al., 2023).

Figure 1. Additive Manufacturing Technologies Divided into The Seven Standardized Categories



Source: (Abuabiah et al., 2023).

Additive manufacturing differs from traditional manufacturing methods primarily in terms of part production process and material utilization. Traditional methods typically involve removing excess raw material through machining, while additive manufacturing builds parts layer by layer, adding material to make the final part. This approach results in less

material waste and allows for the direct creation of complex geometric structures without the need for molds. Additionally, additive manufacturing is well-suited for economically producing customized parts in small-scale production, whereas traditional methods are generally more cost-effective for large-scale production (Attaran 2017).

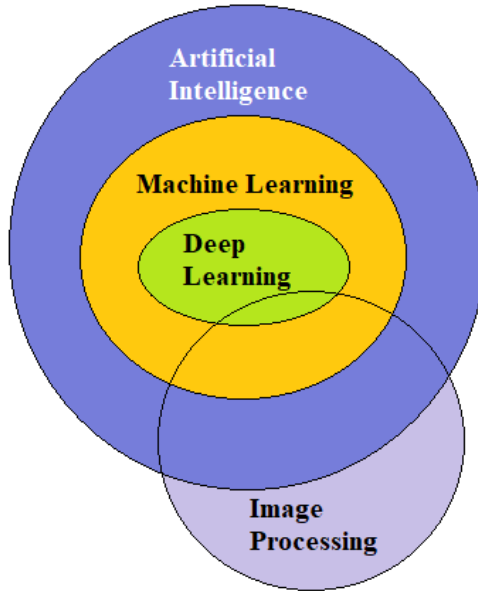
Industry 4.0 plays a major role in advancing additive manufacturing technologies. Key elements of Industry 4.0, such as artificial intelligence, big data, cloud computing, and the Internet of Things (IoT), make additive manufacturing processes more intelligent, flexible, and efficient. The integration of Industry 4.0 with additive manufacturing allows real-time monitoring and optimization of production processes. Moreover, digitalization integrates all stages, from design to production, into a unified digital environment, accelerating production and reducing costs (Craveiro et al. 2019; Khalifa et al. 2024).

2. ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING: ROLE IN MANUFACTURING PROCESSES

The core concepts of artificial intelligence (AI) are based on algorithms and techniques that allow machines to exhibit human-like intelligence. One of the key concepts is machine learning (ML), where systems can learn from data and enhance their performance over time without being explicitly programmed for every task. Image processing is another key concept that enables machines to analyze and interpret visual data, such as images and videos. This is vital for applications like facial recognition and autonomous driving. Deep learning (DL), a subset of machine learning, uses artificial neural networks to handle large and complex data sets, enabling more sophisticated learning processes and decision-making abilities. Together, these

concepts form the foundation of AI, making it capable of solving complex problems and performing tasks that typically require human intelligence. Figure 2 shows the interrelationships between AI, ML, DL, and image processing, highlighting their interconnected roles in advancing technology.

Figure 2. AI, ML, DL and Image Processing Relationship Diagram



ML and DL are revolutionizing manufacturing by improving efficiency and reducing costs. ML predicts maintenance needs, detects failures early, and optimizes production using sensor data. DL, particularly in image processing, automates quality control by identifying product defects. These technologies make production processes faster, more precise, and reduce human intervention, boosting industrial automation and competitiveness (Tercan and Meisen 2022; Luca et al 2022).

Additive manufacturing (AM) and AI play an important role at the intersection of modern manufacturing technologies. AI

provides optimization at every stage of AM processes, from design to production. For example, AI-powered algorithms can optimize material usage, detect errors that may occur during printing in advance and speed up the process. In addition, ML makes it possible to analyze production data and produce more complex and customized products. When these two technologies are used together, more efficient, flexible and sustainable production processes emerge (Yang et al 2017).

3. INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND SMART MANUFACTURING SYSTEMS

Smart manufacturing systems, as part of Industry 4.0, present more efficient and flexible production processes through the integration of digital technologies. The key elements of smart systems include artificial intelligence, the Internet of Things (IoT), big data analytics, cloud computing, and cyber-physical systems. With smart systems technologies, machines and systems can communicate with each other, collect and analyze data. Smart manufacturing reduces production errors, enables more efficient use of resources, and offers flexible production that can be customized based on demand (Zheng et al. 2018).

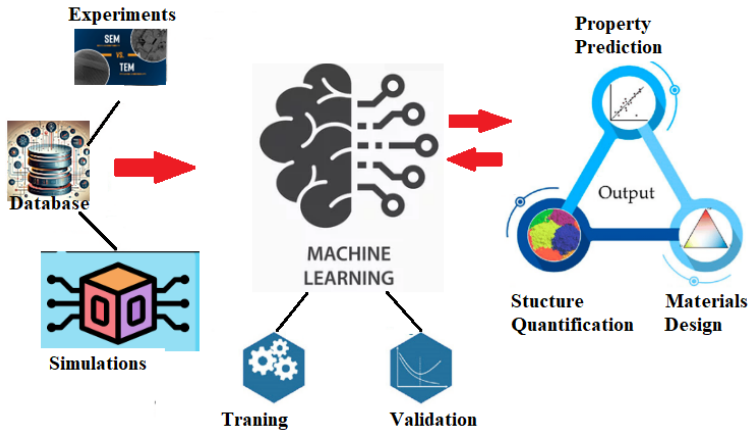
In real-time monitoring, forecasting, and decision-making processes, artificial intelligence facilitates rapid and accurate decision-making by instantly gathering and analyzing data. The data collected from sensors and the Internet of Things (IoT) is processed by AI algorithms to detect potential issues early and enable the system to take automatic actions. This improves process optimization and boosts efficiency. Moreover, AI can autonomously make adaptive decisions in dynamic environments without human intervention, ensuring seamless and more reliable operations (Tien 2017; Fu et al. 2023).

The integration of robotics and automation systems with artificial intelligence enhances the intelligence and flexibility of production processes. AI allows robots to autonomously carry out more complex tasks, significantly reducing the need for human involvement. Through machine learning algorithms, robots can continuously improve and make adaptive decisions based on the data they acquire from their surroundings. This integration boosts efficiency in production lines, lowers error rates, and optimizes costs. Additionally, it provides a competitive edge by enabling customizable and flexible production processes (Jha et al 2021).

4. AI-DRIVEN MATERIALS SCIENCE IN ADDITIVE MANUFACTURING

Artificial intelligence applications offer revolutionary innovations in the processes of material selection and development. The AI-driven materials science workflow, as illustrated in Figure 3, showcases a comprehensive approach that integrates advanced artificial intelligence techniques to enhance various stages of material selection and development. AI algorithms can analyze large datasets to predict the physical and chemical properties of materials with a high degree of accuracy. This accelerates the design of more durable, lightweight, and eco-friendly materials, reducing costs by replacing traditional trial-and-error methods. Ultimately, the integration of AI in material selection and development opens new possibilities for advancing technology and addressing pressing global challenges, such as sustainability and resource efficiency. Additionally, AI can simulate the performance of new materials in advance, enhancing production efficiency and boosting innovation capacity (Dimiduk et al.,2018).

Figure 3. AI-Driven Materials Science Workflow



Source: (Frydrych et al, 2023).

Artificial intelligence provides a major advantage in engineering by significantly speeding up material selection, simulation and testing processes. AI-based systems use past data to predict material properties, enabling the identification of the most suitable options and simulations that evaluate the performance of materials in advance. AI-driven rapid analysis and testing process facilitates faster and more effective results, accelerating research and development. As a result, the time and cost associated with bringing new materials to market is greatly reduced (Guo et al., 2021).

5. FUTURE POTENTIAL APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES

Extensive research is underway on the integration of artificial intelligence (AI) techniques into additive manufacturing (AM) processes, with the field showing substantial future potential. AI is being leveraged across multiple phases of AM to drive process optimization, error mitigation, and overall

operational efficiency. The prospective applications and advancements of AI in AM are categorized into key areas, including “Design Optimization”, “Process Monitoring and Control”, “Manufacturing Parameter Optimization”, “Fault Prediction and Predictive Maintenance”, “Material Science and Innovation in New Material Development”, “Automation of AM Processes”, and “Sustainability and Waste Minimization” (Monfared, 2023).

Ciccone et al. (2023) explore how artificial intelligence (AI) can significantly assist designers and operators in optimizing additive manufacturing (AM), particularly in environments requiring high customization and low production volumes. The study also investigates AI’s potential to enhance AM processes, ranging from simulation optimization to in-process monitoring, while considering future applications and advancements in the field. Paraskevoudis et al. (2020) applied an artificial intelligence-based computer vision methodology using deep neural networks to detect 3D printing defects, specifically wire drawing, during the Fused Deposition Modelling (FDM) process by analyzing live video streams. The trained model is shown to be able to accurately identify the wire drawing defect in real-time and has the potential to stop the printing process or adjust the relevant parameters to correct the defect.

Goh et al., (2021) mentioned that machine learning (ML) enhances various aspects of AM, including design, material optimization, and process monitoring, with applications in fields such as biomedicine and construction. He also stated that as better data collection techniques and more powerful computer chips for ML are developed, the use of ML in AM will become more mature and widely adopted. Cai et al., (2024) emphasized that robotized wire-laser directed energy deposition (DED) holds great promise for producing complex metal parts, but it faces challenges related to process stability. Specifically, he mentioned

that the designed multi-modal IPTD estimation model, consisting of a convolutional neural network (CNN) and a fully connected network, combines the features of molten pool images and process parameters to predict the IPTD state. The regression performances of single-modal and multi-modal IPTD estimation models were analyzed and discussed. As a result, the study proposed a novel deep learning-based approach to monitor deposition stability, achieve high classification accuracy, and demonstrate the method's effectiveness for future process control.

Hosseinzadeh et al., (2023) evaluated machine learning (ML), deep learning (DL) and deep hybrid learning (DHL) models for fault detection and predictive maintenance. Using a synthetic dataset, the study revealed that Deep Forest and Gradient Boosting algorithms provide over 90% accuracy in predicting potential system failures. Anang et al. (2024) investigates the transformative effects of integrating topological data analysis (TDA) with artificial intelligence and machine learning in advanced manufacturing contexts. TDA offers a robust framework for analyzing intricate patterns in data, maintaining resilience against noise and revealing fundamental structures. In the domains of predictive maintenance and process optimization, TDA facilitates proactive interventions by identifying early indicators of equipment failure and improving production efficiency. The study presents substantial enhancements in manufacturing productivity and reliability through detailed case studies and practical applications of these analytical methodologies.

6. CONCLUSIONS AND FUTURE VISION

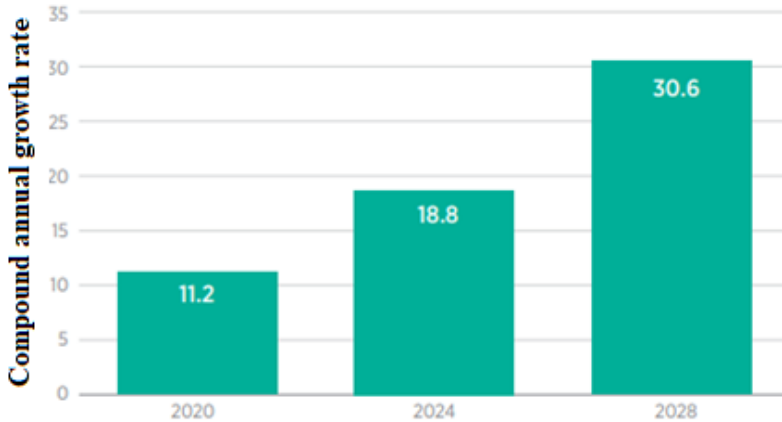
The Conclusion and future vision comprise the future potential of AI and additive manufacturing technologies, research

and development areas, industry adoption rates and future projections.

6.1. Future Potential of Artificial Intelligence and Additive Manufacturing Technologies

Additive manufacturing (AM) has been predicted to be one of the most transformative technologies of our time since 1979. As the use of this technology, driven by its integration with Industry 4.0 components, becomes an increasingly prominent trend, the market continues to grow rapidly. The global "Additive Manufacturing" market, valued at 11.2 billion USD in 2020, is expected to reach 30.6 billion USD by 2028 as shown in Figure 4.

Figure 4. Projected Global Additive Manufacturing Market Size (2020-2028)



Source: (Statista, 2024)

As key components of the digital industry, artificial intelligence (AI) and additive manufacturing (AM) technologies have the potential to introduce groundbreaking innovations in manufacturing processes. The high accuracy of AI algorithms in learning, prediction, and classification, combined with the

manufacturability and design freedom offered by AM, is expected to optimize manufacturing processes for more efficiency, cost-effectiveness, and customization. The integration of AI and AM two technologies is anticipated to make significant contributions to the optimization of production processes.

AI plays a crucial role in optimizing AM processes. With advanced AI algorithms, it is possible to predict outcomes from the design stage to the production process, ensuring optimal material usage, high efficiency, and high production speeds. Moreover, by improving systems that detect incorrect or insufficient support building on the manufacturing table during the AM process and improving automated quality control processes, production errors can be minimized. Thus, enhances reliability, especially in industries that require high precision, such as automotive, aviation-space, medical, and biomedical sectors, while also reducing production times and providing cost advantages.

In the future, the continued integration of artificial intelligence (AI) and additive manufacturing (AM) could enable the realization of fully autonomous additive manufacturing processes. Leveraging machine learning, complex manufacturing challenges can be addressed in real time, optimizing production processes and facilitating both prototype and mass production at reduced costs. Consequently, this integration is expected to bring about a significant transformation at both the industrial and consumer levels, fundamentally altering market dynamics.

6.2.Research And Development Focus Areas of Artificial Intelligence and Additive Manufacturing Technologies

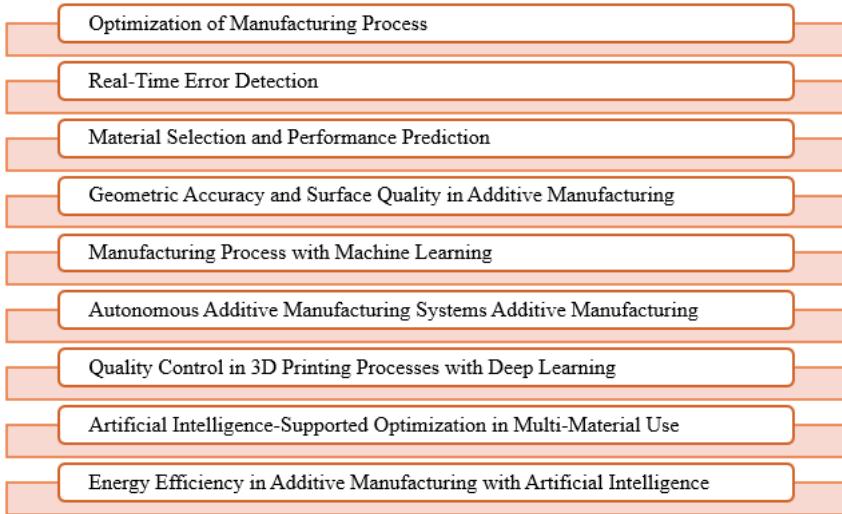
The integration of artificial intelligence (AI) and additive manufacturing (AM) technologies is transforming traditional manufacturing methods, providing more flexible, faster, and

highly customizable production systems. As a rapidly advancing field, additive manufacturing technologies continue to evolve, with machine learning expected to play a key role in future developments. In this context, R&D areas make a decide of manufacturing process and real-time error detection of AM technologies optimized through machine learning and by deep learning are crucial to ensure that the most effective AI solutions are applied, supporting the continued advancement of emerging AM technologies. (Jiang, 2023).

Comprehensive research is being conducted on autonomous additive manufacturing equipment and process technologies. To revolutionize production efficiency and flexibility, cutting-edge manufacturing methods are being integrated with digital twin, artificial intelligence, monitoring, diagnostics, and autonomous operation technologies, leading to the development of innovative applications. Digital twin (DT) technology is used as a new approach to overcome many production problems such as the physical limit of the part and extending the time required for it to not deteriorate.

DT is defined as dynamic digital replicas of a manufacturing system or service, reflecting specific characteristics, operational conditions, and real-time data, providing an active and unique representation. Additionally, DT saves time and costs by replacing costly prototypes and long testing processes thanks to virtual simulations. This technology makes additive manufacturing processes flexible and predictable, making it possible to work on complex product designs with high accuracy. Figure 5 outlines the key topics of Research and Development in the areas of Artificial Intelligence and Additive Manufacturing Technologies.

Figure 5. Key Topics in the R&D of Artificial Intelligence and Additive Manufacturing Technologies



REFERENCES

- Abuabiah, M., Mbodj, N. G., Shaqour, B., Herzallah, L., Juaidi, A., Abdallah, R., & Plapper, P. (2023). Advancements in laser wire-feed metal Additive Manufacturing: A brief review. *Materials*, 16(5), 2030.
- Anang, A. N., & Chukwunweike, J. N. Leveraging. (2024) Topological Data Analysis and AI for Advanced Manufacturing: Integrating Machine Learning and Automation for Predictive Maintenance and Process Optimization. 13(9), 27-39.
- Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business horizons*, 60(5), 677-688.
- Blakey-Milner, B., Gradl, P., Snedden, G., Brooks, M., Pitot, J., Lopez, E., ... & Du Plessis, A. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*, 209, 110008.
- Cai, Y., Zhang, S., Wang, Y., Chen, H., & Xiong, J. (2024). Monitoring process stability in robotic wire-laser directed energy deposition based on multi-modal deep learning. *Journal of Manufacturing Processes*, 128, 111-124.
- Ciccone, F., Bacciaglia, A., & Ceruti, A. (2023). Optimization with artificial intelligence in additive manufacturing: a systematic review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(6), 303.
- Craveiro, F., Duarte, J. P., Bartolo, H., & Bartolo, P. J. (2019). Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0. *Automation in construction*, 103, 251-267.
- Dimiduk, D. M., Holm, E. A., & Niezgoda, S. R. (2018). Perspectives on the impact of machine learning, deep

- learning, and artificial intelligence on materials, processes, and structures engineering. Integrating Materials and Manufacturing Innovation, 7, 157-172.
- Frydrych, K., Karimi, K., Pecelerowicz, M., Alvarez, R., Dominguez-Gutiérrez, F. J., Rovaris, F., & Papanikolaou, S. (2021). Materials informatics for mechanical deformation: A review of applications and challenges. Materials, 14(19), 5764.
- Fu, L., Li, J., & Chen, Y. (2023). An innovative decision making method for air quality monitoring based on big data-assisted artificial intelligence technique. Journal of Innovation & Knowledge, 8(2), 100294.
- Goh, G. D., Sing, S. L., & Yeong, W. Y. (2021). A review on machine learning in 3D printing: applications, potential, and challenges. Artificial Intelligence Review, 54(1), 63-94.
- Guo, K., Yang, Z., Yu, C. H., & Buehler, M. J. (2021). Artificial intelligence and machine learning in design of mechanical materials. Materials Horizons, 8(4), 1153-1172.
- Hosseinzadeh, A., Chen, F. F., Shahin, M., & Bouzary, H. (2023). A predictive maintenance approach in manufacturing systems via AI-based early failure detection. Manufacturing Letters, 35, 1179-1186.
- Jiang, J. (2023). A survey of machine learning in additive manufacturing technologies. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 36(9), 1258-1280.
- Jha, N., Prashar, D., & Nagpal, A. (2021). Combining artificial intelligence with robotic process automation—an intelligent automation approach. Deep learning and big data for intelligent transportation: enabling technologies and future trends, 245-264.

- Khalifa, R. B., Nhassa, G., & Snoussi, A. (2024). An Overview of Additive Manufacturing's Role in industry 4.0. Modeling, Analysis, and Control of Smart Energy Systems, 137-152.
- Luca, A. R., Ursuleanu, T. F., Gheorghe, L., Grigorovici, R., Iancu, S., Hlusneac, M., & Grigorovici, A. (2022). Impact of quality, type and volume of data used by deep learning models in the analysis of medical images. Informatics in Medicine Unlocked, 29, 100911.
- Monfared, V. (2023). Application of Artificial Intelligence (Machine Learning) in Additive Manufacturing, Bio-Systems, Bio-Medicine, and Composites. In Additive Manufacturing for Biocomposites and Synthetic Composites (pp. 152-203). CRC Press.
- Najmon, J. C., Raeisi, S., & Tovar, A. (2019). Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. Additive manufacturing for the aerospace industry, 7-31.
- Paraskevoudis, K., Karayannis, P., & Koumoulos, E. P. (2020). Real-time 3D printing remote defect detection (stringing) with computer vision and artificial intelligence. Processes, 8(11), 1464.
- Rouf, S., Malik, A., Singh, N., Raina, A., Naveed, N., Siddiqui, M. I. H., & Haq, M. I. U. (2022). Additive manufacturing technologies: Industrial and medical applications. Sustainable Operations and Computers, 3, 258-274.
- Statista, (2024). <https://www.statista.com/statistics/284863/additive-manufacturing-projected-global-market-size/> Access Date 21 September, 2024

- Tercan, H., & Meisen, T. (2022). Machine learning and deep learning based predictive quality in manufacturing: a systematic review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33(7), 1879-1905.
- Tien, J. M. (2017). Internet of things, real-time decision making, and artificial intelligence. *Annals of Data Science*, 4, 149-178.
- Yang, J., Chen, Y., Huang, W., & Li, Y. (2017, September). Survey on artificial intelligence for additive manufacturing. In 2017 23rd international conference on automation and computing (ICAC) (pp. 1-6). IEEE.
- Zheng, P., Wang, H., Sang, Z., Zhong, R. Y., Liu, Y., Liu, C., ... & Xu, X. (2018). Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13, 137-150.

INVESTIGATION OF TENSILE STRESS AND PERCENTAGE ELONGATION RELATIONSHIPS IN ALLOYS DEPENDING ON THE ALLOY ELEMENTS

Can GÖNENLİ¹

Okan DUYMAZLAR²

1. INTRODUCTION

Alloys are one of the basic materials used in various engineering and industrial applications. The mechanical properties of these materials vary significantly depending on the proportions of different elements they contain. Elements such as carbon (C), silicon (Si), manganese (Mn), phosphorus (P), sulfur (S), magnesium (Mg), chromium (Cr), nickel (Ni) and copper (Cu) affect the mechanical properties of alloys such as tensile stress, yield stress, hardness and percent elongation and determine the performance of the material. In this study, the effects of different alloying elements on the mechanical properties of steels were investigated and analyzed graphically. Understanding the effects of alloying element ratios on mechanical performance provides important advantages in terms of obtaining the desired mechanical properties in the design and production processes of materials.

In the literature, the effects of the elements in alloys on the mechanical performance of alloys have been investigated in

¹ Assoc. Prof. Dr., Ege University, Ege Vocational School, Mechanical and Metal Technologies, can.gonenli@ege.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9163-1569.

² Lecturer, Ege University, Ege Vocational School, Mechatronics, okan.duymazlar@ege.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1327-7493.

different studies. For example, the addition of Mg and Cu to Al-Si alloys increases the mechanical strength and also changes in the microstructure of the alloy improve material durability (Abdelaziz et al., 2019). The addition of Mg significantly improves the microstructure and mechanical properties of Al-5%Si-Cu alloys. The microstructure refining effect of Mg appears to increase the tensile strength (Salleh et al., 2015). The addition of Mn and Si to Co-Cr-W-Ni biomedical alloys not only increases mechanical strength, but also leads to significant improvements in the microstructure of the alloy (Ueki et al., 2021). In a study investigating the effects of Cu content on central segregation composition and mechanical properties in Al-Mg-Si alloys, an increase in Cu improves the strength of the alloy (Wu et al., 2023). When the effects of Mg content on the microstructure and mechanical properties of Cu-Fe-Cr-Si alloy were examined, it was found that the properties of the alloy such as high strength and conductivity increased with the addition of Mg (Liu et al., 2023). In another study, Ni addition was found to improve the microstructure of Al-Mg-Si-Cu-Zn alloys and increase mechanical strength, and Ni provided a significant increase in tensile strength (Li et al., 2019). In another study showing that the addition of small amounts of Cu and Mg in Al-Si alloys improves mechanical properties with heat treatment, Cu and Mg were found to cause the formation of fine phases in the microstructure of the alloy (Beroual et al., 2019). In another study, the addition of Fe and Cu to Al-Si alloys was observed to improve mechanical properties. The combination of Fe and Cu significantly increased the strength of the alloy (Wang et al., 2010). In a study investigating the effects of changes in the microstructure of Cu-Ni-Si alloys on mechanical properties, the formation of fine dispersoid phases was found to increase the strength of the alloy (Gholami et al., 2017). In another 2011 study, the effects of Fe and Cu on microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu-Fe-Mn alloys were investigated. According to the study, Fe and

Cu additions increase the strength of alloys by improving mechanical properties at high temperature (Wang, 2011). In a study investigating the effects of addition of elements such as Be, Mn, Ca and Sr to Al-7Si-0.3Mg-0.8Fe alloy on microstructure and mechanical properties, it was found that combinations of these elements significantly improved mechanical properties (Kumari, 2007).

The aim of this study is to better understand the effects of these alloying elements on mechanical properties and to support these effects with numerical data and trend analysis. In the study, the relationship of properties such as tensile stress and percent elongation with different element ratios were investigated graphically and analyzed with trend lines. The findings obtained serve as a guide for the design and optimization of steel alloys and aim to guide the selection of materials to be used in various industrial applications. In this context, a detailed study of the effects of alloy compositions on mechanical performance will contribute to the development of more durable and efficient materials. This study specifically focuses on understanding the effects of alloying elements on steel alloys and provides practical results in the field of materials engineering.

2. MATERIAL AND METHOD

Carbon (C) is one of the most important alloying elements of iron-based alloys. While it increases hardness and strength, excessive amounts can cause embrittlement. Carbon content plays a critical role in increasing tensile strength and hardness, especially in steels. Silicon (Si) is an element that improves casting properties and forms a hard, fine-grained structure in alloys. It increases hardness and heat resistance, especially in cast irons and aluminum alloys. It also improves oxidation resistance in stainless steels. Manganese (Mn) is an element that increases

ductility and toughness in steels and other alloys. It reacts with impurities such as oxygen and sulfur to increase strength without reducing hardness. It also improves corrosion resistance. Phosphorus (P) is an element that increases hardness when added to alloys but increases brittleness in excessive amounts. When used in low amounts in steels, it improves machinability and improves fluid fluidity in casting processes. In high amounts it should be used with caution as it can cause brittleness. Sulfur (S) is generally considered an undesirable impurity in alloys because it causes embrittlement. However, it is added in small amounts to some steels to improve machinability. Its harmful effects can be minimized when it combines with manganese to form manganese sulphide. Magnesium (Mg) increases strength and hardness, especially in aluminum and cast iron alloys. Mg, which is among the light metals, especially increases the mechanical strength of cast parts and forms high strength and low density alloys. Chromium (Cr) is an element that significantly improves the corrosion resistance of alloys. It is a key component in the production of stainless steel and forms a protective layer against oxidation. It also has the effect of increasing high temperature strength and hardness. Nickel (Ni) is added to alloys to provide high strength, ductility and corrosion resistance. It is used in stainless steels and superalloys to increase impact strength and maintain toughness even at low temperatures. Copper (Cu) is an element that improves the corrosion resistance and machinability of alloys. It increases hardness and strength in aluminum alloys and protects against atmospheric corrosion by forming a protective oxide layer on the surface of steels (Callister et al., 2021; Dieter, 1986; ASM International, 1990).

In this study, the mechanical properties of samples with different chemical compositions, especially the relationships between critical parameters such as tensile stress and percent elongation and chemical element ratios were analyzed. These

mechanical properties, which are of great importance for the performance and durability of metal alloys, generally vary depending on the proportions of the elements in the internal structure of the material and the interactions of these elements with each other. In this context, mechanical properties such as hardness, tensile stress and yield stress were analyzed under one group and then the relationship between percent elongation and chemical elements was also evaluated. Within the scope of the study, in order to evaluate the percentages of the elements in the alloy, the mechanical properties of a total of 30 casting samples with 95% and above matrix and 95% and above node-count were examined. Matrix represents the main structural phase or microstructural component of the material. Nodes are small, round-shaped structures or grains, especially in materials such as cast iron. Nodule number usually refers to graphite nodules in cast iron or nodules belonging to pearlite-ferrite phases.

3. RESULTS

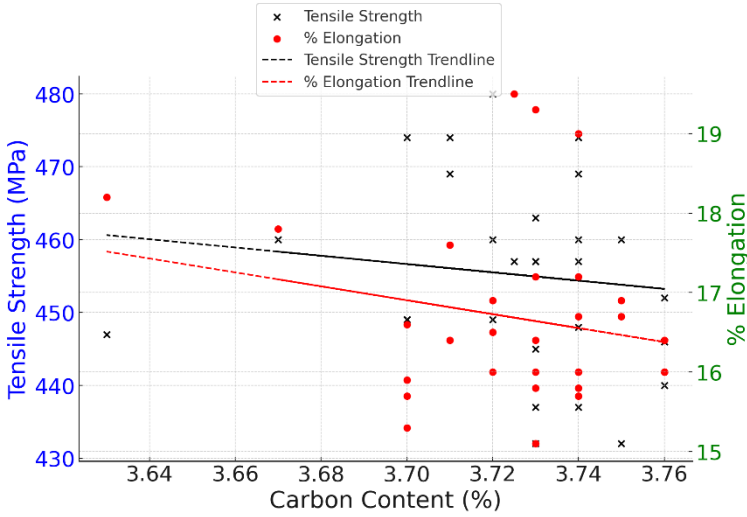
The 30 chemical analyses examined within the scope of the study are presented separately for each element. Table-1 gives the data range according to the chemical analysis of the alloy elements in the samples used in the study.

Table 1. Data Ranges of The Chemical Elements.

Symbol	Name	Range (%), Quantity
<i>C</i>	Carbon	3.63 – 3.76
<i>Si</i>	Silicon	2.52 – 2.68
<i>Mn</i>	Manganese	0.11 – 0.18
<i>P</i>	Phosphorus	0.015 – 0.023
<i>S</i>	Sulfur	0.009 – 0.015
<i>Mg</i>	Magnesium	0.043 – 0.053
<i>Cr</i>	Chromium	0.035 – 0.049
<i>Ni</i>	Nickel	0.045 – 0.058
<i>Cu</i>	Copper	0.035 – 0.053

Figure-1 shows the tensile stress, percent elongation values and trend lines obtained depending on the carbon ratios of the 30 samples.

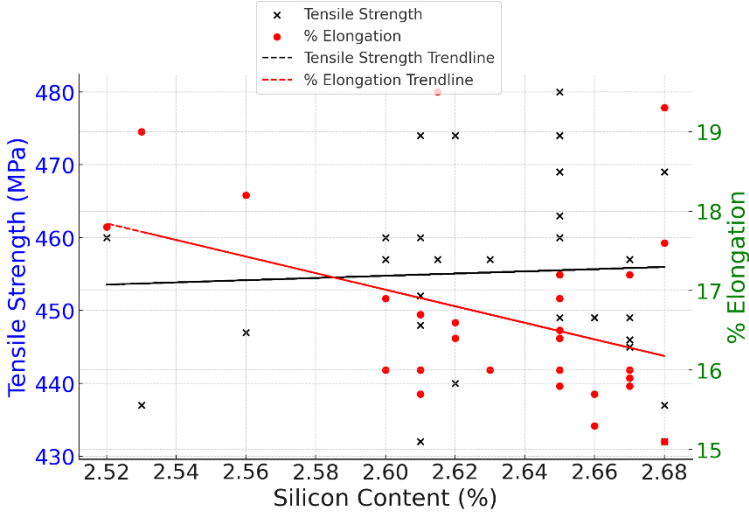
Figure 1. Tensile Stress and Percent Elongation Values Depending on Carbon Content



Carbon (C) is generally known as an element that increases hardness. Increasing the carbon content in iron-carbon alloys leads to an increase in hardness and wear resistance. However, in the study, although high tensile stress values can be seen as the carbon content increases, it is seen that the trend trend of the tensile stress decreases. This may be due to the fact that other elements in the alloy (e.g. silicon, phosphorus, etc.) form a complex interaction by balancing the effect of carbon on tensile stress. The multidimensional effects of the elements in alloys can make it difficult to correctly interpret the isolated effect of a single element. Therefore, the decreasing trend in tensile stress is a result not only of carbon, but also of other alloy components and the microstructural structure of the material. The percent elongation trend, as expected, decreases with carbon content.

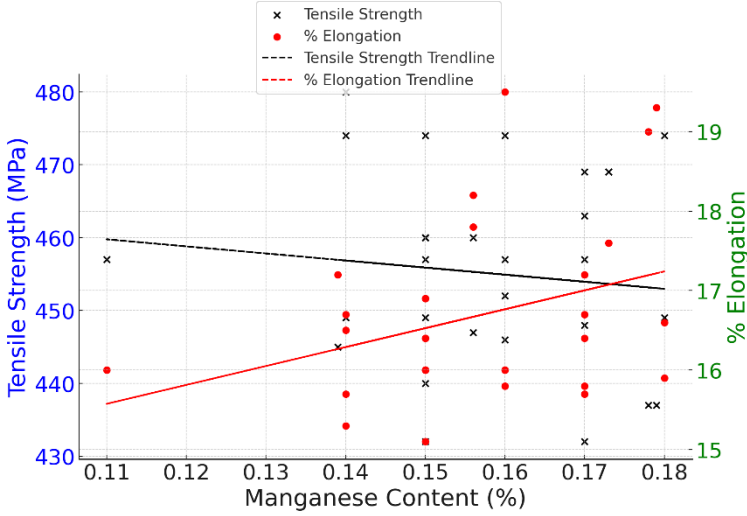
Figure-2 shows the tensile stress, percent elongation values and trend lines obtained depending on the silicon content.

Figure 2. Tensile Stress and Percent Elongation Values Depending on Silicon Content



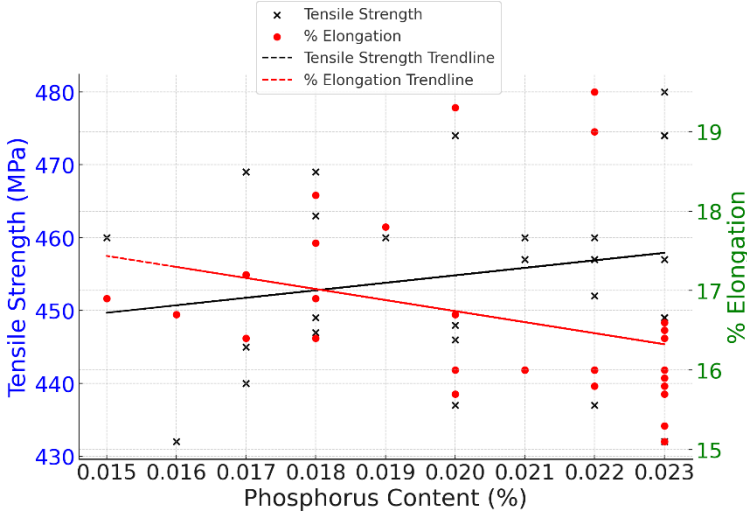
When the relationships between silicon content and tensile stress and percent elongation are examined, tensile stress tends to increase with increasing silicon content. This is in accordance with the fact that silicon is an element that increases the strength of steel alloys. The percent elongation trend line shows that the percent elongation value decreases as the silicon content increases. This finding indicates that while silicon increases the strength, it may adversely affect the ductility, i.e. the elongation capacity of the material. As a result, it is understood that the increase in silicon content positively affects the tensile stress, but leads to a decrease in ductility. Figure-3 shows the tensile stress, percent elongation values and trend lines obtained as a function of manganese content.

Figure 3. Tensile Stress and Percent Elongation Values Depending on Manganese Content



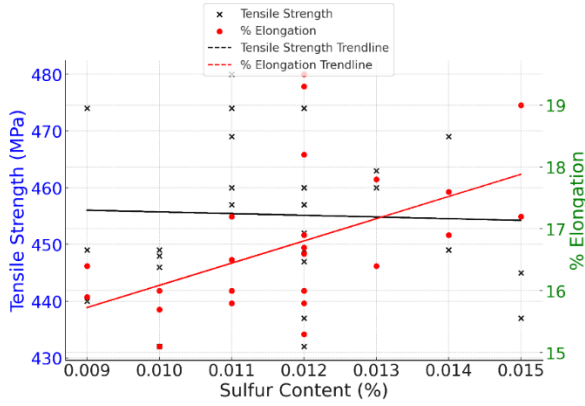
In general, manganese is known as a strength-enhancing element in steel alloys and increasing manganese content is expected to increase the tensile stress. However, the trend line shows a slight decrease in tensile stress with increasing manganese content. This may be due to the complex interactions of manganese with other alloying elements or phase changes above certain ratios limiting its effect on strength. On the other hand, the percent elongation trend line shows a slight increase in ductility with increasing manganese content. This finding suggests that the expected negative effect of manganese on ductility may have been offset by the other components of the alloy. In conclusion, the trends do not fully correspond to the known effects of manganese on mechanical properties and point to complex interactions with other elements in the alloy. Figure-4 shows the values depending on the phosphorus content.

Figure 4. Tensile Stress and Percent Elongation Values Depending on Phosphorus Content



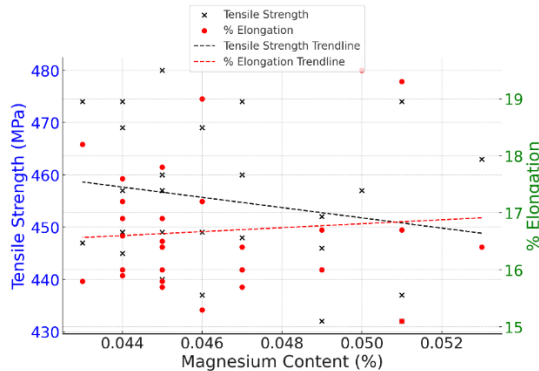
According to the tensile stress trend line, the tensile stress tends to increase as the phosphorus content increases, indicating that phosphorus unexpectedly increases the strength of the material. However, phosphorus is generally known to increase brittleness and negatively affect tensile stress. The percent elongation trend line shows that the percent elongation value decreases as the phosphorus content increases. This is consistent with the expected effect that phosphorus reduces the ductility of the material and makes it more brittle. In conclusion, although the effect of phosphorus on strength is unexpectedly positive, its negative effect on ductility is consistent with the literature. Figure-5 shows the sulfur content dependent values.

Figure 5. Tensile Stress and Percent Elongation Values Depending on Sulfur Content



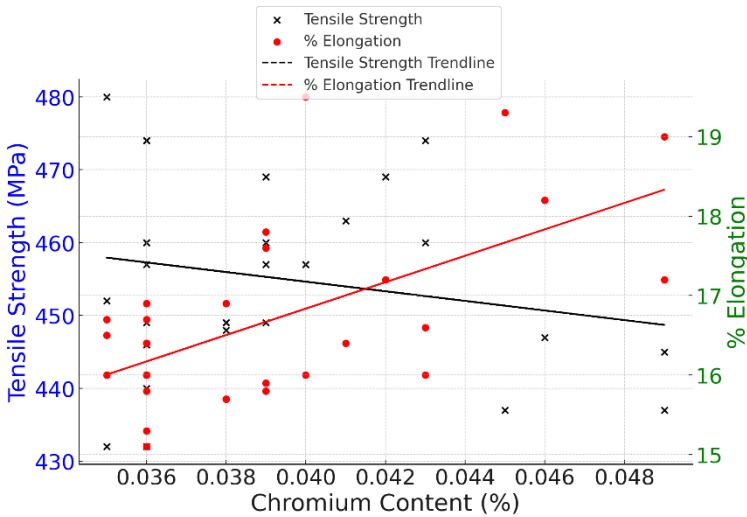
According to the tensile stress trend line, a slight decrease in tensile stress is observed as the sulfur content increases. This result is consistent with the expectations that sulfur is an element that adversely affects the strength of the material. Sulfur usually leads to the formation of sulfur compounds in alloys, resulting in brittleness and loss of strength. The figure shows that the percent elongation decreases with increasing sulfur content, confirming the general expectation that sulfur reduces ductility, making the material more brittle. Figure-6 shows the tensile stress and percent elongation relationship with magnesium.

Figure 6. Tensile Stress and Percent Elongation Values Depending on Magnesium Content



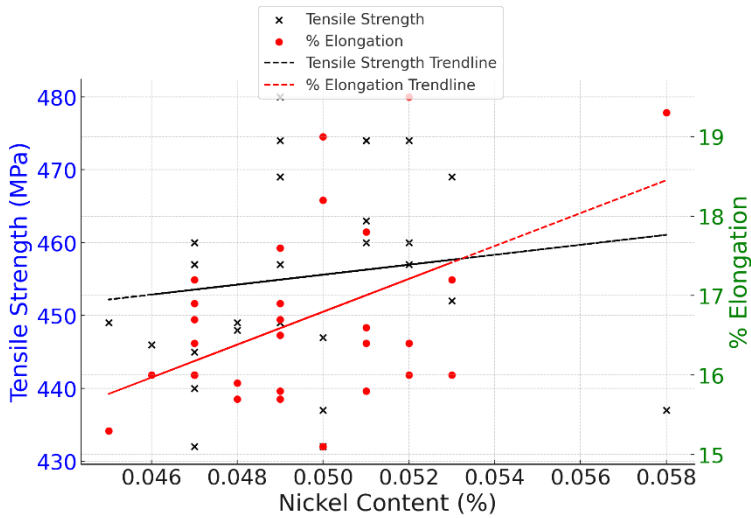
When the tensile stress trend line is examined, it is seen that there is a decreasing trend in the tensile stress as the magnesium content increases. This shows that the expected strength increasing effect of magnesium in alloys is not observed in this graph. The percent elongation trend line shows an increase in the percent elongation value as the magnesium content increases. This finding indicates that magnesium increases ductility and positively affects the elongation capacity of the material. As a result, the data in the graph reveals that magnesium does not have the expected positive effect on tensile stress, but positively affects elongation values by increasing ductility. The relationship between chromium content and mechanical properties is given in Figure-7.

Figure 7. Tensile Stress and Percent Elongation Values Depending on Chromium Content



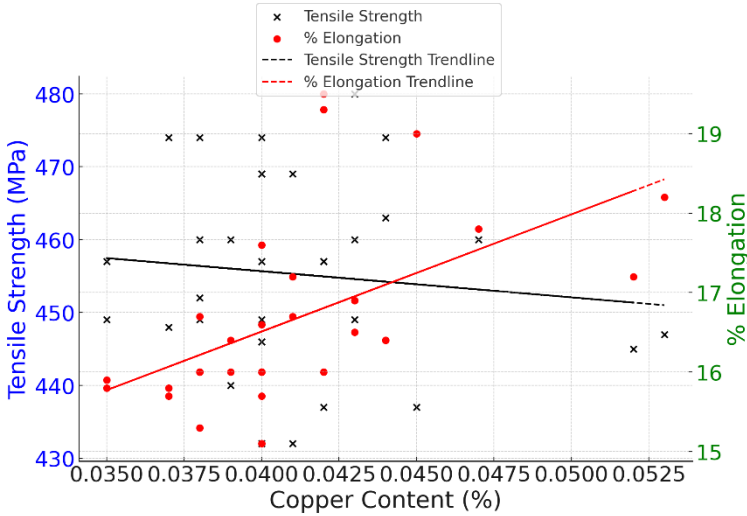
this graph, and that other alloying components or structural effects may offset the effect of chromium on strength. The percent elongation trend line shows an increase in the ductility of the material as the chromium content increases. The values for nickel content are presented in Figure-8.

Figure 8. Tensile Stress and Percent Elongation Values Depending on Nickel Content



The tensile stress trend line shows a significant increase in tensile stress with increasing nickel content. This is consistent with the strength-enhancing effect of nickel in steel alloys. The percent elongation trend line also shows an increase in percent elongation, i.e. ductility, as the nickel content increases. This confirms the ability of nickel to increase not only the strength but also the ductility of the material. This result is consistent with the literature as nickel makes alloys more ductile and flexible. Figure-9 shows the variations depending on the copper ratios.

Figure 9. Tensile Stress and Percent Elongation Values Depending on Copper Content



positive effects on these properties clearly demonstrates the role of these elements in increasing the strength of alloys. Elements such as silicon, carbon and manganese showed more limited effects on these properties.

On the other hand, as a parameter determining the toughness and ductility of the material, percent elongation exhibited a different relationship with chemical elements. Elements such as chromium, copper and nickel were found to have positive effects on percent elongation. These elements increase the plastic deformation capacity of the material, allowing it to change shape more before fracture. Nickel also has a positive effect on percent elongation, while silicon and phosphorus have a negative effect on this property. This suggests that material compositions need to be optimized and that each element should be carefully used in specific proportions.

In conclusion, this study investigates the effects of different chemical compositions on the mechanical properties of specimens. Strength properties including tensile stress were generally positively correlated with elements such as phosphorus and nickel, while ductility properties such as percent elongation showed a positive correlation with chromium, copper and nickel. In contrast, Silicon and Phosphorus were found to negatively affect the ductility properties of the material. These findings emphasize that the chemical composition of materials should be carefully optimized to achieve the desired mechanical performance. In order to utilize metal alloys in different industrial applications, the effect of each element must be accurately evaluated and a balanced composition must be established. This study shows ways for materials engineers to improve the mechanical properties of steel alloys and provides an important basis for new alloy designs.

However, it is important that the analyses are supported by broader research to optimize material compositions for industrial applications. A more detailed study of how these chemical compositions perform under different conditions (e.g. high temperature or corrosion environments) and the effects of these elements on long-term durability could provide important clues for future work in the field of materials engineering. The findings of such studies will provide valuable contributions to optimizing the performance and lifetime of steel alloys.

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank Maren Industrial for their contribution to this study through the data they provided.

REFERENCES

- Abdelaziz, M. H., Samuel, A. M., Doty, H. W., Valtierra, S., & Samuel, F. H. (2019). Effect of additives on the microstructure and tensile properties of Al–Si Alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 2255–2268. doi:10.1016/j.jmrt.2019.03.003
- ASM Handbook, volume 1: Vol. 1 properties and selection: Irons, Steels, and high-performance alloys.* (1990). Materials Park: A S M International.
- Beroual, S., Boumerzoug, Z., Paillard, P., & Borjon-Piron, Y. (2019). Effects of heat treatment and addition of small amounts of Cu and mg on the microstructure and mechanical properties of al-Si-Cu and Al-Si-Mg cast alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 784, 1026–1035. doi:10.1016/j.jallcom.2018.12.365
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2021). *Materials science and engineering: An introduction*. Milton, QLD: John Wiley and Sons Australia, Ltd.
- Dieter, G. E. (1986). *Mechanical metallurgy*. Estados Unidos: McGraw-Hill Interamericana.
- Gholami, M., Vesely, J., Altenberger, I., Kuhn, H.-A., Janecek, M., Wollmann, M., & Wagner, L. (2017). Effects of microstructure on mechanical properties of Cunisi Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 696, 201–212. doi:10.1016/j.jallcom.2016.11.233
- Li, G., Guo, M., Wang, Y., Zheng, C., Zhang, J., & Zhuang, L. (2019). Effect of ni addition on microstructure and mechanical properties of Al–Mg–Si–Cu–Zn alloys with a high MG/Si ratio. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 26(6), 740–751. doi:10.1007/s12613-019-1778-9

- Salleh, M. S., Omar, M. Z., & Syarif, J. (2015). The effects of Mg addition on the microstructure and mechanical properties of thixoformed Al–5%Si–Cu Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 621, 121–130. doi:10.1016/j.jallcom.2014.09.152
- Sreeja Kumari, S. S., Pillai, R. M., Rajan, T. P. D., & Pai, B. C. (2007). Effects of individual and combined additions of be, MN, Ca and sr on the solidification behaviour, structure and mechanical properties of Al–7si–0.3mg–0.8Fe Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 460–461, 561–573. doi:10.1016/j.msea.2007.01.082
- Ueki, K., Yanagihara, S., Ueda, K., Nakai, M., Nakano, T., & Narushima, T. (2021). Improvement of mechanical properties by microstructural evolution of Biomedical Co–Cr–W–Ni alloys with the addition of Mn and si. *MATERIALS TRANSACTIONS*, 62(2), 229–238. doi:10.2320/matertrans.mt-m2020300
- Wang, E. R., Hui, X. D., & Chen, G. L. (2011). Eutectic al–Si–Cu–Fe–Mn alloys with enhanced mechanical properties at room and elevated temperature. *Materials & Design*, 32(8–9), 4333–4340. doi:10.1016/j.matdes.2011.04.005
- Wang, E. R., Hui, X. D., Wang, S. S., Zhao, Y. F., & Chen, G. L. (2010). Improved mechanical properties in cast al–si alloys by combined alloying of Fe and Cu. *Materials Science and Engineering: A*, 527(29–30), 7878–7884. doi:10.1016/j.msea.2010.08.058
- Wu, X., Guan, Z.-P., Yang, Z.-Z., Wang, X., Qiu, F., & Wang, H.-Y. (2023). Effect of cu content on central-segregation composition and mechanical properties of Al–Mg–Si alloys produced by twin-roll casting. *Materials Science and Engineering: A*, 869, 144782. doi:10.1016/j.msea.2023.144782

Yu, X., Song, Y., Wang, C., Gu, K., Zheng, L., Qiu, W., ... Li, Z. (2023). Effect of mg content on the microstructure and properties of high strength, high conductivity Cu–Fe–Cr–Si–Mg alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 883, 145510. doi:10.1016/j.msea.2023.145510

FARKLI GEOMETRİLİ ELEKTRONİK ELEMEN İÇEREN DİKEY KANALDAKİ ISI TRANSFERİNİN AKIŞ YÖNLENDİRİCİ KULLANILARAK İYİLEŞTİRİLMESİNİN ARAŞTIRILMASI

Koray KARABULUT¹

Yeliz ALNAK²

1. GİRİŞ

İklim değişikliği, azalan doğal kaynaklar ve yakın süreçte gelecek nesiller için daha yeşil ve sürdürülebilir bir dünya bırakabilmek adına atılması planlanan yeşil dönüşüm yatırımları, ülkeleri yenilenebilir enerji kaynaklarını daha yoğun olarak kullanmasına teşvik ederken; hali hazırda tüketilen enerjinin de tasarruflu ve verimli bir şekilde kullanılması adına çalışmalar yürütülmektedir. Bu amaçla, özellikle ısı ve akış uygulamalarında yeni yaklaşımlarla geliştirilmiş ekipmanların verimliliklerinin artırılarak, işletme maliyetleri düşük, doğaya duyarlı ve güvenliği yüksek ürünler geliştirilmesi çalışmaları yoğunlaşmıştır (Alnak ve Karabulut, 2024).

Elektronik bileşenlerin soğutulması, daha hızlı, daha küçük ve daha güvenilir sistemlerin gelişmesinin sağlanması bakımından önem arz etmektedir. Böylece, cihazdan elde edilen

¹ Doç. Dr., Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, kkarabulut@cumhuriyet.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5680-0988.

² Dr. Öğr. Üyesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Müh. Bölümü, ytas@cumhuriyet.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4383-3806.

verimlilik artarken; bu durum zaman ve maddi açıdan kazanç elde edilmesine sebep olacaktır.

Uygulamada birçok elektronik bileşenin soğutulması durumunda ısı yayan bileşen dizileri dikey veya eğimli paralel plaka kanallarına yerleştirilmektedir.

Bununla birlikte, kanal içi akış ve ısı transferi uygulamalarında doğal ve zorlanmış taşınımın birlikte uygulandığı karışık taşınım uygulamaları son zamanlarda araştırmacılar ve uygulamacılar tarafından yoğun olarak değerlendirilen tasarımlar arasında yer almaktadır. Karışık taşınımla ısı transferi üzerine yapılan araştırmalar, ısı eşanjörleri, kimyasal işleme ekipmanları, güneş enerjisi toplayıcılarının ve elektronik soğutma vb. gibi uygulamalar birçok mühendislik alanında giderek daha fazla ilgi görmektedir. Böylece, ısınmış olan bileşenler tarafından etrafındaki akışkan ile olan sıcaklık farkına dayalı olarak gerçekleşen doğal taşınımla olan ısı transferinin engellenmeden zorlanmış taşınımla desteklenerek ısı transferi artırılabilir (Özdemir ve ark., 2023).

Literatürde bir kanalda karışık taşınımla ısı transferi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bunlardan birinde, ısı kaynağı içeren bir kanal için laminar zorlanmış akışın, doğal, karışık ve zorlanmış taşınım bölgeleri boyunca kaldırma kuvveti kaynaklı doğal konveksiyon hareketi üzerindeki etkileri Choi ve Ortega (1993) tarafından sayısal olarak incelenmiştir. Sonuçlar, ısı kaynağının ortalama Nusselt (Nu) sayısının eğim açısına büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Auletta ve ark. (2001) dik olarak konumlanmış ve simetrik olarak ısıtılan aşağı yönlü akışı olan bir kanalda adyabatik olarak genişlemenin ısı transferi üzerindeki etkilerini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Yapılan analizler sonucunda kanaldaki uzama ve genişleme miktarlarına göre ısı transferinde %10-20 arasında bir artış olduğunu belirlemişlerdir. Eğimli bir kanalda laminar akış şartlarında

birbirine eş iki ısı kaynağının karışık taşınımıyla soğutulması Boutina ve Bessaih (2011) tarafından değerlendirilmiştir. Isı kaynağı ölçüleri ve aralarındaki uzaklığın yanında kanal eğiminin de ısı transferine belirgin etkileri olduğu saptanmıştır. Forooghi ve Hooman (2013) türbülanslı akışın olduğu iki dalgalı plaka arasında kaldırma kuvvetlerinin de etkisini dikkate alarak ısı transferini sayısal olarak irdelemişlerdir. Çalışmalarında kaldırma kuvvetlerinin ısı transferi üzerinde değişen etkisini gözlemlemişlerdir. Jang ve Yan (2004) sayısal olarak dikey dalgalı bir yüzey boyunca karışık ısı taşınımı ve kütle transferini araştırmışlardır. Mevcut analiz için sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Kaldırma kuvveti oranı N , genlik-dalga boyu oranı α ve değiştirilmiş Richardson (Ri^*) sayısı (Gr/Re^2) bu problem için önemli parametreler olarak belirlenmiştir. Çalışmada, kaldırma kuvveti oranı N ve dalgalı yüzeyin boyutsuz genliğinin yerel Nu sayısı ve yerel Sherwood (Sh) sayısı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Zhang ve ark. (2022) dikey olarak konumlandırılmış daralan-genişleyen bir kanalda akış yönünde ve akışa ters yöndeki akış için karışık konveksiyonun etkisini sayısal olarak değerlendirmişlerdir. Bir diğer çalışmada, Lee ve ark. (2021) açılı kanatçıklara sahip bir kanaldaki doğal ve karışık konveksiyonun ısı kuyusunun tasarım parametrelerindeki durumunu sayısal olarak araştırmışlardır. Wetzel ve Wagner (2019) ise farklı Grashof (Gr) sayılarını dikkate alarak dik bir kanal içerisinde karışık konveksiyonun sayısal simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir.

Coetzee ve ark. (2024) düzgün duvar sıcaklığı sınır koşuluna maruz kalan yatay bir tüp boyunca gelişen laminar karışık taşınım akışının yerel ısı transfer özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. İç çapı 4,9 mm olan 5 m uzunluğunda bir bakır boru boyunca ortalama akışkan sıcaklıklarını ölçmek için yeni bir deney düzeneği geliştirmişlerdir. Bununla birlikte, çalışmalarında boru duvarı-akışkan sıcaklık farklarının azalması

nedeniyle doğal taşınım etkilerinin sürdürülemediğini ve akışkan sıcaklıklarının boru duvarı sıcaklıklarına yaklaştıkça ısı transferinin azaldığını belirlemişlerdir. Zhu ve ark. (2024) aralık oranı aynı ve 4,0 olan üç tandem dairesel silindir için hem zorlanmış hem de karışık konveksiyon akışlarını sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sayısal olarak incelenmişlerdir. Hesaplamalarını $Pr=5-50$ ve $Ri=0-2$ aralığında $Re=150$ gibi düşük bir Reynolds sayısında gerçekleştirmişlerdir. Pr sayısındaki artışın akışın kararlılığında rol oynarken; Ri sayısının büyümesinin ise tersi bir rol üstlendiğini saptamışlardır. Aynı zamanda, zaman ortalamalı hız, basınç katsayısı ve sıcaklığın yüksek Ri sayıları için daha asimetric hale geldiği bulunmuştur. Hamouche ve Bessaïh (2008) sayısal olarak her iki tarafı da açık olan bir kanaldaki birden fazla özdeş çıkıntılı ısı kaynağından havaya olan iki boyutlu laminar ve karışık taşınım ile ısı transferini araştırmışlardır. İç akış modifikasyonu için ısı kaynaklarının üzerinde dikdörtgen bir plaka kurulumunun elektronik bileşenlerden olan ısıyı uzaklaştırmada önemli bir iyileştirme sağladığı görülmüştür.

İncelenen bu çalışmada, birbirine paralel dikey levhali kanalın sol tarafına yerleştirilmiş ısınmış yamuk şekilli engel elemanından karışık taşınım ile ısı transferi ve kanaldaki akışkan hareketi sayısal olarak araştırılmıştır. Sayısal inceleme, zamandan bağımsız, laminar ve iki boyutlu olarak süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin Ansys-Fluent bilgisayar programının kullanılarak çözülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Üst tarafından su girişi olan kanala üst giriş kısmının sağ tarafından yatayla 30° ve 45° açılı olarak akış yönlendirici kanatçıklar yerleştirilmiştir. Yüksek işlemci kapasitesi nedeniyle ısınmış mikroçiplerde ısı transfer yüzey alanını artırarak ısı transfer kapasitesini iyileştirmek amacıyla seçilen yamuk geometrili elektronik elemana sabit ısı akısı ($3529,49 \text{ W/m}^2$ ($Re=1000$ ve $Ri^*=50$)- $10588,4747 \text{ W/m}^2$ ($Re=1000$ ve $Ri^*=150$))

uygulanırken; dikey kanalın diğer yüzeyleri ve akış yönlendirici kanatçık ise adyabatiktir. Yamuk engel yüzeylerine kullanılan Re ve Ri^* sayılarına bağlı olarak Gr^* sayısına karşılık gelen sabit ısı akısı değerleri uygulanmıştır. Kullanılan su akışkanı sıkıştırılamaz olup, kanala giriş sıcaklığı 293 K' dir. Suyun bu sıcaklıktaki termofiziksel özellik değerleri ise şu şekildedir: $k=0,6032$ W/mK, $\rho=998,4$ kg/m³, $c_p=4181,8$ J/kgK, $\mu=1000,6 \cdot 10^{-6}$ N.s/m². Karışık taşınım akışı oluşturmak amacıyla çalışmada kullanılan Reynolds (Re) sayısı değeri 1000 iken; değişken sayısının azaltılarak doğal ve zorlanmış taşınım etkilerinin birbirlerine göre üstünlüklerinin daha iyi karşılaştırılabildiği değiştirilmiş Richardson sayısı (Ri^*) aralığı ise 50-150 olarak alınmıştır. Kanalın üst girişinden itibaren yerçekimi yönünde akan suyun, kanal genişliğine göre akış yönlendirici kanatçığın sahip olduğu uzunluklara bağlı olarak belirlenen akış mesafesi oranı (AGM) ise 3,33 ve 4 olarak tasarlanmıştır. Richardson (Ri^*) sayısına bağlı olarak farklı AGM oranları için kanala yerleştirilen kanatçıkların açılarının (ϕ) ve Re sayısının, engelin toplam ortalama Nu sayıları (Nu_m) ve akışkan sıcaklıkları (T_m) üzerindeki etkilerinin değişimleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, incelenen iki farklı AGM (3,33 ve 4), $Re=1000$ ve $Ri^*=50$ ve 150 değerleri için kanatçıksız ve değişik kanatçık açılı kanallarda hız ve sıcaklık konturu dağılımları görselleştirilerek detaylı bir şekilde araştırılmıştır.

2. SAYISAL YÖNTEM

Kanalın üst girişinden üniform olarak sabit u_0 hızı ile gönderilen akışkan akımı sonucu meydana gelen zorlanmış taşınım ile ısınmış olan elektronik elemandan kaldırma kuvvetinin etkisiyle oluşan doğal taşınım akımlarıyla birlikte karışık taşınım oluşmaktadır. Kanalın girişinden itibaren yerleştirilen akış yönlendirici kanatçıkla hem akışkanın ısınmış

elektronik engel elemanına doğru yönlendirilmesi hem de kanalın orta kısmında akışın hızlandırılarak zorlanmış taşınım hareketleriyle daha iyi bir karışık taşınım akımı oluşturulması planlanmıştır.

Kanaldaki karışık taşınımlı ısı transferinin çözümü, Ansys-Fluent programıyla gerçekleştirilmiştir. Ayırıklaştırma yöntemi olarak momentum denklemleri için “Second Order Upwind” yöntemi tercih edilmiştir. Sayısal çözümlerin yakınsaması için yakınsama kriteri momentum denklemi için 10^{-6} ve enerji denklemi için 10^{-7} olarak alınmıştır.

Bu çalışmada ele alınan akışın, zamandan bağımsız, sıkıştırılamaz, iki boyutlu ve laminar olduğu kabul edilmiştir. Çalışmada, dikey olarak konumlandırılan kanalda yer çekimi kuvveti aşağı yönlü olarak modellenirken; kaldırma kuvvetinin etkisi de hesaba katılmıştır.

Kartezyen koordinatlarda zamandan bağımsız, sıkıştırılamaz akış için süreklilik, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri aşağıda verilmiştir (Özdemir ve ark., 2023).

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v - \rho g \quad (3)$$

Enerji denklemi

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (4)$$

Çalışmada kullanılan boyutsuz sayılardan değiştirilmiş Grashof sayısı (Gr^*), Richardson sayısı (Ri^*) ve Reynolds sayısı (Re) aşağıdaki eşitliklerde sunulmuştur.

$$Gr^* = \frac{g \beta \dot{q} (a + 2d)^4}{k \nu^2} \quad (5)$$

$$Ri^* = \frac{Gr^*}{Re^2} \quad (6)$$

$$Re = \frac{u_o W}{\nu} \quad (7)$$

Burada, g yerçekimi ivmesi (m/s^2), β ısı genleşme katsayısı ($1/K$), $\dot{q}$ ısı akısı (W/m^2), k ısı iletim katsayısı (W/mK), ν kinematik viskozite (m^2/s)' dir.

Elektronik engel elemanın yüzeyindeki ortalama ısı taşınım katsayısı Eş. (8), Nusselt sayısı (Nu) ise Eş. (9) vasıtasıyla hesaplanacaktır.

$$h = \frac{\dot{q}}{(T_e - T_o)} \quad (8)$$

Nu sayısı, taşınım ile ısı geçişinin iletimle ısı geçişine oranı olarak değerlendirilir.

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_s = h(T_e - T_o) \text{ ve } Nu = \frac{h(a+2d)}{k} \quad (9)$$

Ortalama ısı taşınım katsayısı (h_m)

$$h_m = \frac{1}{(a+2d)} \int_0^{a+2d} h d(a+2d) \quad (10)$$

Ortalama Nu sayısı (Nu_m) Eş. 9 ile hesaplanmaktadır.

$$Nu_m = \frac{\dot{q}(a+2d)}{k(T_e - T_o)} = \frac{h_m(a+2d)}{k} \quad (11)$$

Bu eşitliklerde, $\dot{q}$ ısı akısı, u_o dikey kanalın üst kısmından giren akışkanın hızı (m/s), T_e ısınmış engelin ortalama sıcaklığı iken T_o , su akışkanının kanal girişindeki sıcaklığıdır (K). a ve d akışkanla temasta olan yamuk şekilli yüzeyin karakteristik uzunluk (m) ölçüleri iken; u ve v kartezyen koordinatlarda

akışkanın x ve y yönlerindeki hızlarıdır (m/s). k akışkanın ısı iletim katsayısı (W/mK), h yüzey üzerindeki yerel ısı taşınım katsayısı (W/m²K), n ise yüzeye dik yöndür.

Akış Geçiş Mesafesi (AGM), kanal genişliğinin kanatçık uzunluğuna oranı olup aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

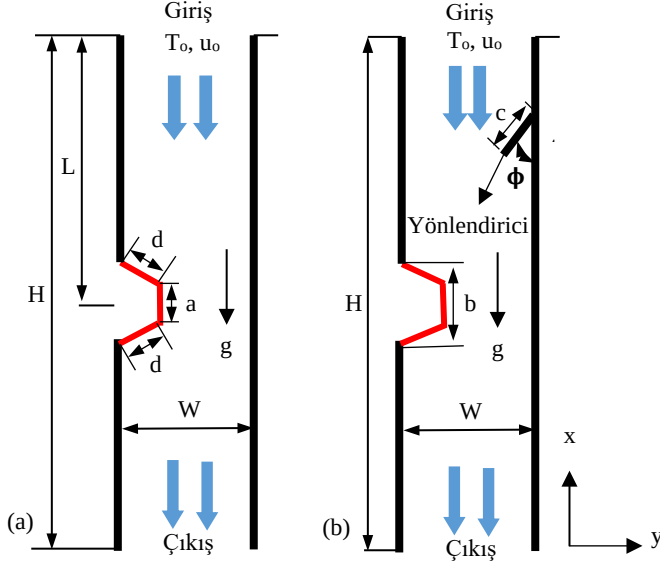
$$AGM = \frac{W}{c} \quad (12)$$

Burada, W kanal genişliği (m) ve c ise akış yönlendirici kanatçık uzunluğudur (m).

3. SAYISAL HESAPLAMA ALANI

Sayısal çözümlemede kullanılan hesaplama alanı Şekil 1a ve b' de gösterilmektedir. Şekil 1 a' da akış yönlendirici kanatçığın olmadığı ve Şekil 1 b' de ise dikdörtgen kesitli kanalın dikey sağ üst yüzeyiyle farklı ϕ açısı yapan yönlendirici kanatçığın olduğu kanal kesiti sunulmaktadır. Çalışmada kanala ve kanatçığa ait boyutsal ölçüler Tablo 1' de sunulurken, sınır şartları ve yapılan kabuller ve Tablo 2' de verilmektedir. Bununla birlikte, kesiti dikdörtgen olan dikey kanalın sol yüzeyine yerleştirilmiş olan yamuk şekilli ve sabit ısı akısına sahip elektronik elemana uygulanan sınır koşulları Şekil 1 üzerinde de belirtilmiştir.

Şekil 1. Dikey Kanalda Yamuk Şekilli Engel Bulunan Karışık Taşınımlı Akış Geometrisi (a) Yönlendirici Kanatçıksız (b) Açılı Yönlendirici Kanatçıklı



Tablo 1. Dikey Kanala ve Kanatçığa Ait Boyutsal Ölçüler

Değişken	Ölçü (mm)
L	1000
W	50
H	1800
a	12,5
b	25
c	15 ve 12,5
d	18,75
ϕ	30° ve 45°

Tablo 2. Çalışmada Uygulanan Sınır Şartları ve Yapılan Kabuller

a.	İki boyutlu, sürekli, ve laminar akış hacmi kullanılmıştır
b.	Sıkıştırılabilir akışkan olarak su kullanılmıştır
c.	Akışkanın ısı özellikleri sabit ve sıcaklıktan bağımsızdır
d.	Yönlendirici kanatçık ve dikey kanal yüzeyleri adyabatiktir
e.	Kanal çıkış basıncı, atmosfer basıncına eşit olarak alınmıştır ($P_c = P_{atm}$)
f.	Kanalın çıkışındaki sıcaklık farkının ihmal edilebilecek kadar düşük seviyede olduğu kabul edilerek $\partial T / \partial y = 0$ olarak belirlenmiştir
g.	Kanal, kanatçık ve yamuk eleman yüzeyinde kaymama sınır şartı olduğu ve bu nedenle bahsedilen yüzeylerde tüm hız bileşen değerlerinin sıfır olduğu kabul edilmiştir
h.	Yamuk engel yüzeylerine kanaldaki Re ve Ri^* sayılarına bağlı olarak Gr^* sayısına karşılık gelen sabit ısı akısı uygulanmıştır
i.	Akışkanın kanala giriş sıcaklığı 293 K' dir
j.	Su için çalışılan $Re=1000$ ' de akışkan giriş hızı 0,020096 m/s' dir
k.	Kanal girişinde "velocity inlet" ve çıkışında ise "pressure outlet" sınır şartı geçerlidir
l.	Dikey kanala aşağı yönlü yerçekimi ivmesi uygulanmıştır

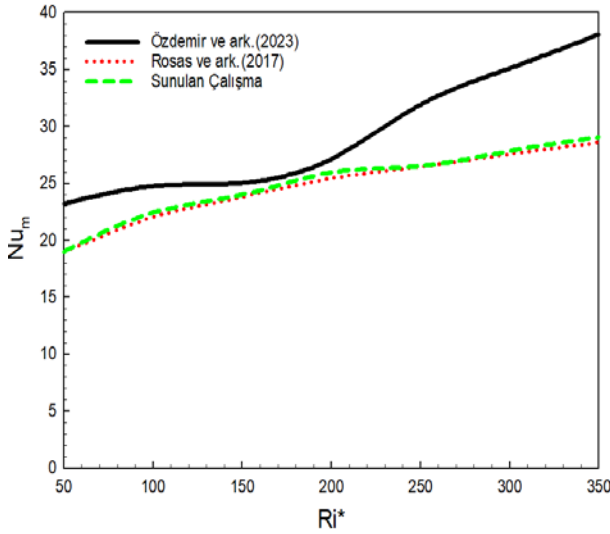
4. SONUÇLARIN DOĞRULANMASI

Çalışmanın sonuçları, Rosas ve ark. (2017)'nin deneysel çalışması ile Özdemir ve ark. (2023) tarafından sonlu hacimler yöntemini kullanan FloEFD paket programıyla elde ettikleri sayısal sonuçlarla Şekil 2 'de görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan dikey kanalın yüksekliği 1,8 m ve genişliği ise 0,05 m iken; yamuk engel üst kanal girişinden itibaren 1 m aşağıda tasarlanmıştır. Özdemir ve ark. (2023)'nin sayısal çalışmasıyla olan farklılıkların ağ sayısı ve yapısına bağlı olarak özellikle yüksek Ri^* sayılarında oluşan girdap bölgelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sunulan çalışma ile Rosas ve ark. (2017)'nin deneysel çalışmasının birbirleriyle oldukça uyumlu oldukları belirlenmiştir. Bu nedenle, çalışmanın doğru ve kabul edilebilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Sonuçların ağ sayısından bağımsızlığını sağlamak amacıyla yamuk engelin ortalama Nu sayısının (Nu_m) ağ sayısıya

değişimi incelenerek en uygun ağ sayısı belirlenmiştir. Bu amaçla, Nu_m sayısının Ri^* sayısına bağlı olarak ağ sayısı ile değişimi Tablo 3’ de verilmiştir. Buna göre, 842285 adet ağ elemanı sayısının 1062252 adet ağ sayısı ile karşılaştırıldığında Nu_m sayısı değişimi %0,1’ den daha az olduğundan; 842285 adet ağ elemanı sayısının akış yönlendirici kanatçıksız kanal için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Şekil 2. Çalışma Sonuçlarının Doğrulanması



Tablo 3. Yamuk Engelin Ortalama Nu Sayısının (Nu_m) Ağ Elemanı Sayısına Bağlı Olarak Ri^* Sayısıyla Değişimi

Ağ Sayısı	$Ri^*=50-Nu_m$	$Ri^*=100-Nu_m$	$Ri^*=150-Nu_m$
289071	2,82144	5,602417	8,247801
643624	2,88058	5,610262	8,257397
842285	2,88104	5,610547	8,257454
1062252	2,88105	5,610551	8,257425

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Şekil 3' de kanatçıksız ve dikey kanalın sağ üst giriş kısmından 30° ve 45° açılı kanatçıkların olduğu durumlarda $Re=1000$ ve değiştirilmiş Richardson sayısının (Ri^*) 50-150 aralığında kanalın sol yüzeyinde bulunan yamuk şeklindeki elemandan karışık taşınım hareketiyle olan ısı transferine bağlı ortalama Nu sayısının (Nu_m) kanatçık uzunluğuna göre değişen Akış Geçiş Mesafesi (AGM) oranına bağlı (a) $AGM=3,33$ ve (b) $AGM=4$ değişimleri sunulmaktadır. Her iki AGM oranında da artan Ri^* sayısına bağlı olarak Nu_m sayısı artış göstermektedir. $AGM=3,33$ iken (Şekil 3(a)) kanalın üst tarafından gelen akışkanın yamuk engele, $AGM=4$ 'e (Şekil 3(b)) göre daha iyi yönleneceği engel etrafındaki doğal taşınıma bağlı yeniden dolaşım bölgelerini baskılayarak akışkan hareketliliğini artırmasıyla Nu_m sayısının daha yüksek olmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte, yine her iki AGM oranında da 30° açılı kanatçıklı durumda hem kanatçıksız hem de 45° kanatçık açılı duruma göre Nu_m sayısı daha fazladır. $AGM=3,33$ ve $Ri^*=150$ için 30° açılı kanatçık durumunda sırasıyla kanatçıksız ve 45° açılı kanatçıklı durumlara göre Nu_m sayıları %7,39 ve %1,64 daha fazladır. Kanaldaki akış yapısına göre akışkanın engele yönlenme durumuna bağlı olarak $AGM=4$ için bu artış miktarı azalmaktadır.

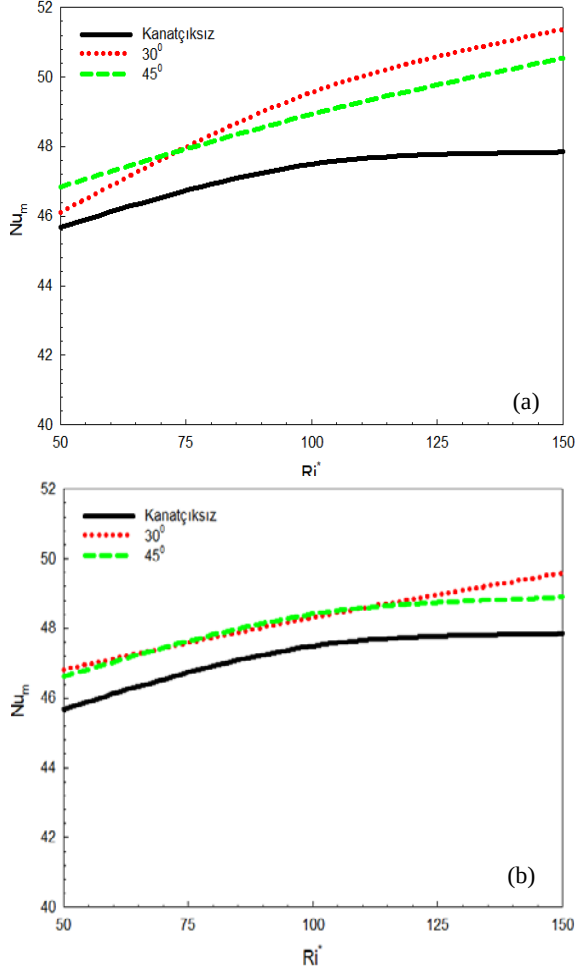
Kanatçıksız ve farklı kanatçık açılı (30° ve 45°) durumlarda dikey kanalda bulunan yamuk engelden karışık taşınıma bağlı olarak gerçekleşen ısı transferiyle kanaldaki akışkanın ortalama sıcaklık değişimi T_m Şekil 4' de farklı Ri^* sayıları ve AGM oranları için (a) $AGM=3,33$ ve (b) $AGM=4$ verilmektedir. Ri^* sayısının artışına bağlı olarak artan karışık ısı taşınımı nedeniyle T_m değerleri artarken, sıcaklık değerlerinin birbirine yakın olması kanatçığın engel etrafında oluşan yeniden dolaşım bölgelerini yeteri kadar hareketlendirememesi sebebiyledir. Bu durum, kanaldaki engel geometrisi yanında Re

ve Ri^* sayılarına ek olarak kanatçık tasarımının da önemli bir parametre olduğunu belirtmektedir.

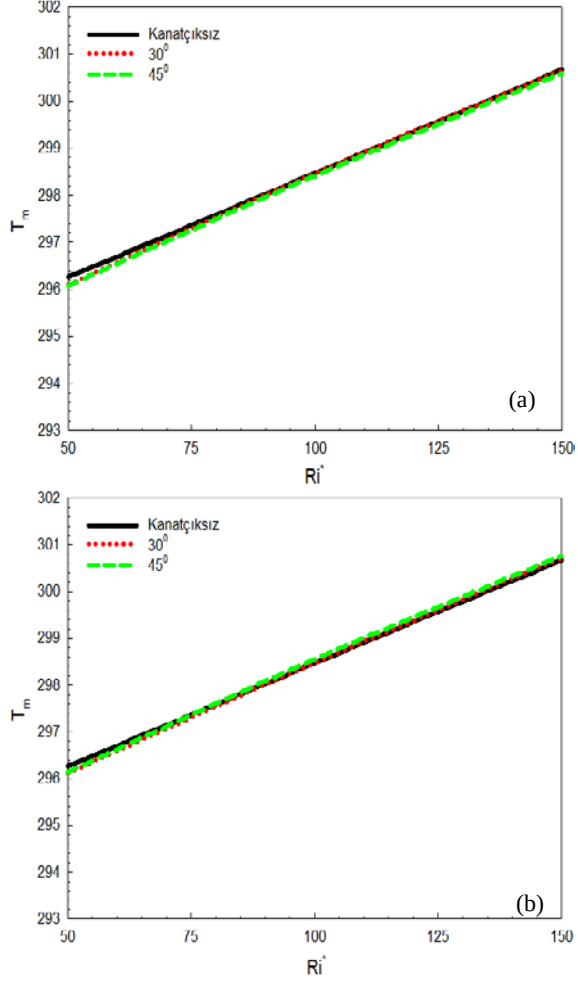
Şekil 5' de $Re=1000$ ve Ri^* sayısının 50 ve 150 değerleri için $\phi=30^\circ$ ve 45° kanatçık açılarında ve $AGM=3,33$ ve 4 değerlerinde hız konturu dağılımları sergilenmektedir. Kanatçiksız durumda her iki AGM oranı için de engelin üst kısmında oluşan yeniden dolaşım akış bölgeleri engel etrafındaki akış hareketlenmesini sınırlamaktadır. Ri^* sayısı 150 olduğunda da kanal içerisindeki hız değerleri artış gösterse de yeniden dolaşım bölgeleri üzerinde etkisi yeteri kadar artmamaktadır. Kanala eklenen kanatçık sayesinde akış engele doğru yönlendirilebilirken, azalan yeniden dolaşım bölgeleri engel etrafındaki akış hızını artırmaktadır. Kanatçık açısı 30° iken her iki AGM oranı için de engel etrafındaki akışkan hareketliğinde 45° kanatçık açısına göre daha fazla akışkan hareketliliği elde edilmektedir.

Isınmış yamuk engel etrafındaki ve kanaldaki akışkanın sıcaklık konturu dağılımları, $Re=1000$ ve $Ri^*=50$ ve 150 değerlerinde $\phi=30^\circ$ ve 45° kanatçık açıları ve $AGM=3,33$ ve 4 için Şekil 6' da gösterilmektedir. Sıcaklık konturu dağılımlarında, sıcaklığın fazla olduğu akışkan kısımları ısı transferi akışının tam olarak sağlanamamasına bağlı olarak ısınmanın fazla olduğu kısımlardır. $Ri^*=150$ durumlarda $Ri^*=50$ olduğu durumlara göre artan doğal taşınım akımları zorlanmış taşınım akımlarını baskıladığından engel etrafında ve kanalda oluşan yeniden dolaşım bölgeleri akışkanın ısınmasına sebep olarak engelden olan ısı transferini kötüleştirmektedir. Bu nedenle, $Ri^*=150$ için tüm kanatçık açılarında kanaldaki akışkan sıcaklıkları $Ri^*=50$ ' ye göre daha fazla olmaktadır ki bu durumun Re sayısının artışıyla zorlanmış taşınımın etkisinin artırılması yanında farklı kanatçık tasarımlarıyla giderilebileceği düşünülmektedir.

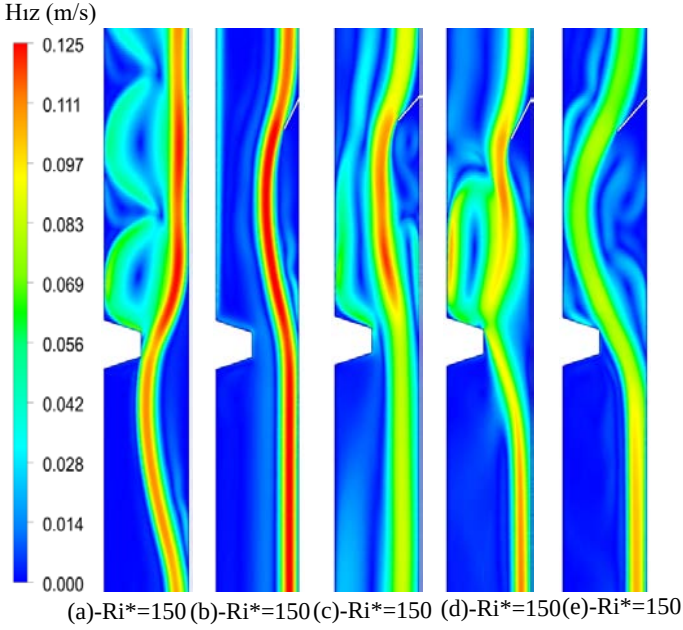
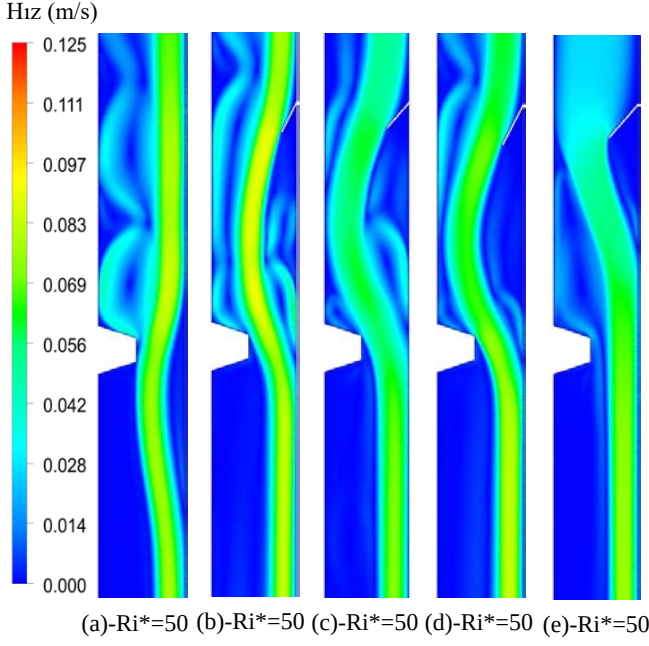
Şekil 3. Toplam Ortalama Nu Sayısının (Nu_m) Ri^* Sayısı, Kanatçık Açısı ve AGM Oranına Göre Değişimi (a) AGM=3,33 (b) AGM=4



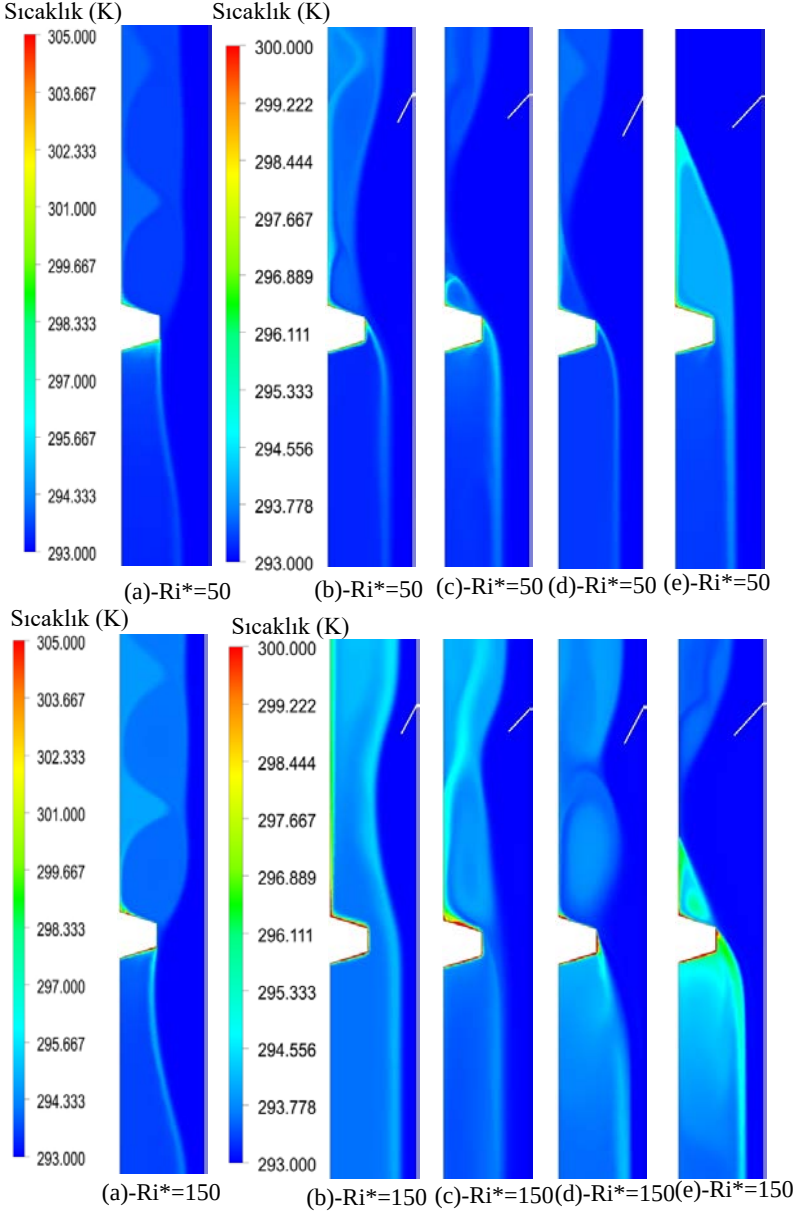
**Şekil 4. Kanal Boyunca Ortalama Akışkan Sıcaklığının (T_m) Ri^* sayısı, Kanatçık Açısı ve AGM Oranına Göre Değişimi
(a) $AGM=3,33$ (b) $AGM=4$**



**Şekil 5. Hız konturu dağılımları $Ri^*=50$ ve 150 ve $Re=1000$ için
(a) kanatsız kanal (b) $\phi=30^\circ$, AGM=4 (c) $\phi=45^\circ$, AGM=4
(d) $\phi=30^\circ$, AGM=3,33 (e) $\phi=45^\circ$, AGM=3,33**



Şekil 6. Sıcaklık konturu dağılımları $Ri^*=50$ ve 150 ve $Re=1000$ için (a) kanatçıksız kanal (b) $\phi=30^\circ$, AGM=4 (c) $\phi=45^\circ$, AGM=4 (d) $\phi=30^\circ$, AGM=3,33 (e) $\phi=45^\circ$, AGM=3,33



6. GENEL SONUÇLAR

Isınmış yamuk engelin olduğu dikey bir kanalda doğal ve zorlanmış taşınımın oluşturduğu karışık taşınım akış hareketiyle ısı transferinin incelendiği bu çalışmayla ulaşılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

$AGM=3,33$ iken kanalın üst tarafından gelen akışkanın yamuk engele, $AGM=4$ 'e göre daha iyi yönlenmesi Nu_m sayısının daha yüksek olmasını sağlamaktadır.

Her iki AGM oranında da 30° açılı kanatçıklı durumda hem kanatçıksız hem de 45° kanatçık açılı duruma göre Nu_m sayısı daha fazladır.

$AGM=3,33$ ve $Ri^*=150$ için 30° açılı kanatçık durumunda sırasıyla kanatçıksız ve 45° açılı kanatçıklı durumlara göre Nu_m sayıları %7,39 ve %1,64 daha yüksektir.

Ri^* sayısının artışına bağlı olarak artan karışık ısı taşınımını nedeniyle T_m değerleri artarken, sıcaklık değerlerinin birbirine yakın olması kanatçığın engel etrafında oluşan yeniden dolaşım bölgelerini yeteri kadar hareketlendirememesi sebebiyledir.

Ri^* sayısının 150 olduğu durumlarda, $Ri^*=50$ olduğu durumlara göre artan doğal taşınım akımları zorlanmış taşınım akımlarını baskıladığından engel etrafında ve kanalda oluşan yeniden dolaşım bölgeleri akışkanın ısınmasına sebep olarak engelden olan ısı transferini kötüleştirmektedir.

$Ri^*=150$ için tüm kanatçık açılarında kanaldaki akışkan sıcaklıkları $Ri^*=50$ ' ye göre daha fazla olmaktadır ki bu durumun Re sayısının artışıyla zorlanmış taşınımın etkisinin artırılması yanında farklı kanatçık tasarımlarıyla giderilebileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) birimi tarafından STBMYO-2024-005 proje numarası ile desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

- Alnak, D.E., Karabulut, K. (2024) Investigation of heat transfer increment in electronic system surfaces by different air jet impingement applications, *Journal of Engineering Thermophysics*, 33(1), 161-185.
- Auletta, A., Manca, O., Morrone, B., Naso, V. (2001) Heat transfer enhancement by the chimney effect in a vertical isoflux channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(22), 4345-4357.
- Boutina, L., Bessaih, R. (2011) Numerical simulation of mixed convection air cooling of electronic components mounted in an inclined channel, *Applied Thermal Engineering*, 31 (11-12), 2052-2062.
- Choi, C.Y., Ortega, A. (1993) Mixed convection in an inclined channel with a discrete heat source, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36, 3119-3134.
- Coetzee, M. J., Steyn, D., Everts, M., (2024) The local heat transfer characteristics associated with mixed convective developing flow through a horizontal tube exposed to a uniform wall temperature boundary condition, *International Journal of Thermal Sciences*, 203, 109167.
- Forooghi P., Hooman K. (2013) Effect of buoyancy on turbulent convection heat transfer in corrugated channels a numerical study, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64, 850-862.
- Hamouche, A., Bessaïh, R. (2008) Mixed convection air cooling of electronic components mounted in a horizontal channel, *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 3, 53-64.

- Jang, J. H., Yan, W. M. (2004) Mixed convection heat and mass transfer along a vertical wavy surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47 (3), 419-428.
- Lee, J. S., Ha, M. Y., Min, J. K. (2021) Numerical study on the mixed convection around inclined-pin fins on a heated plate in vertical channels with various bypass ratios, *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 101310.
- Rosas, I.Y., Trevino, C., Martinez-Suastegui, L. (2017) Experimental study of mixed convection heat transfer in a vertical channel with a one-sided semicylindrical constriction with prescribed heat flux, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 67(Part A), 155-167.
- Özdemir, S., Kılıç, M., Çalışır, T., Başkaya, Ş. (2023) Numerical investigation of enhancing mixed convection heat transfer by using semicylindrical obstacles in a vertical channel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (3), 1805-1820.
- Wetzel, T., Wagner, C. (2019) Buoyancy-induced effects on large-scale motions in differentially heated vertical channel flows studied in direct numerical simulations, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 75, 14-26.
- Zhang W., Wei Y., Yu P., Zhu Z. (2022) Numerical investigation on buoyancy-driven flow over a circular cylinder in a channel with nonparallel walls, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 82(6), 299-316.
- Zhu, H. J., Zhong, J. W., Liu, B., Zhou, T. M. (2024) Unsteady wake and heat transfer characteristics of three tandem circular cylinders in forced and mixed convection flows, *Physics of Fluids*, 36(7), 073602.

DÜŞÜK GÜÇLÜ MOTORLAR İÇİN BASİT BİR MOTOR TEST DİNAMOMETRESİ¹

Gökçe Hilal YAVUZ²

Emre ARABACI³

1. GİRİŞ

Motor performansının ölçülmesinde en önemli basamak, motor çıkış milinden elde edilen işin (kuvvetin veya torkun) ölçülmesidir. Motorun çıkış milinden elde edilen bu gerçek ve kullanılabilir değerlerin ölçülmesinde “*dinamometre*” adı verilen özel makineler kullanılmaktadır. Dinamometreler uygun göstergelerle, kuvvet, moment, hız ve güç ölçmek üzere kullanılan enerji dönüştürücüleri olarak tanımlanmaktadır. Motor dinamometreleri araştırma veya üretimde, hareket üreten her türlü makinenin torkunu ve gücünü belirlemede veya bu hareket üreten makineler için geliştirilmiş komponentlerin mevcut makinenin performansına etkisinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. (Martyr & Plint, 2012).

Dinamometre kavramı TDK sözlüğünde Türkçeleştirilmiş hali olan kuvvetölçer şeklinde yer almaktadır ve kuvveti ölçmeye yarayan cihaz olarak tanımlanmaktadır. Motor dinamometresi ise motorlardan elde edilen kuvveti ölçmeye yarayan cihazlardır.

¹ Bu çalışma Tübitak 2209-A “Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı” kapsamında 2022/2 çağrı döneminde proje olarak desteklenmiştir.

² Lisans Öğrencisi, Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Pamukkale/Denizli, gyavuz20@posta.pau.edu.tr, ORCID: 0009-0008-4389-6413.

³ Doç. Dr., Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Pamukkale/Denizli, earabaci@pau.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6219-7246.

Dinamometreler kuvvet ölçümünü statik veya dinamik sistemler için yapabilmektedir. Motorlar dinamik sistemler olduğundan dolayı dinamometre dinamik ölçüm yapmaktadır (Türk Dil Kurumu, 2023; Martyr & Plint, 2012).

Şekil 1. Basit Bir Dinamometre



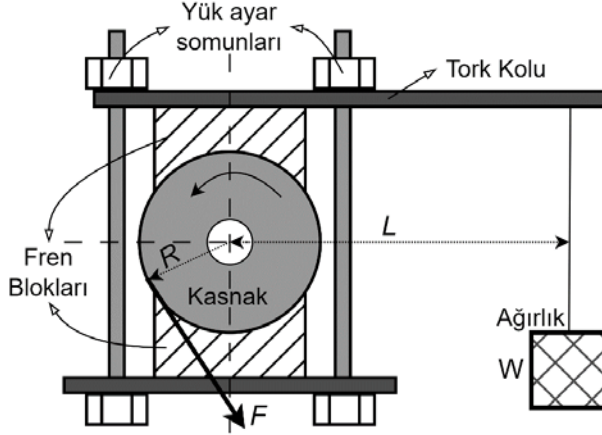
Şekil 1’de görüldüğü gibi 5 kg kütleli bir cisim dinamometreye asıldığında yer çekimi etkisi ile bir kuvvet oluşturmaktadır. Bu durum Newton’un ikinci yasası ile açıklanabilmektedir (Sarı & Dombaycı, 2009).

$$F = ma = mg \quad (1)$$

Motor dinamometrelerinde dönen bir milin frenlenmesi ile elde edilen bir kuvvetin ölçümü söz konusudur (Zammit, 1987). Şekil 2’de görüldüğü gibi bir milin frenlenmesi için bir frenleme bloğu ve frenleme kuvvetini meydana getiren ağırlık bulunmaktadır. Motorlarda kuvvet ölçümü frenlemeye bağlı bir durumdur ve dinamik sistemlerde çok bir şey ifade etmemektedir. Frenleme için gereken kuvvet yerine “*tork*” değerinin bilinmesi çok daha kullanışlı olmaktadır. Bunun için Şekil 2 referansında aşağıdaki basit eşitlik (Eş. 2) kullanılabilmektedir (Martyr & Plint, 2012; Zammit, 1987).

$$\tau = FR = WL \quad (2)$$

Şekil 2. Basit Bir Motor Dinamometresi



Yukarıdaki eşitlikte L ifadesi tork kolu uzunluğunu belirtmektedir. W ağırlığı (yük) L mesafesinde bir τ torku oluşturmaktadır. Benzer şekilde kasnağın R yarıçapına F kuvveti etki ederek yine τ torku oluşturmaktadır. Böylelikle temelde motor milinde oluşan τ torku ölçülebilir hale gelmiştir. Motor dinamometreleri için kuvvet yerine tork ifadesinin kullanılmasının nedeni, dairesel olarak hareket eden bir milin üzerine uygulanması gereken kuvvetin uygulama mesafesine bağlı olarak değişmesidir. Ancak tork kavramı bir mil için milden elde edilen enerji olarak düşünülmelidir (Martyr & Plint, 2012; Zammit, 1987).

Günümüzde ister statik, ister dinamik sistemler için kullanılan ve hassas ölçümler yapabilen tork sensörleri bulunmaktadır. Bu tork sensörlerinde genellikle strain gauge'ler kullanılmaktadır. Bununla birlikte bu sensörlere enkoder eklenerek hız ölçümü ve bunun yanında güç ölçümü de yapılabilmektedir. Bu çalışmada tork ölçümü için dinamik tork sensörü kullanılmıştır (Burster Präzisionsmesstechnik GmbH & Co. KG, 2016a,b).

Motor dinamometrelerinde tork ölçümü için tork sensörünün yanında bir frenleme sistemi bulunmalıdır. Motor dinamometrelerinde genel olarak manyetik etkili, mekanik etkili ve hidrolik etkili frenleme sistemleri kullanılmaktadır. Her fren sisteminin kendine göre avantaj ve dezavantajı bulunmaktadır (CMC Controls, 2023; Warner Electric, 2016).

Su frenleri olarak da bilinen hidrolik etkili frenleme sistemleri yüksek güçlü motorların testlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Su frenleri genel olarak rotor ve statordan veya gruplarından meydana gelmektedir. Frenleme enerjisi ısı enerjisine dönüştüğünden dolayı sistem içerisindeki su açık veya kapalı sistem olarak sürekli olarak değiştirilmektedir. Kapalı devre sistemde su bir eşanjör vasıtasıyla soğutulmaktadır. Bu tür sistemlerde gövde olarak görev yapan stator üzerinden tork ölçümü yapılmaktadır. Genellikle tork ölçümü için loadcell kullanılmaktadır (Martyr & Plint, 2012; Çetinkaya & Salman, 2007; Altınörs, 2001; Öz, Borat, & Sürmen, 2003; Krebl, 1995; Gallacher, 1995; Cooling, 1985; Babbitt, Bonomo, & Moskwa, 1997).

Sık kullanılan bir başka dinamometre ise Eddy akımlı dinamometredir. Eddy akımı (girdap akımı veya Foucault akımı olarak da bilinmektedir) Faraday'ın indüksiyon yasasına göre, manyetik alanın değişimi elektrik akımı üretir. Manyetik alan değiştiğinde iletkenlerin içerisinde oluşan çembersel (bir çerçevenin içerisinde başladığı noktaya dönen) elektrik akımıdır. Lenz yasası sebebiyle, Eddy akımı, kendisini oluşturan manyetik alana karşı bir manyetik alan oluşturur, yani kendisini oluşturan manyetik alan değişimine karşı çıkar. Örneğin, yüzeyinde oluşan Eddy akımı sebebiyle, iletken bir yüzey, yakınlarında hareket eden bir mıknatısa çekme kuvveti uygulayabilir. Eddy akımı fren yapmak için de kullanılır. Eddy akımı, sürtünmesiz frenleme sağlayarak kinetik enerjiyi manyetik alanla dönüştürür. Fren kasnağı ya da takozu ile temas olmadığı için mekanik aşınma

olmaz. Ama bir Eddy akımı freni “tutunma” momenti sağlamaz ve mekanik frenlerle birleştirilerek kullanılabilir; örneğin tavan yük taşıma vinçleri. Diğer bir uygulaması ise bazı lunapark trenlerinde, arabadan uzatılan ağır bakır plakaların kalıcı mıknatısların arasında kaydırılmasıyla yapılır. Plakaların arasındaki elektriksel direnç, sürtünme ile eşdeğer olan bir sürüklenme etkisine sebep olur, bu da arabanın kinetik enerjisini harcar. Elektro mıknatısları kullanarak manyetik alanın gücü ayarlanabilir. Böylece frenleme etkisi değiştirilebilir (Martyr & Plint, 2012; Çetinkaya & Salman, 2007; Altınörs, 2001; Öz, Borat, & Sürmen, 2003; Krebl, 1995; Gallacher, 1995; Cooling, 1985; Babbitt, Bonomo, & Moskwa, 1997).

Bu çalışmada hem basit yapısı, hem de ekonomik olmasından dolayı akım baskılı mekanik etkili bir fren mekanizması kullanılmıştır. Akım baskılı mekanik etkili fren mekanizması ile ilgili detaylı bilgi ileriki sayfalarda verilmiştir. Bu çalışma kapsamında yalnızca yük ölçümü (kuvvet, tork veya güç) için bir sistem tasarımı bulunmaktadır. Bir motor testi için yakıt tüketimi, hava tüketimi, egzoz emisyonları, çeşitli sıcaklıklar gibi ölçümler, yanma analizi vb. ölçümler bu çalışma için kapsam dışıdır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

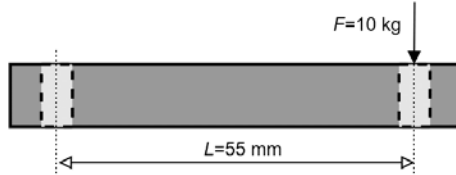
2.1.Tork Sensörü

Bu çalışmada frenleme için akım baskılı tozlu fren sistemi, bu sistem için bir elektronik kontrol modülü, tork sensörü ve tork sensöründeki verilerin işlenmesi ve görüntülenmesi amacıyla bir bilgisayar ve yazılım kullanılmıştır. Ayrıca, fren ve tork sensörünün mekanik olarak birleştirilmesi, tork sensörü ile motorun boşluksuz kaplinle bağlanması, fren tork sensörü ve motorun konumlandırıldığı tabla ile elektriksel bağlantılar da çalışma kapsamında yer almıştır.

Motor dinamometreleri içten yanmalı motorların tork ve güç performans karakterlerinin belirlenmesi için kullanılan yük makineleridir. Bu makineler kapsamlı ölçümlerde kullanıldığından ve özel üretim olduklarından dolayı oldukça pahalıdırlar. Tek silindirli motorlar için ise yaygın olarak elektrikli dinamometre kullanılmaktadır. Burada motor dinamometresinden istenen temel özellik, motorun frenlenmesi ve bu frenleme enerjisinin hassas bir şekilde ölçülmesidir. Bu çalışmada düşük güçlü ve düşük torklu motorların tork ve güç performans karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılacak, düşük maliyetli (bakım, üretim vs.) bir motor dinamometresi imal etmek ve testlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır (Altınörs, 2001; Cooling, 1985; Çelik, Bayır, & Özdalyan, 2007).

Tork sensörü olarak HX711 entegre devreli strain gauge loadcell kullanılmıştır. Loadcell kapasitesi 10 kg'dır. Burada Şekil 3'teki gibi bir montaj yapılmıştır. Kuvvet uygulanan yer ile mesnet noktası arasında 55 mm bulunmaktadır.

Şekil 3. Loadcell Montaj Durumu



Buna göre sistemin maksimum ölçebileceği tork değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

Öncelikle Eş. 1 kullanılarak kuvvet bulunur:

$$F = 10 \times 9,81 = 98,1 \text{ N}$$

Torku hesaplamak için kol uzunluğunu metre cinsinden kullanmamız gerekir. Şekil 3'te görülen montajda, kol uzunluğu $L = 55 \text{ mm} = 0,055 \text{ m}$ 'dir. Eş. 2 kullanılarak tork hesaplanabilir.

$$\tau = 98,1 \times 0,055 = 5,3955 \text{ Nm} \cong 5,4 \text{ Nm}$$

Bu değer, sensöre 10 kg'lık bir yük uygulandığında elde edilen anlık tork değerini temsil etmektedir.

Her sensörün belirli bir maksimum yüklenme kapasitesi vardır. Bu kapasiteyi aşmak, sensörde geri dönüşü olmayan hasarlara yol açabilir. Bu yüzden genellikle bir “*emniyet katsayısı*” kullanılır. Emniyet katsayısı, sensörün nominal tork değerine göre dayanabileceği maksimum torku bulmak için kullanılır. Bununla birlikte yapılan deneylerde sensörün dayanabileceği maksimum yükün belirlenebilmesi için aşırı yükleme testi yapılmıştır. Yapılan deneylerde 17,3 kg sürekli yükte sensörün kullanılmaz hale geldiği tespit edilmiştir. Bu sürekli yük değeri emniyet katsayısı hesaplamasında anlık yük olarak kabul edilebilir. Buna göre emniyet katsayısı (*S*) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$S = \frac{\text{Maksimum yük}}{\text{Normal yük}} = \frac{17,3}{10} = 1,73 \cong 1,7$$

Sensörün maksimum torku yaklaşık olarak 9,32 Nm olarak hesaplanmıştır. Bu, sensörün aşırı yüklemeye dayanarak zarar görmeden kaldırabileceği maksimum torktur.

2.2.Akım Baskılı Manyetik Fren Sistemi

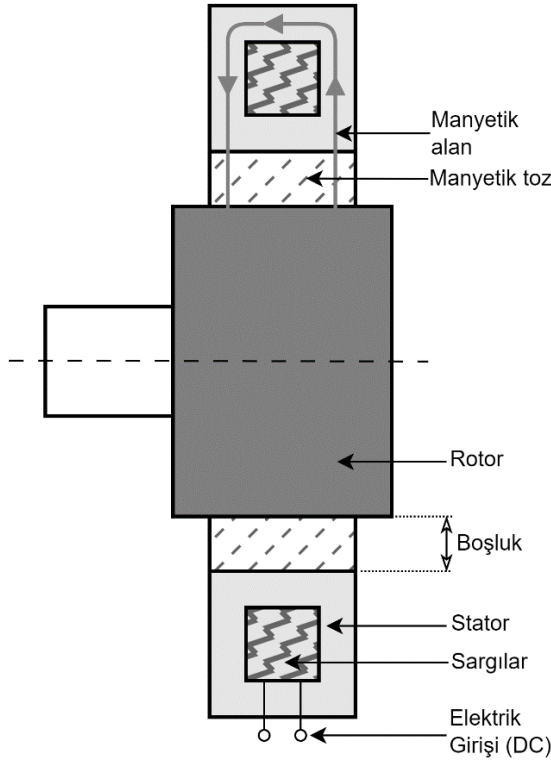
Manyetik (veya elektromanyetik) frenlerin tek yüz frenler, power off frenler, tozlu frenler, histerisis frenler ve çok diskli frenler gibi birçok çeşidi vardır (Woodford, 2023).

Sürtünmesiz olarak elektronik voltaj kontrolü yardımıyla istenilen torklara kademesiz geçiş yapabilen frenleme sistemi olan tozlu frenler, mekanik sürtünmeler az olduğu için uzun ömürlü ve bakım gerektirmeyen sistemlerdir. 0 V DC ile 24 V DC arasında voltaj ayarı ile tork iniş çıkışları kademesiz olarak ayarlanabilir. Bu frenler kontrollü açma ve kapama, tork kontrolleri, tork sınırlamaları, hız kontrolü ve kontrollü başlama

işleri için sıklıkla kullanılmaktadır. Akım baskılı manyetik fren, akım baskılı tozlu fren olarak da adlandırılmaktadır (Woodford, 2023; EMF Fren, 2014; Altra Industrial Motion, 2016; Warner Electric, 2010).

Bu fren sistemine “tozlu” denilmesinin nedeni, stator olarak görev yapan ve giriş miline bağlı olan silindir kısmı ile gövdeye temas etmeyen rotorun, çıkış miline yataklık eden paslanmaz çelik tozlarla dolu bir boşluğa sahip olmasıdır (Şekil 4).

Şekil 4. Akım Baskılı Tozlu Manyetik Fren



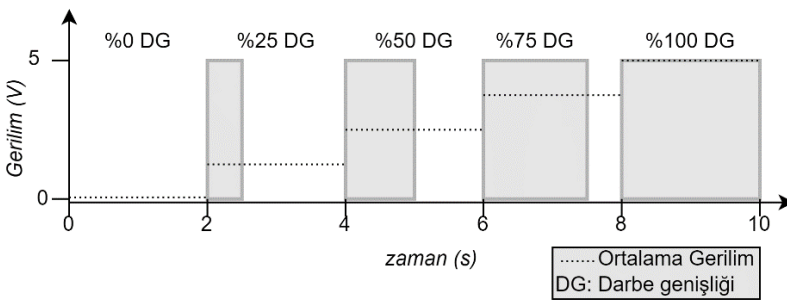
Normal durumda, boşlukta bulunan tozlar serbest bir şekilde hareket eder. Ancak bir gerilim uygulandığında, bu tozlar manyetik alan etkisiyle birleşerek frenleme kuvveti oluşturur. Uygulanan gerilim arttıkça, frenleme kuvveti de o oranda artar.

2.3.Frenleme Sistemi İçin Kontrol Modülü

Bu çalışmada, akım baskılı tozlu manyetik frenleme sisteminin istenilen tork değerlerinde yükleme yapabilmesi amacıyla kullanılması planlanmıştır. Fren sistemi, 0-24 VDC aralığında çalışmakta olup, bu sistemde bobin stator (gövde) üzerinde sabit durumdadır.

Sürekli gerilim uygulandığında aşırı ısınma ve yanma gibi sorunların önüne geçmek için, gerilimi sürekli olarak uygulamak yerine darbeli bir şekilde iletmek daha faydalı bir yöntemdir. Bu yöntem, Dalga Genişlik Modülasyonu (PWM) olarak adlandırılır. PWM yönteminde, kaynaktan alınan gerilim özel devreler aracılığıyla belirli sürelerde darbeler haline getirilir (Şekil 5). Darbe genişlik modülasyonu, gerilimin sürekli mi yoksa kesik mi olacağı sürelerin ayarlanmasıyla gerçekleştirilir. Gerilimin bir çevrimdeki uygulanma süresi, ortalama gerilim üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Şahin & Dedeoğlu, 2013). Sargıların aşırı ısınma ihtimaline karşı bu PWM uygulamasına ek olarak cebri fan sistemi de kullanılmıştır. Böylelikle bir fan yardımıyla fren üzerindeki ısının atılması sağlanmıştır.

Şekil 5. Darbe Genişlik Modülasyonu



Burada görüldüğü gibi darbelerin tepe değerleri (genlikleri) sabit kalmakta, değişen ise darbelerin genişlikleri, yani sürelerdir. Çıkışta yansıyan, bu darbelerin ortalama değeri olan ortalama gerilimdir. Darbe genişliklerini belirleyen ise

anahtarlama işlemidir. Kurulan özel devrelerde kullanılan elemanlara bağlı olarak bir anahtarlama frekansı belirlenir. Aynı şekilde, devredeki elemanlar sayesinde darbe genişliği ayarlanarak, belirlenen frekansta istenilen genişlikte çalışma sağlanır (Arduino, 2023; Şahin & Dedeoğlu, 2013).

Çalışmada kullanılan manyetik frenin kontrolü ile DC motorun kontrolü arasında fark bulunmamaktadır. Bu nedenle, kontrollü frenleme yapmak için bir DC motor sürücü devresi yeterli olmaktadır. Piyasada hazır olarak bulunan PWM DC motor sürücü devreleri, üzerlerindeki potansiyometre yardımıyla DC motor hızını ayarlayabilmektedir.

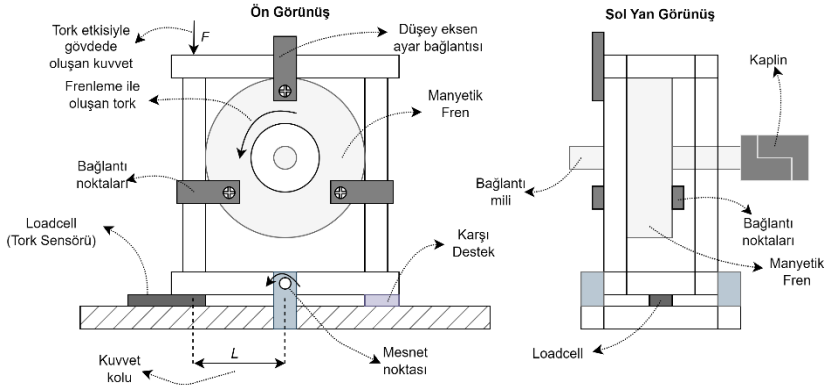
Çalışmada, güvensizlik ve ayarlama zorlukları nedeniyle hazır devreler yerine, basit bir mikrodenetleyici yardımıyla PWM sinyali üreten bir DC motor sürücü devresi tasarlanmıştır. Bu sistem, gerektiğinde bilgisayardan da kontrol edilebilir şekilde tasarlanmıştır. Sürücü devre olarak L298N entegresine sahip hazır bir kart, mikrodenetleyici olarak ise Arduino UNO kullanılmıştır (STMicroelectronics, 2000; Delebe, 2014).

Fren sistemi, bir motora bağlanarak basit bir düzenek oluşturulmuştur. Bu düzenek için Arduino ile bir kod yazılmıştır. Devreye; yük artırma, yük eksiltme ve acil durdurma butonları eklenmiş ve işlemler LCD ekran üzerinden görüntülenmiştir.

2.4.Oluşturulan Dinamometre Sistemi

Oluşturulan dinamometre düzeneğinde, 20x20 mm boyutlarında 6 kanallı sigma profil ve bağlantı elemanları kullanılmıştır. Fren sistemi olarak, 35 Nm maksimum torka sahip EMF marka ABTF 03 model akım baskılı manyetik tozlu fren tercih edilmiştir. Dinamometre sisteminin şematiği Şekil 6'da gösterilmiştir.

Şekil 6. Dinamometre Sistemi Şematığı



Bu şemâtiğe, fren sargıları gövdede sabittir. Frenleme yapıldığında, mildeki enerji gövdeye aktarılır. Bu çalışmada, motor gövdesinin dinamometre gövdesine yük oluşturması sağlanmıştır. Bunun için bir mesnet noktası oluşturulmuş ve böylece dinamometre gövdesi tork sensörüne yük uygulamıştır. Bu yapıya uygun olarak bir kontrol ünitesi geliştirilmiştir. Kontrol ünitesinde Arduino Uno geliştirme kartı, LCD Keypad Shield, HX711 Analog-Dijital dönüştürücü ve BTS7960B DC-PWM motor sürücüsü kullanılmıştır.

Kontrol ünitesi için yazılmış Arduino kodu Şekil 7'de gösterilmiştir. Kod şu şekilde yapılandırılmıştır: Butonlar A0 pinine bağlanmıştır. Yukarı ve Aşağı butonları ile frenleme değeri 0-100 aralığında ayarlanabilir. Sol buton ise frenlemenin sıfırlanması (acil stop) işlevi için kullanılmaktadır. Frenleme değerine bağlı olarak D3 pininde PWM sinyali üretilmektedir. D3 pini, BTS7960B DC-PWM motor sürücüsüne bağlıdır ve bu PWM sinyali dinamometrenin frenlenmesini sağlar.

Frenlemenin oluşturduğu tork değerinin ekranda gösterilebilmesi için bir kalibrasyon katsayısı belirlenmiştir. Bu katsayı, torkun doğrudan Nm cinsinden görüntülenmesini sağlamaktadır. Yapılan ön deneyler sonucunda kalibrasyon katsayısı 836 olarak belirlenmiştir Bu belirleme için manyetik

frene bir mil takılmış, fren 24 V ile enerjilendirilmiş ve bu mil dijital göstergeli bir torkmetre ile döndürülmeye çalışılmıştır. Ayrıca, başlangıç kalibrasyonu (sıfırlama) için sağ buton kullanılmıştır.

Şekil 7. Kontrol Ünitesi İçin Arduino Kodları

<pre>#include <LiquidCrystal> #include "HX711.h" LiquidCrystal ekran(8, 9, 4, 5, 6, 7); HX711 tarti; #define DT 12 #define SCK 11 float kalibrasyon_katsayisi = 836.0; int basilan_tus = 0; int okunan_deger = 0; float offset = 0; int fren_degeri = 0; #define yukari 1 #define asagi 2 #define right 0 #define left 3 #define PWM_PIN 3 unsigned long fren_azaltma_zamani = 0; bool fren_azaltilacak = false; byte buton_bul() { okunan_deger = analogRead(A0); if (okunan_deger > 1000) return yok; if (okunan_deger < 50) return right; if (okunan_deger < 195) return yukari; if (okunan_deger < 380) return asagi; if (okunan_deger < 555) return left; } void setup() {</pre>	<pre> ekran.begin(16, 2); ekran.clear(); tarti.begin(DT, SCK); tarti.set_scale(kalibrasyon_katsayisi); tarti.tare(); pinMode(PWM_PIN, OUTPUT); void loop() { basilan_tus = buton_bul(); if (basilan_tus == yukari && fren_degeri < 100) { fren_degeri++; } if (basilan_tus == asagi && fren_degeri > 0) { fren_degeri--; } float agirlik = tarti.get_units(5) - offset; float tork = agirlik / 100.0; if (tork > 25.0) { fren_azaltilacak = true; } if (fren_azaltilacak && millis() - fren_azaltma_zamani >= 200) { if (fren_degeri > 0) { fren_degeri--; } fren_azaltma_zamani = millis(); if (tork <= 25.0) {</pre>	<pre> fren_azaltilacak = false; } } if (basilan_tus == right) { offset = tarti.get_units(5); } if (basilan_tus == left) { fren_degeri = 0; } ekran.setCursor(0, 0); ekran.print("Tork: "); if (tork < 0) { ekran.print("(*)"); tork = -tork; } else { ekran.print("(" * "); } if (tork < 10.0) ekran.print("0"); ekran.print(tork, 2); ekran.print(" Nm"); ekran.setCursor(0, 1); ekran.print("Fren: "); if (fren_degeri < 10) ekran.print("00"); else if (fren_degeri < 100) ekran.print("0"); ekran.print(fren_degeri); analogWrite(PWM_PIN, map(fren_degeri, 0, 100, 0, 255)); delay(100); } }</pre>
--	--	--

Sistemin korunabilmesi için basit bir güvenlik önlemi alınmıştır. Bu önlem çerçevesinde, tork değeri 25 Nm'yi aştığında frenleme kademeli olarak azaltılarak 25 Nm'ye düşürülmektedir. Böylelikle daha yüksek yüklerin oluşturulması ve mekanik arızaların meydana gelmesi engellenmektedir. Sistem anlık yük aşımalarında da devreye girerek frenlemeyi düzenleyebilmektedir. Deneyler esnasında kullanılan motorla göre bu değer kod üzerinden değiştirilebilir niteliktedir. Ancak bu değerın mutlaka frenin maksimum tork değeri olan 35 Nm'yi geçmemesi gerekmektedir. Buna göre elde edilen LCD ekran görüntüsü Resim 1'deki gibidir.

Resim 1. Oluşturulan Devrenin LCD Ekran Görüntüsü

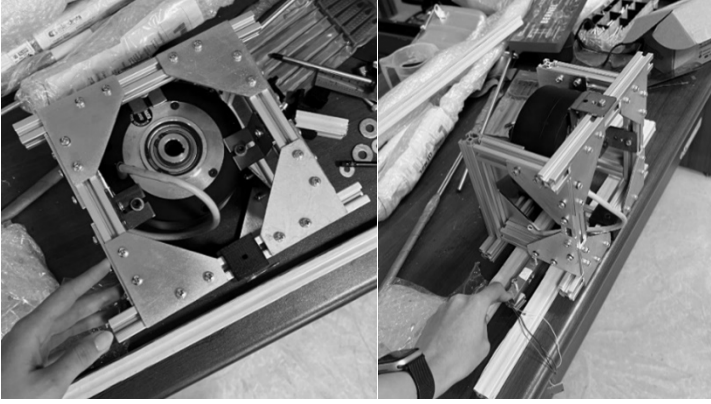


Burada örnek olarak frenleme %20 iken tork değeri 8.51 Nm (kalibre edilmemiş değerdir) olarak görülmektedir. Eğer sisteme motor hızı ölçümü için bir sensör eklenseydi (bu çalışmada kullanılmamıştır) tork değerinin yanı sıra hız ve güç değerleri de ekranda görüntülenebilirdi.

3. BULGULAR

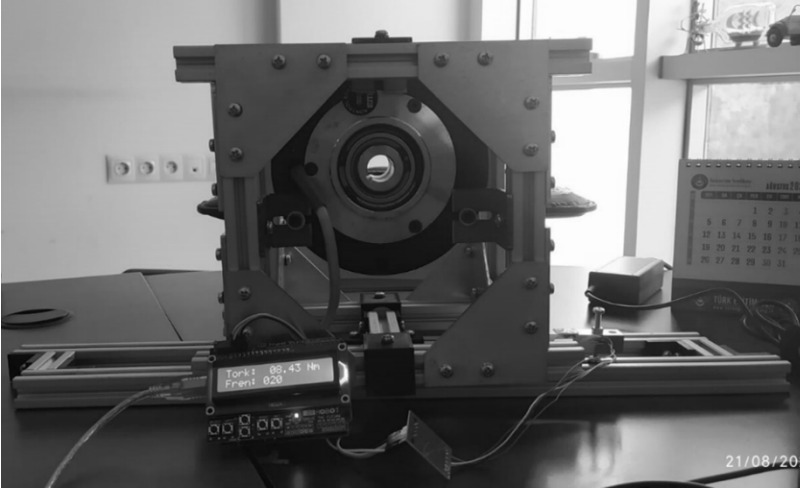
Dinamometrenin mekanik yapımı laboratuvarda gerçekleştirilmiştir. 20×20 sigma profillerin kesimi, profillerin birleştirilmesi gibi tüm işlemler için laboratuvar imkanları kullanılmıştır. Bununla birlikte gerekli olan bazı bağlantı elemanları modellenerek 3D FDM yazıcıda ABS malzemeden üretilmiştir. Bu bağlantı elemanları üzerinde yük olan bağlantı elemanları olmayıp yalnızca montajı kolaylaştırmak için kullanılan basit elemanlardır. Dinamometre yapısının güçlendirilmesi için çelik köşebentler kullanılmıştır. Montaj esnasındaki görüntüler Resim 2’de görüldüğü gibidir.

Resim 2. Dinamometrenin Montaj Aşamaları



Montaj aşaması sonrasında elde edilen dinamometrenin son hali Resim 3'teki gibidir. Burada mukavemetin artırılması amacıyla kullanılan çelik köşebentler görülmektedir. kullanılmıştır. Bu köşebentler sayesinde dinamometrenin rijitliği sağlanmıştır. Dinamometrenin ayak kısmında titreşim sönümleyici kauçuk damperler kullanılmıştır. Bu damperler sayesinde motordan kaynaklanan titreşim hasarları minimize edilmiştir.

Resim 3. Dinamometrenin Son Hali



Sigma profil kullanılarak yapılan imalat sayesinde dinamometre, farklı motorlara uyarlanabilir hale getirilmiştir. Fren kısmının sigma profilin raylarına deliksiz olarak montajlanması bu esnekliği sağlamıştır. Ayrıca, sigma profil üzerindeki boş alanlara sensör gibi ek komponentler de yerleştirilebilmektedir. Tasarıma uygun şekilde montajlanan dinamometre, testler için hazır hale getirilmiştir.

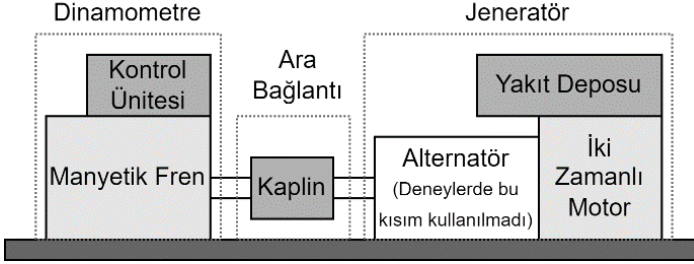
Dinamometrenin çalışabilmesi için ayarlanabilir bir güç kaynağı kullanılarak 24 V elektrik beslemesi yapılmıştır. Dinamometrenin basit bir şekilde test edilebilmesi amacıyla HHY 960 model iki zamanlı motora sahip bir jeneratör kullanılmıştır. Jeneratörün görseli ve özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur. Bu test sırasında jeneratörün alternatör kısmı kullanılmamıştır; alternatörün rotoru doğrudan motora bağlıdır. Jeneratör alternatörünün arka kapağı delinerek UCF203 yataklı rulman yerleştirilmiştir. Rotor miline M8 saplama takılmış ve dinamometreye kaplin yardımıyla bağlanan 17 mm çapındaki mil buraya monte edilmiştir. GS19 boşluksuz kaplinin her iki tarafı da 17 mm çapında işlenerek dinamometre ile motor arasındaki bağlantı sağlanmıştır.

Tablo 1. Jeneratörün Özellikleri

Jeneratör Çıkışı	220 VAC, 50 Hz Tek faz 800 W (1.0 kVA) Maksimum
Motor Kurs Hacmi	63 cc
Motor Çıkış Gücü	1490 W Maximum
Motor Tipi	Dikey, tek silindir, 2 zamanlı, doğal emişli, saat yönü tersine
Yakıt	87+ oktan benzin ve yağ karışımı

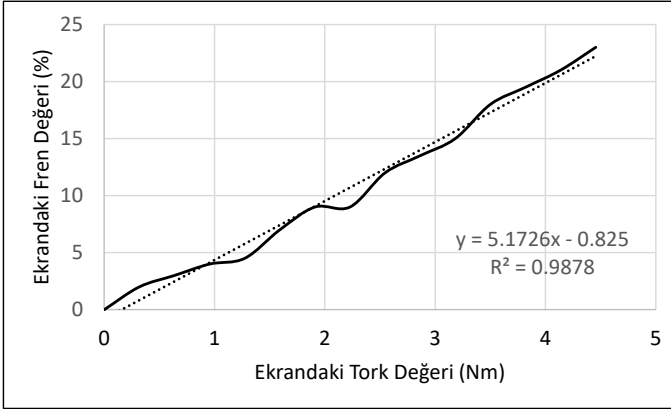
Motor üzerinde bulunan hız regülatörü nedeniyle sürekli olarak 3000 rpm hızda çalışmaktadır. Oluşturulan deney düzeneği şematiği Şekil 8'deki gibidir.

Şekil 8. Deney Düzeneği



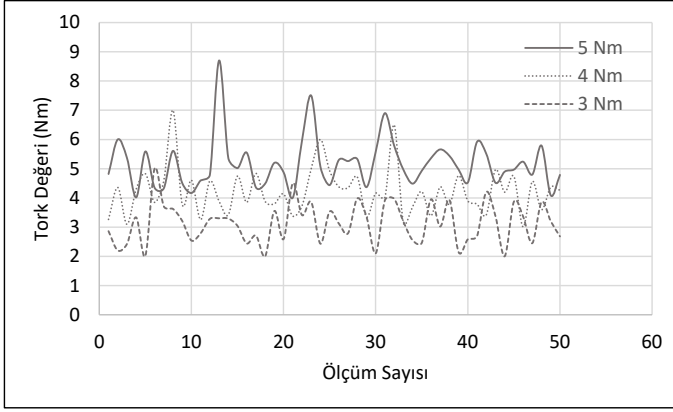
Oluşturulan deney düzeneğine göre yaklaşık 5 Nm'ye kadar motor yüklenebilmiştir. Tork değerine göre yapılan frenleme aşağıdaki gibi olmuştur. Görüldüğü gibi tork değeri ile fren yüzdesi arasında lineer bir ilişki vardır (Şekil 9).

Şekil 9. Tork Değerine Göre Frenleme Yüzdesi



Frenlemeye göre tork değeri sürekli olarak değişse de ortalama bir değer elde edilebilmektedir. Bunun için Arduino koduna fren torkunun örneklediği bir kod eklenerek kaydedilmiştir. Motoru arzu edilen tork değerine ulaştırdıktan sonra 50 ms aralıklarla 50 örnek alınmıştır. 5 Nm, 4 Nm ve 3 Nm için yapılan ölçümler Şekil 10'dadır ve bu ölçümlerin ortalama değerine göre mutlak hatalar sırasıyla %3.16, %2.95 ve %0.6 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 10. Frenlemeye Göre Ölçümlerdeki Kararsızlıklar



4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, düşük güçlü içten yanmalı motorların performansını ölçmek amacıyla basit bir dinamometre tasarlanıp üretilmiştir. Literatür taraması yapıldığında, güç üreten döngüsel makinelerin performansını değerlendirmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiş olduğu görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan dinamometre, prony freninin modernize edilmiş bir versiyonudur. Frenleme sistemi olarak, akım baskılı tozlu fren tercih edilmiştir. Fren sisteminde aşınma elemanlarının bulunmaması önemli bir avantaj sağlamaktadır. Ancak fren, yükleme sırasında aşırı ısınabilmektedir. Bu nedenle, 5 Nm maksimum tork değerine sahip bir motor için 35 Nm kapasiteli bir fren seçilmiştir. Nominal çalışma değerine göre frenin 6.59 kW gücü absorbe edebilme kapasitesi vardır, ancak etkin bir soğutma sistemi ile kullanılması zorunludur.

Dinamometre çerçevesi/gövdesi, günümüzde yaygın olarak kullanılan alüminyum sigma profiller ile yapılmıştır. Çoğu bağlantı parçası hazır olarak temin edilmiş, ancak standart olarak bulunmayan bağlantı elemanları tasarlanarak 3D yazıcıda üretilmiştir. Deneyler sırasında elde edilen dinamometrede birkaç

küçük mekanik sorun yaşanmış ve bu sorunlar giderildikten sonra deneylere devam edilmiştir. Şu anda sistem sorunsuz çalışmaktadır.

5. ÖNERİLER

Bu çalışma, motorların performanslarının nasıl ölçüldüğüne dair yapılan temel düzey bir çalışmadır. Basit bir dinamometre oluşturulmasına rağmen, çeşitli geliştirmeler yapılabilir. Örneğin, hız ölçümü eklenerek doğrudan güç ölçümü yapılabilir. Bununla birlikte elektronik kontrol sistemi geliştirilebilir. Ayrıca oluşturulan dinamometrede bazı tasarımsal hatalar bulunmaktadır. Ancak mevcut bütçe ve imkanlarla optimum bir tasarım elde edilmiştir. Daha iyi bir tasarım ve üretimle daha stabil çalışan bir dinamometre yapmak mümkündür.

KAYNAKÇA

- Altınörs, A. (2001). *Dinamometreler için yeni bir kontrol sistemi tasarımı* (Yüksek lisans tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Altra Industrial Motion. (2016). *Permanent magnet and magnetic particle clutches and brakes* (ss. 1-32). ABD: Altra Industrial Motion.
- Arduino. (2023). *PWM Arduino*. <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM> (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2023).
- Babbitt, G. Y., Bonomo, L. R., & Moskwa, J. J. (1997). Design of an integrated control and data acquisition system for a high-bandwidth, hydrostatic, transient engine dynamometer. *Proceedings of the American Control Conference* (ss. 1157-1161). New Mexico, ABD.
- Burster Praezisionsmesstechnik GmbH & Co. KG. (2016). *8661 non-contact transmission for rotating applications: Precision torque sensor brochure* (ss. 1-4). Almanya: Burster Praezisionsmesstechnik.
- Burster Praezisionsmesstechnik GmbH & Co. KG. (2016). *8661 non-contact transmission for rotating applications: Precision torque sensor operation manual* (ss. 1-74). Almanya: Burster Praezisionsmesstechnik.
- CMC Controls. (2023). *Electromagnetic particle brake*. <http://www.cmccontrols.com/brakes-clutches.shtml> (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2023).
- Cooling, J. E. (1985). Information technology in engine test systems. *International Journal of Vehicle Design*, 6(4), 638-643.

- Çelik, B., Bayır, R., & Özdalyan, B. (2007). Bilgisayar destekli motor test standının tasarımı ve imalatı. *Teknoloji Dergisi*, 10(2), 131-141.
- Çetinkaya, S., & Salman, S. (2007). *Motor ve taşıt performans testleri* (Ders Notu). Ankara, Türkiye: Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi.
- Delebe, E. (2014). *Projeler ile Arduino* (5. baskı). İstanbul, Türkiye: Kodlab.
- EMF Fren. (2014). *Elektromanyetik fren ve kavrama sistemleri dokümanı* (ss. 1-21). İstanbul, Türkiye: EMF Fren.
- Gallacher, A. M. (1995). Dynamic engine testing: Why? *SAE Technical Paper*, 952301.
- Krebl, W. H. (1995). Engine test beds-yesterday-today-tomorrow. *SAE Technical Paper*, 952299.
- Martyr, A. J., & Plint, M. A. (2012). *Engine testing: The design, building, modification and use of powertrain test facilities* (4. baskı). Oxford, İngiltere: Elsevier.
- Öz, İ. H., Borat, O., & Sürmen, A. (2003). *İçten yanmalı motorlar*. İstanbul, Türkiye: Birsan Yayınevi.
- Sarı, İ., & Dombaycı, A. (2009). *Teknolojinin bilimsel ilkeleri* (1. baskı). Ankara, Türkiye: Nobel Yayıncılık.
- STMicroelectronics. (2000). *L298N datasheet* (ss. 1-13). Cenevre, İsviçre: STMicroelectronics.
- Şahin, H., & Dedeoğlu, S. K. (2013). *MikroC ve PIC18F4550* (2. baskı). İstanbul, Türkiye: Atlas Yayıncılık.
- Türk Dil Kurumu. (2023). Dinamometre sözcüğünün anlamı. http://tdk.gov.tr/index.php?option=com_bts&arama=kelim&guid=TDK.GTS.5837f451912d77.41753466 (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2023).

- UniWest. (2023). *Eddy current*. <http://uniwest.com/Principles-of-Eddy-Current-W63.aspx> (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2023).
- Warner Electric. (2010). *Tension control systems* (ss. 1-80). ABD: Warner Electric.
- Warner Electric. (2016). *Permanent magnet and magnetic particle clutches and brakes* (ss. 1-32). New Hartford, ABD: Altra Industrial Motion.
- Woodford, C. (2023). *Magnetic brakes*. <http://www.explainthatstuff.com/Eddy-current-brakes.html> (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2023).
- Zammit, S. J. (1987). *Motor vehicle engineering science for technicians*. Oxford, İngiltere: Elsevier.

ADDITIVE ADVANTAGE: REDEFINING MACHINE ELEMENTS THROUGH 3D PRINTING TECHNOLOGY

Onat Halis TOTUK¹

1. INTRODUCTION

Additive Manufacturing (AM), also known as 3D printing, has revolutionized the field of machine design by offering unprecedented flexibility and capabilities in the production of complex components. This technology builds objects layer by layer, using computer-aided design (CAD) data or 3D object scans to guide the precise deposition of materials into geometric shapes (Nexus Integra, n.d.). Unlike traditional subtractive manufacturing methods that remove material from a solid block, AM adds material sequentially, enabling the creation of intricate structures and geometries that were previously impossible or impractical to produce (MIT Sloan, 2017). The process encompasses a wide range of techniques, including fused deposition modeling (FDM), stereolithography (SLA), selective laser sintering (SLS), and direct metal laser sintering (DMLS), each offering unique advantages and applications in machine element design. These various AM processes differ in their materials, energy sources, layer formation methods, and the shape of the final product, influencing factors such as surface finish quality, dimensional accuracy, mechanical properties, and overall production time and cost (Springer, 2022).

¹ Instructor Dr.; Çankaya University Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department. Ankara/TÜRKİYE, onattotuk@cankaya.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9314-9204.

The impact of AM on machine design has been transformative, offering benefits such as reduced lead times, enhanced design freedom, and improved sustainability. By eliminating many intermediate steps in the traditional supply chain, AM allows for rapid prototyping and production of small lot sizes, making it ideal for customized machine elements and on-demand manufacturing (MIT Sloan, 2017). Furthermore, AM enables the creation of complex internal structures, consolidation of multiple parts into single components, and the use of functionally-graded materials, leading to lighter, stronger, and more efficient machine elements (Nexus Integra, n.d.). These capabilities have found particular resonance in industries such as aerospace, where weight reduction and complex geometries are critical. For instance, major aerospace manufacturers like Airbus and Boeing have embraced AM for producing critical components, showcasing its potential to revolutionize not only prototyping but also full-scale production of machine elements (Avionics International, 2020). The ability to create lattice structures through AM has also opened new avenues for optimizing strength-to-weight ratios in machine elements, providing unique design advantages that are difficult to achieve using conventional manufacturing methods (ASME, n.d.).

AM has emerged as a transformative technology in modern engineering and manufacturing, revolutionizing the way machine elements are designed, prototyped, and produced. Its importance lies in its ability to overcome many limitations of traditional manufacturing methods, offering unprecedented design freedom, cost-effectiveness for small-batch production, and rapid prototyping capabilities (MIT Sloan, 2017). AM enables engineers to create complex geometries, consolidate multiple parts into single components, and optimize designs for improved performance and reduced weight, all of which are crucial in industries such as aerospace, automotive, and medical

devices (Additec3D, 2023). Furthermore, AM's capacity for on-demand production and customization has significantly reduced lead times and inventory costs, making it an invaluable tool for agile manufacturing and responsive supply chains (Alpha Precision PM, 2022).

The significance of AM in modern engineering extends beyond its production capabilities, as it is reshaping entire design philosophies and manufacturing strategies. By removing many constraints associated with traditional manufacturing, AM encourages engineers to think differently about product design, focusing on optimizing functionality rather than manufacturability (PTC, 2019). This paradigm shift has led to innovations in areas such as lightweight structures, functionally graded materials, and biomimetic designs. Moreover, AM's sustainability benefits, including reduced material waste and lower energy consumption, align with the growing emphasis on environmentally responsible manufacturing practices (BSI, n.d.). As the technology continues to evolve, with improvements in speed, material options, and quality control, AM is poised to play an increasingly central role in the future of engineering and manufacturing, driving innovation, efficiency, and competitiveness across various industries.

2. FUNDAMENTALS OF ADDITIVE MANUFACTURING

Additive Manufacturing encompasses a variety of processes, each with unique characteristics and applications in machine element production. Fused Deposition Modeling (FDM) is widely used for its simplicity and cost-effectiveness, extruding thermoplastic filaments layer by layer to create parts (Loughborough University, n.d.). Stereolithography (SLA) offers higher resolution and smoother surface finishes by using a laser

to cure liquid photopolymer resin, making it ideal for detailed prototypes and functional parts (Formlabs, 2023). Selective Laser Sintering (SLS) and Direct Metal Laser Sintering (DMLS) use powdered materials, with SLS typically working with polymers and DMLS with metals. These processes use a laser to sinter or melt the powder particles, creating strong, complex parts without the need for support structures (3D Hubs, 2023). Each of these processes has its strengths and limitations, influencing their suitability for different machine element applications based on factors such as material properties, part complexity, and production volume.

The range of materials available for AM has expanded significantly, enabling the production of machine elements with diverse properties. Polymers, including thermoplastics like ABS, PLA, and nylon, are commonly used in FDM and SLS processes, offering good strength-to-weight ratios and chemical resistance (Sculpteo, 2023). For metal AM, materials such as stainless steel, titanium alloys, and aluminum are widely used, particularly in DMLS processes, providing high strength and heat resistance crucial for many machine elements (EOS, n.d.). Composite materials, combining polymers with reinforcing fibers or particles, are also gaining traction in AM, offering enhanced mechanical properties and expanding the application scope of 3D-printed machine elements (Markforged, 2022). The continuous development of new materials, including ceramics and bio-compatible substances, is further broadening the potential of AM in machine design.

AM offers numerous advantages in machine design, including design freedom for complex geometries, part consolidation, and rapid prototyping capabilities. These benefits enable the creation of optimized, lightweight structures and functionally integrated components that can significantly enhance performance and efficiency (Additec3D, 2023). AM also allows

for on-demand production and customization, reducing inventory costs and lead times. However, the technology also faces limitations. Build size constraints, slower production speeds for large volumes, and higher per-unit costs compared to traditional mass production methods can be challenging (Alpha Precision PM, 2022). Additionally, issues related to surface finish quality, dimensional accuracy, and anisotropic mechanical properties due to layer-by-layer construction need consideration in design and post-processing stages (Loughborough University, n.d.). Despite these challenges, ongoing advancements in AM technologies and materials continue to expand its capabilities and applications in machine element design and production.

3. DESIGN CONSIDERATIONS FOR AM MACHINE ELEMENTS

Design for Additive Manufacturing (DfAM) principles are essential for creating optimized machine elements that fully leverage the capabilities of AM technologies. DfAM encompasses a range of strategies aimed at exploiting the design freedoms offered by AM while addressing its limitations (PTC, 2019). Key principles include designing for minimal support structures, optimizing part orientation, and consolidating multiple components into single, complex geometries. For instance, designing self-supporting angles (typically 45 degrees or steeper) can significantly reduce the need for support structures, thereby minimizing post-processing requirements and material waste (Additec3D, 2023). Part orientation is crucial not only for minimizing support structures but also for optimizing mechanical properties, as AM parts often exhibit anisotropic behavior due to their layer-by-layer construction (Loughborough University, n.d.). Component consolidation, enabled by AM's ability to create complex internal features, can lead to reduced assembly times,

improved performance, and enhanced reliability by eliminating potential failure points at joints and interfaces.

Topology optimization has emerged as a powerful tool in the DfAM toolkit, allowing engineers to create lightweight, high-performance machine elements that would be impossible to manufacture using traditional methods. This computational approach determines the optimal material distribution within a given design space, subject to specified loads and constraints, often resulting in organic, biomimetic structures (Brckett et al., 2011). When combined with AM, topology optimization can lead to significant weight reductions – often 30-50% – while maintaining or even improving structural performance. However, the implementation of topology optimization for AM requires careful consideration of manufacturing constraints, such as minimum feature size, build orientation, and support structure requirements. Advanced topology optimization algorithms now incorporate these AM-specific constraints directly into the optimization process, ensuring that the resulting designs are not only theoretically optimal but also manufacturable (MIT Sloan, 2017).

Lattice structures represent another frontier in DfAM, offering unique opportunities for creating lightweight, multifunctional machine elements. These periodic cellular structures can be tailored to achieve specific mechanical, thermal, or acoustic properties, making them ideal for a wide range of applications (ASME, n.d.). In aerospace, for example, lattice structures are used to create lightweight structural components that maintain high stiffness and strength. In thermal management applications, gyroid lattices have shown promise for creating compact, high-efficiency heat exchangers due to their high surface-area-to-volume ratio and self-supporting nature (nTop, 2022). The design of effective lattice structures for AM requires a deep understanding of the relationship between lattice geometry

(e.g., cell type, size, and density) and resultant properties. Advanced design software, such as nTop, now offers tools for generating and optimizing complex lattice structures, enabling engineers to create machine elements with precisely tuned performance characteristics across multiple physical domains.

4. ADVANCED APPLICATIONS IN AEROSPACE

The aerospace industry has embraced additive AM for producing complex, lightweight components that were previously impossible or impractical to manufacture using traditional methods. One notable example is GE Aviation's LEAP engine fuel nozzle, which showcases the transformative potential of AM in aerospace. The intricate internal channels and optimized design not only improve fuel efficiency but also enhance durability, demonstrating how AM can simultaneously address multiple engineering challenges. Similarly, Airbus has successfully implemented AM for producing bionic partitions in its A320 aircraft, utilizing a bio-inspired design that mimics cellular bone structure to create a component that is 45% lighter than traditional partitions while maintaining the required strength and functionality (Additec3D, 2023).

Several case studies highlight the successful implementation of AM in aerospace applications. Satair, an Airbus Services subsidiary, recently delivered the first certified metal 3D-printed flying spare part to a U.S. airline operating Airbus A320ceo aircraft (Avionics International, 2020). This breakthrough involved the production of wingtip fences, critical components for managing wingtip vortices, which were no longer in production using conventional methods. By transitioning to AM, Satair not only addressed immediate supply chain challenges but also ensured a sustainable solution for years to come. Another compelling case study is Gravity Industries' use of AM for rapid

prototyping in the development of jet suits. The company leveraged various 3D printing technologies, including stereolithography (SLA), to accelerate their prototype and testing process. For instance, they used clear resin to produce transparent parts for a vortex-cooled rocket engine igniter, allowing engineers to observe combustion patterns inside the test rig (Formlabs, 2023).

Weight reduction is a primary driver for AM adoption in aerospace, with several strategies being employed to maximize this benefit. Topology optimization, combined with AM, allows engineers to create organic, biomimetic structures that maintain or even improve structural performance while significantly reducing weight. For example, the aerospace industry has seen weight reductions of 30-50% in optimized components produced through AM (MIT Sloan, 2017). Another effective strategy is the use of lattice structures, which offer a unique balance of strength and lightweight properties. These periodic cellular structures can be tailored to achieve specific mechanical, thermal, or acoustic properties, making them ideal for a wide range of aerospace applications (ASME, n.d.). For instance, gyroid lattices have shown promise in creating compact, high-efficiency heat exchangers due to their high surface-area-to-volume ratio and self-supporting nature (nTop, 2022). Additionally, the ability to consolidate multiple parts into a single, complex component not only reduces weight but also improves reliability by eliminating potential failure points at joints and interfaces.

5. CUSTOMIZATION AND COMPLEX GEOMETRIES

Additive Manufacturing has revolutionized the design and production of custom machine elements, offering unprecedented flexibility and capabilities. Unlike traditional manufacturing

methods, AM allows engineers to create highly specialized components tailored to specific applications without the constraints of tooling or mold requirements (PTC, 2019). This design freedom enables the optimization of part geometry for improved performance, weight reduction, and enhanced functionality. For instance, in the aerospace industry, custom AM-produced components have led to significant weight reductions and improved fuel efficiency. GE Aviation's LEAP engine fuel nozzle, produced using laser powder bed fusion technology, exemplifies this potential, consolidating 20 parts into a single unit and achieving a 25% weight reduction compared to its conventionally manufactured counterpart (MIT Sloan, 2017). The ability to rapidly iterate designs and produce functional prototypes also accelerates the development cycle, allowing for more innovative and efficient machine elements to be brought to market faster.

Creating complex internal structures is another area where AM excels, enabling designs that were previously impossible or impractical to manufacture. AM technologies, particularly powder bed fusion and directed energy deposition, allow for the creation of intricate internal channels, lattice structures, and variable density regions within a single component (Loughborough University, n.d.). These complex internal geometries can significantly enhance the performance of machine elements by optimizing fluid flow, heat transfer, or structural integrity while minimizing weight. For example, conformal cooling channels in injection molds, created through AM, can improve cooling efficiency and reduce cycle times in plastic injection molding processes (Additec3D, 2023). Similarly, the aerospace industry has leveraged AM to create bionic structures that mimic cellular bone structures, resulting in components that are both lighter and stronger than their traditional counterparts. Airbus's bionic partition, for instance, utilizes a bio-inspired

design that is 45% lighter than traditional partitions while maintaining the required strength and functionality (Additec3D, 2023).

The ability to consolidate multiple parts into single components represents one of the most significant advantages of AM in machine element design. This consolidation not only reduces assembly time and costs but also enhances overall product reliability by eliminating potential failure points at joints and interfaces (Tempus 3D, 2022). A notable example of successful part consolidation through AM is HP's redesign of a drill extraction shoe used in their print head manufacturing process. By leveraging AM, HP engineers were able to integrate various parts into a single piece, resulting in a 95% reduction in manufacturing costs, a 90% weight reduction, and a significant decrease in lead time from 3-5 days to just 24 hours (Tempus 3D, 2022). Similarly, Aerosport Modeling and Design Inc. redesigned a rudder trim system, reducing a 16-part metal assembly to just four pieces 3D printed using HP Multi Jet Fusion technology. This consolidation not only simplified the assembly process but also led to significant cost reductions and improved manufacturing efficiency (Tempus 3D, 2022). As AM technologies continue to advance, the potential for part consolidation in machine element design is expected to grow, leading to more efficient, lightweight, and high-performance components across various industries.

6. PERFORMANCE OPTIMIZATION THROUGH AM

Additive Manufacturing has sharpened the optimization of mechanical properties in machine elements, offering unprecedented control over material composition and structure. Through techniques such as selective laser melting (SLM) and

electron beam melting (EBM), engineers can create parts with tailored mechanical properties that outperform traditionally manufactured components (Additec3D, 2023). For instance, AM enables the production of functionally graded materials, where material composition or microstructure can be varied throughout a single part to optimize strength, stiffness, or wear resistance in specific areas. This capability has been particularly beneficial in aerospace applications, where components must withstand extreme conditions while minimizing weight. GE Aviation's LEAP engine fuel nozzle exemplifies this optimization, achieving a 25% weight reduction while improving durability through its complex, AM-enabled design (MIT Sloan, 2017). Furthermore, AM allows for the creation of lattice structures and topologically optimized geometries that can significantly enhance strength-to-weight ratios, leading to components that are both lighter and stronger than their traditionally manufactured counterparts.

Thermal management has seen significant advancements through the application of AM technologies, particularly in the design and production of heat exchangers and cooling systems. AM enables the creation of complex internal geometries that maximize heat transfer efficiency while minimizing size and weight (BSI, n.d.). For example, conformal cooling channels in injection molds, produced through AM, can significantly improve cooling efficiency and reduce cycle times in plastic injection molding processes (Additec3D, 2023). In the aerospace industry, AM has been used to create highly efficient, compact heat exchangers with intricate internal structures that would be impossible to manufacture using traditional methods. These AM-produced heat exchangers can achieve higher thermal performance in smaller volumes, contributing to overall system efficiency and weight reduction. Additionally, the ability to integrate thermal management features directly into structural components through AM has led to more compact and efficient

designs in various applications, from electronics cooling to aerospace thermal control systems.

Optimizing fluid flow in AM components has opened new possibilities for improving the performance of various fluid systems. The design freedom offered by AM allows for the creation of complex internal channels and flow paths that can significantly enhance fluid dynamics and reduce pressure losses (Springer, 2023). In the case of fuel nozzles, AM has enabled the integration of intricate swirler geometries and flow channels that improve fuel atomization and combustion efficiency. For instance, the redesign of a liquid atomizer using topology optimization and AM techniques resulted in reduced pressure loss compared to conventionally manufactured parts (Springer, 2023). In hydraulic systems, AM has been used to create optimized pump impellers with complex blade geometries that improve efficiency and reduce cavitation. The ability to rapidly prototype and iterate designs through AM also allows for more extensive testing and optimization of fluid flow components, leading to superior performance in the final products. Furthermore, the integration of flow simulation tools with AM design processes has enabled engineers to create highly optimized fluid flow components that push the boundaries of performance in areas such as aerospace propulsion, automotive fuel systems, and industrial fluid handling equipment.

7. LIGHTWEIGHT STRUCTURES IN MACHINE DESIGN

Additive Manufacturing has greatly advanced strategies for weight reduction in machine design, offering unprecedented opportunities to create lightweight yet robust structures. One of the most effective approaches is topology optimization, which uses computational algorithms to distribute material efficiently

within a given design space, subject to specific load conditions and constraints (MIT Sloan, 2017). This method often results in organic, skeletal structures that maintain strength while significantly reducing weight. Another key strategy is the use of lattice structures, which can be tailored to achieve specific mechanical properties while minimizing material usage. For instance, gyroid lattices have shown promise in creating compact, high-efficiency heat exchangers due to their high surface-area-to-volume ratio and self-supporting nature (nTop, 2022). Additionally, AM enables the creation of functionally graded materials, where material composition or structure can be varied throughout a single part to optimize performance in specific areas. This capability allows engineers to design components that are strong where needed and lightweight elsewhere, leading to overall weight reductions without compromising functionality (Additec3D, 2023).

Biomimicry and nature-inspired designs have emerged as powerful concepts in AM, leveraging millions of years of evolutionary optimization found in natural structures. These designs often result in lightweight yet strong components that outperform traditional engineering solutions. For example, the aerospace industry has adopted bionic structures that mimic cellular bone structures. Another notable example is the use of tree branch-inspired support structures in AM, which optimize material distribution for load-bearing while minimizing weight. These nature-inspired designs not only reduce weight but also often improve other performance characteristics such as energy absorption, thermal management, and fluid dynamics. The integration of generative design tools with AM processes has further expanded the possibilities for creating efficient, biomimetic structures that push the boundaries of lightweight design in machine elements.

Several case studies highlight the successful implementation of lightweight AM machine elements across various industries. In the aerospace sector, GE Aviation's LEAP engine fuel nozzle stands out as a prime example. In the automotive industry, Bugatti has leveraged AM to create lightweight brake calipers for high-performance vehicles. These titanium calipers, produced using selective laser melting, are 40% lighter than their aluminum counterparts while offering superior strength and heat dissipation properties (EDO Additive, n.d.). Another compelling case study is HP's redesign of a drill extraction shoe used in their print head manufacturing process. By leveraging AM and design optimization, HP engineers were able to reduce the component's weight by 90% while also achieving a 95% reduction in manufacturing costs and significantly decreasing lead time (Tempus 3D, 2022). These case studies demonstrate the transformative potential of AM in creating lightweight machine elements that offer improved performance, reduced costs, and enhanced sustainability across various applications.

8. INTEGRATION OF AM WITH TRADITIONAL MANUFACTURING

Hybrid manufacturing approaches have emerged as a powerful integration of AM with traditional manufacturing techniques, offering unique advantages in terms of design flexibility, material efficiency, and production speed. These approaches typically combine AM processes with subtractive manufacturing methods, such as CNC machining, to leverage the strengths of both technologies (Additec3D, 2023). For instance, a part can be initially produced using AM to create complex internal geometries or lattice structures, followed by precision machining to achieve tight tolerances and superior surface

finishes. This combination allows for the creation of components that would be impossible or impractical to manufacture using either method alone. One notable example is the DMG MORI Lasertec 65 hybrid manufacturing system, which integrates laser-based powder-fed AM with five-axis CNC machining capabilities, enabling the deposition of material and subsequent machining within a single setup (MIT Sloan, 2017). This integration not only reduces production time and costs but also opens up new possibilities for part design and optimization, particularly in industries such as aerospace and automotive where complex, high-performance components are required.

Post-processing techniques play a crucial role in enhancing the quality and performance of AM parts, addressing issues such as surface roughness, dimensional accuracy, and material properties. One common post-processing method is laser polishing, which can significantly reduce surface roughness and improve the aesthetic appearance of metal AM parts. For example, studies have shown that laser polishing can decrease the surface roughness of Ti6Al4V parts from 90 μm to 4 μm (MDPI, 2022). Another important post-processing technique is hot isostatic pressing (HIP), which involves subjecting the AM part to high pressure and temperature to eliminate internal porosity and improve mechanical properties. HIP has been shown to increase the density of AM parts to nearly 100% and enhance fatigue resistance. Additionally, heat treatment processes, such as solution heat treatment and aging, are often employed to optimize the microstructure and mechanical properties of metal AM parts. These thermal processes can help relieve residual stresses, homogenize the microstructure, and improve strength and ductility (MDPI, 2022).

Quality control and inspection methods for AM components are essential to ensure the reliability and consistency of produced parts. Non-destructive testing (NDT) techniques play

a significant role in this aspect, allowing for the inspection of internal structures and defects without damaging the part. X-ray computed tomography (CT) has emerged as a powerful tool for AM part inspection, enabling the visualization of internal features, porosity, and dimensional accuracy with high resolution (Alpha Precision PM, 2023). Another important NDT method is ultrasonic testing, which can detect internal defects and characterize material properties. In-situ monitoring systems are also being developed and integrated into AM machines to enable real-time quality control during the manufacturing process. These systems use sensors and cameras to monitor parameters such as melt pool dynamics, layer thickness, and thermal distribution, allowing for immediate detection and correction of potential issues (Alpha Precision PM, 2023). Statistical process control (SPC) methods are increasingly being applied to AM processes, using data collected from in-situ monitoring and post-build inspections to identify trends and optimize process parameters. As the AM industry continues to mature, the development and standardization of quality control and inspection methods will be crucial for ensuring the widespread adoption of AM technologies across various industries.

9. FUTURE TRENDS AND CHALLENGES

Emerging AM technologies and materials are poised to revolutionize the manufacturing landscape in the coming years. One of the most promising developments is the advancement of multi-material 3D printing, which allows for the creation of complex, multi-functional parts with varying material properties within a single build (Additec3D, 2023). This technology opens up new possibilities for creating parts with optimized mechanical, thermal, and electrical properties. Another exciting trend is the development of 4D printing, where 3D printed objects can change

shape or properties over time in response to external stimuli such as heat, moisture, or light (MIT Sloan, 2017). In terms of materials, there is a growing focus on sustainable and bio-based materials for AM, including recycled plastics and biodegradable polymers. Additionally, the development of high-performance materials for metal AM, such as new superalloys and metal matrix composites, is expanding the potential applications of AM in industries like aerospace and automotive (MDPI, 2022).

Scalability and mass production using AM remain significant challenges, but recent advancements are addressing these issues. The development of larger, faster AM systems is enabling the production of larger parts and higher volumes. For instance, new powder bed fusion systems with multiple lasers and increased build volumes are significantly improving production rates for metal parts (Alpha Precision PM, 2023). Another approach to scalability is the concept of "AM farms" or distributed manufacturing networks, where multiple AM machines work in parallel to produce large quantities of parts. This approach is being facilitated by advancements in automation and AI-driven process control, which help maintain consistency across multiple machines (MIT Sloan, 2017). However, challenges remain in terms of cost-effectiveness for high-volume production compared to traditional manufacturing methods. To address this, hybrid manufacturing approaches that combine AM with traditional subtractive manufacturing are gaining traction, offering a balance between the flexibility of AM and the efficiency of conventional processes (Additec3D, 2023).

Regulatory and standardization challenges continue to be significant hurdles for the widespread adoption of AM, particularly in highly regulated industries such as aerospace and medical devices. The lack of comprehensive standards for AM processes, materials, and quality control has led to uncertainties in product certification and regulatory approval (BSI, n.d.).

However, efforts are underway to address these challenges. Organizations such as ISO, ASTM, and national standards bodies are working to develop and harmonize AM standards globally. For instance, the ISO/ASTM 52900 series of standards provides a common language and framework for AM processes and materials (Alpha Precision PM, 2023). In the medical device sector, regulatory bodies like the FDA have issued guidance documents specific to AM, helping to clarify requirements for 3D printed medical devices (Spentys, n.d.). Despite these efforts, challenges remain in areas such as in-process quality assurance, material traceability, and long-term performance prediction of AM parts. As the technology continues to evolve rapidly, regulatory frameworks and standards will need to keep pace to ensure safety and reliability while fostering innovation in the AM industry.

10. CONCLUSION

Additive Manufacturing has abruptly enhanced the design and production of machine elements, offering unprecedented capabilities in creating complex geometries, customized designs, and lightweight structures. Throughout this chapter, we have explored the fundamental AM processes, design considerations, and advanced applications in aerospace and other industries. Key points include the importance of DfAM principles, the transformative potential of topology optimization and lattice structures, and the significant advantages of part consolidation and weight reduction strategies (MIT Sloan, 2017). We have also examined the integration of AM with traditional manufacturing techniques, highlighting hybrid approaches and the crucial role of post-processing and quality control methods in ensuring the reliability and performance of AM-produced components (Alpha Precision PM, 2023). The case studies presented, such as GE

Aviation's LEAP engine fuel nozzle and Airbus's bionic partition, demonstrate the tangible benefits of AM in terms of weight reduction, performance enhancement, and cost savings in real-world applications (Additec3D, 2023).

Looking to the future, AM is poised to play an increasingly central role in machine element design and production. Emerging technologies such as multi-material printing and 4D printing are set to expand the possibilities for creating adaptive, multi-functional components (MIT Sloan, 2017). Advancements in materials science, including the development of high-performance alloys and sustainable bio-based materials, will further broaden the application scope of AM (MDPI, 2022). While challenges remain in terms of scalability, mass production, and regulatory standardization, ongoing efforts in these areas are paving the way for wider adoption of AM across industries. As AM technologies continue to mature and integrate with digital design tools, artificial intelligence, and advanced simulation capabilities, we can expect to see a paradigm shift in how machine elements are conceived, optimized, and manufactured. This evolution will likely lead to more efficient, sustainable, and innovative products that push the boundaries of performance and functionality in ways previously thought impossible (BSI, n.d.).

REFERENCES

- 3D Hubs. (2023). What is 3D printing? The definitive guide.
- Additec3D. (2023). Advantages of Additive Manufacturing.
- Alpha Precision PM. (2022). Advantages & Disadvantages of Additive Manufacturing.
- ASME. (n.d.). 3D-Printed Lattices Optimize Strength-to-Weight Ratios.
- Avionics International. (2020). How the Aerospace Industry is Finding New 3D-Printing Use Cases for Old Aircraft Parts.
- Brackett, D., Ashcroft, I., & Hague, R. (2011). Topology optimization for additive manufacturing.
- BSI. (n.d.). Additive Manufacturing: Revolutionizing Modern Industries.
- EDO Additive. (n.d.). Weight Reductions with 3D Printing.
- EOS. (n.d.). Materials for Metal Additive Manufacturing.
- Formlabs. (2023). 9 Applications of 3D Printing in Aerospace.
- Formlabs. (2023). The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing.
- Loughborough University. (n.d.). About Additive Manufacturing.
- Markforged. (2022). Composite 3D Printing.
- MDPI. (2022). Post-Processing Techniques to Enhance the Quality of Metallic Parts Manufactured by Additive Manufacturing.
- MIT Sloan. (2017). Additive manufacturing, explained.
- Nexus Integra. (n.d.). The impact of additive manufacturing on industrial production.

- nTop. (2022). Design for additive manufacturing: 3 levels of DfAM.
- PTC. (2019). Why Is Additive Manufacturing Important?
- Sculpteo. (2023). 3D Printing Materials: The Complete Guide.
- Spentys. (n.d.). Regulatory issues and challenges for 3D-printed medical devices.
- Springer. (2022). Introduction to Additive Manufacturing.
- Springer. (2023). Fluid topology optimization and additive manufacturing of a liquid atomizer.
- Tempus 3D. (2022). The Advantages of Part Consolidation with Additive Manufacturing.

ANALYSIS OF THE EXTRAPOLATION CAPABILITIES OF PHYSICS-INFORMED NEURAL NETWORKS ON DAMPED AND UNDAMPED VIBRATION CASES

Okan DUYMAZLAR¹

Can GÖNENLİ²

1. INTRODUCTION

In recent years, the application of artificial neural networks (ANNs) to various engineering problems has attracted great interest. ANNs are a form of artificial intelligence that are inspired by the structure of biological neurological networks. ANN modelling enables the creation of complex systems that are dependent on large data sets, which are then processed using data-driven approaches. ANNs are particularly useful in problems based on large data sets. However, these models, which are not based on physical laws, may not fully reflect the fundamental dynamics of the system and become dependent on the quantity and quality of the training data.

In order to overcome this problem, Physics-informed Neural Networks (PINNs) have been recently developed. PINNs aim to improve the modelling accuracy of physical processes by integrating physical laws into artificial neural networks (Moradi, Duran, Eftekhari Azam, & Mofid, 2023). These networks offer strong generalisation capabilities even in the absence of data,

¹ Lecturer, Ege University, Ege Vocational School, Mechatronics, okan.duymazlar@ege.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1327-7493.

² Assoc. Prof. Dr., Ege University, Ege Vocational School, Mechanical and Metal Technologies, can.gonenli@ege.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9163-1569.

especially by incorporating physical laws such as partial differential equations (PDEs) into the learning process. The physics-based modelling capabilities of PINNs have been highlighted in many studies in recent years. (Raissi, Perdikaris, & Karniadakis, 2019) revealed that PINNs offer an effective solution as an alternative to classical methods in solving differential equations of physical systems. This method is becoming increasingly common in mechanical engineering applications such as fluid mechanics, heat transfer and structural analysis (Billah, Khan, Liu, & Dutta, 2023; Cai, Wang, Wang, Perdikaris, & Karniadakis, 2021; Zhang, Guo, Chen, Xu, & Liu, 2022).

Physics-informed Neural Networks, which are especially used in modelling physical systems, offer highly effective solutions for modelling the dynamic behaviour of systems (Raissi et al., 2019). In addition to traditional ANN methods, PINNs aim to provide more accurate results by including the differential equations of physical systems in the learning process. The fundamental principle of PINNs is to improve the overall accuracy of the model by integrating the differential equations of physical models with the learning process of the ANN. These approaches have been particularly successful in modelling complex physical processes such as engineering dynamics, fluid mechanics and structural vibration (Karniadakis et al., 2021).

(Karniadakis et al., 2021), in their study examining the applications of PINNs in various engineering fields, highlighted the capabilities of these networks, especially in dynamic systems. In the study, it is stated that PINNs provide better performance than traditional ANNs due to the fact that they are supported by physical models when evaluating the performance of PINNs with the accuracy criterion. Furthermore, as stated in their findings, the use of physical equations in the training process of PINNs increased the generalisation ability of the model.

(Zhu, Zabarar, Koutsourelakis, & Perdikaris, 2019) investigated how Physics-informed neural networks can be used in high-dimensional problems and in situations where labelled data is not available. Their study showed that physical systems can produce accurate results even in unsupervised data sets, while highlighting the uncertainty detection and modelling success of PINNs. This capability of PINNs offers a critical advantage, especially for reducing the impact of missing or biased data points in engineering problems.

(Mishra & Molinaro, 2022) compared PINNs with conventional numerical methods and observed that PINNs perform better than conventional methods, especially in high-dimensional dynamic systems. This makes PINNs an important tool for challenging and complex engineering problems.

(Sun, Gao, Pan, & Wang, 2020) proposed a surrogate model for fluid flow simulations based on a physics-constrained deep learning (DL) approach, providing a solution that does not rely on computationally expensive simulation data. It is common practice in the field of fluid dynamics to utilise computationally expensive numerical methods based on the discretisation of governing equations, such as the Navier-Stokes equations. This presents a significant challenge in the case of real-time applications and optimisation tasks, due to the inherently multi-scale nature of fluid dynamics and the geometric complexities involved. In this study, the authors propose a deep neural network (DNN) model structured to enforce initial and boundary conditions while embedding the Navier-Stokes equations directly into the loss function of the model. This approach allows the model to be trained using minimal data, focusing on the physics that govern fluid dynamics rather than relying on pre-existing simulation data. The model's performance is validated through several internal flow problems relating to hemodynamics (e.g., blood flow). The results demonstrate that the DL surrogate

approximations of flow fields and uncertainty propagation align well with traditional first-principle numerical simulations, making the method a promising alternative for real-time applications.

However, the extrapolation capabilities of PINNs and their performance on the data sets that exceeds the boundaries of the training dataset, are still not fully explored. This study aims to analyze the extrapolation capabilities of PINNs on underdamped and undamped free vibration models. Considering the successful prediction performance of PINNs in system dynamics problems, how accurate these networks can produce results with data other than the training set stands out as an important research topic (Karniadakis et al., 2021; Lu, Meng, Mao, & Karniadakis, 2021; Moradi et al., 2023). In this context, it will be examined whether PINNs can accurately model the behaviour of damped and undamped systems and whether they can be valid beyond the limits of the training data.

2. MATERIAL AND METHOD

Within the scope of the study, both undamped and damped free vibration cases to empirically assess the extrapolation capability of PINNs. A fully connected neural network (FCN) was selected as the neural network architecture, and the data to be used during training were obtained with the help of closed-form analytical solutions. The required physical loss functions of the PINNs were obtained with the help of case-specific differential equations and integrated with the FCN data loss function. The Pytorch library was used to create and train the network and to design PINNs by combining the physical loss functions required for PINNs with the pre-existing loss function (Imambi, Prakash, & Kanagachidambaresan, 2021).

2.1. Physics-Informed Neural Network Architecture

In this study, a fully connected neural network (FCN) was utilized to approximate the solution of the damped and undamped free vibration case studies. The network is composed of multiple layers, where each hidden layer consists of 32 neurons, using the hyperbolic tangent (tanh) activation function. The architecture of the network is defined as follows:

- Input layer: 1 neuron corresponding to the time variable (t).
- Hidden layers: 3 layers used with 32 neurons each, employing the tanh function for the activation function.
- Output layer: 1 neuron corresponding for the prediction of the displacement results according to time variable showed as ($x(t)$). The FCN is implemented using PyTorch, and the weights are optimized through the Adam optimizer with a learning rate of (1×10^{-4}).

2.2. Training Data and Loss Function for Undamped Case

Synthetic data obtained from the undamped free vibration equation for the network training:

$$x(t) = x_0 \cos(\omega_n t)$$

where ($x_0 = 1.0$) is the initial displacement measured in meters, ($\omega_n = \sqrt{k/m} = \sqrt{10/1}$) is the natural frequency of the system where k and m states stiffness and mass, respectively and (t) is the time variable. A total of 50 random points were sampled from the time interval $[0, 10]$ seconds, and the corresponding displacement values were calculated.

The training data points are used to compute the data loss, which

is the mean squared error (MSE) between the predicted displacement values ($\hat{x}(t)$) and the true displacement values ($x(t)$).

$$L_{\text{data}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{x}(t_i) - x(t_i))^2$$

Where:

- N is the number of training data points,
- $\hat{x}(t_i)$ is the predicted displacement by the NN at time t_i .
- $x(t_i)$ is the true displacement value.

In addition to the data loss, a physics-informed loss was computed using the governing equation of motion for the undamped free vibration:

$$\ddot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = 0$$

To enforce this physical constraint, 100 collocation points were randomly selected from the same time interval. Collocation points are exact locations within the domain of a problem where the governing differential equations are enforced to be satisfied. In the context of PINNs, collocation points are used to guarantee that the neural network not only fits the data but also considers the physical laws described by the governing equations at selected points. According to the collocation points, the physics- loss was calculated as:

$$L_{\text{physics}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\ddot{x}(t_i) + \omega_n^2 x(t_i))^2$$

where (N) is the number of collocation points. The total loss function is a combination of the data loss and the physics-informed loss. Physics loss is weighted by λ , a factor of (1×10^{-4}) and total loss function formed as:

$$L_{\text{total}} = L_{\text{data}} + \lambda L_{\text{physics}}$$

2.3. Training Data and Loss Function For Damped Case

In the damped free vibration system, damped natural frequency ω_d and natural frequency ω_n are defined as follows:

$$\omega_n = \sqrt{k/m}$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

Where k , m , and ζ notates the stiffness, mass nad damping ratio, respectively. The equation of motion used for the damped free vibration is given by:

$$x(t) = x_0 e^{-\zeta \omega_n t} \cos(\omega_d t)$$

Where:

- $x_0 = 1.0$ is the initial displacement measured in meters,
- $\zeta = 0.1$ is the damping ratio, and
- $(\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{10}{1}})$ is the natural frequency of the system

To generate synthetic data for the underdamped free vibration system, we follow a similar approach as in the undamped case. We sample random time points from the interval $[0, 10]$ seconds and calculate the corresponding displacement values using the damped free vibration equation. Data loss function for the underdamped system formed same as the unamped system with MSE.

$$L_{\text{data}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{x}(t_i) - x(t_i))^2$$

We also computed an additional data loss using a physics-informed approach based on the governing differential equation of motion for the damped free vibration as shown in the equation.

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = 0$$

This equation accounts for the damping force proportional to the velocity ($2\zeta\omega_n\dot{x}(t)$) in addition to the spring force. To enforce this physical constraint, 100 collocation points were randomly selected from the same time interval. A collocation point is an exact location within the domain of a problem—be it time, space or some other factor—where the governing differential equations are enforced to be satisfied. In the context of PINNs, collocation points are used to guarantee that the neural network not only fits the data but also considers the physical laws described by the governing equations at selected points. The second-order time derivative of the network's prediction was computed using automatic differentiation, and the physics-loss was calculated as:

$$L_{\text{physics}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\ddot{x}(t_i) + 2\zeta\omega_n\dot{x}(t_i) + \omega_n^2x(t_i))^2$$

Where (N) is the number of collocation points. As in the case of undamped vibration, for damped free vibration the physics-loss L_{physics} weighted by the same λ coefficient with (1×10^{-4}) and data-loss L_{data} are combined to obtain the total loss function.

$$L_{\text{total}} = L_{\text{data}} + \lambda L_{\text{physics}}$$

3. RESULTS

The neural network was trained for 20,000 iterations using the Adam optimiser. The data employed in the training process comprised 100 randomly selected points within the range of 0 to

10 seconds. At each iteration, both data loss and physics-based loss were calculated, and the total loss was back-propagated through the network. The predictions of the network are illustrated in Figures 1 and 2 for the undamped free vibration cases, which were used to visualise the training progress.

Figure 1. Training Progress Visualisation for Undamped Case

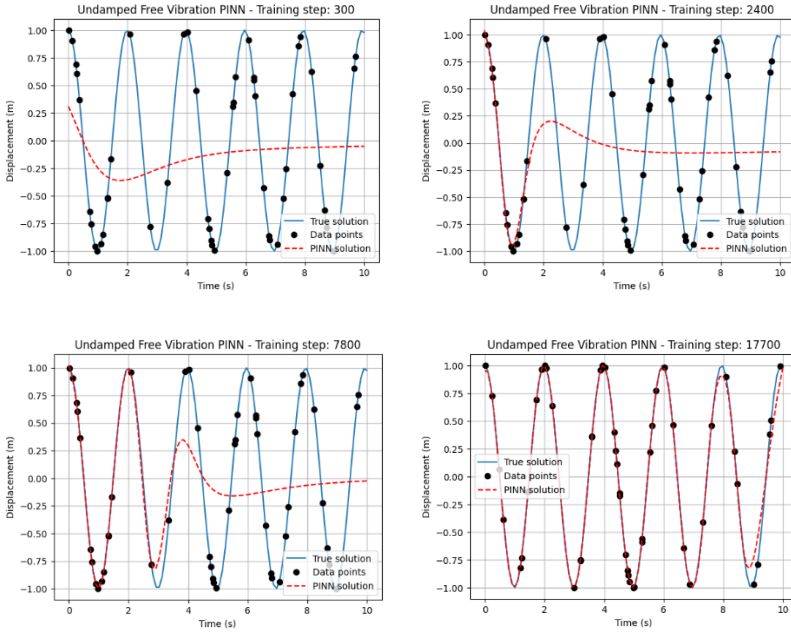
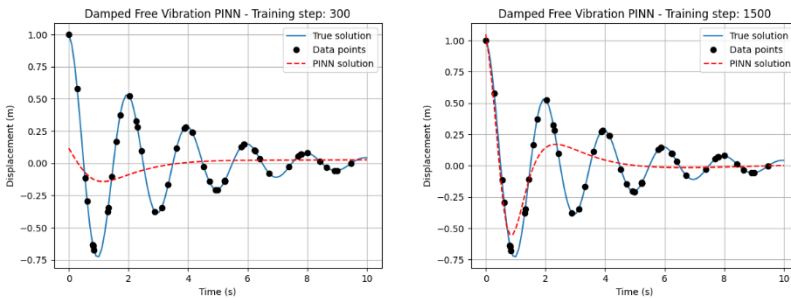
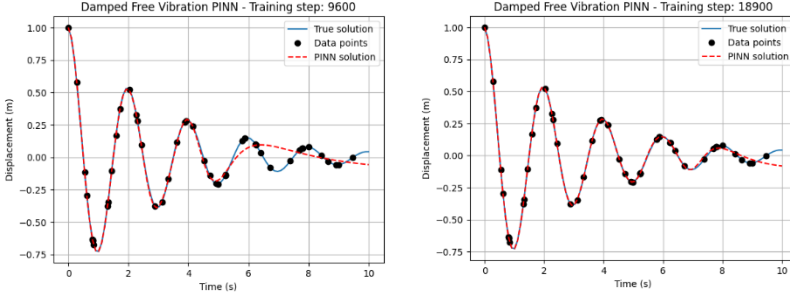


Figure 2. Training Progress Visualisation for the Underdamped Case





As illustrated in Figures 1 and 2, when the training data and test data are employed within the same range, PiNN demonstrates remarkable proficiency in prediction and is able to effectively identify patterns that align with the characteristics of the problem domain. However, given that the training data and test data are defined within the same range, it can be concluded that the process primarily examines the interpolation capability of PiNN. Regarding interpolation ability, it is evident that a PiNN exhibits comparable performance to traditional NNs.

At each iteration, both the data loss and the physics-informed loss were computed, and the total loss was backpropagated through the network. The network's predictions were shown in Figure-1 for undamped free vibration and Figure-2 for underdamped free vibration cases to visualize the training progress.

However, in order to question whether PiNNs really recognise the pattern and gain extrapolation ability, they should be subjected to a validation beyond the boundaries of the training data. For this reason, the time range of the data obtained in both unamped and underdamped systems was limited to data points between 0-5 seconds. From the analytical solution points between 5-10 seconds outside the training data, 10 time steps were selected, with the amount of increment randomised, and used to question the extrapolation capability of PiNNs. Figure 3 and

Figure 4 show visualisations of the training sequence evolution of the method applied for the undamped and underdamped scenarios.

Figure 3. Extrapolation Capabilites for Undamped Case

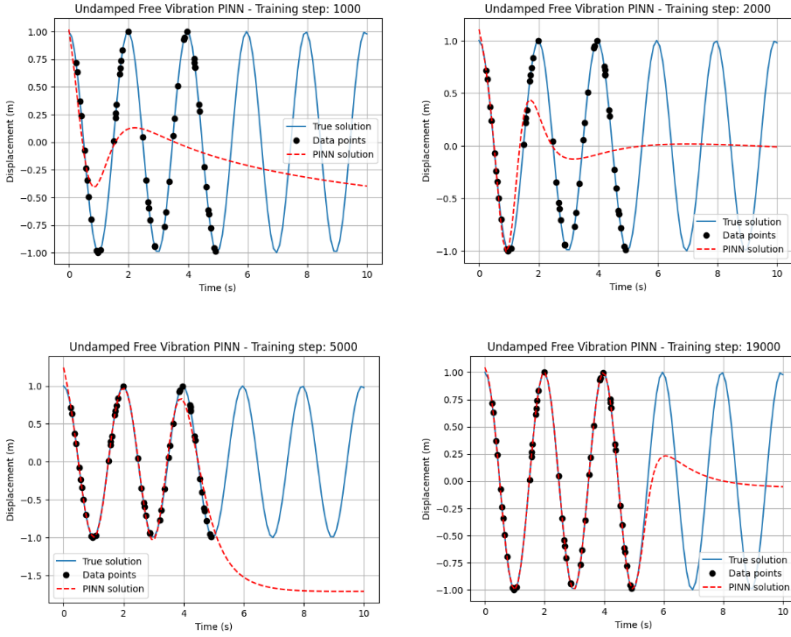
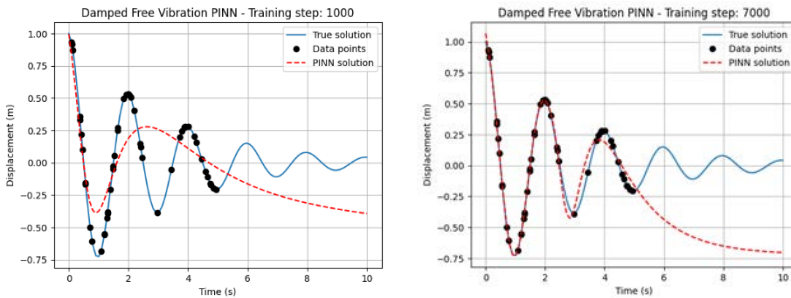


Figure 4. Extrapolation Capabilites for Underdamped Case



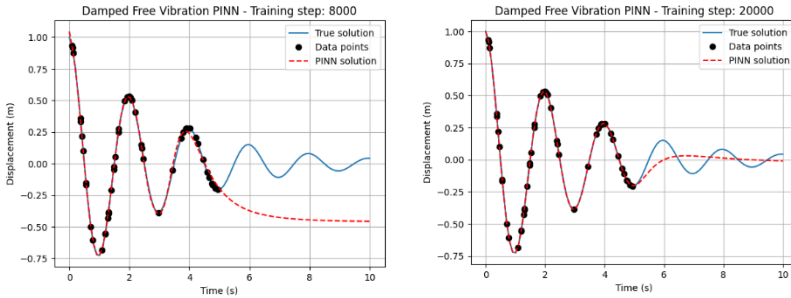


Table-1 and Table-2 shows the absolute and relative errors between the PiNN predicted and the analytical solutions of the extrapolation points in detail.

Table 1. Extrapolation Results for Undamped Free Vibration.

Time (s)	Analytical Solution	PiNN Predicted	% Absolute Relative Error	Absolute Error
5.0	-0.994656	-0.985684	0.902061	0.008972
5.555555	0.285424	-0.065628	122.9931	0.351052
6.111111	0.889075	0.227519	74.409454	0.661556
6.666667	-0.614301	0.14436	123.49981	0.75866
7.222222	-0.661841	0.064406	109.73131	0.726247
7.777778	0.85912	0.01369	98.40647	0.84543
8.333333	0.344047	-0.016359	104.75493	0.360406
8.888889	-0.986386	-0.034	96.55305	0.952386
9.444445	0.020826	-0.044496	313.66037	0.065321
10.0	0.978683	-0.050897	105.200615	1.02958

Table 2. Extrapolation Results for Damped Free Vibration

Time (s)	Analytical Solution	PiNN Predicted	% Absolute Relative Error	Absolute Error
5.0	-0.205681	-0.204133	0.752424	0.001548
5.555555	0.034523	-0.078966	328.73203	0.11349
6.111111	0.134532	0.009704	92.78671	0.124828
6.666667	-0.064087	0.029367	145.8238	0.093454
7.222222	-0.075718	0.024916	132.90587	0.100634
7.777778	0.067495	0.015457	77.09937	0.052038
8.333333	0.033322	0.006531	80.39954	0.02679
8.888889	-0.057354	-0.000676	98.82078	0.056678
9.444445	-0.006485	-0.0062	4.394181	0.000285
10.0	0.04228	-0.01035	124.48075	0.05263

The results given in table-1 and table-2 are shown in Figure-5 and Figure-6, which more clearly illustrate the prediction and extrapolation capability of the PiNN-based model. The red dots in the figures indicate the PiNN prediction, while the blue line indicates the analytical solution. Errors, in other words, the distance of the predictions from the exact results, are represented by the dashed green lines.

Figure 5. Errors of PiNN at Extrapolation Points of Undamped Vibration Model

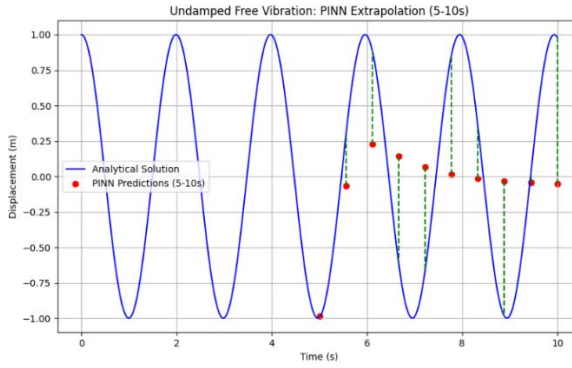
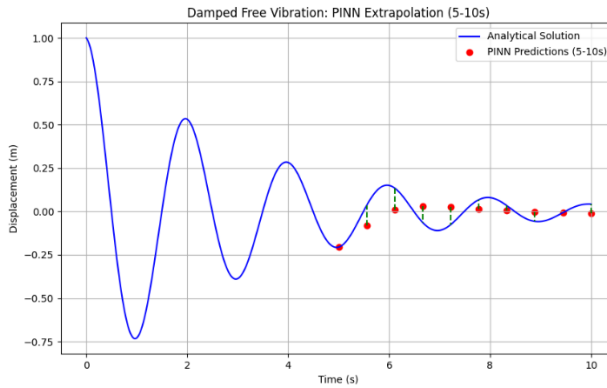


Figure 6. Errors of PiNN at Extrapolation Points of Damped Vibration Model



4. CONCLUSION

In this study, we explored the potential of Physics-Informed Neural Networks (PINNs) in extrapolating both damped and undamped free vibration cases. We trained the models on data within a specific time range and then tested them on an extrapolation region beyond this range to gain insights into their generalisation capabilities. We used the relative error between the predicted and true values as a key metric to assess the models' performance.

Both PINN models for damped and undamped free vibration, demonstrate a considerable increase in relative error as the time values move further away from the training region. However, the damped free vibration case generally results in lower relative errors than the undamped case, likely due to the damping effect reducing the severity of oscillations.

The results for the undamped free vibration case show both areas of close approximation and significant deviation as the model extrapolates beyond its training region. For ($t = 5.0$) seconds, the PINN prediction closely matches the analytical solution, with an absolute error of 0.00897 and a very small relative error of 0.90%. However, as we move further into the extrapolation zone, significant discrepancies appear. For instance, at ($t = 5.55$) seconds, the relative error jumps to 123%, and by ($t = 6.66$) seconds, the relative error exceeds 123.5%. A consistent pattern of higher errors is observed beyond ($t = 5.55$) seconds, suggesting that the PINN model struggles to accurately predict the oscillatory behavior of undamped free vibration as it moves away from the training range. The model performs better near the beginning of the extrapolation range (at ($t = 5.0$) seconds), but as it attempts to capture the oscillations, the errors become substantial. This indicates that the model fails to generalize the periodic nature of the undamped

system effectively. The highest absolute error occurs at ($t = 6.66$) seconds with a value of 0.758. The relative errors exceed 100% for most points beyond ($t = 5.55$) seconds, demonstrating the model's inability to capture the correct oscillatory phase and amplitude during extrapolation.

For the damped free vibration case, the model shows better performance in terms of relative error compared to the undamped case, particularly near the start of the extrapolation range. However, significant errors still arise as the model approaches the end of the extrapolation interval. At ($t = 5.0$) seconds, the PINN prediction closely follows the analytical solution with a small relative error of 0.75%. As we progress into the extrapolation range, the errors increase. For example, at ($t = 5.55$) seconds, the relative error spikes to 328.7%, indicating a major deviation between the predicted and true values. Despite the lower frequency of oscillation due to damping, the model's predictions show high errors as it moves away from the training region, although these errors are generally lower than in the undamped case. The highest absolute error in the damped case occurs at ($t = 6.11$) seconds with a value of 0.1248.

In conclusion, the analysis of the extrapolation results for both undamped and damped free vibration systems reveals that the PINN model performs adequately near the edges of the training region but fails to generalize well into the extrapolation range, particularly for the undamped system. Both models struggle to generalize the oscillatory behavior accurately during extrapolation. The undamped model struggles to maintain the correct amplitude and phase of the oscillations. While the damped system shows relatively better performance because the damping effect helps reduce the severity of this issue in the damped case, but errors still remain significant in both cases. Further model refinement or advanced techniques could be explored to improve the model's ability to generalize beyond the training range.

REFERENCES

- Billah, M. M., Khan, A. I., Liu, J., & Dutta, P. (2023). Physics-informed deep neural network for inverse heat transfer problems in materials. *Materials Today Communications*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106336>
- Cai, S., Wang, Z., Wang, S., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2021). Physics-informed neural networks for heat transfer problems. *Journal of Heat Transfer*. Retrieved from <https://doi.org/10.1115/1.4050542>
- Imambi, S., Prakash, K. B., & Kanagachidambaresan, G. R. (2021). PyTorch. In *EAI/Springer Innovations in Communication and Computing*. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-030-57077-4_10
- Karniadakis, G. E., Kevrekidis, I. G., Lu, L., Perdikaris, P., Wang, S., & Yang, L. (2021). Physics-informed machine learning. *Nature Reviews Physics*, 3(6), 422–440.
- Lu, L., Meng, X., Mao, Z., & Karniadakis, G. E. (2021). DeepXDE: A deep learning library for solving differential equations. *SIAM Review*. Retrieved from <https://doi.org/10.1137/19M1274067>
- Mishra, S., & Molinaro, R. (2022). Estimates on the generalization error of physics-informed neural networks for approximating a class of inverse problems for PDEs. *IMA Journal of Numerical Analysis*. Retrieved from <https://doi.org/10.1093/imanum/drab032>
- Moradi, S., Duran, B., Eftekhar Azam, S., & Mofid, M. (2023). Novel Physics-Informed Artificial Neural Network Architectures for System and Input Identification of Structural Dynamics PDEs. *Buildings*. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/buildings13030650>

- Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>
- Sun, L., Gao, H., Pan, S., & Wang, J. X. (2020). Surrogate modeling for fluid flows based on physics-constrained deep learning without simulation data. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.112732>
- Zhang, Q., Guo, X., Chen, X., Xu, C., & Liu, J. (2022). PINN-FFHT: A physics-informed neural network for solving fluid flow and heat transfer problems without simulation data. *International Journal of Modern Physics C*. Retrieved from <https://doi.org/10.1142/S0129183122501662>
- Zhu, Y., Zabaras, N., Koutsourelakis, P. S., & Perdikaris, P. (2019). Physics-constrained deep learning for high-dimensional surrogate modeling and uncertainty quantification without labeled data. *Journal of Computational Physics*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.05.024>

PLASTİK ENJEKSİYON HACİM KALIPÇILIĞI İÇİN KALIP SETLERİNİN AŞAMALI OLARAK OLUŞTURULMASI

Harun YAKA¹

Harun AKKUŞ²

1. GİRİŞ

Enjeksiyon kalıplama, plastik sektörünün önemli bir bölümünü oluşturur ve dünya çapında büyük bir iş koludur. Dünya genelinde plastik malzemelerin üretimi yaklaşık %36 ekstrüzyon ile üretilirken %32'si enjeksiyon kalıplama ile üretilir (Rosato ve Rosato, 2012). Bu yönüyle enjeksiyon kalıplama işlemi, plastik parçalar yapmak için kullanılan en yaygın kalıplama işlemlerinden biridir. Genellikle, plastik enjeksiyon kalıplama tasarımı, plastik ürün tasarımı, kalıp tasarımı ve enjeksiyon kalıplama işlemi tasarımı içerir ve bunların hepsi kalıplanmış ürünün kalitesine ve üretim verimliliğine katkıda bulunur (Matin vd., 2012; Zhou vd., 2009). Yüksek kaliteli üretim teknolojisinin ortaya çıkmasıyla birlikte; bileşenlerin minyatürleştirilmesinin yanı sıra; karmaşıklık, hafiflik ve tasarımdaki hassasiyet, günümüzde plastik ürünlerin ticari sürdürülebilirliği için önemli faktörler haline gelmiştir (Kashyap ve Datta, 2015). Kalıp ve proses tasarımı açısından çok yönlülüğü nedeniyle enjeksiyon kalıplama, mükemmel boyut toleransına sahip net şekillerine yakın bileşenler üreten karmaşık plastik

¹ Doç. Dr., Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, harun.yaka@amasya.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4859-9609.

² Doç. Dr., Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde Teknik Bilimler MYO, Otomotiv Teknolojisi, hakkus@ohu.edu.tr, ORCID:0000-0002-9033-309X.

ürünlerin seri üretiminde onlarca yıldır önemli bir yer tutmaktadır. Sonuç olarak, optimum kalitede bir ürün elde etmek için enjeksiyon kalıplamanın makine ve proses parametrelerini kullanmak yıllar boyunca birincil araştırma alanı olmuştur (Huang ve Tai, 2001). Bilgisayar destekli plastik enjeksiyon kalıplama için kalıp tasarımı, uzun bir süredir dünya çapında birçok yazar tarafından odaklanmıştır. Çeşitli yazarlar, mühendislerin enjeksiyon kalıplamanın parça, kalıp ve seçim parametrelerini tasarlamasına yardımcı olan program sistemleri geliştirmiştir (Deng vd., 2002). Son yıllarda, birçok yazar plastik enjeksiyon kalıplama için bilgisayar destekli tasarım (BDT) ile kalıp tasarım sistemleri geliştirmiştir (Jong vd., 2009; Low ve Lee, 2003; Lin vd., 2009; Lin vd., 2008).

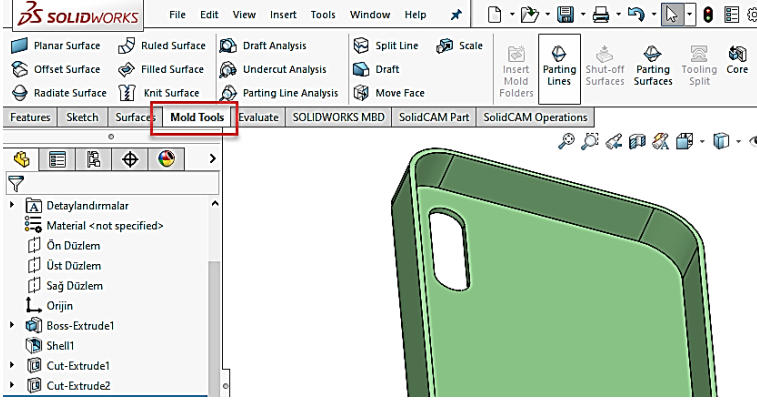
Bu çalışmada bilgisayar destekli tasarım programlarından biri olan ve günümüzde yaygın olarak kullanılan SolidWorks programında cep telefonu kılıfının plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilebilmesi için gerekli olan kalıp setlerinin oluşturulması aşamalı olarak anlatılmıştır.

2. KALIP ARAÇLARI (MOLD TOOLS)

SolidWorks programında plastik enjeksiyon hacim kalıpcılığı için istenilen plastik ürünün kalıp setlerini ve kalıp elemanlarını elde edebildiğimiz kısım kalıp araçları (Mold Tools) menüsüdür. Kalıp setleri oluşturulacak ürünün bilgisayar destekli tasarım programında üç boyutlu modeli tasarlanıp bilgisayar ortamında kaydedilmesi gerekir veya daha önce kaydedilmiş olan bir dosyanın açılması gerekir. Bu aşamalardan sonra kalıp araçları seçeneği ile hacim kalıbı çıkarılır. Erkek ve dişi kalıbın yanı sıra enjeksiyon kalıbında olması gereken maça, pim delikleri, civata delikleri ve diğer ara plakalar gibi kalıp elemanları bu menü içerisinde oluşturulabilir. Şekil 1'de SolidWorks programında kalıp araçları menüsü verilmiştir. Kalıp araçları menüsü

içerisinde kullanılacak kısımlar sırası ile alt başlık şeklinde çalışma içerisinde belirtilmiştir.

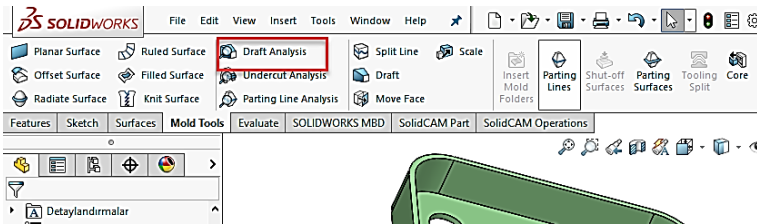
Şekil 1. Kalıp Araçları (Mold Tools) Menüsü



2.1. Kalıp Açısı Analizi (Draft Analysis)

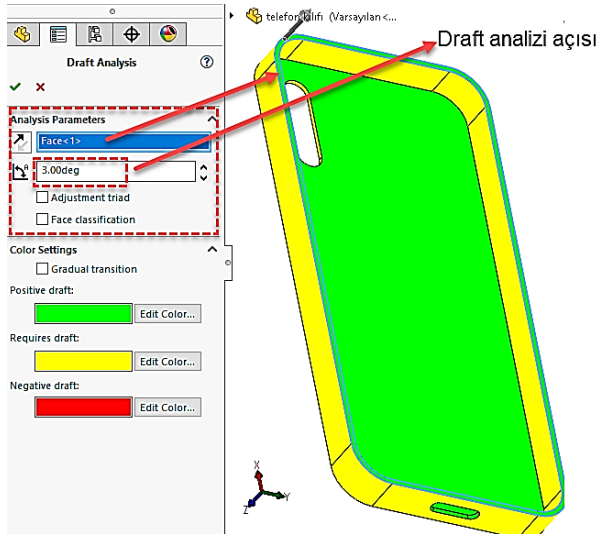
Kalıp açısı ürünün kalıptan çıkış açılarının analiz edildiği komuttur. Bazen parçalar şekilleri gereği hacim kalıplarından çıkarılmaları zor olabilmektedir. Kalıptan rahat çıkabilmeleri için kalıp unsurları ve geometrisi uygun tasarlanmalıdır. Bunun içinde kalıp ayırım yönüne paralel olan yüzeylere açı verilmelidir veya kalıp için iticiler oluşturulmalıdır. Kalıp için yapılması gereken işlemlerin tespit edilebilmesi için de kalıp açısı analizi yapılmalıdır. Şekil 2’de kalıp açısı analizi yapılacak kısım gösterilmiştir.

Şekil 2. Kalıp Açısı Analizi (Draft Analysis) Menüsü



Şekil 3'te kalıp açısı analizi (Draft Analysis) komutuna girdikten sonra "Analysis Parameters" kısmından kalıp ayırma yönüne göre dik olan uygun bir yüzey seçilir. Bu yüzey, iş parçası yüzeyinden seçilebileceği gibi çekme yönüne dik olan düzlemlerden de seçilebilir. "Draft analizi açısı" kısmına analiz etmek istediğimiz açı değeri yazılır. Yüzey derinliği küçük olan parçaların kalıptan daha rahat çıkabileceği için bu açılar genellikle 1-3° arasında seçilir. Komut onaylandığında iş parçası yüzeylerinin kalıptan rahat çıkıp çıkmayacağına dair analiz sonuçlarını vermektedir. Yeşil renkli kısım pozitif açı yani ok yönünde ve erkek kalıba temas eden yüzeylerdir. Yeşil renkli yüzeyler kalıptan rahat çıkar anlamı taşımaktadır. Kırmızı renkli kısım ok yönünün tersinde olan ve dişi kalıba temas eden yüzeyleri ifade eder. Çekme yönüne ters olan negatif açı bölgeleridir. Bu bölgelerde dişi kalıptan rahatlıkla çıkmaktadır. Sarı bölgeler ise kalıp ayırma yönüne paralel olan ve kalıptan zor çıkan yüzeyleri gösterir. Bu yüzeylere draft menüsü içerisinde açı verilmelidir.

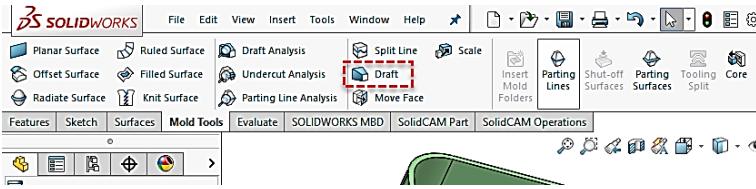
Şekil 3. Kalıp Açısı Analizi (Draft Analysis) İçin Açı ve Parametrelerin Belirlenmesi



2.2.Kalıp açısı (Draft)

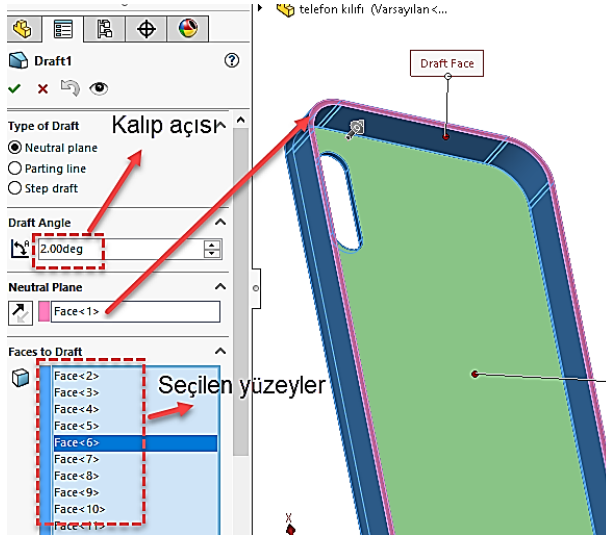
Şekil 4’te gösterilen “Draft” komutu kalıp açısı analizi sonrasında açı verilmesi gereken kısımlara açı vermek için kullanılır. Bu nedenle “Draft Analysis” menüsü ile karıştırılmamalıdır. Plastik malzemenin kalıptan daha rahat çıkması için kalıp açısı analizinde belirlenen sarı renkli yüzeyler tek tek seçilerek istenilen derecede açı verilir.

Şekil 4. Kalıp Açısı (Draft) Menüsü



Şekil 5’te gösterildiği gibi ilk olarak kalıp açısı analizinde seçmiş olduğumuz yüzey “Neutral Plane” kısmında tekrar seçilir. Daha sonra ilk yapılan analizde sarı olan yüzeyler tek tek seçilir; istenen kalıp açısı girildikten sonra onaylanarak sarı yüzeylere kalıp açısı verilir.

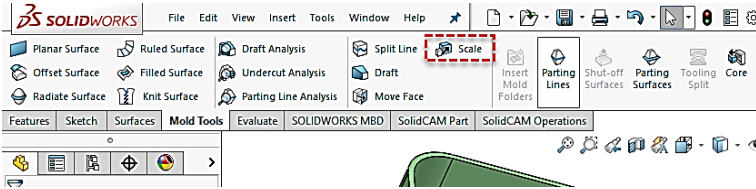
Şekil 5. Kalıp Açısı (Draft) İçin Gerekli Parametrelerin Girilmesi



2.3.Ölçek (Scale)

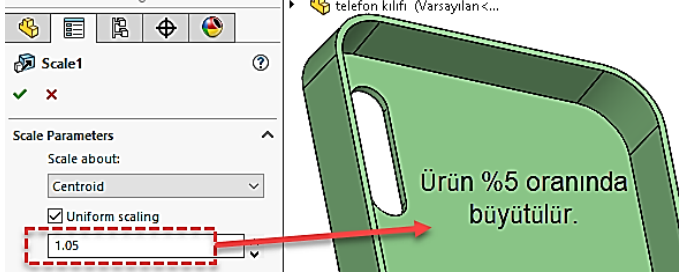
Şekil 6 ‘da verilen “Scale” komutu ile katı modeli tasarlanan plastik ürün hacimsel olarak boyutları büyütülür. Bilindiği üzere plastik malzemeler eriyik halde kalıplara enjekte edilmektedirler. Kalıptan çıkıp soğuyan plastik ürün boyutsal ve hacimsel olarak küçülür. Bu küçülmeyi telafi ederek ürünün istenilen ölçülerde olması için plastik malzemenin çekme oranına göre “Scale” komutu ile büyütülür. Ürünün çekme oranı kullanılan polimerin cinsi ve ürünün hacmine (ölçülerine) göre değişim göstermektedir. Polimerlerin çekme oranları polimer üreten firmalar tarafından yaklaşık olarak verilse de kesin değildir. Kalıplama sıcaklığı, ürün ölçüsü gibi birçok faktör çekme oranını etkilemektedir. Bu nedenle imalatçılar deneme yanılma yöntemiyle polimerlerin çekme oranlarını belirlemektedirler.

Şekil 6. Ölçek (Scale) Menüsü



Şekil 7’de görüldüğü gibi “Scale” komutuna girildikten sonra ölçek parametreleri altında “Uniform scaling” kısmına büyütme oranı girilir. Bu seçenekte yapılan büyütme, parça üzerinde her yeri eşit olarak büyütme işlemi gerçekleştirir. Böylelikle boyutsal olarak düzenli bir büyüme meydana gelir. Şekilde büyütme oranına 1,05 yazılmıştır. Bu değer ürünün %5 oranında büyütüldüğü anlamına gelmektedir.

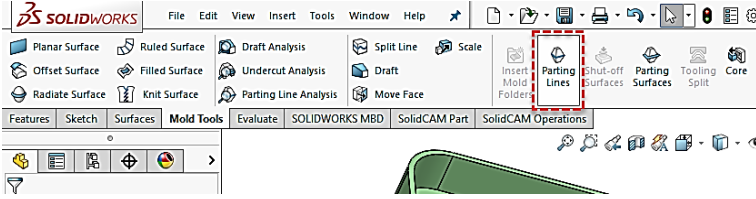
Şekil 7. Plastik Ürünün Ölçeklendirilmesi



2.4. Kalıp Ayırım Çizgisi (Parting Lines)

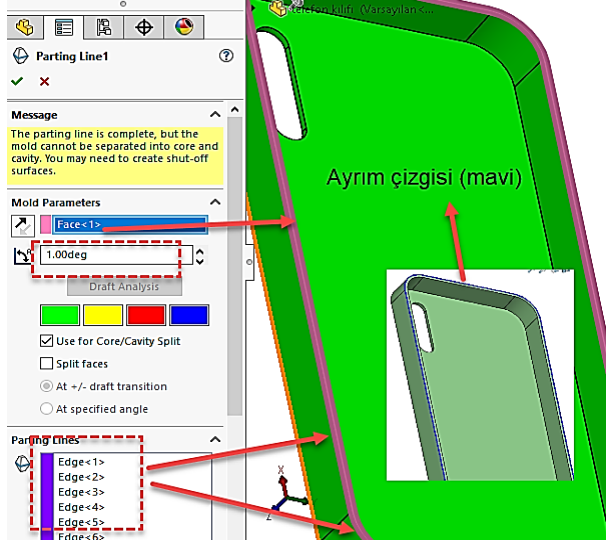
Kalıp ayırım çizgisi ana kalıp setlerini oluşturan erkek ve dişi kalıbın ayrıldığı düzlemin dış hatlarını belirten çizgidir. Şekil 8’de kalıp ayırım çizgisi verilmiştir.

Şekil 8. Kalıp Ayırım Çizgisi (Parting Lines) Menüsü



Şekil 9’da ayırım yüzeyleri oluşturmak için yapılan ayarlar verilmiştir. “Mold Parameters” kısmında kalıp açısı analizindeki yüzey seçilir ve analiz etmek istediğimiz kalıp açısı yazılır. Bu menü içerisinde de kalıp açısı analizi yapılması gerekir. Eğer öncesinde “Draft” komutunda açı verilmiş ise sarı yüzeyler bu analiz sonucunda oluşmayacaktır. Menü içerisinde “Draft Analysis” komutunu çalıştırdığımızda otomatik olarak Mavi renkteki ayırım çizgilerini belirler. Eğer mavi renkte ayırım çizgileri oluşmamış veya istediğimiz yerlerde oluşmamış ise “Parting Lines” kısmında seçili kenarlar silinerek manuel olarak seçmek istediğimiz kenarlar seçilerek belirlenebilir.

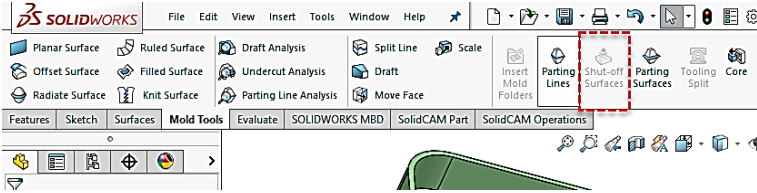
Şekil 9. Kalıp Ayrım Çizgisinin Belirlenmesi



2.5.Delikleri kapatma (Shut-off Surfaces)

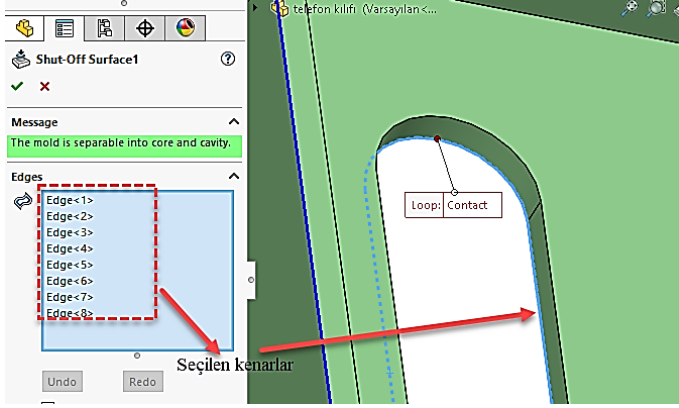
Şekil 10’da parça üzerindeki deliklerin kapatılabileceği menü gösterilmiştir. Bu menü içerisinde ürün üzerinde delikler varsa bu deliklere yüzey atayarak kapatma işlemi yapılır.

Şekil 10. Delikleri Kapatma (Shut-Off Surfaces) Menüsü



Delikleri kapatma komutu, delikleri otomatik görür ve delik kenarlarına mavi çizgiler oluşturarak çizgiler arasını yüzey ile kapatır. Eğer istenilen kenarlar seçilmemiş ise “Edges” kısmında seçili kenarlar temizlenip istenen kenarlar manuel olarak seçilir ve delikler yüzey ile kapatılır (Şekil 11).

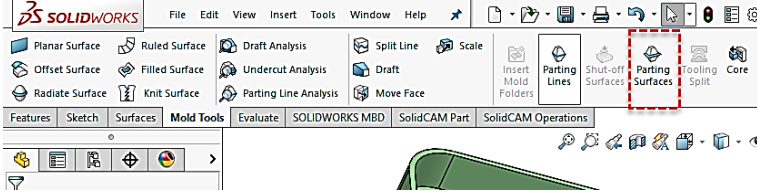
Şekil 11. Delikleri Kapatmak İçin Uygun Kenarların Seçilmesi



2.6.Ayırım Yüzeyleri (Parting Surfaces)

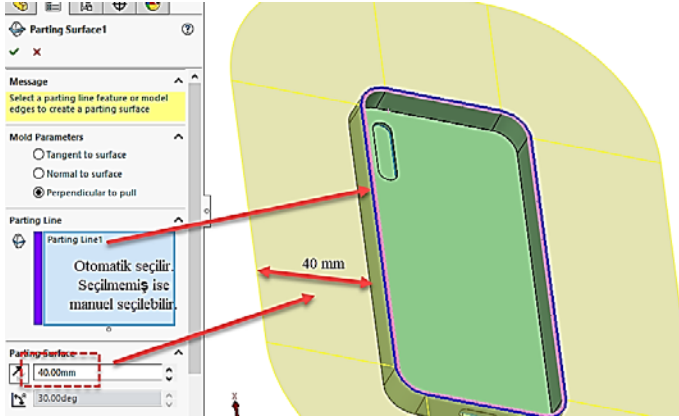
Ayırım yüzeyleri menüsünde erkek ve dişi kalıp setlerinin birleşme noktasında ayırım çizgisine göre ayırım yüzeyi oluşturur. Şekil 12’de ayırım yüzeyleri menüsü verilmiştir.

Şekil 12. Ayırım Yüzeyleri (Parting Surfaces) Menüsü



Ayırım yüzeyi oluşturulurken “Parting Line” kısmında ayırım çizgisi otomatik olarak seçilir. Eğer ayırım çizgisi seçilmemiş ise manuel olarak seçilmelidir. “Parting Surfaces” kısmında yüzeyin parçadan olan mesafesi ve yönü belirlenir. Oluşturulacak kalıp setleri bu yüzey üzerine çizileceği için yüzey boyutu küçük olmamalıdır. Şekil 13’te ayırım yüzeyi parçadan dışarı yönlü 40 mm olacak şekilde verilmiştir. Bu değer parçanın bütün kenarlarında oluşan yüzeylerde aynıdır.

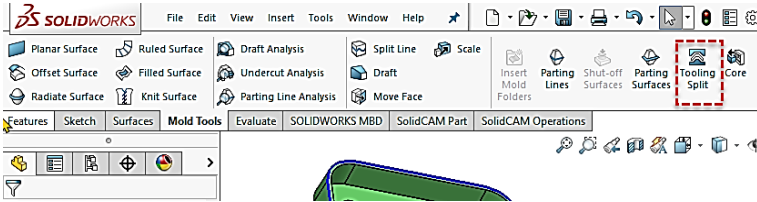
Şekil 13. Ayrım Yüzeylerinin Oluşturulması



2.7. Kalıp setleri ayrımı (Tooling Split)

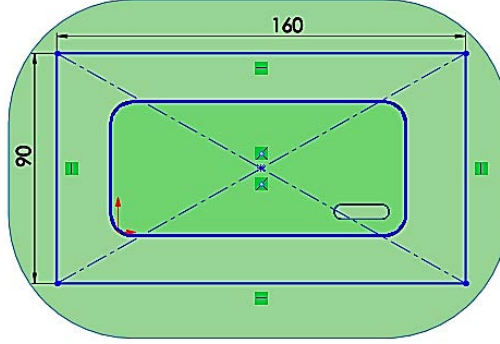
Bu komutta erkek ve dişi kalıp setleri oluşturulur. Şekil 14’te kalıp setlerinin oluşturulduğu menü verilmiştir.

Şekil 14. Kalıp Setleri Ayrımı (Tooling Split) Menüsü



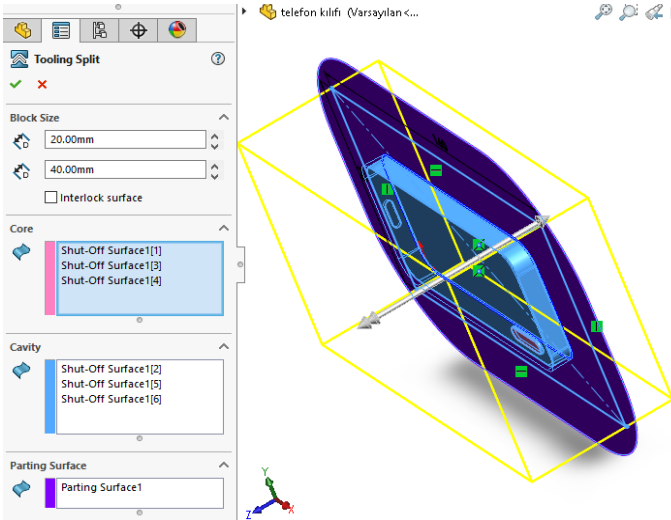
Komuta girildiğinde “Parting Surface” komutu ile oluşturulan yüzey tıklanır ve iki boyutlu çizim yapılan taslak (Sketch) menüsü aktif olur. Bu kısımda kalıp setinin şekli ve ölçüleri belirlenir. Kalıp setleri yuvarlak veya dikdörtgen şeklinde tasarlanabilir. Çizilen kalıp setleri yüzeyden dışarı taşmadan yüzey içerisinde olmalıdır. Ayrıca kalıp setleri ölçüsü ürünün boyutlarından da büyük olmalıdır. Kısacası çizilen kalıp seti plastik ürünün dışında ve ayrım yüzeyi üzerinde olmalıdır. Şekil 15’te kalıp seti 90x160 mm ölçülerinde ve dikdörtgen şeklinde çizilmiştir.

Şekil 15. Kalıp Setlerinin Biçimi ve Ölçülerinin Belirlenmesi



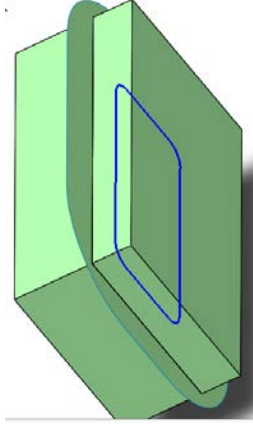
Onay verildikten sonra program otomatik olarak erkek ve dişi kalıp ayrımlarını oluşturur (Şekil 16). “Block Size” kısmında erkek ve dişi kalıpların derinlikleri (kalınlıkları) belirlenir. “Core, Cavity ve Parting Surface” kısımları program tarafından otomatik olarak belirlenmektedir.

Şekil 16. Kalıp Setlerinin Kalınlığının Belirlenmesi



Komut onaylandığında Şekil 17’de görüldüğü gibi kalıp setleri katı model olarak oluşturulur. Çekme yönüne göre erkek ve dişi kalıpları bu aşamada oluşmuştur ancak çekme yönüne dik olan delikleri elde edebilmek için maça tasarımı gerekmektedir.

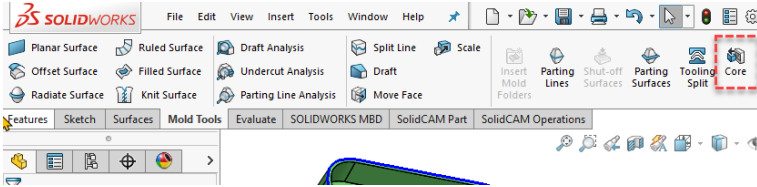
Şekil 17. Erkek ve Dişi Kalıp Setleri



2.8.Maça (Core)

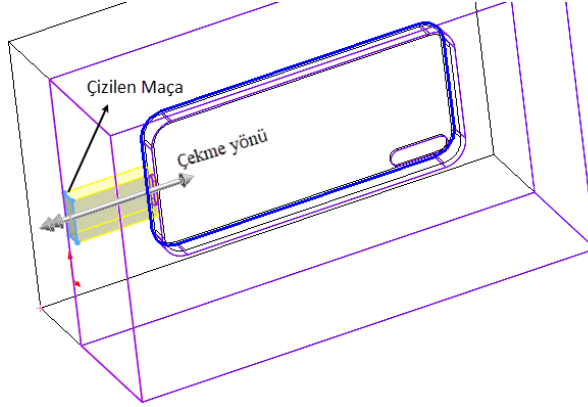
Bu komut ile maça gerektiren parçalara maça tasarımı yapılır. Bazı malzemelerde erkek ve dişi kalıp ayrım doğrultularına dik delikler veya faturalar bulunabilir. Bu gibi durumlarda maça tasarlamak gerekmektedir. Şekil 18’de Maça menüsü verilmiştir.

Şekil 18. Maça (Core) Menüsü



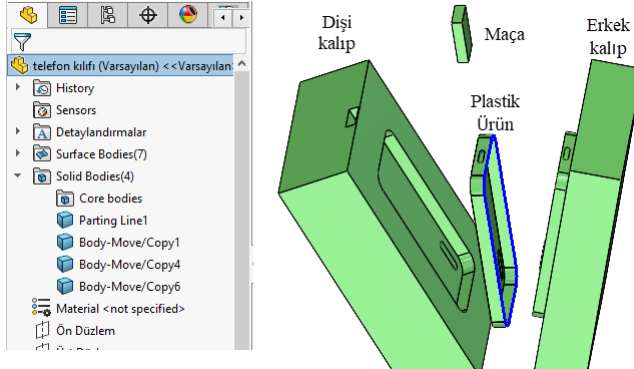
Maça oluşturulacak kısım kalıp içerisinde kaldığı için Solidworks görünüm stillerinden tel kafes yöntemi seçildiğinde görünür hale gelir. Maça oluşturulacak yüzey seçilir ve seçilen yüzeye dik bakılarak istenen ölçüde maça çizilir. Mouse yardımı ile Şekil 19’da ki gibi ok boşluğu geçecek kadar çekilir ve bırakılır. Program plastik ürün üzerindeki boşluğu otomatik olarak doldurur. Komut onaylandığında maça katı model olarak oluşturulur.

Şekil 19. Kalıp Setleri Üzerine Maça Oluşturma



Kopyala ve taşı (Move and Copy) komutu ile kalıp setleri ayrılarak oluşan erkek ve dişi kalıplar detaylı bir şekilde incelenir. Oluşturulan setler “Solid Bodies” kısmından görülmektedir. Elde edilen katı model ayrı ayrı kaydedilebilir. Kalıp setleri üzerinde ayrı ayrı veya bütün halde değişiklikler yapılabilmektedir. Üzerlerinde yapılması gereken bağlantı ve kılavuz pim delikleri, enjeksiyon yollukları, soğutma kanalları vs. açılabilir.

Şekil 20. Oluşturulan Kalıp Setleri



3. SONUÇ

Bilgisayar destekli tasarım, imalat alanında giderek yaygınlaşan ve imalatın olmazsa olmazı haline gelen bir unsur

olmuştur. İmalatın birçok alanında olduğu gibi plastik enjeksiyon kalıplarının tasarımı için de kullanılmaktadır. Günümüzde insan taleplerinin ve konforunun artması nedeniyle ürünler artık daha karmaşık ve kompleks yapıya sahiptir. Bu nedenle kalıp setleri bilgisayar ortamında tasarlanarak üretilmek zorundadır. Bu çalışmada cep telefonu kılıfının imalatı için gerekli olan kalıp setlerinin SolidWorks programında nasıl tasarlandığı anlatılmıştır. Sonuç olarak, karmaşık geometriye sahip plastik parçalar için kalıp setlerinin bilgisayar destekli tasarım programı kullanarak kolaylıkla elde edilebildiği görülmüştür. Çalışma bu yönüyle plastik imalat sektöründe kalıp setlerini tasarlamak isteyen imalatçılara yardımcı olacaktır.

KAYNAKÇA

- Deng, Y.M., Britton, G.A., Lam, Y.C., Tor, S.B., and Ma, Y.S. (2002). Feature-based CAD-CAE integration model for injection-moulded product design. *International Journal of Production Research*, 40(15), 3737-3750.1.
- Huang, M. C., and Tai, C.C. (2001). The effective factors in the warpage problem of an injection-molded part with a thin shell feature. *Journal of materials processing technology*, 110(1), 1-9.
- Jong, W.R., Wu, C.H., Liu, H.H., and Li, M.Y. (2009). A collaborative navigation system for concurrent mold design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40, 215-225.
- Kashyap, S., and Datta, D. (2015). Process parameter optimization of plastic injection molding: a review. *International Journal of Plastics Technology*, 19(1), 1-18.
- Lin, B.T., Chan, C.K., and Wang, J.C. (2008). A knowledge-based parametric design system for drawing dies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36, 671-680.
- Lin, B.T., Chang, M.R., Huang, H.L., and Liu, C.Y. (2009). Computer-aided structural design of drawing dies for stamping processes based on functional features. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42, 1140-1152.
- Low, M.L., and Lee, K.S. (2003). Application of standardization for initial design of plastic injection moulds. *International Journal of Production Research*, 41(10), 2301-2324.
- Matin, I., Hadzistevic, M., Hodolic, J., Vukelic, D., and Lukic, D. (2012). A CAD/CAE-integrated injection mold design

system for plastic products. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63, 595-607.

Rosato, D.V., and Rosato, M.G. (2012). *Injection molding handbook*. Springer Science & Business Media.

Zhou, H., Shi, S., and Ma, B. (2009). A virtual injection molding system based on numerical simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40, 297-306.

INTERACTION OF AI-SUPPORTED SIMULATION TOOLS IN ENGINEERING DESIGN PROCESSES

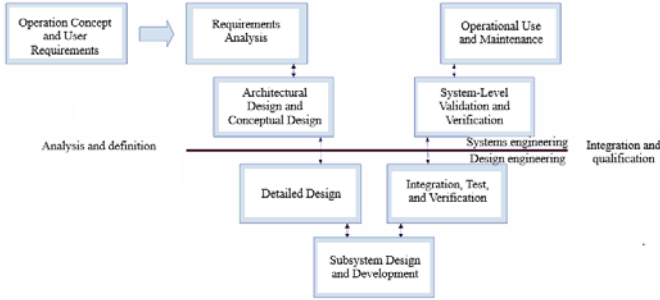
Aysu AKILLI ARI¹

Harun YAKA²

1. INTRODUCTION

The use of simulation tools in engineering design processes has been a widespread practice for years (Genç, 2019). These tools are used to analyze various aspects of design (Yalçın et al., 2018), optimize design decisions, and improve product performance. However, the complexity and dependency on computational power of traditional simulation tools can limit design processes and be insufficient for optimization (Sinha et al., 2001).

Figure 1. Systems Engineering V-Model



Source: (Yılmaz, 2022)

¹ Dr., Amasya University, Merzifon Vocational School, Machine Program, aysu.akilli@amasya.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1252-9417.

² Assoc. Prof. Dr., Amasya University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering, harun.yaka@amasya.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4859-9609.

When examining the steps in Figure 1;

Operation Concept and User Requirements: This is where the operational concept and user requirements are defined.

Requirements Analysis: In this stage, the requirements of the system are analyzed.

Architectural Design and Conceptual Design: This stage involves creating the architectural and conceptual design of the system.

Detailed Design: The detailed design of the system is developed here.

Subsystem Design and Development: This stage focuses on the design and development of subsystems.

Integration, Test, and Verification: Integration of subsystems, testing, and verification are conducted in this stage.

System-Level Validation and Verification: The entire system is validated and verified to ensure it meets the requirements.

Operational Use and Maintenance: The system is deployed for operational use and maintained throughout its lifecycle.

In recent years, the rapid development of artificial intelligence technology has ushered in a new era in engineering design processes. AI-supported simulation tools utilize technologies such as big data analysis, machine learning, and AI algorithms to make design processes smarter and more efficient. These tools are used to solve complex problems, expand the design space, and generate optimized solutions.

This study emphasizes the significance of AI-supported simulation tools in the field of engineering and will lay the foundation for future research. With the influence of AI

technology, it will be possible to further optimize engineering design processes and discover innovative solutions. This article represents an important step in shaping the future of engineering design processes.

2. THE USE OF AI-SUPPORTED SIMULATION TOOLS

The use of AI-supported simulation tools in engineering design processes is becoming increasingly widespread. These tools are effectively utilized at various stages of the design process across different engineering disciplines. Within the framework of Industry 4.0, AI and simulation tools play a crucial role in production systems. Lee et al., (2015) developed the Cyber-Physical Systems architecture and demonstrated that AI is a critical component in the optimization of production systems.

In fields such as bioengineering and bioinformatics, AI-supported simulation tools significantly contribute to data analysis and modeling processes. Kell and Oliver (2004) addressed the complementary roles of inductive and hypothesis-driven scientific approaches in the post-genomic era, highlighting the role of AI in the interpretation of biological data. This underscores the importance of AI tools for better understanding biological systems and developing new hypotheses.

In civil engineering, AI and simulation tools are effectively used in the design, planning, and management processes of construction. Nguyen et al., (2019) reviewed the applications of AI in the construction industry, noting that these technologies enhance the efficiency and accuracy of projects. AI-supported simulation tools help achieve better results at every stage, from the planning phase to the completion of construction projects.

In electrical engineering, AI-supported simulation and optimization tools play a critical role in system analysis and performance improvement processes. Nikolic and Lygeros (2012) conducted an analysis of simulation and optimization in electrical engineering, detailing the applications of AI in this field. These tools make significant contributions to improving the efficiency and reliability of energy systems.

AI-supported simulation tools help make design processes in engineering disciplines more effective, efficient, and innovative. These tools play a critical role in analyzing complex systems, optimizing their performance, and reducing costs. In the future, with further advancements in AI and simulation technologies, it is anticipated that more innovations and improvements will be achieved in engineering design processes.

2.1. Structural Analysis and Optimization

AI-supported simulation tools play a critical role in structural analysis and optimization processes within engineering disciplines. These tools are used to model the behaviors of complex structural systems, identify weaknesses in the design process, and enhance structural integrity (Rajak and Das, (2018). Specifically, the effective use of evolutionary algorithms and topology optimization in structural optimization provides significant advantages in solving engineering problems (Bendsoe and Sigmund, 2013).

AI-supported simulation tools used in structural analysis offer high accuracy and speed, enabling engineers to create safer and more economical designs. For example, Kaveh and Talatahari (2010) demonstrated how the charged system search algorithm can be used in the optimal design of skeletal structures. These algorithms play an important role in the analysis and optimization of complex structures.

Hybrid optimization methods are used to achieve superior results in structural design. The combination of methods such as genetic algorithms and particle swarm optimization offers significant advantages in structural design processes (Kaveh and Zolghadr, 2011). These hybrid approaches help optimize designs to achieve the best possible performance.

Additionally, structural cost optimization is carried out more effectively with AI-supported simulation tools. Adeli and Sarma (2006) detailed how fuzzy logic, genetic algorithms, and parallel computing techniques can be used in structural cost optimization. These approaches ensure that structures are both cost-effective and high-performing.

2.2.Fluid Dynamics Simulations

Fluid dynamics simulations are critically important in many areas, such as aerodynamic design and the analysis of water and air fluid behaviors. Problems that are traditionally time-consuming and complex to solve can be addressed more quickly and efficiently with AI-supported simulation tools. AI, particularly through the use of deep learning and machine learning techniques, has become a powerful tool for modeling and analyzing fluid dynamics problems.

AI-supported simulation tools offer significant advantages in solving complex fluid dynamics problems. These tools can process large data sets and predict fluid behaviors with high accuracy. Deep learning algorithms, when used in fluid dynamics simulations, provide faster results compared to traditional computational fluid dynamics (CFD) methods. For instance, deep learning-based models are effectively used to predict and analyze the behaviors of fluids in complex geometries (Duraismy, 2019).

Machine learning techniques also play a crucial role in optimizing fluid dynamics simulations. These techniques not only

accelerate the solution process of fluid dynamics problems but also ensure more accurate and reliable results. Machine learning algorithms analyze simulation data, optimize model parameters, and thus achieve more precise simulation outcomes (Brunton et al., 2020).

Another advantage of using AI-supported simulation tools in fluid dynamics is the rapid processing of high-resolution simulation data. This allows engineers to evaluate a greater number of designs in a shorter time and determine the solutions that provide the best performance. Lee and You (2019) examined how deep learning techniques can be integrated with high-resolution CFD simulations to solve fluid dynamics problems.

Similarly, combining machine learning algorithms with adaptive network methods enhances the accuracy and speed of fluid dynamics simulations. Geneve et al. (2020) highlighted the advantages of such adaptive methods in solving fluid dynamics simulations.

AI-supported simulation tools are bringing revolutionary advancements in solving fluid dynamics problems. These tools improve engineering design processes and promote innovation by providing faster and more efficient results compared to traditional methods. In the future, with further advancements in AI and simulation technologies, more innovative and effective solutions in the field of fluid dynamics will emerge.

2.3. Thermal Analysis

AI-supported simulation tools play a significant role in thermal analysis. The analysis of factors such as heat transfer, temperature distribution, and thermal performance is critical in the engineering design process. These tools use deep learning algorithms and thermal simulation techniques to model and solve thermal analysis problems.

AI-supported simulation tools offer the ability to solve complex heat transfer problems quickly and efficiently in thermal analysis. Deep learning algorithms, with their capacity to learn from large datasets, model and analyze complex thermal behaviors. For instance, Yu et al. (2019) demonstrated that deep learning techniques can be used to accurately predict temperature distribution in thermal systems. This helps engineers make better decisions during the design process.

Machine learning techniques also play an important role in optimizing thermal simulations. These techniques optimize model parameters to improve thermal performance and accelerate simulation processes. For example, Nagendra et al. (2018) enhanced the performance of thermal management systems in electronic devices using artificial neural networks.

Additionally, AI-supported simulation tools, when combined with adaptive modeling techniques, provide more precise and reliable results in thermal analysis. Feng et al. (2020) used adaptive neural networks to model and analyze the dynamic behaviors of complex thermal systems. These methods enable engineers to achieve more effective results in thermal analysis processes.

Another important application area of AI and thermal simulation tools is the thermal analysis of energy systems. Zhang et al. (2019) examined how AI techniques can be used to analyze heat transfer processes in energy systems. This is a significant step toward improving energy efficiency and system performance.

AI-supported thermal analysis tools are also widely used in fields such as aerospace and automotive engineering. Wang et al. (2018) investigated how AI-based thermal analyses can be used in thermal management processes in aerospace engineering. Similarly, Zhou et al. (2020) examined how AI-supported thermal

simulations can be used to optimize engine cooling systems in the automotive sector.

AI-supported simulation tools are bringing revolutionary advancements in thermal analysis. These tools improve engineering design processes and promote innovation by providing faster, more accurate, and more efficient results in heat transfer, temperature distribution, and thermal performance analyses.

2.4.Optimization and Design Space Exploration

AI-supported simulation tools play a critical role in engineering design processes by expanding the design space and producing optimized design solutions. These tools utilize optimization algorithms that analyze large datasets to optimize design parameters and discover the best design solutions. The use of AI-supported simulation tools enhances the efficiency of engineering design processes, allowing for the discovery of more innovative and optimized solutions.

AI-based optimization techniques offer significant advantages in expanding the design space and finding optimal solutions. These tools solve complex design problems and determine the most suitable design parameters by using deep learning and machine learning algorithms on large datasets. For example, Liu et al. (2019) examined how AI-based optimization algorithms can be used in engineering design processes and their potential to expand the design space. This study demonstrates how AI can manage complexities in the design process and achieve better outcomes.

Machine learning techniques play a crucial role in optimizing design parameters and discovering the best design solutions. These techniques analyze large datasets to enable faster and more effective decision-making in engineering design processes. For instance, Wang et al. (2018) investigated how

machine learning algorithms can be used to explore the design space and produce optimized design solutions. These methods help engineers develop more innovative and optimized designs.

Deep learning algorithms are an important tool for expanding the design space and finding optimized design solutions. These algorithms analyze complex data structures and relationships to discover the most suitable design solutions. For example, Chen et al. (2020) examined how deep learning techniques can be used in engineering design processes and their potential to expand the design space. This study highlights the role and potential of deep learning in engineering design processes.

Another significant advantage of AI-supported simulation tools is their ability to reduce error rates in design processes. These tools optimize design parameters to provide more reliable and accurate results. For example, Zhang et al. (2019) investigated how AI-based simulation tools reduce error rates in engineering design processes. This helps engineers develop more reliable and accurate design solutions.

An important application area of AI-supported optimization techniques is material science. AI algorithms are used in material design processes to develop new materials and optimize the performance of existing materials. For example, Xie et al. (2017) examined how AI-based optimization algorithms can be used in material design processes and assist in the discovery of new materials.

Similarly, AI-supported simulation tools play an important role in the field of bioengineering. These tools are used to model and analyze biological systems, aiding in the development of better bioengineering solutions. For instance, Konda et al. (2018) examined how AI-based simulation tools can be used in bioengineering design processes. This study highlights

the potential of AI-supported simulation tools in the field of bioengineering.

AI-supported simulation tools are also widely used in automotive engineering. These tools aid in the automotive design processes, helping develop more efficient and optimized vehicle designs. For example, Kim et al. (2019) investigated how AI-based optimization techniques can be used in automotive design processes to enhance vehicle performance. Additionally, AI-supported simulation tools have significant applications in energy systems. These tools are used in the design processes of energy systems to improve energy efficiency and optimize system performance. For example, Liu et al. (2018) examined how AI-based optimization algorithms can be used in the design processes of energy systems. This study emphasizes the potential and importance of AI-supported simulation tools in energy systems.

In conclusion, AI-supported simulation tools provide revolutionary advancements in engineering design processes by expanding the design space and producing optimized design solutions. These tools help engineers make faster and more effective decisions, reduce error rates in design processes, and enable the discovery of more innovative solutions. In the future, with further development of AI and simulation technologies, more innovative and effective solutions will emerge in engineering design processes.

3. ADVANTAGES

AI-supported simulation tools offer numerous advantages in engineering design processes. These tools enhance engineering processes in various areas, including the ability to produce rapid solutions, cost and time savings, reduction of error rates, discovery of innovative solutions within the design space, and objective decision-making capabilities. These advantages provide

effective solutions to the challenges engineers face, contributing significantly to innovation and efficiency.

3.1.Rapid Solution Production Capability

AI-supported simulation tools leverage high computational power to solve complex problems more quickly. By analyzing large datasets, these tools significantly reduce decision-making time in the design process and allow engineers to make optimizations rapidly. For example, Zhang et al. (2019) examined the rapid solution production capabilities of AI-based simulation tools, noting their significant speed benefits in engineering design processes. This enables engineers to generate more alternative solutions in a shorter time, accelerating the design process.

3.2.Cost and Time Savings

AI-supported simulation tools can be effectively used at different stages of the design process without the need for costly experiments and physical prototypes. This provides cost and time savings and accelerates the product development process. Chen et al. (2020) demonstrated that AI-based simulations offer cost and time savings, speeding up product development processes. This is especially beneficial in large projects, providing significant cost advantages and allowing for more efficient use of resources.

3.3.Reduction of Error Rates

AI-supported simulation tools reduce error rates in the design process. These tools analyze data obtained from real-world tests to identify and correct design errors. Additionally, they allow for the early detection of errors in the design process, thus reducing engineering costs and time losses. Liu et al. (2018) showed that AI-based simulations significantly reduce error rates.

Reducing error rates contributes greatly to improving product quality and ensuring customer satisfaction.

3.4.Discovery of Innovative Solutions in the Design Space

AI-supported simulation tools expand the design space, allowing for the discovery of more innovative and optimized solutions. These tools use optimization algorithms that analyze large datasets to optimize design parameters and discover the best design solutions. Wang et al. (2018) noted that AI-based simulations offer innovative solutions by expanding the design space. This enables engineers to develop creative and innovative solutions, providing a competitive advantage.

3.5.Objective Decision-Making Ability

AI-powered simulation tools facilitate more objective decision-making by reducing human errors and biases. These tools make decisions based on data, minimizing subjective influences in the design process. This leads to more consistent and reliable results. Xie and colleagues (2017) demonstrated that AI-based simulations provide more objective and reliable decisions. The ability to make objective decisions ensures higher accuracy and reliability in design processes.

The advantages of AI-powered simulation tools make engineering design processes more efficient, reduce costs, save time, and enable the discovery of more innovative solutions. These tools allow engineers to make more effective decisions and reduce error rates in the design process. For instance, Kim et al. (2019) noted that AI-powered simulations save costs and time in engineering processes and reduce error rates.

AI-powered simulation tools are bringing revolutionary advancements to engineering design processes. With advantages such as rapid solution generation, cost and time savings, reduction

in error rates (Song et al., 2020), discovery of innovative solutions, and the ability to make objective decisions, these tools improve engineering processes. In the future, as AI and simulation technologies advance further, more innovative and effective solutions will emerge in engineering design processes. The benefits provided by these innovations not only improve engineering processes but also offer more sustainable and economical design solutions, leading to societal and environmental benefits. In this context, the future potential of AI-powered simulation tools will play a crucial role in pushing the boundaries of engineering and technology, creating a safer, more efficient, and innovative world.

4. CHALLENGES

While AI-powered simulation tools offer significant advantages in engineering design processes, they also face certain challenges. These challenges emerge in various areas such as data reliability, model uncertainty, computational complexity, training and expertise requirements, and ethical issues. Being aware of and addressing these challenges is critical to ensuring the effective and reliable use of AI-powered simulation tools.

4.1.Data Reliability

The accuracy and reliability of AI-powered simulation tools depend on the quality of the data sets used. However, data sets may sometimes have gaps or misunderstandings. This can affect the accuracy of simulation results and lead to reliability issues. For example, Nygaard and colleagues (2020) demonstrated how incomplete or incorrect data can negatively impact simulation results. Implementing proper data collection and processing methods is necessary to enhance data quality.

4.2.Model Uncertainty

The uncertainty of simulation models can make it difficult to accurately model real-world conditions. Managing and accounting for uncertainties can be particularly challenging in complex systems. This can reduce the reliability of simulation results and complicate the decision-making process. Sokolova et al., (2019) examined the impact of model uncertainty on simulation results and emphasized the importance of managing these uncertainties. Conducting uncertainty analyses and continuously updating models are important for increasing model accuracy.

4.3.Computational Complexity

AI-powered simulation tools often require high computational power. Analyzing large data sets and running complex simulation models can be time-consuming and costly. This can make access difficult for small-scale companies or organizations with limited budgets. Gupta et al., (2021) examined how the need for high computational power affects simulation processes. Innovative solutions such as cloud computing and parallel processing techniques can be used to reduce computational costs.

4.4.Training And Expertise Requirements

Effective use of AI-powered simulation tools requires expertise and training. Properly configuring these tools, processing data sets, and interpreting results necessitate a certain level of expertise. Additionally, developing technical skills related to using these tools can take time. Johnson et al., (2018) discussed the training and expertise requirements necessary for the effective use of AI-based simulation tools. These challenges can be overcome by developing training programs and user-friendly interfaces.

4.5.Ethical Issues

The use of AI-powered simulation tools can also raise ethical concerns. Particularly, there may be concerns about how simulation results could affect human lives or the environment. This highlights the need for careful evaluation and use of simulation results. Binns et al., (2020) addressed the ethical dimensions of AI applications and emphasized the need for caution in this regard. Establishing and strictly applying ethical guidelines can enhance the reliability of AI-powered simulation tools.

The challenges of AI-powered simulation tools can limit or complicate their use. However, when these challenges are appropriately addressed, the potential of these tools remains significant, offering substantial contributions to engineering design processes. For example, Smith et al., (2022) examined the benefits provided by AI-powered simulations in overcoming challenges in engineering processes.

These challenges require engineers and researchers to continuously innovate and improve existing methods (Chen et al., 2020). In this context, the future development of AI-powered simulation tools will necessitate greater collaboration and interdisciplinary work in engineering and technology fields. In this process, enhancing data quality, reducing model uncertainties, lowering computational costs, developing training programs, and applying ethical guidelines will increase the effectiveness of AI-powered simulation tools.

AI-powered simulation tools are bringing revolutionary advancements to engineering design processes. The advantages offered by these tools, when the challenges are overcome, will make engineering processes more efficient, faster, and reliable. In the future, as AI and simulation technologies further develop, more innovative and effective solutions will emerge in

engineering design processes. The benefits provided by these innovations not only improve engineering processes but also offer more sustainable and economical design solutions, leading to societal and environmental benefits.

5. CONCLUSION

AI-supported simulation tools play a crucial role in engineering design processes. Compared to traditional simulation methods, these tools can operate faster, more flexibly, and more effectively. However, there are some advantages and challenges associated with the use of these technologies, and it is essential to overcome these challenges to fully realize their future potential. AI-supported simulation tools can be used to solve complex problems and produce optimized design solutions when combined with big data analysis and deep learning techniques. This can accelerate the product development process and provide a competitive advantage. However, some challenges accompany these advantages. In particular, issues such as data reliability and model uncertainty can affect the accuracy of AI-supported simulation tools and lead to reliability problems. Additionally, factors such as computational complexity and training requirements can make it difficult to use these tools effectively. In the future, AI-supported simulation tools may play an even more important role. Especially with the further integration of big data analysis and deep learning techniques, these tools can be used to solve more complex and large-scale problems. This can further optimize engineering design processes and enable the discovery of innovative solutions. However, to fully realize this potential, some obstacles must be overcome. In particular, addressing issues such as data reliability and model uncertainty can enhance the accuracy and reliability of AI-supported simulation tools. Additionally, it is essential to train users and

develop more user-friendly interfaces. In conclusion, AI-supported simulation tools have great potential in the field of engineering. However, to fully realize this potential, certain challenges must be overcome, and the technology must be further developed. This report encourages more work in this area while evaluating the current status and future potential of AI-supported simulation tools.

REFERENCES

- Adeli, H., & Sarma, K. (2006). Cost Optimization of Structures: Fuzzy Logic, Genetic Algorithms, and Parallel Computing. *John Wiley & Sons*.
- Bendsoe, M.P., & Sigmund, O. (2013). Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. *Springer Science & Business Media*.
- Binns, R., Veale, M., & Van Kleek, M. (2020). Ethical Considerations in AI Simulations. *AI & Society*, 35(2), 231-243.
- Brunton, S.L., Noack, B.R., & Koumoutsakos, P. (2020). Machine learning for fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 52, 477-508.
- Chen, X., Zhao, Y., & Gao, W. (2020). Deep learning in design optimization: Methods and applications. *Applied Soft Computing*, 89, 106098.
- Duraisamy, K., Iaccarino, G., & Xiao, H. (2019). Turbulence modeling in the age of data. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 51, 357-377.
- Feng, Z., Wang, X., & Zhang, Y. (2020). Adaptive neural networks for real-time thermal simulation in dynamic systems. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 31(10), 4145-4157.
- Genç, M. (2019). Sanal gerçeklik teknolojilerinin, inşaat endüstrisinde ve inşaat mühendisliğinde kullanılabilirliği, *Master's thesis*, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Geneve, A.R., Farr, N., & Kotlicki, A. (2020). Adaptive neural networks for efficient computation of fluid dynamics. *Computers & Fluids*, 200, 104452.

- Gupta, R., Kumar, S., & Srivastava, R. (2021). Computational Challenges in AI-Enhanced Simulations. *Computing in Science & Engineering*, 23(4), 25-34.
- Johnson, D., Smith, A., & Lee, J. (2018). Expertise and Training in AI-Driven Simulation Tools. *International Journal of Training and Development*, 22(1), 50-64.
- Kaveh, A., & Talatahari, S. (2010). Optimal design of skeletal structures via the charged system search algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(4), 453-472.
- Kaveh, A., & Zolghadr, A. (2011). A hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization for constrained structural design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 43(5), 745-759.
- Kell, D.B., & Oliver, S.G. (2004). Here is the evidence, now what is the hypothesis? The complementary roles of inductive and hypothesis-driven science in the post-genomic era. *BioEssays*, 26(1), 99-105.
- Kim, S., Park, J., & Lee, D. (2019). AI-based optimization in automotive design. *Automotive Innovation*, 1(1), 45-57.
- Konda, P., Prabhakar, S., & Bhatia, D. (2018). AI applications in bioengineering design. *Bioengineering & Translational Medicine*, 3(2), 142-155.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23.
- Lee, S., & You, D. (2019). Data-driven prediction of unsteady flow over a circular cylinder using deep learning. *Journal of Fluid Mechanics*, 879, 217-254.

- Liu, Y., Sun, X., & Wang, J. (2018). AI-driven design optimization for energy systems. *Energy & AI*, 1, 45-56.
- Liu, Y., Yang, Y., & Zhang, H. (2019). AI-driven optimization in engineering design. *Journal of Engineering Design*, 30(5), 165-182.
- Nagendra, G., Patnaik, L., & Saha, S.K. (2018). Thermal management in electronics: A review of machine learning applications. *Journal of Electronic Packaging*, 140(4), 041005.
- Nguyen, D.D., Shcherbakov, V., & Hong, T.S. (2019). Application of artificial intelligence in the construction industry: A state-of-the-art review. *Automation in Construction*, 108, 103282.
- Nikolic, D., & Lygeros, J. (2012). Analysis of simulation and optimization in electrical engineering. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(2), 777-788.
- Rajak, M., & Das, S. (2018). Optimization of structural components using evolutionary algorithms: A review. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 458-466.
- Sinha, R., Paredis, C.J., Liang, V C., & Khosla, P.K. (2001). Modeling and simulation methods for design of engineering systems. *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, 1(1), 84-91.
- Smith, J., Kim, H., & Park, D. (2022). Overcoming Challenges in AI-Driven Engineering Simulations. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 105, 104319.
- Sokolova, M., Ross, B., & Olsen, C. (2019). Handling Model Uncertainty in AI-Based Simulations. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 92, 113-126.

- Song, Y., Wang, J., & Li, X. (2020). Optimizing aerospace design with AI. *Aerospace Science and Technology*, 100, 105786.
- Wang, J., Li, X., & Zhou, Z. (2018). Machine learning for design space exploration and optimization. *Design Automation Conference*, 2(3), 45-58.
- Wang, J., Zhuang, Y., & Wei, Y. (2018). Artificial intelligence in energy system analysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3743-3757.
- Wang, P., He, Y., & Li, J. (2018). AI-driven thermal analysis in aerospace engineering. *Aerospace Science and Technology*, 82, 207-217.
- Xie, T., Li, J., & Wang, Y. (2017). AI in materials design: Optimization and discovery. *Materials & Design*, 135, 123-134.
- Yalçın, S.E., Henden, B., Başaran, İ., Pamuk, B., & Öztürk, N. (2018). Montaj Hattı Parça Besleme Süreçlerinin Planlanması İçin Kural Tabanlı Sistem Tasarımı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(4), 71-82
- Yılmaz, A. (2022). Sistem mühendisliği süreçleri ve uygulamaları. *Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 15(3), 123-145.
- Yu, Z., Guo, Z., & Zhang, H. (2019). Deep learning for thermal field prediction of electronic equipment. *Applied Thermal Engineering*, 156, 153-162.
- Zhang, Q., Zhang, J., & Huang, M. (2019). Reducing design errors with AI-based simulation tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(9), 3803-3817.

- Zhang, X., Li, Y., & Wang, J. (2019). Artificial intelligence in energy system thermal analysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 201-211.
- Zhou, T., Xu, K., & Liu, J. (2020). Application of AI-based thermal simulation in automotive engine cooling systems. *Automotive Engineering*, 12(2), 153-163.

ADAPTIVE CONTROL OF DYNAMIC AND DEAD ZONE UNCERTAINTIES IN TELEOPERATION ROBOTIC SYSTEM

Tayfun ABUT¹

Servet SOYGUDER²

1. INTRODUCTION

Many problems affect the position and force tracking performances of Teleoperation Robotic systems. These problems are emerging day by day due to the experiences arising from these systems' usage areas. Some of the active research areas are surgical operations, space studies, educational activities, etc. ¹⁻³. Many parameters affect stability and transparency, which are the main targets in teleoperation systems. Parameter uncertainties and dead zones are among the problems that affect stability and transparency, etc. to solve the problems, varied control techniques have been suggested and implemented for various systems in the literature ⁴⁻⁵. Some of these are given below.

An adaptive controller supported by experimental studies has been proposed and used by the authors for trajectory control with dynamic and kinematic uncertainties ⁵. In a study of non-linear teleoperation systems in the literature, an adaptive controller was used and it was shown that the joints tend to reset

¹ Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, Mus Alparslan University, 49100, Mus, Turkey, tayfunabut@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4646-3345.

² Prof., Department of Industrial Engineering, Ankara Yıldırım Beyazıt University, 06100, Ankara, Turkey, servetsoyguder@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8191-6891.

their positions where the gravitational forces are not zero. Performance has been shown to increase with simulation results ⁶. An adaptive controller has been proposed and used by Liu and Tavakoli ⁷ for teleoperation systems with uncertain dynamics and multiple degrees of freedom. The passivity-based synchronization of a system with uncertain kinematics and dynamics was simulated by Wang ⁸. An adaptive controller for uncertain nonlinear bilateral teleoperation system Liu et al. ⁹ suggested. It was carried out with experiments and simulations to indicate the performance of the controller. An adaptive controller proposed by Liu and Khong ¹⁰ tried to control the nonlinear teleoperation system with uncertain kinematics and dynamics, and simulation and experimental studies were carried out. An adaptive method for controlling robots with uncertain kinematics and dynamics was simulated by Wang ¹¹. This method has a separation feature. The simulation and experimental studies of the adaptive computed torque method to compensate for uncertain kinematics, dynamics, and interaction forces were carried out by Abut and Soyguder ¹². Li et al. ¹³, adaptive control of a bilateral teleoperation system with uncertain parameters and communication delays was performed in the workspace. This method was simulated in a two-degree-of-freedom system. Kebria et al. ¹⁴ were simulate robust adaptive control of teleoperation systems with delays and uncertainties. They have supported the simulation results with experimental studies. Yang et al. ¹⁵, the control of the teleoperation system with uncertain kinematics and dynamics with Adaptive fuzzy was performed. The authors' proposed method was supported by experimental results. Mehrjouyan et al. ¹⁶, performed robust observer-based adaptive synchronization control of uncertain nonlinear bilateral teleoperation systems under time-varying delay. The method was supported by simulation studies. The authors wrote review articles containing literature works on adaptive control methods

recommended by researchers to control teleoperation systems¹⁷⁻²¹.

All of the teleoperation studies given above have neglected the dead zone problem. Still, the dead zone has a nonlinear structure commonly acknowledged in the literature. It leads the system to instability. Many studies have been made in the literature to solve the dead-zone problem in classical robot control, and further studies proceed. Tao and Kokotovic²² made the first of these studies. The study focused on creating an inverse model of the dead zone and updating it. Wang et al.²³ used a robust adaptive control scheme without utilizing the dead zone inverse. Wang et al.²⁴ suggested a robust adaptive fuzzy backstepping control approach for nonlinear systems interconnected with unmodified dynamics and dead zones. It was guaranteed that all closed-loop system signals were hemispherically uniform and ultimately limited in the mean square. The method has been supported by simulation studies. Zhou et al.²⁵ aimed to follow a stable trajectory with an adaptive neural network (NN) for robots exposed to dead-zone input. He designed a virtual control signal and a real controller. The adaptive step-back control method and Lyapunov stability theory enabled the proposed controller to limit all systems' signals to a hemispherical uniform and ultimately. In another study, Zhang et al.²⁶ performed the control of a robot with neural networks with uncertainties and dead-zone entry. The model-based constant time control was examined, and it was observed that both the system's parameters and the input dead zone function were well-known. The model-based constant time control was examined and the robot was simulated, where both the system parameters and the input dead zone function are unknown.

The dynamic uncertainty and dead zone problem make the control of systems difficult and unstable. To overcome the parameter uncertainty problems of these teleoperation systems,

various control strategies have been developed and implemented in the literature. Still, there are very few studies addressing the dead zone problem. One of them is a nonlinear adaptive control method for a system with a dead zone and dynamic uncertainty in a study conducted by Liu et al.²⁷ applied experimentally. Both robots used in the study have a dead zone, and the recommended method has been compared with the adaptive control method. In another study, Liu and Tavakoli²⁸ suggested a bilateral adaptive controller for nonlinear teleoperation systems with uncertain dynamic parameters and dead zones. They performed the study in a simulation environment. Among the robots used in the study, only the slave robot has a dead zone. Finally, the proposed method has been compared graphically and numerically using the classical adaptive control and MSE criteria. As known, in the control of teleoperation robotic systems, dynamic and dead zone uncertainty that cause stability problems also affect transparency and cause performance degradation. The main reason for preferring the adaptive control method in this study is that it can adapt itself to all disruptive effects during control and the parameters of the systems are obtained.

In this study, the classical Adaptive Computed Torque Control (ACTC) method and Optimal Adaptive Computed Torque Control (OACTC) + Robust Adaptive Control (RAC) methods are applied in a simulation environment for uninterrupted interaction. Grey wolf optimization (GWO), one of the current optimization algorithms, was utilized to acquire the control coefficients used in the OACTC method. Despite the dynamic and dead zone uncertainties of the system, the stability of position and force tracking was investigated using the Lyapunov stability analysis method. Thus, the applicability of the methods has been demonstrated. The results obtained were compared with the literature and with each other using performance criteria (MSE and MAE). The OACTC+RAC

methods proposed in this study were seen to be used for the first time as a result of literature research and it was seen that the positive results obtained would contribute to the literature. In this context, the authors believe that the study carried out in the simulation environment has an innovative view.

The following are the primary contributions of this work;

a- The first contribution of this work is the centers of mass, moments of inertia disturbing (internal and external) forces, etc. that occur during the motion of the system and adversely affect the control of the system. The Optimal Adaptive Computed Torque Control (OACTC) method was recommended against all effects. In this method, an adaptive rule was created against all the negative effects given above, and the method was carried out in a simulation environment.

b- Another contribution presented in this study is the use of Grey Wolf Optimization (GWO), one of the current optimization algorithms, to acquire the control coefficients used in the OACTC method. This causes the OACTC method to have a significant advantage in terms of applicability and originality.

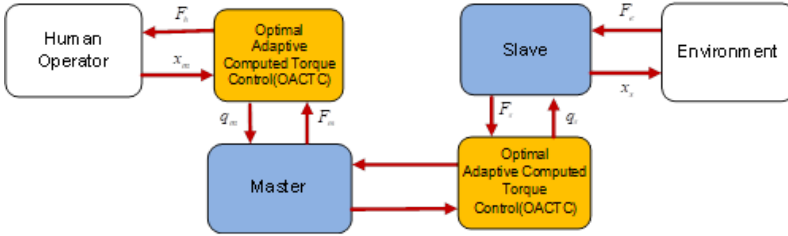
c- The creation of an adaptation rule for the uncertain parameters of the dead zone using the Robust Adaptive Control (RAC) method and its use in the system is another contribution presented in the work.

d- Another contribution of this study is the comparison of the suggested method (OACTC+RAC) with the classical ACTC method both graphically and numerically (see Table 1-3 (MSE and MAE), and Figure 7-12). Also, comparing the proposed method with a previous study in the literature utilizing performance criteria (MSE) is another contribution of the study (see Table 3). Compensating the dynamic and dead zone uncertainty problems of teleoperation systems using the OACTC

and RAC methods in their simulation environment is the summary of the contribution in the article.

The remainder of this article is formatted in the following manner. Section 2 covers the mathematical model of the system as well as the dead zone. A recommended dead zone model is also offered. The suggested controller for the system is shown in Section 3. The OACTC method and the GWO algorithm are given for the system's dynamic uncertainty. Also, the RAC method recommended for the dead zone problem is shown in detail. In Section 4, simulation results achieved by applying the suggested methods are given numerically and graphically. Additionally, the comparison results with the literature are shown in this section. Section 5 summarizes the entire article and provides information on the development of this article and future studies. Figure 1 shows the proposed OACTC method block schema for bilateral control of the system.

Figure 1. Block schema of the proposed OACTC method



2. MATHEMATICAL MODELS OF THE SYSTEM

The dynamic models of the robots that make up the system are given below.

$$M_m(q_m)(\ddot{q}_m) + C_m(q_m, \dot{q}_m)(\dot{q}_m) + G_m(q_m) = \tau_h + \tau_m \quad (1)$$

$$M_s(q_s)(\ddot{q}_s) + C_s(q_s, \dot{q}_s)(\dot{q}_s) + G_s(q_s) = \tau_s - \tau_e \quad (2)$$

$q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i$ and τ_i indicate the position, speed, acceleration, and control torque, respectively. $i \in \{m, s\}$ shows the master and slave robot. $M(q_i) \in R^{3 \times 3}$ is a positively defined symmetric matrix that contains the inertia matrix, $C(q_i) \in R^{3 \times 3}$ Coriolis and centrifugal force matrix, $G(q_i) \in R^{3 \times 3}$ shows the weight forces. τ_m and τ_s show the control torque expressions of the master and slave robots. τ_h and τ_e show the torque expressions occurring on the human and environmental sides. $\tau_h = J_m^T F_h$ and $\tau_e = J_s^T F_e$. F_h expresses the torque exerted by the human operator and environment. The feel-force expression, which will be obtained by the human operator and the environment, is modeled as a spring-damper model in the computer environment. The model was obtained according to Newton's 2nd law of motion.

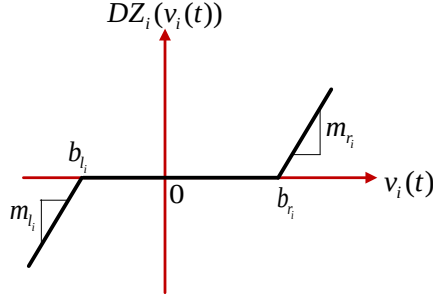
$$F_i = k_i(\Delta_i) + b_i(\dot{\Delta}_i), \Delta_i = z_r - z \quad (3)$$

The force obtained from the spring-damper model is represented by F_i . b_i is the damping coefficient and k_i is the spring constant. z_r represents the initial positions of the springs, and z represents the actual positions of the master and slave robots. Appendix A shows the Jacobean matrices of the robots that make up the system.

2.1.Dead Zone Model

The dead zone has the potential of a teleoperation system, in particular, to significantly destabilize the position tracking performance and disrupt the transparency of the system. The general view of the dead zone model is given below in Figure 2.

Figure 2. Dead Zone Model Overview



$$DZ_i(v_i(t)) = \begin{cases} m_{ri}(v_i(t) - b_{ri}) & \text{if } v_i(t) \geq b_{ri} \\ 0 & \text{if } -b_{li} < v_i(t) < b_{ri} \\ m_{li}(v_i(t) + b_{li}) & \text{if } v_i(t) \leq -b_{li} \end{cases} \quad (4)$$

In general, an inverse model is added to eliminate the dead zone problem in the literature. However, measurement defects that may occur after reversing the system can pose a particular problem. Entrances and exits of the dead zone are $v_i(t)$ and $DZ_i(v_i(t))$. b_{li} and b_{ri} show breakpoints m_{ri} and m_{li} show slopes. i indicates the number of joints ($i=1,2,3...n$). The exit of the dead zone cannot be used for measurement purposes. The slopes of the dead zone in the positive and negative regions are the same ($m_r = m_l = m$). Generally, the model and parameters of the dead zone are unknown. However, it is assumed that these parameters are limited and their signs are known ($b_{ri} > 0$, $b_{li} < 0$, $m_{ri} = m_{li} = m > 0$)²²⁻²⁹. Therefore, in this work, a new model given below is described without creating the dead zone's inverse.

$$DZ_i(v_i(t)) = mv_i(t) + dz_i(v_i(t)) \quad (5)$$

$$dz_i(v_i(t)) = \begin{cases} -mb_{ri} & \text{if } v_i(t) \geq b_{ri} \\ -mv_i(t) & \text{if } -b_{li} < v_i(t) < b_{ri} \\ -mb_{li} & \text{if } v_i(t) \leq -b_{li} \end{cases} \quad (6)$$

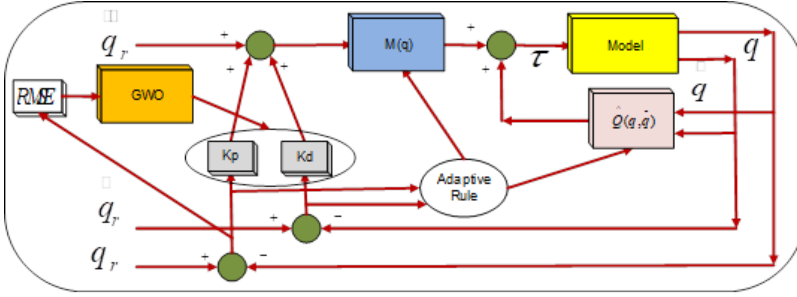
As mentioned above, since the model parameters are limited, $dz_i(v_i(t))$, is obtained since $|dz_i(v_i(t))| \leq \alpha$ $\alpha > 0$ is here.

3. THE PROPOSED CONTROLLERS

3.1. The Optimal Adaptive Computed Torque Control (OACTC) method

Usually, a model is constituted for systems, but there are still plenty of problems and it is not easy to get a full model. Besides, there are environmental effects in the systems that cannot be modeled. All internal and external uncertainties in the systems or the working environment negatively influence the methods. All adaptive control methods aim to recommend and compensate for these parameters that lead systems to uncertainty and instability that negatively affect control performance. Besides, the best update rule is to create a minimum error. It teaches the system's parameters by updating the error value of the incorrectly known or unavailable parameters of the system until the error value is minimized. While updating system parameters in classical Adaptive Computed Torque Control (ACTC) methods, updating the control coefficients, which are critical in the control of the system, is not taken into account³⁰⁻³¹. In this section, the proposed Optimal Adaptive Computed Torque Control (OACTC) method, the adaptation rule created to update the uncertain parameters of the system, and the Grey Wolf Optimization (GWO) method used to determine the control coefficients are given. Furthermore, the Lyapunov stability method used for the stability of the system is given. An elaborated block schema of the OACTC method is illustrated in Figure 3.

Figure 3. The Elaborated Block Schema of the OACTC Method



The first error expressions of the proposed OACTC method for the master and slave robots are shown in equation 7. $i=m,s$ shows the master and slave robots utilized in the system.

$$\tau_i = W_i(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i) \varphi_i \quad (7)$$

The dynamic model equations of the system are given in equation 8 obtained after necessary adjustments according to the proposed method.

$$M_i(q_i)(\ddot{q}_i) + C_i(q_i, \dot{q}_i)(\dot{q}_i) + G_i(q_i) = W_i(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i) \varphi_i \quad (8)$$

$W_i(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i) \varphi_i$ regression is a time-varying function, φ_i showing uncertain parameters. In the equation given below, $z = r, m$ is the q_r reference position, q_m is the position of the master robot, and q_s is the slave robot's position, respectively.

$$\hat{M}_i(q_i)(\ddot{q}_z + K_d \dot{e}_i + K_p e_i) + \hat{C}_i(q_i, \dot{q}_i)(\dot{q}_i) + \hat{G}_i(q_i) = \tau_i \quad (9)$$

Equation 10 was obtained by adding an estimated expression containing internal or external disturbance effects and unknown real values to the equations given in Equation 9.

$$W_i(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i) \varphi_i = \hat{M}_i(q_i)(\ddot{q}_z + K_d \dot{e}_i + K_p e_i) + \hat{C}_i(q_i, \dot{q}_i)(\dot{q}_i) + \hat{G}_i(q_i) = \tau_i \quad (10)$$

When the error expressions given in equation 11 are examined, it is seen that the values between the reference (r)

values and the output values of the master (m) and slave (s) robots are acquired.

$$e_i = q_z - q_i, \dot{e}_i = \dot{q}_z - \dot{q}_i, \ddot{e}_i = \ddot{q}_z - \ddot{q}_i \quad (11)$$

Equation 12 was obtained by adding error equation 11 to torque equation 10. Equation 13 was obtained by adding Equation 8 to Equation 12.

$$\tau_i = \hat{M}_i(q_i)(\ddot{q}_z + K_d \dot{e}_i + K_p e_i) + \hat{C}_i(q_i, \dot{q}_i)(\dot{q}_i) + \hat{G}_i(q_i) \quad (12)$$

$$\tau_i = \hat{M}_i(q_i)(\ddot{e}_i + K_d \dot{e}_i + K_p e_i) + W_i(q_i, \dot{q}_i \ddot{q}_i) \varphi_i \quad (13)$$

Parametric and unknown (un-modelable) parameter errors were anticipated and incorporated into the equations. (For example, constant or variable dynamic parameter errors display continuous variation during the time the system moves and comes into touch with the environment (inertia matrices and mass centers, etc., for example)). When equations 7 and 13 are equalized to each other, equations 14 and equations 15-16 are obtained.

$$\hat{M}_i(q_i)(\ddot{e}_i + K_d \dot{e}_i + K_p e_i) + W_i(q_i, \dot{q}_i \ddot{q}_i) \hat{\varphi}_i = W_i(q_i, \dot{q}_i \ddot{q}_i) \varphi_i \quad (14)$$

$$\ddot{e}_i + K_d \dot{e}_i + K_p e_i = \hat{M}_i^{-1}(q_i) W_i(q_i, \dot{q}_i \ddot{q}_i) (\varphi_i - \hat{\varphi}_i) \quad (15)$$

$$\ddot{e}_i + K_d \dot{e}_i + K_p e_i = \hat{M}_i^{-1}(q_i) W_i(q_i, \dot{q}_i \ddot{q}_i) \vec{\varphi}_i \quad (16)$$

The equation for parameter errors is the equation $\vec{\varphi}_i = (\varphi_i - \hat{\varphi}_i)$. When the φ_i equation is examined, it is seen that the estimated parameter values of $\hat{\varphi}_i$ and the value of $\vec{\varphi}_i$ consist of the difference between these two values. Equation 16, which is re-expressed according to the state space form, is given in equations in the range 17-19. The expressions given in these equations show the coefficients of the error vector (e_i), A_i , and B_i . The I_{in} identity matrix Q_{in} is taken as the zero matrices.

$$\ddot{e}_i = A_i e_i + B_i \widehat{M}_i^{-1}(q_i) W_i(q_i, \dot{q}_i \ddot{q}_i) \vec{\varphi}_i \quad (17)$$

$$e_i = \begin{bmatrix} e_i \\ \dot{e}_i \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} I_{in} \\ Q_{in} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} Q_{in} & I_{in} \\ -K_p & -K_d \end{bmatrix} \quad (19)$$

In this part, the stability analysis of the system will be given. The Lyapunov stability analysis method was chosen for the analysis method. Signal and parameter errors were incorporated, into the Lyapunov function ($V=V_i (i=(m,s))$) shown in equation 20.

$$V_i = e_i^T P_i e_i + \vec{\varphi}_i^T \Gamma_i^T \vec{\varphi}_i \quad (20)$$

In the function given in Equation 20, P_i should be a constant, positive, and symmetric matrix, and Γ_i should be a positive and diagonal matrix. γ_i must be positive and constant for the Γ_i matrix to be as in equation 21.

$$\Gamma_i = \text{diag}(\gamma_{i1}, \gamma_{i2}, \dots, \gamma_{in}) \quad (21)$$

Equation 22 is obtained when the derivative of function 20 is obtained.

$$\dot{V}_i = e_i^T P_i \dot{e}_i + \dot{e}_i^T P_i e_i + \vec{\varphi}_i^T \Gamma_i^T \vec{\varphi}_i \quad (22)$$

Equation 23 was used to obtain equation 22.

$$[\vec{\varphi}_i^T \Gamma_i^T \vec{\varphi}_i]^T = \vec{\varphi}_i^T \Gamma_i^T \vec{\varphi}_i \quad (23)$$

When the state-space model given above is replaced by equation 22, equations 24 and 25 are obtained. Equation 25 is the simplified version of equation 24.

$$\dot{V}_i = e_i^T P_i (A_i e_i + B_i \widehat{M}_i^{-1}(q_i) W_i(q_i, \dot{q}_i \ddot{q}_i) \vec{\varphi}_i) + (A_i e_i + B_i \widehat{M}_i^{-1}(\dot{q}_i) W_i(q_i, \dot{q}_i \ddot{q}_i) \vec{\varphi}_i)^T P_i e_i + 2 \vec{\varphi}_i^T \Gamma_i^{-1} \dot{\vec{\varphi}}_i \quad (24)$$

$$\dot{V}_i = e_i^T Q_i e_i + 2\vec{\varphi}_i^T (\Gamma_i^{-1} \dot{\vec{\varphi}}_i + W_i(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i)^T \hat{M}_i^{-1}(q_i) B_i^T P_i e_i) \quad (25)$$

Lyapunov can be used to obtain P_i and Q_i matrices. The Q_i matrix is a symmetrical matrix with a positive definition. Using the Lyapunov equations, a positive Q_i matrix and a positive symmetric P_i matrix will be obtained.

$$A_i^T P_i + P_i A_i = -Q_i$$

(26) $\vec{\varphi}_i$ When the expression is placed in equation number 25 and the additive term is taken off from the equation, equation 27 is acquired.

$$\dot{\vec{\varphi}}_i = -\Gamma_i W_i(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i)^T \hat{M}_i^{-1}(q_i) B_i^T P_i e_i \quad (27)$$

$$\dot{V}_i = -e_i^T Q_i e_i \quad (28)$$

These are the necessary steps to create an update rule from the equations given above. The most important thing here is that even if the real parameter was got with the valued adaptive rule, these values do not change and their derivatives are equal to zero. For the update rule, equation 29 was obtained by adding the equation $\vec{\varphi}_i = (\varphi_i - \hat{\varphi}_i)$ to equation 27.

$$\dot{\vec{\varphi}}_i = \dot{\varphi}_i - \dot{\hat{\varphi}}_i \rightarrow \dot{\vec{\varphi}}_i = 0 - \dot{\hat{\varphi}}_i \quad (29)$$

Equation 30 was obtained by adding Equation 29 to Equation 27.

$$\dot{\hat{\varphi}}_i = -\Gamma_i W_i(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i)^T \hat{M}_i^{-1}(q_i) B_i^T P_i e_i \quad (30)$$

When equation 30 obtained for the update rule is examined, it is seen that the system includes all parameters (constant or variable). By adding this rule to the equations of the system and also considering the boundary conditions of the system, equation no. 31 was obtained when the stability analysis was analyzed according to the Lyapunov function. The system

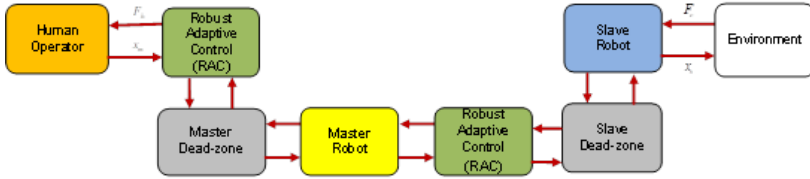
will be found to be stable as a consequence of this analysis. Using the update rule, it is aimed to learn the parameters of the system and thus get the minimum error values.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V = V_{\infty}, \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V} = 0 \quad (31)$$

3.2. Robust Adaptive Control (RAC) Method

This section will explain the recommendations, and robust adaptive control method to eliminate the dead zone problem. First, controlling the dead zone's reverse will be carried out without adding to the system. The block schema of the Robust Adaptive Control (RAC) method recommended for compensation for the dead zone problem in the master and slave robots is shown in Figure 4.

Figure 4. RAC Method Control Schema for System



The state vector of the control variables of the system is shown $x_i = [q_i; \dot{q}_i]$. Also, the desired position vector is given $x_{di} = [q_{di}; \dot{q}_{di}]$. A virtual shear velocity vector for achieving the control target is defined in Equation 32.

$$s_i = \lambda_i \hat{x}_i \quad (32)$$

$\hat{x}_i = x_i - x_{di}$, λ_i is a fixed positive definition matrix. When it is defined as $\lambda_i \hat{x}_i(t) = \lambda_i \hat{x}_i + \ddot{q}_i - \ddot{q}_{di}$ the derivative of equation 32 was obtained and equation 33 was obtained.

$$\dot{s} = \lambda_i \hat{x}_i + \ddot{q}_i - \ddot{q}_{di} \quad (33)$$

Since the virtual slip speed error to be practiced in the adaptive rule to be applied to the system may generate a cracking

problem, a new speed error variable has been determined to avoid this problem.

$$s_\varepsilon = s - \varepsilon \text{sat}(s/\varepsilon) \quad (34)$$

Where ε the pleasure is a positive constant and $\text{sat}(\cdot)$ is a saturation function as given in equation 35.

$$\text{sat}(s_i/\varepsilon) = \begin{cases} 1 & s_i \geq \varepsilon \\ s_i/\varepsilon & \varepsilon < s_i < \varepsilon \\ -1 & s_i \leq -\varepsilon \end{cases} \quad (35)$$

$i = m, s, \dots, n$. If equation 33 is substituted into equation 36 given below, equation 37 is obtained.

$$M_i(q_i)(\ddot{q}_i) + C_i(q_i, \dot{q}_i)(\dot{q}_i) + G_i(q_i) = \tau_i \quad (36)$$

$$M_i(q_i)(\dot{s}_i) - M_i(q_i)\lambda_i \hat{x}_i + M_i(q_i)\ddot{q}_d = \tau_i \quad (37)$$

Adaptive rules are made to definitions before they are written. These are in the form of $\tau_i = \ddot{q}_{di} - \lambda_i \hat{x}_i$, $\phi_i = \frac{1}{m}$.

$$\tau_i = mv(t) + dz(v(t)) \quad (38)$$

The expression $mv(t) + dz(v(t))$ is given in equation 38 is the exit expression of the dead zone.

$$v_i(t) = -K_i s_i + \hat{\phi}_i J_i - K_i \text{sat}(s_i/\varepsilon_i) \quad (39)$$

$$\tilde{\phi}_i = \hat{\phi}_i - \phi_i \quad (40)$$

$$\dot{\hat{\phi}}_i = -\varsigma_i J_i^T s_\varepsilon \quad (41)$$

K is a positively defined diagonal constant matrix. ϕ_i a dead zone $\hat{\phi}_i$ represents predicted dead zone parameters. $\hat{\phi}_i$ and ς_i , denote the adaptation rule of the dead zone and a positively defined constant, respectively. The expression $K_i s_i$ is a feedback law containing velocity and position errors between the actual

position and the desired position. The expression that compensates for the dead zone is $\hat{\phi}_i J_i$. $K_i \text{sat}(S_i/\varepsilon_i)$ statement has been added to the system to avoid chattering problems that may occur in the sliding error vector. Equations 38 and 39 are written into equation 37 using the expression J_i and equation 42 is obtained.

$$M_i(q_i)(\dot{s}_i) = -M_i(q_i)J_i + m[K_i s_i + \hat{\phi}_i J_i - K_i \text{sat}(S_i/\varepsilon_i)] + dz(v(t)) \quad (42)$$

The Lyapunov function for the stability analysis of the robust adaptive control used for the dead zone is written in equation 43.

$$\dot{V}_{2i} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{m} s_\varepsilon^T M_i(q_i) s_\varepsilon + \frac{1}{\varsigma_i} \hat{\phi}_i^2 \right] \quad (43)$$

$\tilde{\phi}_i = \hat{\phi}_i - \phi_i$ equals, $s_\varepsilon^T M_i(q_i) \dot{s}_\varepsilon = s_\varepsilon^T M_i(q_i) \dot{s}$. When the derivative of equation 43 is obtained, 44 is obtained, too.

$$\dot{V}_{2i} = \frac{1}{m} s_\varepsilon^T M_i(q_i) \dot{s} + \frac{1}{\varsigma_i} \tilde{\phi}_i \dot{\hat{\phi}}_i + \frac{1}{2m} s_\varepsilon^T M_i(q_i) \dot{s}_\varepsilon \quad (44)$$

When equation 42 is placed into equation 44, equation 45 is obtained.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2i} = & -s_\varepsilon^T K_i s_i + s_\varepsilon^T [\hat{\phi}_i J_i - K_i \text{sat}(S_i/\varepsilon_i)] + \\ & s_\varepsilon^T (-\phi_i M_i(q_i) J_i) + s_\varepsilon^T \frac{dz(v(t))}{m} + \frac{1}{\varsigma_i} \tilde{\phi}_i \dot{\hat{\phi}}_i + \frac{1}{2m} s_\varepsilon^T \dot{M}_i(q_i) s_\varepsilon \end{aligned} \quad (45)$$

Equation number 45 replaces equation number 41 by using the expression J_i and equation 46 is obtained.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{2i} = & -s_\varepsilon^T K_i s_i - s_\varepsilon^T K_i \text{sat}(S_i/\varepsilon_i) + s_\varepsilon^T \frac{dz(v(t))}{m} + \\ & \frac{1}{2m} s_\varepsilon^T \dot{M}_i(q_i) s_\varepsilon \end{aligned} \quad (46)$$

When equation no 34 is placed in equation 46, equation no 47 is obtained.

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_{2i} &= -s_{\varepsilon}^T K_i s_{\varepsilon} - s_{\varepsilon}^T (K_i \varepsilon + K_i^*) \text{sat}(s_i/\varepsilon_i) + s_{\varepsilon}^T \frac{dz(v(t))}{m} \\
 &\quad + \frac{1}{2m} s_{\varepsilon}^T \dot{M}_i(q_i) s_{\varepsilon} \\
 &\leq -s_{\varepsilon}^T K_i s_{\varepsilon} - \text{eig}_{\min}(K_i \varepsilon + K_i^*) \|s_{\varepsilon}\| + s_{\varepsilon}^T \frac{dz(v(t))}{m} \\
 &\quad + \frac{1}{2m} s_{\varepsilon}^T \dot{M}_i(q_i) s_{\varepsilon} \\
 &\leq -s_{\varepsilon}^T K_i s_{\varepsilon} - [\text{eig}_{\min}(K_i \varepsilon + K_i^*) - \frac{\|dz(v(t))\|}{m} \\
 &\quad - \frac{\|\dot{M}_i(q_i) s_{\varepsilon}\|}{2m}] \|s_{\varepsilon}\| \\
 &\leq -s_{\varepsilon}^T K_i s_{\varepsilon} - [\text{eig}_{\min}(K_i \varepsilon + K_i^*) - \frac{\alpha}{m} - \frac{\beta}{2m}] \|s_{\varepsilon}\| \quad (47)
 \end{aligned}$$

$$\dot{V}_{2i} \leq -s_{\varepsilon}^T K_i s_{\varepsilon} \quad (48)$$

The expression given above shows $\text{eig}_{\min}(K_i \varepsilon + K_i^*) \geq \frac{\alpha}{m} + \frac{\beta}{2m}$. Since V_{2i} is positively defined, $\dot{V}_{2i}$ is negative semi-definite, it is seen that V_{2i} is limited. Therefore, the signals $\dot{s}_i, s_{\varepsilon}$, and $\tilde{\phi}_i$ are also limited i.e. it is $s_{\varepsilon}, \tilde{\phi}_i \in L^{\infty}, \tilde{\phi}_i$.

$$\dot{V}_{2i} \leq -s_{\varepsilon}^T K_i s_{\varepsilon} \quad (49)$$

When equation 49 is examined in terms of position tracking performance;

$$\text{eig}_{\min}(K_i) s_{\varepsilon}^T s_{\varepsilon} \leq s_{\varepsilon}^T K_i s_{\varepsilon} \leq -\dot{V}_i \quad (50)$$

Where $\text{eig}_{\min}(K_i)$ K_i shows the minimum eigenvalue of the matrix. Equation 51 is obtained by integrating both sides of Equation 50

$$\begin{aligned}
 \text{eig}_{\min}(K_i) \int_0^t \|s_{\varepsilon}\|^2 dt &\leq -\int_0^t \dot{V}_i dt = \dot{V}_i(0) - \dot{V}_i(t) \leq V(0) < \\
 \infty &\quad (51)
 \end{aligned}$$

$s_\varepsilon \in L^2$. Since it is already $s_\varepsilon \in L^\infty$, s_ε (42) $s_i \in L^\infty$, and $\hat{x}_i \in L^\infty$ can be obtained from the definition. Since it is $s_\varepsilon \in L^\infty$, $s_\varepsilon \in L^2$ and, $\dot{s}_\varepsilon \in L^\infty$, according to Barbalat's Lemma ²⁸ $s_\varepsilon \rightarrow 0$ is $s_i \rightarrow 0$ obtained. $\dot{\hat{\phi}}_i = -\Gamma_i W_i(q_i, \dot{q}_i \ddot{q}_i)^T \hat{M}_i^{-1}(q_i) B_i^T P_i e_i$ the dynamic update rule for systems with dynamic uncertainties and $\dot{\hat{\phi}}_i = -\zeta_i J_i^T s_\varepsilon$ the dead zone update rule for master slaves with uncertain dead zone has been developed. These two update rules, it is aimed to increase the position and force tracking of the performance of adaptive controllers.

4. SIMULATION RESULTS

Bilateral simulation works between the master robot and slave robot will be described in this section in the existence of parameter uncertainty and dead zone difficulties. To control master and slave robots, the OACTC method was employed, and the Lyapunov stability analysis approach was used to ensure system stability. The control coefficients (K_p & K_d) are obtained using the GWO algorithm, which is crucial in the OACTC method used to regulate the system. To get the best values for the control method's parameters, you'll need a goal function (K_p & K_d). Robust adaptive control (RAC) has been proposed and implemented for the system's possible dead zone problem. The master robot must follow the slave robot's reference trajectories while the objective function is being generated, and the slave robot's force values must be followed by the master robot with minimal error (position and force). When comparing the speed, simplicity, and deterministic approaches employed in the study to the Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm, swarm-based meta-heuristic optimization methods are favored since they make for a globally optimum solution. Mirjalili et al. ³² first proposed the GWO algorithm. This algorithm has a wide range of applications ³²⁻³³. The algorithm's underlying philosophy was

developed by mimicking the social lives and hunting techniques of gray wolves in the wild. There are three basic hunting behaviors used by grey wolves. Containment, hunting, and assaulting prey are three of these methods. The Root Mean Squared Error (RMSE) was chosen as the optimization objective function in this investigation.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_j^N q_{mj} - q_{sj} \right)^2} \quad (52)$$

The j . value of the master robot is q_{mj} , while the j . value of the slave robot is q_{sj} . $j = 1, 2, 3, 4 \dots N$. The chosen GWO has several advantages when it comes to cost calculation.

The algorithm's working speed is substantially increased because of the GWO architecture. The wolves' social order plays a vital impact in their ability to catch prey, which can quicken the convergence rate and lower computation costs. Briefly, GWO was employed to improve the K_p & K_d parameters. Some GWO settings must be chosen before the optimization process can begin. The size of the wolves will have a direct impact on the optimization's timing and accuracy. Because of the magnitude of the wolf population, more time is dissipated, yet just a few wolf populations may deliver the optimum gain matrix. The GWO algorithm's wolf population was set to 45, the maximum number of iterations to 40, and it was discovered that the optimum values were attained. The master and slave robots in this study each have six degrees of freedom (DOF). $m_{m1} = 0.5 \text{ kg}$, $m_{m2} = 0.75 \text{ kg}$, $m_{m3} = 0.25 \text{ kg}$, $l_{m1} = l_{m2} = 0.132 \text{ m}$, $l_{m3} = 0.23 \text{ m}$ were the physical specifications of the master robot. The slave robot's physical characteristics were $m_{s1} = 27 \text{ kg}$, $m_{s2} = 22 \text{ kg}$, $m_{s3} = 25 \text{ kg}$, $l_{s1} = 0.352 \text{ m}$, $l_{s2} = 0.360 \text{ m}$, and $l_{s3} = 0.545 \text{ m}$. Human and environmental models have stiffness values of $k_h = k_e = 10 \text{ N/m}$ and damping coefficients of b_h and $b_e = 2 \text{ Ns/m}$. In addition, when acquiring human and environmental torque values, the

initial conditions were $x_0 = y_0 = z_0 = 0$. During the system's control, the operational time was set to 20 seconds. The graphics produced as a result of the system's control are shown below. A filter with a lower than 2-degree angle is used to obtain graphics.

In this study, the results obtained using the ACTC method were compared with each other to better understand the OACTC+RAC method. Figures 5 and 6 illustrate the joint angle position and torque tracking graphs obtained with the ACTC approach in the existence of both dynamic and dead zone uncertainty of the teleoperation system comprised of master and slave robots.

Figure 5. The ACTC method's position tracking graph in the existence of both dynamic and dead zone uncertainty (without dead zone compensation)

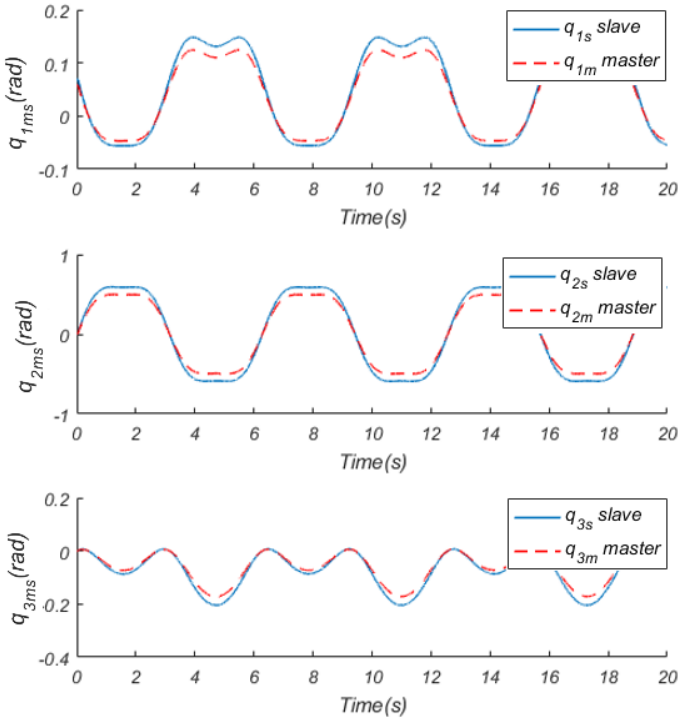
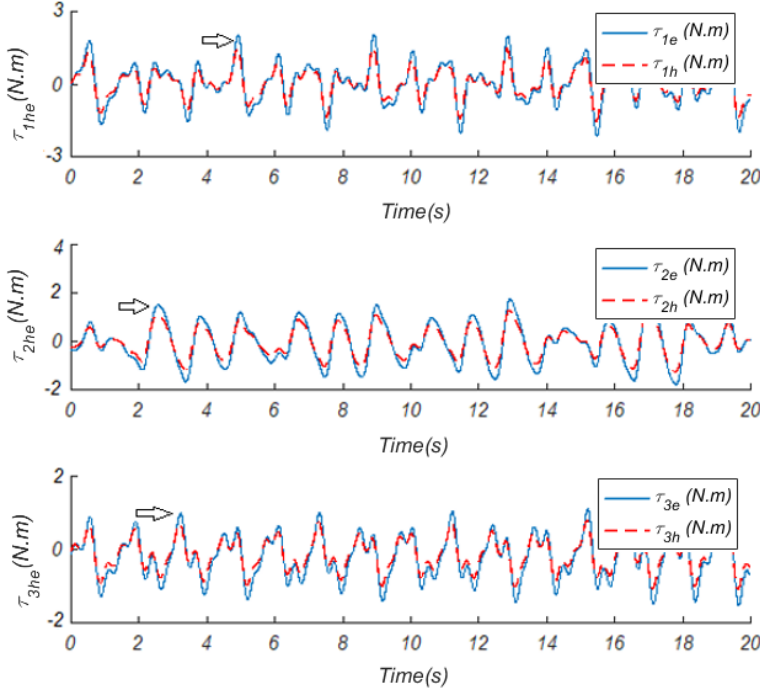


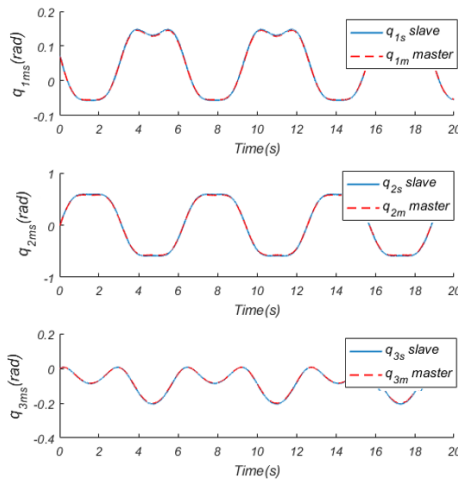
Figure 6. The ACTC method's torque tracking graph in the existence of both dynamic and dead zone uncertainty (without dead zone compensation)



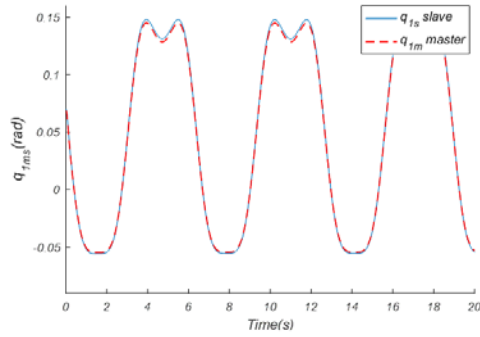
When looking at the angular position tracking graphics of the master and slave robots shown in Figure 5, it is noticed that the 1st joint's angular position performance ranges between roughly $+0.15 \sim (-0.06)$ radians. When looking at the angular position of the 2nd joint, it is noticed that it ranges between roughly $+0.6 \sim (-0.6)$ radians. According to the angular position graph of the 3rd joint, it is viewed that the position values change roughly in the range of $0 \sim (-0.2)$ radians. When looking at the human and environmental torque graph in Figure 6, it can be seen that the 1st joint's torque performance varies between $3 \sim (-3)$ Newton-meters (N.m). According to the human and environmental torque graph of the 2nd joint, it is seen that the values change roughly around $+2 \sim (-2)$ N.m. According to the

human and environmental torque graph of the 3rd joint, it is seen that the values change around $+1.5 \sim (-1.5)$ N.m. When examined in the graphics, it is observed that the force monitoring performance of the system decreases, as indicated by the arrow signs, when the dead zone is not taken into account. When Figures 5 and 6 are examined, tracking errors are observed in both position and human and environmental torque tracking performance, which causes performance loss. It seems clear that tracking errors of these positions and torque tracking errors cannot converge to zero. Position tracking performance of the OACTC+RAC control method proposed compensating both dynamic and dead zone uncertainties of the teleoperation system occur master and slave robots in Figure 7 a) angular position of all joint angles b) 1st joint, c) 2nd joint, and d) 3rd joint position graphs are given. Position error graphs of joint positions are shown in Figure 8. In Figure 9, the torque graph of the suggested OACTC + RAC control method to make up for both dynamic and dead zone uncertainties is given. The torque tracking error graphs acquired utilizing the OACTC + RAC control method are illustrated in Figure 10.

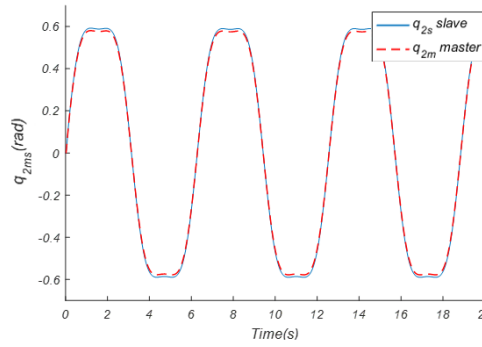
a. The angular position of all joint



b. 1. joint



c. 2. Joint



d. 3. joint

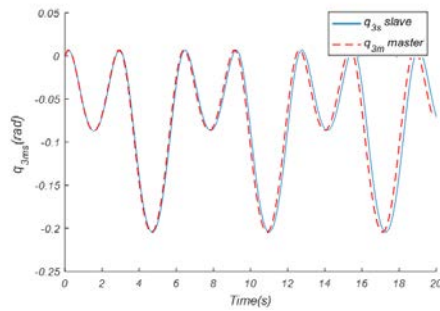


Figure 7. The OACTC + RAC method's position tracking graph in the existence of both dynamic and dead zone uncertainty

Figure 8. The OACTC + RAC method's position tracking error graph in the existence of both dynamic and dead zone uncertainty

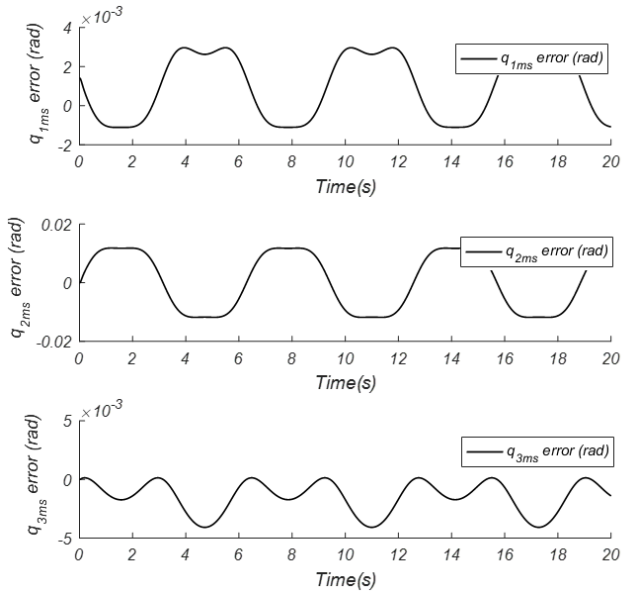


Figure 9. The OACTC + RAC method's torque tracking graph in the existence of both dynamic and dead zone uncertainty

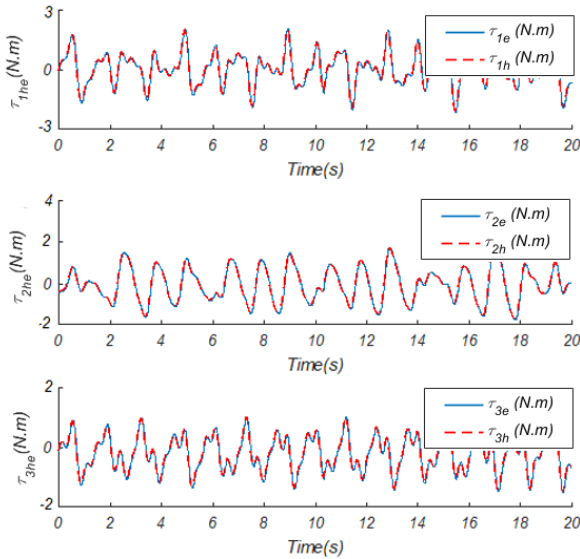
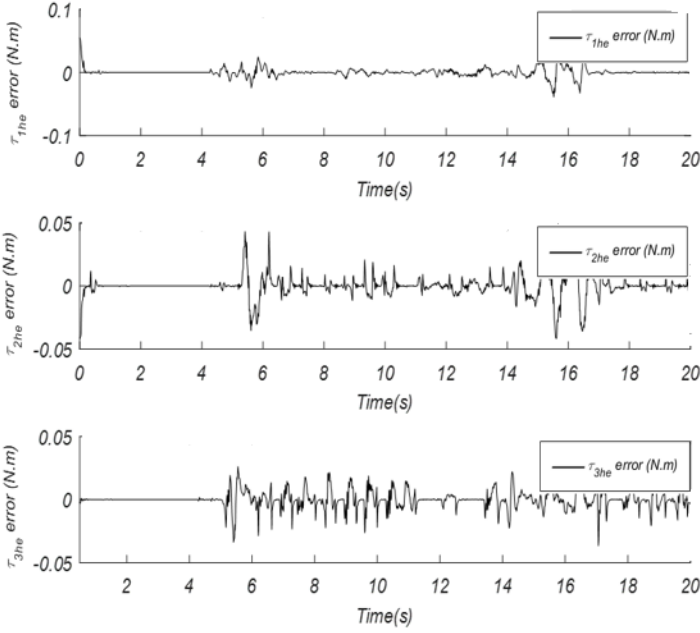


Figure 10. The OACTC + RAC method's torque tracking error graph in the existence of both dynamic and dead zone uncertainty



According to the angular position graph of the 1st joint obtained using the OACTC+RAC method, it is seen that the position values change roughly around $+0.15 \sim (-0.06)$ radians (see Figure 7). According to the angular position graph of the 2nd joint shown in Figure 7, it is viewed that the position values change roughly around $+0.6 \sim (-0.6)$ radians. According to the angular position graph of the 3rd joint, it is observed that the position values change roughly around $0 \sim (-0.2)$ radians. According to the angular position error graph of the 1st joint obtained using the OACTC+RAC method, it is seen that the position error values change roughly around $+0.1 \sim (-0.1)$ radians (see Figure 8). According to the angular position graph of the 2nd joint shown in Figure 8, it is viewed that the position values change roughly around $+0.1 \sim (-0.1)$ radians. According to the angular position error graph of the 3rd joint, it is observed that the

position values change roughly around $+0.2 \sim (-0.2)$ radians. The torque tracking performance at the 1st joint varies between $2.5 \sim (-2.5)$ N.m, according to the human and environment torque tracking graphs shown in Figure 9. When comparing the results of human and environmental torque measurement at the 2nd joint, it was examined that they vary by about $+2 \sim (-2)$ N.m. According to the torque graph of the 3rd joint, it is observed that the torque values change roughly around $+1.5 \sim (-1.5)$ N.m. The torque tracking error performance at the 1st joints fluctuates between $2.5 \sim (-2.5)$ N.m., as seen in the human and environment torque tracking error graphs in Figure 10. When comparing the results of human and environmental torque measurement at the 2nd joint, it was observed that they differ by about ± 0.05 N.m. According to the human and environmental torque graph of the 3rd joint, it is observed that the torque error values change roughly around $+0.025 \sim -0.040$ N.m. It is also clearly viewed in the graphs given in Figures 7-9 and 10 that the position and torque tracking errors decrease considerably to converge to zero. It is seen that the error performances are in the acceptable range looking at the graphics in general. The key reason for the suggested OACTC-RAC method's improved performance is that it uses the GWO algorithm to improve the performance of the ACTC method's control coefficients while also using the RAC approach for the dead zone problem. Furthermore, two different performance criteria Mean Square Error (MSE) and Mean Absolute Error (MAE) were used to numerically analyze the position and torque tracking errors of the methods.

$$MSE = \frac{1}{N} \left(\sum_j^N y_{m_j} - y_{s_j} \right)^2 \quad (53)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \left(\sum_j^N |y_{m_j} - y_{s_j}| \right) \quad (54)$$

The master robot's value is denoted by y_{mj} , while the value of j . is denoted by j . The slave robot's worth was given by y_{sj} . The angle (q & τ) expression is represented by $j = 1, 2, 3, 4 \dots N$. Table 1 illustrates the comparison table of the performance results of the joint angles position error obtained by using ACTC (without dead zone compensation) and OACTC + RAC (with dead zone compensation) methods according to MAE and MSE criteria. Table 2 shows the comparison table of the performance results of human-operator and environment torque error values acquired by utilizing ACTC (without dead zone compensation) and OACTC + RAC (with dead zone compensation) methods according to MAE and MSE criteria.

Table 1. The performance comparisons of the angular position error (rad) using MAE and MSE

a) MAE			b) MSE		
Control type/Criteria	ACTC	OACTC +RAC	Control type/Criteria	ACTC	OACTC +RAC
MAE(q_1)	0.2946	0.1219	MSE (q_1)	0.2241	0.1098
MAE(q_2)	0.2732	0.1158	MSE(q_2)	0.2408	0.0943
MAE(q_3)	0.2186	0.1044	MSE (q_3)	0.1921	0.0721

Table 2. The performance comparisons of the torques tracking error (N.m) using MAE and MSE

a) MAE			b) MSE		
Control type/Criteria	ACTC	OACTC +RAC	Control type/Criteria	ACTC	OACTC +RAC
MAE(τ_1)	0.9862	0.2171	MSE(τ_1)	0.3724	0.0766
MAE(τ_2)	0.7284	0.4158	MSE(τ_2)	0.3827	0.0445
MAE(τ_3)	0.3173	0.1525	MSE(τ_3)	0.1254	0.0041

According to the performance error result table obtained using the ACTC method according to the MAE criteria given in Table 1 a), the error values of the 1st, 2nd, and 3rd joints are 0.2946, 0.2732, and 0.2186 radians, respectively. Similarly, according to the performance error result table obtained using the

OACTC + RAC method according to the MAE criteria given in Table 1 a), the error values of the 1st, 2nd, and 3rd joints are 0.1219, 0.1158, and 0.1044 radians, respectively. According to the performance error result table obtained using the ACTC method according to the MSE criteria given in Table 1 b), the error values of the 1st, 2nd, and 3rd joints are 0.2241, 0.2408, and 0.1921 radians, respectively. Similarly, according to the performance error result table obtained using the OACTC + RAC method according to the MSE criteria given in Table 1 b), the error values of the 1st, 2nd, and 3rd joints are 0.1098, 0.0943, and 0.0721 radians, respectively. According to the torque performance error result table obtained using the ACTC method according to the MAE criteria given in Table 2 a), the error values of the 1st, 2nd, and 3rd joints are 0.9862, 0.7284, and 0.3173 N.m, respectively. According to the torque error result table obtained using the OACTC + RAC method according to the MAE criteria illustrated in Table 2 a), the error values of the 1st, 2nd, and 3rd joints are 0.2171, 0.4158, and 0.1525 N.m, respectively. According to the torque performance error result table obtained using the ACTC method according to the MSE criteria given in Table 2 b), the error values of the 1st, 2nd, and 3rd joints are 0.3724, 0.3827, and 0.1254 N.m, respectively. According to the torque error result table obtained using the OACTC + RAC method according to the MSE criteria illustrated in Table 2 b), the error values of the 1st, 2nd, and 3rd joints are 0.0766, 0.0445, and 0.0041 N.m, respectively. When comparing the findings of the a) MAE and b) MSE criteria in Tables 1 and 2, the ACTC technique has a higher position and torque-tracking error. Position and force tracking errors are considerably improved when using the OACTC + RAC technique. In general, considering the position and torque tracking error values, the OACTC + RAC method and the MSE performance criterion have shown superior performance between the two methods. The results obtained by Liu and Tavakoli [24] using the Bilateral adaptive control method MSE criteria were

compared with the OACTC + RAC control method suggested in Table 3. Figures 11 and 12 indicate a comparison of the suggested approach, OACTC control, with ACTC and Bilateral adaptive control [24] methods using MSE performance criteria.

Table 3. The performance comparisons of the angular position tracking error (rad) and torque tracking error (N.m) with a study in the literature

Control type	Angular position tracking error (rad)		Torque tracking error (N.m)	
	MSE(q_1)	MSE(q_2)	MSE(τ_1)	MSE(τ_2)
Proposed Method (OACTC+RAC)	0.1098	0.0943	0.0766	0.0445
Bilateral adaptive control [24]	0.1286	0.2016	0.2135	0.2355

Figure 11. The performance comparison graph of the q_1 angular position (rad) and τ_1 torque (N.m) with a study in the literature

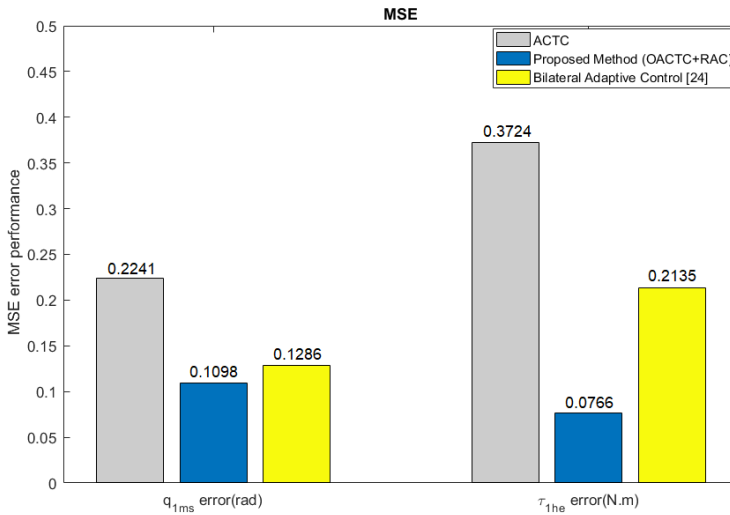
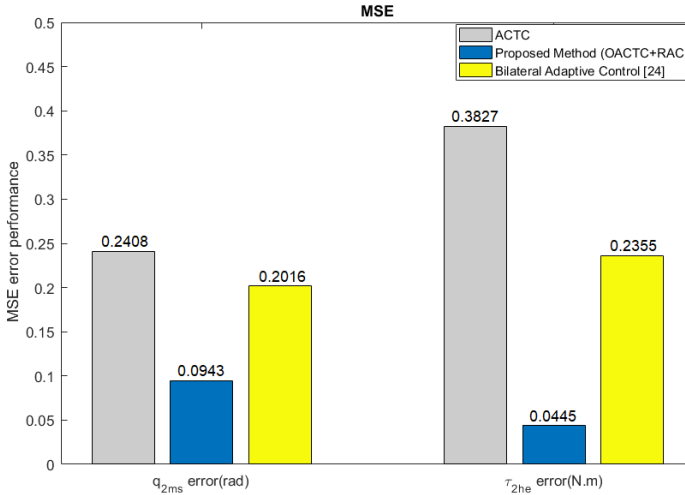


Figure 12. The performance comparison graph of the q_2 angular position (rad) and τ_2 torque (N.m) with a study in the literature



Considering the performance results given in Table 3, Figures 11 and 12, it is seen that the recommended OACTC + RAC method for both position tracking and torque tracking error shows superior performance compared to the reference given in the table and graphs. Generally, it has been observed that the error values achieved according to the performance criteria are admissible. When the simulation results are evaluated, it is discovered that the slave robot follows the master robot's reference position information satisfactorily. Furthermore, it is viewed that the torque values acquired as a result of the system's interaction on the slave robot's side are successfully transmitted to the master robot's side. The suggested OCTC and RAC methods, despite the dynamic uncertainties and dead zones, demonstrate a stable and well-angular position and torque tracking performance, as shown in the graphs and tables provided by the study.

5. CONCLUSIONS

In this study, dynamic parameter uncertainty and dead zone problems that affect the position and force tracking performance of teleoperation robotic systems are examined. To eliminate the parameter uncertainty from these problems, the Optimally Adaptive Computed Torque Control (OACTC) method, in which control coefficients are obtained using the Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm, and the Robust Adaptive Control (RAC) method for the dead zone problem have been proposed and applied. Separate adaptation rules were created for both problems and applied simultaneously to the system. The results were compared graphically and numerically with each other and interpreted. In addition, it has been compared with a previous study in literature (Table 3, Figures 11 and 12). It has been observed that the performance results have acceptable error rates in bilateral control, thus it has been observed that the performance has increased. The main reason for the proposed OACTC+RAC method to perform better is to raise the performance of the control coefficients of the ACTC method by using the GWO algorithm and simultaneously using the RAC method for the dead zone problem. The method can be developed for problems such as backlash and hysteresis by using different objective functions and creating different adaptation rules.

Acknowledgment

The subject of this study was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) within the scope of the 2211/C Domestic Priority Doctoral Scholarship Program.

Declaration of Conflicting Interests: The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the

work reported in this paper. On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

Ethical approval: This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

Appendix A

$$J_m = \begin{bmatrix} -\cos \theta_1 (l_2 \sin \theta_3 + l_1 \cos \theta_2) & l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 & -l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_3 \\ 0 & l_1 \cos \theta_2 & l_2 \sin \theta_3 \\ -l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3 - l_1 \sin \theta_1 \cos \theta_2 & l_1 \sin \theta_2 \cos \theta_1 & l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 \end{bmatrix} \quad (A1)$$

$$J_z = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 (l_1 \cos \theta_2 - l_2 \sin \theta_2 \sin \theta_3) & -\cos \theta_1 (l_2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + l_1 \sin \theta_2) & -l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_3 \\ -\sin \theta_1 (l_1 \cos \theta_2 - l_2 \sin \theta_2 \sin \theta_3) & -\sin \theta_1 (l_2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + l_1 \sin \theta_2) & l_2 \sin \theta_2 \\ 0 & l_2 \cos \theta_2 - l_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 & l_2 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \end{bmatrix} \quad (A2)$$

REFERENCES

- [1]Yang G. H., Zhang Z., Yang L., Deng J., You S., Du J., Yang H. Keep healthcare workers safe: application of teleoperated robot in isolation ward for COVID-19 prevention and control *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020; 33 (1): 1-4.
- [2]Abut T., Soyguder S. Optimal adaptive computed torque control for haptic-teleoperation system with uncertain dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2022; 236(4): 800-817.
- [3] Zarei, M., Kalhor, A., Tale Masouleh, M. An experimental oscillation damping impedance control for the novint falcon haptic device based on the phase trajectory length function concept. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019; 233(8): 2663-2672.
- [4]Chao, G., Bo, P., Guojun, N., Yili, F. Modeling and design optimization of master manipulator for robot-assisted minimally invasive surgery. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022; 09544062221128695.
- [5]Cheah C.C., Liu C., Slotine J.J.E. Adaptive tracking control for robots with unknown kinematic and dynamic properties, *The International Journal of Robotics Research*, 2006; 25(3): 283-296.
- [6]Nuño E., Ortega R., Basañez L. An adaptive controller for nonlinear teleoperators, *Automatica*, 2010; 46(1):155-159.
- [7]Liu X., Tavakoli M. Adaptive control of teleoperation systems with linearly and nonlinearly parameterized dynamic

- uncertainties, *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 2012; 134(2).
- [8]Wang H. Passivity based synchronization for networked robotic systems with uncertain kinematics and dynamics, *Automatica*, 2013; 49(3): 755-761.
- [9]Liu X., Tao R., Tavakoli M. Adaptive control of uncertain nonlinear teleoperation systems, *Mechatronics*, 2014; 24(1): 66-78.
- [10]Liu Y. C., Khong M. H. Adaptive control for nonlinear teleoperators with uncertain kinematics and dynamics, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015; 20(5): 2550-2562.
- [11]Wang H., Adaptive control of robot manipulators with uncertain kinematics and dynamics, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, 62(2): 948-954.
- [12]Abut T., Soyguder S. Real-time control of bilateral teleoperation system with adaptive computed torque method, *Industrial Robot: An International Journal*. 2017; 44(3): 299-311.
- [13]Li Y., Yin Y., Zhang D. Adaptive task-space synchronization control of bilateral teleoperation systems with uncertain parameters and communication delays, *IEEE Access*, 2018; 6: 5740-5748.
- [14]Kebria P. M., Khosravi A., Nahavandi S., Shi P., Alizadehsani R. Robust adaptive control scheme for teleoperation systems with delay and uncertainties, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019;1–11.
- [15]Yang L., Chen Y., Liu Z., Chen K., Zhang Z. Adaptive fuzzy control for teleoperation system with uncertain kinematics and dynamics, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2019;17(5): 1158-1166.

- [16] Mehrjouyan A., Menhaj M. B., Khosravi M. A. Robust observer-based adaptive synchronization control of uncertain nonlinear bilateral teleoperation systems under time-varying delay. *Measurement*, 2021; 182:109542.
- [17] Passenberg C., Peer A., Buss M. A survey of environment-, operator-, and task-adapted controllers for teleoperation systems. *Mechatronics*, 2010; 20(7): 787-801.
- [18] Chan L., Naghdy F., Stirling D. Application of adaptive controllers in teleoperation systems: A survey. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2014; 44(3): 337-352.
- [19] Zhang S., Yuan S., Yu X., Kong L., Li Q., Li G. Adaptive neural network fixed-time control design for bilateral teleoperation with time delay. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2022; 52(9): 9756-9769.
- [20] Li Y., Zhang K., Liu K., Johansson R., Yin Y. Neural-network-based adaptive control for bilateral teleoperation with multiple slaves under Round-Robin scheduling protocol. *International Journal of Control*, 2021; 94(6): 1461-1474.
- [21] Yang Y., Zeng X., Hua C. Continuous fixed-time synchronization control for uncertain industrial master-slave robotics system with improved transparency. *Journal of the Franklin Institute*. 2022.
- [22] Tao G., Kokotovic P. V. Adaptive control of plants with unknown deadzones, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994; 39(1): 59-68.
- [23] Wang X. S., Su C. Y., Hong H. Robust adaptive control of a class of nonlinear systems with unknown dead-zone, *Automatica*, 2004; 40(3): 407-413.

- [24] Wang H., Liu W., Liu P. X., Lam H. K. Adaptive fuzzy decentralized control for a class of interconnected nonlinear system with unmodeled dynamics and dead zones. *Neurocomputing*, 2016; 214: 972-980.
- [25] Zhou Q., Zhao S., Li H., Lu R., Wu C. Adaptive neural network tracking control for robotic manipulators with dead zone, *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 2018; 30(12):3611-3620.
- [26] Zhang D., Kong L., Zhang S., Li Q., Fu Q. Neural networks-based fixed time control for a robot with uncertainties and input deadzone, *Neurocomputing*, 2020; 390:139-147.
- [27] Liu X., Jiang W., Dong X. C. Nonlinear adaptive control for dynamic and dead-zone uncertainties in robotic systems, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2017; 15(2): 875-882.
- [28] Liu X., Tavakoli M. Bilateral adaptive control of nonlinear teleoperation systems with uncertain dynamics and dead-zone, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2018; 140(12).
- [29] Lewis F. L., Tim W. K., Wang L. Z., Li Z. X. Deadzone compensation in motion control systems using adaptive fuzzy logic control, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1999; 7(6):731-742.
- [30] Chen Y., Ma G., Lin S., Gao J. Adaptive fuzzy computed-torque control for robot manipulator with uncertain dynamics, *International journal of advanced robotic systems*, 2012; 9(6): 237.
- [31] Shang W. W., Cong S., Ge Y. Adaptive computed torque control for a parallel manipulator with redundant actuation, *Robotica*, 2012; 30(3): 457.

- [32] Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A. Grey wolf optimizer, *Advances in engineering software*, 2014; 69: 46-61.
- [33] Faris H., Aljarah I., Al-Betar M. A., Mirjalili S. Grey wolf optimizer: a review of recent variants and applications, *Neural computing and applications*, 2018; 30(2): 413-435.

ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF LIGNOCELLULOSIC FIBER FILLED POLYPROPYLENE COMPOSITES FOR ENGINEERING APPLICATIONS

Mustafa ÖNCÜL¹

1. INTRODUCTION

Polypropylene (PP) is a widely used thermoplastic polymer known for its high mechanical strength, chemical resistance, and ease of processing, making it suitable for diverse applications, including the aviation, automotive, and defense industries (Al-Oqla & Sapuan, 2014; Tripathi, 2002). Considering the current environmental concerns and the increasing demand for sustainable materials, improving the properties of polypropylene with the addition of lignocellulosic fillers is seen as an environmentally friendly option (Alshammari et al., 2019). Lignocellulosic fibers, used in this study to improve polypropylene's performance and reduce its environmental impact, are particularly significant due to their biodegradability, renewability, and cost-effectiveness (Pickering, Efendy, & Le, 2016). Incorporating these fibers into polypropylene has been shown to directly influence the material's mechanical properties (Ku, Wang, Pattarachaiyakoop, & Trada, 2011). Many studies in the literature have explored natural fiber reinforced polypropylene (Gholampour & Ozbakkaloglu, 2020; Savran, Öncül, Yılmaz, Aydın, & Sever, 2023). There is significant

¹ Dr., İzmir Katip Çelebi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering., mustafa.uncul@ikcu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4441-6353.

research activity focused on improving the mechanical, thermal, and environmental performance of polypropylene by incorporating various reinforcement materials (Jawaid & Khalil, 2011; Wambua, Ivens, & Verpoest, 2003). In particular, natural fiber reinforcements, such as those derived from lignocellulosic sources, contribute to material sustainability, enhancing its eco-friendliness and long-term viability (John & Thomas, 2008). This field of study is notable for its efforts in increasing and optimizing performance properties (Faruk, Bledzki, Fink, & Sain, 2012). Additionally, surface treatments and the use of compatibilizer to improve the interfacial adhesion between natural fibers and the polypropylene matrix are crucial topics (Mylsamy et al., 2024; Soni et al., 2024). The literature primarily focuses on specific fiber types and their combinations with polypropylene, presenting optimizations tailored to specific applications. However, there is a noticeable gap in the comprehensive analysis of varying fiber ratios, processing conditions, and their effects on composite performance. Moreover, many studies offer limited mechanical testing and lack sufficient examination of the long-term behavior of these materials under sustained loads (Oyedeji et al., 2024).

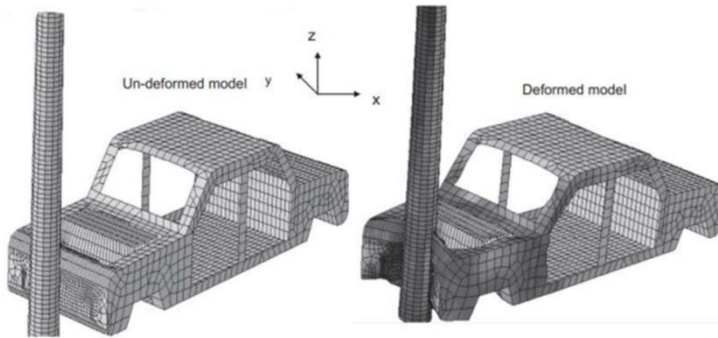
The Finite element method (FEM) is a widely employed computer simulation technique in engineering and the physical sciences, utilized for analyzing the behavior of complex structures and materials (Norrie & De Vries, 2014). This method subdivides an object into a finite number of elements, allowing for detailed mathematical examination of each component's behavior and facilitating insights into the material's response under realistic conditions (Bathe, 2006). In this study, the ANSYS software (licensed by İzmir Katip Çelebi University), a robust tool specifically designed for finite element analysis, was employed to model the mechanical behavior of materials. The integration of ANSYS with FEM provides engineers with a deeper understanding of material behavior while significantly

reducing both costs and time associated with the design process (Hibbitt, Karlsson, & Sorensen, 1997). FEM is particularly advantageous for detailed analyses of complex materials such as composites, as it allows for the examination of stress, deformation, and other mechanical properties at the micro-level (Alade & Ibrahim, 2022). Furthermore, FEM analyses can be seamlessly integrated with experimental test data, enabling a comparison of theoretical predictions with practical outcomes. This integration allows for an enhanced understanding of material performance under real-world conditions and can be used as a replacement for large-scale or costly physical tests, thereby saving resources (David Müzel, Bonhin, Guimarães, & Guidi, 2020). Ultimately, the use of FEM supports the improvement and development of material models, leading to enhanced performance in industrial applications and reduced costs (Kim, Sankar, & Kumar, 2018).

In the aviation sector, composites are employing the manufacturing of fuselages, wings, engine components, and interior structures. Their lightweight nature contributes significantly to reducing aircraft weight, thereby enhancing fuel efficiency and streamlining maintenance and repair processes (Jones, 1999; Nikishkov, 2004). FEM plays a critical role in analyzing the strength and fatigue of aircraft structures, as well as in the iterative process of design improvements based on operational conditions (Zienkiewicz & Taylor, 2005). Similarly, in the automotive industry, composite materials are utilized to improve durability, reduce vehicle weight, and enhance fuel efficiency, directly aligning with industry goals of optimizing performance and efficiency (David Müzel et al., 2020; Norrie & De Vries, 2014). FEM is extensively applied in mechanical testing, crash simulations, and material optimization of automotive components, providing valuable insights into material behavior under different scenarios. For instance, analysis of

vehicle crash tests as illustrated in Figure 1, such as those conducted by Abdel-Nasser (2013) assists in selecting suitable materials and implementing design improvements based on the results obtained.

Figure 1. Vehicle crash test application with FEM



Source: (Abdel-Nasser, 2013)

This study aims to evaluate the mechanical performance of polypropylene and its composites. Utilizing a developed methodology and advanced simulation techniques, this research seeks to provide deeper insights into this critical area of materials science and deliver innovative solutions for industrial applications. The findings are predicted to contribute to the development of sustainable material designs.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

In this study, thermoplastic polypropylene (LG M1500, PP) used as matrix material and malva stem particles used as a lignocellulosic filler (LF) material. Particles between 100 and 250 micrometers were used to produce the composites. 10% LF filled PP composites (PPC) were produced by using a high-speed thermokinetic mixer and a heated-cooled hydraulic press (İzmir

Katip Çelebi University Laboratories). The material properties are summarized in Table 1.

Table 1. Materials properties

	Density (g/ cm ³)	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio
PP	0.9	983.01	0.42
PPC	1.2	1073.28	0.3

2.2.Methods

The mechanical properties of the samples, including tensile strength, tensile modulus, flexural strength, and flexural modulus, were measured using a tensile testing machine (Shimadzu AGS-X, 5 kN, Japan). Tensile tests were performed according to ASTM D638-14, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," with a crosshead speed of 50 mm/min. Flexural tests were carried out following ASTM D790-17, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials," with a crosshead speed of 1 mm/min. Each test was repeated at least five times for each material type to ensure accuracy and reliability.

Numerical analysis for tensile and three-point bending tests were performed using ANSYS software to analyze the deformation responses of materials under applied stress.

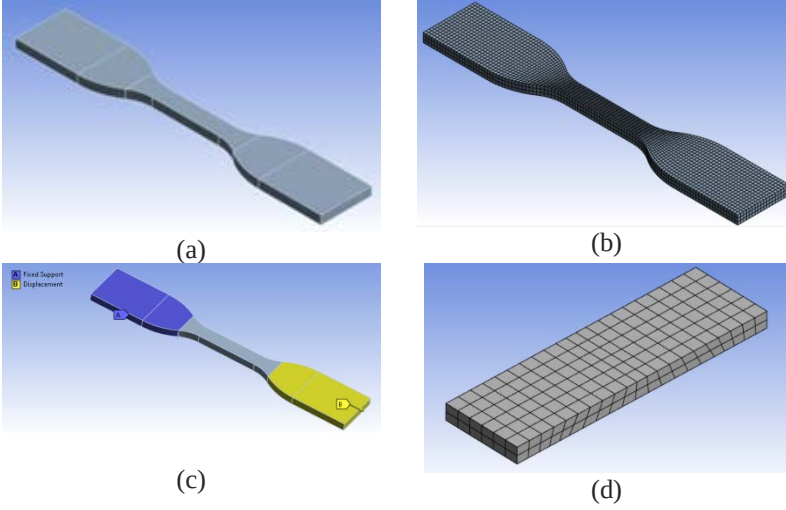
Tensile test simulations were conducted to assess the material's behavior under tension, focusing on its tensile strength, elastic modulus, and breaking point. These simulations, performed using ANSYS software, considered the sample geometry, material properties, and applied loads to ensure accurate representation of experimental conditions. The simulation parameters were adjusted to close the actual testing environment. The results provide insights into the tensile behavior of the sample, including the maximum stress and

deformation characteristics. For PP, the maximum total deformation reached 12.351 mm, with a corresponding maximum equivalent (von Mises) stress of 27.72 MPa. For PPC, the maximum total deformation was 12.429 mm, while the maximum equivalent stress was 24.546 MPa. These results were compared with experimental data to evaluate the accuracy and reliability of the simulation.

Flexural simulations were conducted to evaluate the material's behavior under three-point bending, which is crucial for determining bending strength and deformation response. These simulations, performed using ANSYS software, accounted for the sample geometry, material properties, and applied loads to accurately same experimental conditions. The simulation parameters were carefully adjusted to reflect real-world testing scenarios. The results provide insights into the sample's bending strength, maximum deformation, and post-bending behavior. To assess the accuracy and reliability of the simulation, these results were compared with experimental findings. For PP, the simulations revealed that the material exhibited a certain level of flexural strength, with a maximum equivalent stress of 2.23 MPa and a maximum total deformation of 5.247 mm. The analysis of the material's behavior after bending indicated that the deformation was uniformly distributed. Similarly, for PPC, the flexural simulations demonstrated a specific flexural strength, with a maximum equivalent stress of 1.866 MPa and a maximum total deformation of 5.1233 mm. Post-bending analysis of the composite showed that deformation was evenly distributed, and the material remained stable after bending.

ANSYS simulations provide visual representations of the stress distribution, deformation, and other mechanical properties of the material. The images, given in Figure 2, facilitate a better understanding of the material's behavior by allowing comparisons with experimental results.

Figure 2. a. Finished geometry, b. Meshing geometry for tensile test (mesh size = 1 mm), c. Explicit dynamics boundaries, d. Meshing geometry (mesh size = 1 mm) for three-point bending test.



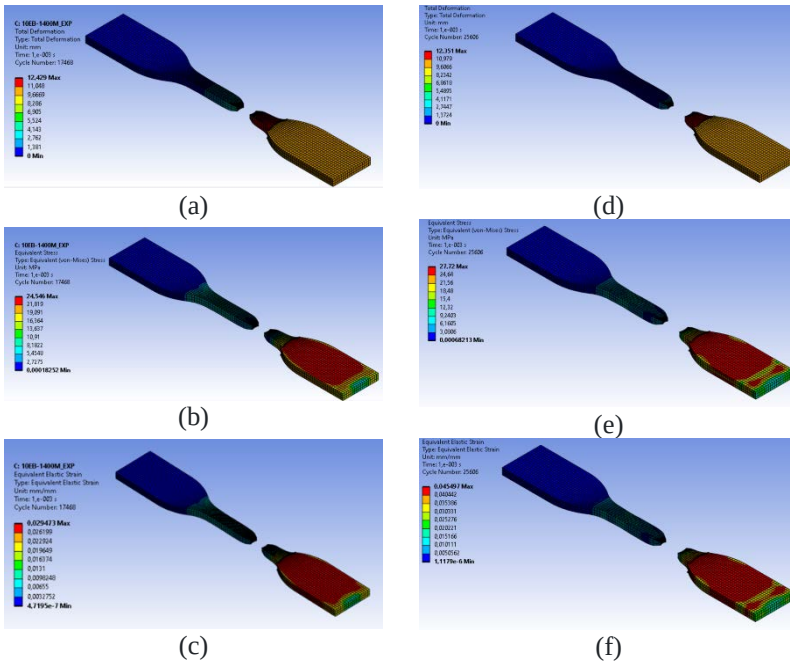
3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1.Tensile Test Results

Total deformation and equivalent stress analysis result for both PP and PPC are given in Figure 3. For PPC, Figure 3 (a-c), the results indicated that the material experienced a maximum deformation of 12.429 mm, demonstrating its theoretically high elasticity. When this deformation was analyzed in terms of strain, the equivalent elastic strain was calculated to be 0.030 mm/mm, which is 1.1% lower than the experimental results. This discrepancy highlights a potential area for calibration within the simulation model. Overall, the comparison of the current results shows that the simulation successfully reflects real test conditions and material behavior while providing a better prediction of the material's potential performance.

For PPC, the analysis indicated that it experienced a maximum equivalent stress of 24.5 MPa, which is significantly higher than the 15.8 MPa obtained from experimental tests. This difference underscores the material's high strength potential as predicted by the simulation. In terms of maximum stress, the experimental results measured 15.8 MPa, suggesting that the material does not exhibit the same level of structural strength as indicated in the simulation. Additionally, the maximum strain value recorded in the experimental tests was 0.041 mm/mm, indicating that the material elongates similarly to the simulation results.

Figure 3. a. Total deformation result of PPC, b. Equivalent stress result of PPC, c. Equivalent elastic strain result of PPC, d. Total deformation result of PP, e. Equivalent stress result of PP, f. Equivalent elastic strain result of PP



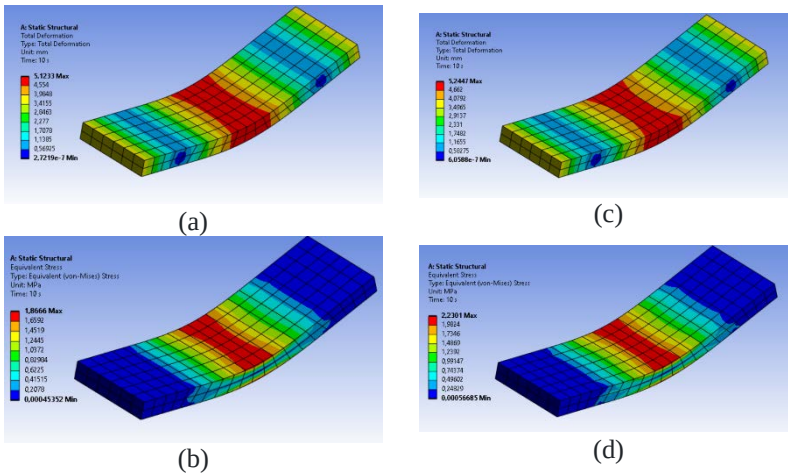
According to the simulation results, Figure 3 (d-f), the PP experienced a maximum deformation of 12.351 mm, leading to a

calculated strain of 0.045 mm/mm. This result is in close agreement with experimental test findings, suggesting a higher simulated strain value for the material. The simulation indicated that PP remains under a maximum von Mises stress of 27.72 MPa, reflecting its high strength. When comparing the simulation results with experimental tests, it is evident that the simulation aligns closely with experimental data, indicating that the material exhibits greater strength than initially measured. The maximum stress recorded in experimental tests was found to be 22.79 MPa, highlighting a significant difference that suggests the simulation material could withstand greater stress. Additionally, the maximum strain obtained from experimental tests was recorded at 0.0357 mm/mm, indicating that the simulation accurately represents material behavior and shows potential for improvement.

3.2.Three-point Bending Test Results

Total deformation and equivalent stress analysis result for both PP and its composites are given in Figure 4.

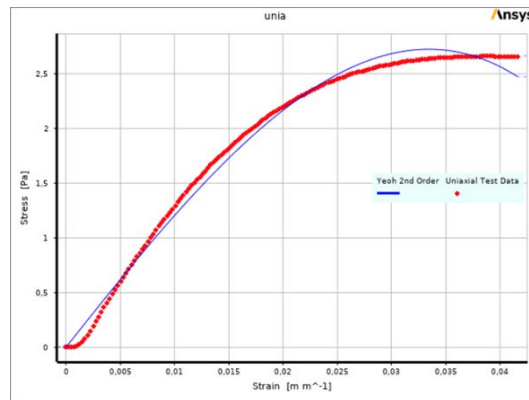
Figure 4. a. Total deformation result of PPC, b. Equivalent stress result of PPC, c. Total deformation result of PP, d. Equivalent stress result of PP.



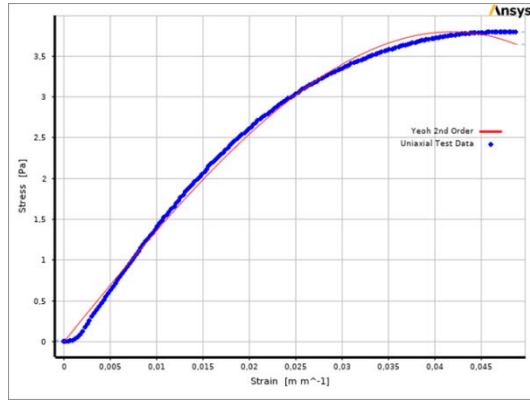
According to the simulation results, the PP material experienced a maximum deformation of 5.24447 mm, resulting in a calculated strain value of 0.158 mm/mm. The simulation predicted that PP was subjected to a maximum von Mises stress of 2.2301 MPa. In comparison, the maximum stress value measured experimentally was 2.694978 MPa, indicating that the simulation predicted a stress approximately 17% lower than the experimental results. This discrepancy suggests that while the simulation model effectively predicts stress values, it struggles to align with the results observed in real test conditions.

Additionally, the maximum strain recorded in experimental tests was 0.130901 mm/mm, while the ANSYS simulation estimated the maximum strain for PP to be approximately 15.8% higher than the experimental value of 13.0901%. This indicates that the simulation predicts elongation that is around 20.7% greater than what was observed experimentally.

Figure 5. Yeoh model prediction versus experimental data, a. for PPC, and b. for PP.



(a)



(b)

Based on the stress-strain data obtained from the tensile uniaxial tests conducted on the composite material in the experimental setup, the ANSYS simulation identified the Yeoh 2nd Order Hyperelastic material model as the best fit for accurately replicating the test results as given in Figure 5. This model demonstrated a strong correlation between the experimental and simulated data, providing a reliable representation of the material's nonlinear behavior. The use of the Yeoh model enables better predictions of the material's performance under various loading conditions, making it a valuable tool for future design and analysis (Yeoh, 1993).

4. CONCLUSION

This study aimed to analyze the mechanical properties of polypropylene PP and its composite (PPC), focusing on evaluating and comparing their tensile and flexural behaviors through experimental tests and finite element modeling (FEM). The simulations for PP predicted higher stress and strain values than those observed in experimental results, suggesting that the simulations overestimated the material's behavior. In contrast, the simulations for the composite material more accurately represented the strain and stress, aligning closely with

experimental data due to optimized material properties and constraints. These findings highlight the need for further calibration and validation of simulation techniques and material modeling to improve accuracy. Nonetheless, the study provides valuable insights for optimizing material selection and design processes, enabling more precise design optimization and potential reductions in material costs while enhancing product performance—especially crucial in high-performance industries like automotive and aerospace. The integration of simulation and real-world testing demonstrated in this research adds significant value to engineering design, and future research should focus on advancing simulation methods and exploring the long-term fatigue behavior and environmental durability of materials.

REFERENCES

- Abdel-Nasser, Y. A. (2013). Frontal crash simulation of vehicles against lighting columns using FEM. *Alexandria Engineering Journal*, 52(3), 295–299.
- Alade, A., & Ibrahim, A. (2022). Application of Finite Element Method for Mechanical Characterization of Wood and Reconstituted Lignocellulosic-Based Composites–A Review. *Recent Progress in Materials*, 5(01). Retrieved from <https://par.nsf.gov/biblio/10426504>
- Al-Oqla, F. M., & Sapuan, S. M. (2014). Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: Feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry. *Journal of Cleaner Production*, 66, 347–354.
- Alshammari, B. A., Alotaibi, M. D., Alothman, O. Y., Sanjay, M. R., Kian, L. K., Almutairi, Z., & Jawaid, M. (2019). A New Study on Characterization and Properties of Natural Fibers Obtained from Olive Tree (*Olea europaea* L.) Residues. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(11), 2334–2340. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01526-8>
- Bathe, K.-J. (2006). *Finite element procedures*. Klaus-Jurgen Bathe.
- David Müzel, S., Bonhin, E. P., Guimarães, N. M., & Guidi, E. S. (2020). Application of the finite element method in the analysis of composite materials: A review. *Polymers*, 12(4), 818.
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H.-P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Topical Issue on Polymeric Biomaterials*, 37(11), 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>

- Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2020). A review of natural fiber composites: Properties, modification and processing techniques, characterization, applications. *Journal of Materials Science*, 55(3), 829–892. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y>
- Hibbitt, Karlsson, & Sorensen. (1997). *ABAQUS/standard: User's Manual* (Vol. 1). Hibbitt, Karlsson & Sorensen.
- Jawaid, M., & Khalil, H. A. (2011). Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate Polymers*, 86(1), 1–18.
- John, M. J., & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 71(3), 343–364.
- Jones, R. M. (1999). *Mechanics of Composite Materials* (2nd Ed.). CRC Press.
- Kim, N.-H., Sankar, B. V., & Kumar, A. V. (2018). *Introduction to finite element analysis and design*. John Wiley & Sons.
- Ku, H., Wang, H., Pattarachaiyakoop, N., & Trada, M. (2011). A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 42(4), 856–873.
- Mylsamy, B., Shanmugam, S. K. M., Aruchamy, K., Palanisamy, S., Nagarajan, R., & Ayrilmis, N. (2024). A review on natural fiber composites: Polymer matrices, fiber surface treatments, fabrication methods, properties, and applications. *Polymer Engineering & Science*, 64(6), 2345–2373. <https://doi.org/10.1002/pen.26713>
- Nikishkov, G. P. (2004). Introduction to the finite element method. *University of Aizu*, 1–70.
- Norrie, D. H., & De Vries, G. (2014). *The finite element method: Fundamentals and applications*. Academic Press.

- Oyedeji, O. A., Hess, J., Zhao, X., Williams, L., Emerson, R., & Webb, E. (2024). Exploring biofiber properties and their influence on biocomposite tensile properties. *Polymer International*, pi.6696. <https://doi.org/10.1002/pi.6696>
- Pickering, K. L., Efendy, M. A., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98–112.
- Savran, M., Öncül, M., Yılmaz, M., Aydın, L., & Sever, K. (2023). Modeling and optimization of dynamic-mechanical properties of hybrid polymer composites by multiple nonlinear neuro-regression method. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 41(6), 1243–1254.
- Soni, A., Das, P. K., Gupta, S. K., Saha, A., Rajendran, S., Kamyab, H., & Yusuf, M. (2024). An overview of recent trends and future prospects of sustainable natural fiber-reinforced polymeric composites for tribological applications. *Industrial Crops and Products*, 222, 119501.
- Tripathi, D. (2002). *Practical guide to polypropylene* (1st Ed.). Rapra Technology Ltd.
- Wambua, P., Ivens, J., & Verpoest, I. (2003). Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, 63(9), 1259–1264.
- Yeoh, O. H. (1993). Some forms of the strain energy function for rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 66(5), 754–771.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The finite element method for solid and structural mechanics*. Elsevier.

STRUCTURE OF INDUSTRY 4.0-BASED PRODUCTION TECHNOLOGIES AND EVALUATION OF ADAPTATION TO MANUFACTURING INDUSTRY

Erman ZURNACI¹

1. INTRODUCTION

The need for the digitalization of production systems, along with innovative technologies, has initiated a new industrial revolution. Advanced production technologies have increased machine-human interaction, and digitalized production lines have caused a radical change in the industry. Sharpening competition conditions and increasingly diverse customer expectations have led to increased aesthetic needs from products and functionality. Increasing demand and decreasing resources have necessitated the development of different technologies and methods for sustainable and low-cost production in the manufacturing industry. Developing technologies have paved the way for a new industrial revolution.

The new industrial revolution is also necessary to solve problems such as production speed, supply process, and updatable production lines to meet the ever-changing demands of the global economy. In fierce competition conditions, companies must profit from the technological innovations brought by Industry 4.0 to produce faster, more environmentally friendly products at lower costs and in accordance with customer

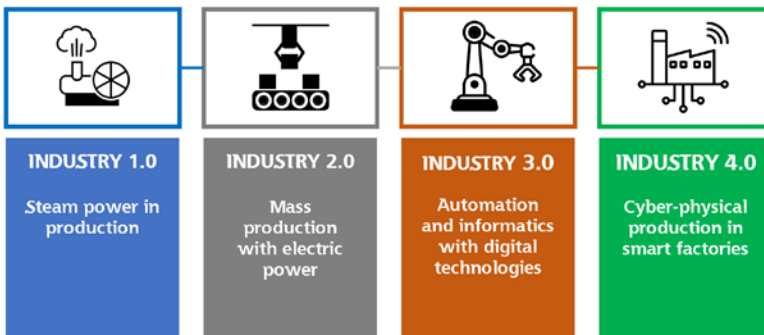
¹ Asst. Prof. Dr., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Kastamonu University, Kastamonu, Turkey.
ermanzurnaci@kastamonu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1298-4054.

expectations. One of the reasons for the slow progress of the fourth industrial revolution is the high costs of digital transformation and the need to renew existing infrastructures. In addition, providing the knowledge and qualified workforce required for digitalization poses a significant challenge, especially in developing economies (Javaid et al., 2024). Various difficulties must be overcome by using innovative technological methods instead of traditional production methods. Overcoming these difficulties will also accelerate the transition to Industry 5.0.

2. INDUSTRIAL 4.0 REVOLUTION AND BASIC TECHNOLOGIES

The latest industrial revolution that we have witnessed is called 'Industry 4.0', and this concept was first used in the German government's high-tech strategy program at the Hannover Fair in 2011, and became more widespread with its inclusion in the World Economic Forum in 2016. With each industrial revolution, production has become increasingly digitalized, and the diminishing human power has been replaced by electronically controlled equipment (Figure 1).

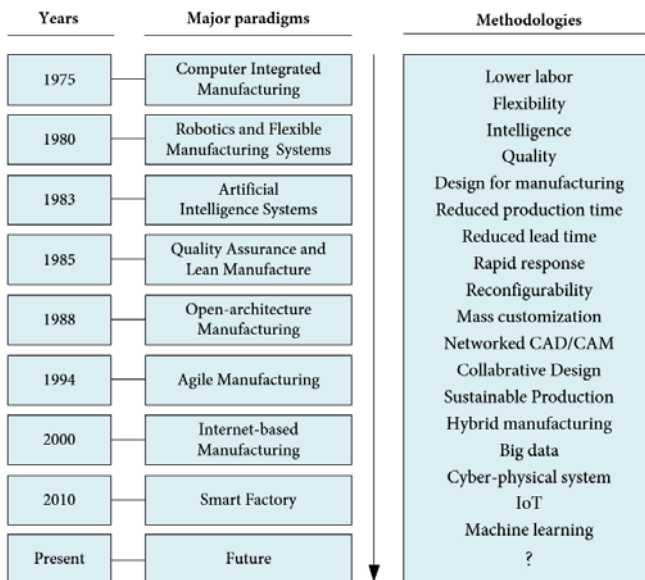
Figure 1. Industrial revolutions and decisive technologies



The main aim of Industry 4.0 is to generate a mechanism that automatically manages all processes from raw material

ordering to production start, from production to waste recycling, in accordance with the customer's individual needs (Neugebauer et al., 2016). With the development of production technologies and the use of these new technologies in different areas of industry, many concepts have emerged in production (Pereira & Romero, 2017). While the first industrial revolution used steam power, now, with the power of electricity, an automated and more sustainable, albeit complex, more efficient production process has become possible (Qin et al., 2016). Changing times, developing technologies, and new approaches that have been produced to respond to changing needs have caused paradigm shifts in industry. Sometimes, the underlying force of innovations is needs, while sometimes, innovative technologies have paved the way for these paradigm shifts (Figure 2). Innovations brought by technological developments have enabled the use of limited resources in different areas, which has resulted in increased productivity and quality.

Figure 2. Historical Process of the Main Paradigms in Production

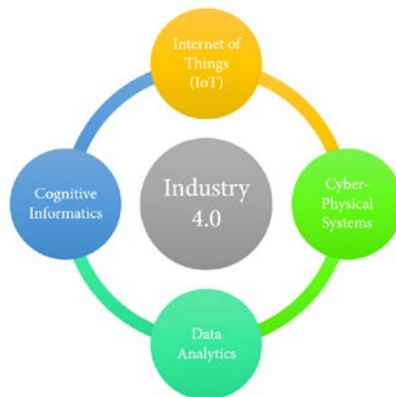


Source: (Wright, 2001)

Different problems that have emerged in production in recent years require the use of Industry 4.0 technologies. In particular, the loss of labor that will begin to occur due to the aging European population will allow Industry 4.0 technologies to take more place in production processes. According to the Economic Policy Committee and the European Commission, the working-age population will decrease by 16% by 2050 (Hewitt, 2002). Autonomous production technologies will reduce the need for unskilled labor while also allowing more resources to be allocated for expert labor.

With each industrial revolution, the need for labor provided by humans has decreased, and instead, machines have started to take more place in production. The digitalizing world has started to leave not only the labor force but also the control of production to computers. Digital computers have led to further advances in communication and communication technologies (Shamim et al., 2016). The realization of the fourth industrial revolution was made possible by the development of four basic technologies (Figure 3). The integration of these technologies with each other enables the digitalization of production. The technologies that form the basis of the fourth industrial revolution can be listed as follows (Thames & Schaefer, 2016):

Figure 3. Key Components of Industry 4.0



Internet of Things (IoT): Internet of Things technology is the interconnection and communication of physical systems via wired or wireless communication methods or the Internet (Witkowski, 2017). Here, sensors collect data in accordance with the system design determined for a predetermined task and this data is transmitted to a processor. The processor interprets and evaluates the data. Then, it is decided what the actuators in the system will do, and this decision is transmitted via electronic communication methods, allowing the work to be done autonomously. This system can be used in many different areas, from smart homes to digitalized production, without the need for human intervention. Especially in factories, errors in the production process can be detected in advance with IoT systems, increased production efficiency and energy optimization can be achieved.

Cognitive Informatics: The production of autonomous systems is possible by developing systems that evaluate the entire production process and can make decisions by converting feedback signals into meaningful information. The discipline that imitates the way the human brain thinks and tries to integrate it into artificial intelligence systems is defined as cognitive informatics (Wang et al., 2020). Cognitive informatics can also be expressed as the ability of systems to manage themselves by working in integration with IoT. Autonomous systems can make decision-making processes faster and more efficient with cognitive informatics-based technologies.

Cyber-Physical Systems: Cyber-physical systems, as the name suggests, are integrated systems where physical systems work together with digital technologies (Zhou et al., 2015). In cyber-physical systems, physical data is collected from sensors integrated into the system, and after being evaluated by decision-making systems, it is transmitted to actuators, and autonomous decision processes are performed. Autonomous vehicles are the

best example of cyber-physical systems. Road data is automatically collected during driving and processed in the computer system to make driving decisions, and accordingly, vehicles are allowed to move autonomously. It is also one of the most critical changes under predictive maintenance applications. Sensors and preventive maintenance applications can detect physical changes in mechanical system parameters can be performed (Lasi et al., 2014).

Data Analytics: Controlling every stage of production system and autonomously managing decision-making processes requires more sensors. Each sensor produces a large amount of real-time data, and this information is raw data. Collecting and analyzing this data provides important information that can affect production performance. For this reason, analyzing all this data instantly, making instant decisions, and reporting it require advanced data analytics. One of the basic components of data analytics is cloud storage technology. One of the most important features of cloud storage technology is that stored data can be accessed regardless of location. This provides significant convenience for the use of IoT technologies.

3. DIFFICULTIES IN ADAPTING INDUSTRIAL COMPANIES TO INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES

Although the advantages of Smart Manufacturing technologies promise a very efficient and high-quality production process, the technological infrastructure and expert workforce they require to delay the integration of these technologies into the production processes of companies. The vast majority of companies do not want to allocate the necessary investment budget to use these innovative technologies.

With the developments in electronic communication, sensor and detection technologies, AI-supported approaches can significantly increase efficiency in different production processes. In addition, the integration of automation systems into existing production lines brings with it quite complex problems (Leitão et al., 2016). Additionally, these systems need to be protected against malicious attacks due to their connection to the Internet (Serror et al., 2021). This brings with it some difficulties regarding the security of the systems.

Since production systems and equipment are interconnected via communication networks, malicious attacks such as cyberattacks have the potential to completely halt or disrupt processing. In addition, data related to production processes can be stolen through malicious cyberattacks. This poses significant security risks for companies. Recent studies have shown that popular machine learning methods, such as machine learning, can be manipulated by inputting incorrect data (Madry et al., 2017). Therefore, the decision made by AI-supported algorithms may turn into an unsafe processing process in cases where adequate security measures are not taken (Papernot et al., 2016). To overcome these problems, AI-supported production algorithms and predictive maintenance applications are needed. Ensuring a safe production process is an even more important issue, especially in non-autonomous machining processes where humans also play a role (Javier García & Fernández, 2015).

The integration of Industry 4.0 technologies into the manufacturing processes of industrial companies offers significant opportunities but also brings with it various challenges. These challenges slow down the adaptation process. The obstacles to the adaptation of Industry 4.0 technologies can be listed as follows.

3.1. High Investment Costs

The basic components of Industry 4.0, namely cyber-physical systems, internet of things, big data analytics and artificial intelligence technologies, and electronic components that work with these technologies, are quite costly. Small and medium-sized enterprises, in particular, have difficulty meeting the capital investments required to transition to these new technologies (Ghobakhloo et al., 2012). Renewing the machine park, installing sensor systems that detect production processes, and creating data storage systems and data analysis infrastructures for storing collected data require high costs. Even if all these costs are covered, an expert workforce is needed to use and manage these technologies. Since the use of Industry 4.0 technologies also provides energy optimization, some of it can be compensated with government incentives.

3.2. Inadequacy of Technological Infrastructure

Many industrial companies have difficulty adapting their existing machinery to Industry 4.0 technologies. Older generation machinery and equipment, in particular, may not be integrated with new digital and automation systems. This requires companies to install new systems from scratch or modernize old equipment, which is a time-consuming and costly process. Even if the installation cost is covered, technological equipment will still be needed for the necessary maintenance and repair operations to ensure the continuity of the process. The integration of machinery should be ensured as a whole. When a new technological device is added to the machinery and works incompatibly with other systems, it causes a loss of efficiency. Therefore, changing all of the existing systems may be scary for companies. Companies that have completed the Industry 3.0 transformation can make this transition faster and cheaper.

3.3. Need for Qualified Workforce

Having Industry 4.0 technologies is not enough to digitalize a production process. Even if systems with technologically advanced equipment are used, a qualified workforce is still needed to produce software to run decision-making systems, perform maintenance and repair operations, and monitor the process. However, the lack of employees specialized in innovative technology areas such as autonomous systems, data analytics, artificial intelligence, and automation systems poses a significant obstacle for companies (Serror et al., 2021). Companies need intensive training programs and skill development practices to adapt their existing employees to these technologies.

The cost of expert labor is high. Companies generally tend to use government incentives when making such investments. In this way, they minimize investment risk. In addition, the training of a workforce with the necessary qualifications in these areas can be provided by government incentives. In this way, companies can be encouraged to use new technologies. The digitalization process can also cause fear of losing their jobs in employees. This can cause businesses to resist the digital transformation process. This resistance can prevent or delay the transformation process. This problem can be prevented by informing and training workers.

3.4. Cyber Security Risks

Manufacturing processes digitized with Industry 4.0 provide a large amount of data about the process. Processing and storing this data can cause significant cybersecurity vulnerabilities. Companies' transfer of their production processes to digital media and the connection established with the internet network also requires protecting this data against malicious cyberattacks. If the necessary security measures are not taken,

risks such as theft of critical data related to processing processes, unauthorized access to customer information, and production stoppage or slowdown may occur. Closing these security vulnerabilities also requires additional investments in addition to installation costs.

3.5. Data Management and Integration Problems

At the heart of Industry 4.0 are the processes of collecting and processing big data. However, companies may face difficulties collecting, storing, analyzing, and integrating this data into production processes. Integrating data from different sources and using them to benefit the business is complex. Especially in cases where data quality is low, incorrect analyses can be made, which can negatively affect decision-making processes.

3.6. Organizational Resistance

Adaptation to digital production technologies cannot be achieved through technological investment alone. It also requires the formation of a new organizational structure. Because digital production is different from traditional production processes. Therefore, creating an organizational structure compatible with digital production technologies may require a certain transition period. Resistance, especially from senior management and employees, can slow adaptation. For companies to realize digital transformation, employees must first have sufficient knowledge on this subject and be aware of the benefits of using digital technologies, and senior management must support this process.

3.7. Lack of National and International Regulations

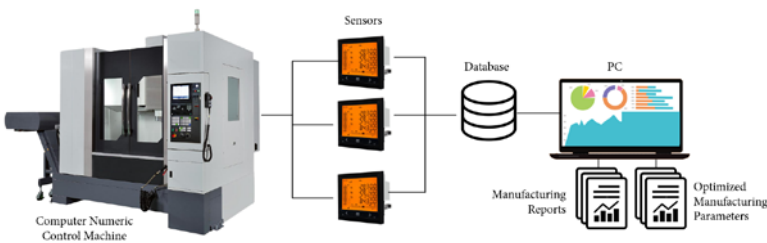
One of the biggest challenges of Industry 4.0 is that common standards and communication protocols between different technologies have not yet been fully established (Horváth & Szabó, 2019). There may be incompatibilities between technologies offered by different manufacturers, which

can lead to integration problems. In addition, legal requirements for data collection, processing and storage can create additional workload for companies. Companies may have difficulty integrating systems and equipment from different suppliers without a common industry standard. This can cause demotivation in employees and employers, which can push them away from digital transformation.

4. SMART MANUFACTURING CONCEPT

Smart Manufacturing is a concept that emerged with the development and spread of technologies that are the product of the Industry 4.0 industrial revolution. The smart manufacturing concept is an approach that uses automation and digital technologies to make production processes faster, more flexible, and more efficient (Soroush et al., 2020). Smart manufacturing processes utilize technologies such as the Internet of Things, big data analytics, cyber-physical systems, artificial intelligence, and cloud computing. The manufacturing process can be performed autonomously or manually. Smart manufacturing systems focus on optimizing the process by gathering detailed information about the manufacturing process rather than how it is performed.

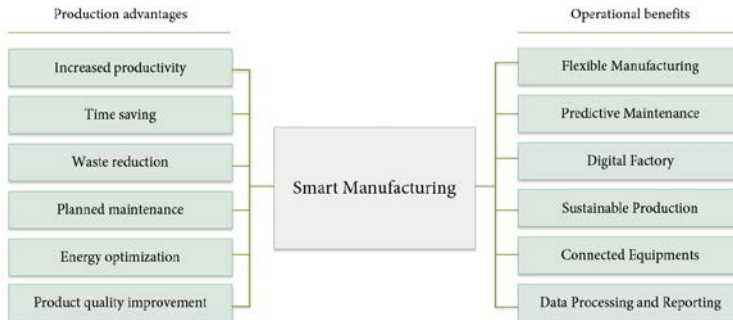
Figure 6. Smart Manufacturing Process



In smart manufacturing systems, system components can communicate with each other and transfer data instantly in real-time. This data can be stored with cloud computing technologies,

and reporting can be performed during production when necessary (Figure 6). In addition, it is possible to detect faults in advance by processing the data. However, the complex structure of a smart factory and advanced automation systems require high safety standards to ensure security (Yan et al., 2017). However, with data security, each processed data provides valuable information for the healthy progress of the production process. This prevents disruptions in the production process, ensures production continuity, and prevents loss of labor. Smart manufacturing technologies have attracted more attention with the development of technologies that form the basis of Industry 4.0 (Figure 7).

Figure 7. Smart Manufacturing Advantages and Benefits



Intelligent processing aims to automate tasks that humans perform in the physical world and optimize processes themselves (Mekid et al. 2009). Machine learning techniques and AI-supported technologies are used to produce solutions for process optimization and efficiency increase in processing. Autonomous robots and smart sensors increase production speed and accuracy by minimizing human intervention in production lines. These technologies can be used to ensure occupational safety, especially in repetitive and dangerous tasks. As a result, smart manufacturing technologies offer significant advantages in terms of efficiency, quality, and sustainability in the manufacturing

industry. For these reasons, many companies in the manufacturing sector are making major investments in the smart manufacturing market, which is expected to grow very much (TrendForce, 2022).

The relationship between smart manufacturing and Industry 4.0 provides a flexible and efficient production structure. Industrial robots and digitalized machines that communicate with each other provide a customizable production line that can respond quickly to different customer demands and changing market conditions. Thus, a production line that can be quickly integrated for order-based production can be provided.

The technological capabilities offered by Industry 4.0 create the flexible infrastructure required for Smart Manufacturing. The relationship between these two concepts is based on a hybrid production process that emerges through the integration of digitalization and automation into production processes (Bi et al., 2022). While Industry 4.0 provides digital transformation in production, Smart Manufacturing enables the application of digital production technologies in manufacturing processes. In particular, real-time and instantaneous data processing processes, cyber-physical systems, and artificial intelligence algorithms increase performance at every stage of production processes, allowing for fast and low-cost production. Therefore, these two concepts are a new synergy that complements each other and increases production efficiency.

4.1. Predictive Maintenance Applications

Predictive maintenance is the early detection of possible failures in machinery and equipment by precisely monitoring and interpreting changes in manufacturing processes and implementing appropriate maintenance practices (Zonta et al., 2020). The basis of this approach is the ability to monitor the manufacturing process precisely. Therefore, these monitoring

processes are only possible by integrating Industry 4.0 technologies. Predictive maintenance applications can collect continuous data from the machine park using sensors, IoT devices, and data analytics. Data analytics applications can analyze the collected data to determine when the equipment will need maintenance.

Maintenance costs constitute much of total production costs (Blanchard, 1997). Companies usually add maintenance costs to product costs. Because it is usually not possible to measure maintenance costs accurately. With the solutions brought by Industry 4.0, it becomes possible to estimate the remaining life of equipment using data collected through multiple sensors. As a result, maintenance costs and downtime can be reduced (Yan et al., 2017). This results in increased productivity and quality.

The biggest advantage of predictive maintenance applications is the reduction of downtime. Since possible failures can be predicted in advance, unexpected stoppages can be minimized. When maintenance operations are carried out planned, unnecessary maintenance costs can be prevented, thus saving both cost and labor. Timely maintenance extends the working hours of costly systems. Preventing dangerous failure risks in advance is important for occupational safety; in addition, environmental waste is reduced by preventing unexpected situations.

4.2. 3D Printing Technology

Three-dimensional production is a technique of producing solid models designed by combining materials in layers. In this method, digital product models created by engineers are converted into real objects. The digital product model is first divided into layers, then each layer is added on top of the other and the layers are combined with high heat. Different three-

dimensional models can be produced with different materials, regardless of their geometry (Kartal & Kaptan, 2023). This production technique is used in many critical fields, such as medicine, aviation, food, biomedical engineering, medicine, defense, and aviation (Bozkurt & Karayel, 2021; Giannopoulos et al., 2016; Liu et al., 2017). It is a faster, more flexible, and less waste-producing production method than traditional production methods.

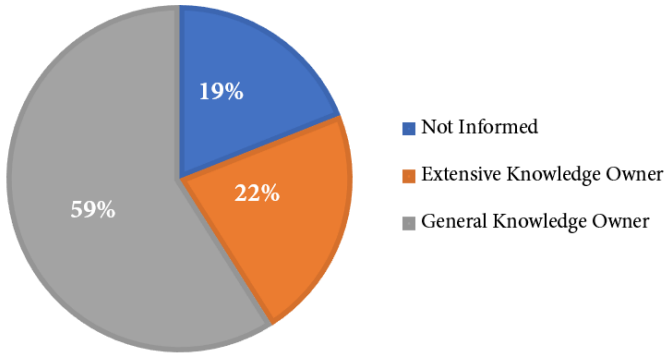
The most important advantage of the three-dimensional production technique is that it can be customized. Most of the production parameters can be customized, and some parameters can even be changed during production. Production and design parameters also have a significant effect on the mechanical properties of the product (Lanzotti et al., 2015; Zurnacı & Özdemir, 2023). Researchers have developed sustainable components with improved mechanical properties by taking advantage of this feature of the three-dimensional production technique (Zurnacı, 2023). This production technique also provides a compatible opportunity for integrating industrial automation technologies. Since production is carried out completely digitally, the optimization and control of the production process can be provided autonomously. Therefore, it has an important role in the Industrial Revolution 4.0. As part of smart manufacturing systems, 3D manufacturing increases flexibility by offering customized production and rapid prototyping (Alogla et al., 2021). Production process parameters can be optimized for production efficiency and sustainability. The strong compatibility between Industry 4.0 goals and the advantages of 3D manufacturing can greatly facilitate the transformation of the manufacturing industry.

5. DIGITAL TRANSFORMATION OF INDUSTRY IN TURKEY

The digital transformation of industry in Turkey is a process that has accelerated especially within the framework of Industry 4.0. Turkey, which wants to take a greater place in the global market and develop competitive products, encourages digitalization in the industry to increase efficiency, reduce costs, ensure environmental sustainability, and high value-added production in industrial sectors (Usta, 2021). The strategic goals include ensuring digitalization primarily in the automotive, white goods, and electronics sectors. In addition, various incentive and grant programs have been created for small and medium enterprises and large industrial organizations. Thus, financial support is provided for high investment costs, one of the biggest obstacles to digital transformation.

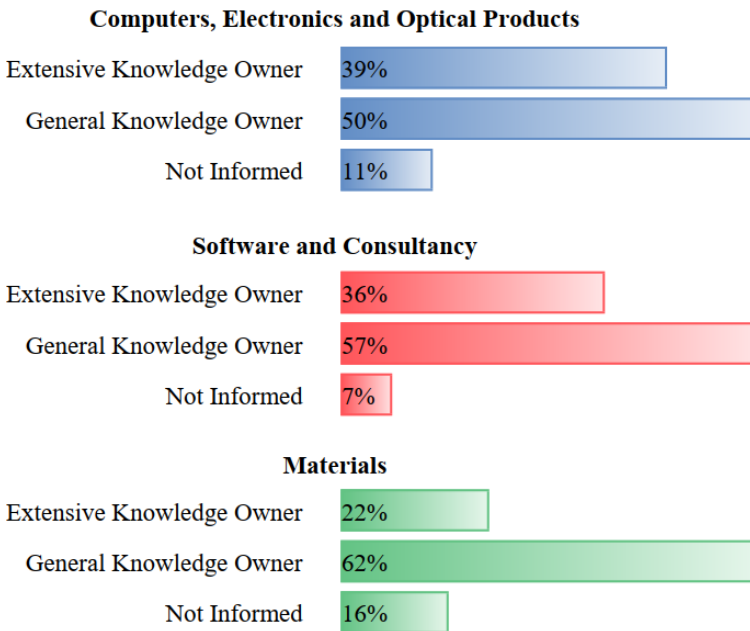
In order to determine the current status of critical technologies and support for smart manufacturing systems, a survey was conducted by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) in June 2016 with approximately 1000 private sector companies that received R&D incentives. As a result of this study, it was determined that only 22% of the companies participating in the survey had comprehensive knowledge about R&D and smart manufacturing (Figure 4) (TÜBİTAK, 2016). The research also shows that companies want to integrate innovative technologies into their processes as a goal shortly. It was determined that the sectors with the highest awareness of smart production systems are the electronics, software, and materials sectors, respectively (Figure 5).

Figure 4. Awareness Status of Companies in Turkey



Source: (TÜBİTAK, 2016)

Figure 5. The Three Sectors with the Highest Awareness



Source: (TÜBİTAK, 2016).

6. AN GENERAL ASSESSMENT OF THE FUTURE OF INDUSTRY 4.0-BASED PRODUCTION

While the previous industrial revolution focused on reducing human labor, the most important component of the latest industrial revolution is data. Developing artificial intelligence techniques can produce a lot of meaningful information by interpreting production data. This information can be used to increase production quality and efficiency. In particular, the use of smart manufacturing technologies can provide benefits such as shortening production time, reducing maintenance costs, and reducing cutting tool costs. This significantly contributes to national economies and ensures sustainable production.

Adaptation of industrial companies to Industry 4.0 technologies brings with it many challenges that need to be overcome, along with the significant advantages it provides. In order to overcome these challenges mentioned above, companies need to make strategic investments, develop a qualified workforce, and implement innovative management processes. Only in this way can the opportunities offered by Industry 4.0 be fully utilized. In this way, companies can gain long-term competitive advantage and use more sustainable production systems.

REFERENCES

- Bi, Z., Xu, L., & Ouyang, P. (2022). Smart Manufacturing—Theories, Methods, and Applications. *Machines*, 10(9), 742. <https://doi.org/10.3390/machines10090742>
- Blanchard, B. S. (1997). An enhanced approach for implementing total productive maintenance in the manufacturing environment. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 3(2), 69–80. <https://doi.org/10.1108/13552519710167692>
- Bozkurt, Y., & Karayel, E. (2021). 3D printing technology; methods, biomedical applications, future opportunities and trends. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 1430–1450. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.050>
- Ghobakhloo, M., Hong, T. S., Sabouri, M. S., & Zulkifli, N. (2012). Strategies for Successful Information Technology Adoption in Small and Medium-sized Enterprises. *Information*, 3(1), 36–67. <https://doi.org/10.3390/info3010036>
- Giannopoulos, A. A., Mitsouras, D., Yoo, S.-J., Liu, P. P., Chatzizisis, Y. S., & Rybicki, F. J. (2016). Applications of 3D printing in cardiovascular diseases. *Nature Reviews Cardiology*, 13(12), 701–718. <https://doi.org/10.1038/nrcardio.2016.170>
- Hewitt, P. S. (2002). Depopulation and ageing in Europe and Japan: the hazardous transition to a labor shortage economy. *Internationale Politik Und Gesellschaft*, 111–120.
- Horváth, D., & Szabó, R. Z. (2019). Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-

- sized companies have equal opportunities? *Technological Forecasting and Social Change*, 146, 119–132.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.05.021>
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Sinha, A. K. (2024). Digital economy to improve the culture of industry 4.0: A study on features, implementation and challenges. *Green Technologies and Sustainability*, 2(2), 100083.
<https://doi.org/10.1016/j.grets.2024.100083>
- Javier García, & Fernández, F. (2015). A Comprehensive Survey on Safe Reinforcement Learning. *Journal of Machine Learning Research*, 8(15), 1437–1480.
- Kartal, F., & Kaptan, A. (2023). Experimental Determination of the Optimum Cutting Tool for CNC Milling of 3D Printed PLA Parts. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 7(2), 150–160.
<https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1267634>
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242.
<https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Leitão, P., Colombo, A. W., & Karnouskos, S. (2016). Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges. *Computers in Industry*, 81, 11–25.
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.08.004>
- Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Wang, Y. (2017). 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 69, 83–94.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.018>

- Madry, A., Makelov, A., Schmidt, L., Tsipras, D., & Vladu, A. (2017). *Towards Deep Learning Models Resistant to Adversarial Attacks*. <http://arxiv.org/abs/1706.06083>
- Neugebauer, R., Hippmann, S., Leis, M., & Landherr, M. (2016). Industrie 4.0 - From the Perspective of Applied Research. *Procedia CIRP*, 57, 2–7. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.002>
- Papernot, N., McDaniel, P., Jha, S., Fredrikson, M., Celik, Z. B., & Swami, A. (2016). The Limitations of Deep Learning in Adversarial Settings. *2016 IEEE European Symposium on Security and Privacy (EuroS&P)*, 372–387. <https://doi.org/10.1109/EuroSP.2016.36>
- Pereira, A. C., & Romero, F. (2017). A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*, 13, 1206–1214. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.032>
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. *Procedia CIRP*, 52, 173–178. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>
- Serror, M., Hack, S., Henze, M., Schuba, M., & Wehrle, K. (2021). Challenges and Opportunities in Securing the Industrial Internet of Things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(5), 2985–2996. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3023507>
- Shamim, S., Cang, S., Yu, H., & Li, Y. (2016). Management approaches for Industry 4.0: A human resource management perspective. *2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, 5309–5316. <https://doi.org/10.1109/CEC.2016.7748365>

- Sorouch, M., Baldea, M., & Edgar, T. F. (Eds.). (2020). *Smart Manufacturing: Concepts and Methods*. Elsevier.
- Thames, L., & Schaefer, D. (2016). Software-defined Cloud Manufacturing for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 52, 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.041>
- TrendForce. (2022). *TrendForce Forecasts Size of Global Market for Smart Manufacturing Solutions to Top US\$320 Billion by 2020; Product Development Favors Integrated Solutions*.
<https://www.trendforce.com/presscenter/news/20170731-9805.html>
- TÜBİTAK. (2016). *Yeni Sanayi Devrimi: Akıllı Üretim Sistemleri Teknoloji Yol Haritası*.
- Usta, S. K. (2021). Türkiye’de yürütülen Endüstri 4.0 araştırmaları. *Journal of Turkish Operations Management*, 5(2), 23.
- Wang, Y., Widrow, B. C., Zadeh, L. A., Howard, N., Wood, S., Bhavsar, V. C., Budin, G., Chan, C. W., Fiorini, R. A., Gavrilova, M. L., & Shell, D. F. (2020). Cognitive Intelligence. In *Deep Learning and Neural Networks* (pp. 1500–1523). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-0414-7.ch084>
- Witkowski, K. (2017). Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 – Innovative Solutions in Logistics and Supply Chains Management. *Procedia Engineering*, 182, 763–769. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.197>
- Wright, P. K. (2001). *21st Century Manufacturing*. Prentice Hall Upper Saddle River.
- Yan, J., Meng, Y., Lu, L., & Li, L. (2017). Industrial Big Data in an Industry 4.0 Environment: Challenges, Schemes, and Applications for Predictive Maintenance. *IEEE Access*, 5,

23484–23491.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2765544>

Zhou, K., Taigang Liu, & Lifeng Zhou. (2015). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, 2147–2152. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2015.7382284>

Zonta, T., da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E. S., & Li, G. P. (2020). Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106889. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889>

Zurnacı, E. (2023). Optimization of 3D Printing Parameters to Mechanical Strength Improvement of Sustainable Printing Material Using RSM. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 7(1), 38–46. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1231076>

Zurnacı, E., & Özdemir, H. K. (2023). Investigation of the Compressive Strength, Energy Absorption Properties and Deformation Modes of the Reinforced Core Cell Produced by the FDM Method. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.30855/gmbd.0705047>

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

yaz
yayınları

YAZ Yayınları

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3

İscehisar / AFYONKARAHİSAR

Tel : (0 531) 880 92 99

yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com