



**ERİYİK YIĞMA MODELLEME (FDM) YÖNTEMİ  
İLE ÜRETİLEN TUNGSTEN BAKIR VE BRONZ  
TAKVİYELİ POLİLAKTİK ASİT (PLA)  
KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
DENEYSEL VE İSTATİSTİKSEL ARAŞTIRILMASI**

**2024  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Yasin KURUOĞLU**

**Tez Danışmanları  
Prof. Dr. Halil DEMİR  
Doç. Dr. Mahir AKGÜN**

**ERİYİK YIĞMA MODELLEME (FDM) YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN  
TUNGSTEN BAKIR VE BRONZ TAKVİYELİ POLİLAKTİK ASİT (PLA)  
KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE  
İSTATİSTİKSEL ARAŞTIRILMASI**

**Yasin KURUOĞLU**

**Tez Danışmanları**

**Prof. Dr. Halil DEMİR**

**Doç. Dr. Mahir AKGÜN**

**T.C.**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Ocak 2024**

Yasin KURUOĞLU tarafından hazırlanan “ERİYİK YIĞMA MODELLEME (FDM) YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN TUNGSTEN BAKIR VE BRONZ TAKVİYELİ POLİLAKTİK ASİT (PLA) KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE İSTATİSTİKSEL ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Halil DEMİR .....  
Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doç. Dr. Mahir AKGÜN .....  
Tez 2. Danışmanı, Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 25/02/2021

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Doç. Dr. Barış ÖZLÜ (ASÜ)	.....
Üye : Prof. Dr. Halil DEMİR (KBÜ)	.....
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Serdar GÜLDİBİ (KBÜ)	.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN .....  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Yasin KURUOĞLU

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

**ERİYİK YIĞMA MODELLEME (FDM) YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN  
TUNGSTEN BAKIR VE BRONZ TAKVİYELİ POLİLAKTİK ASİT (PLA)  
KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE  
İSTATİSTİKSEL ARAŞTIRILMASI**

**Yasin KURUOĞLU**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanları:**

**Prof. Dr. Halil DEMİR**

**Doc. Dr. Mahir AKGÜN**

**Ocak 2024, 66 sayfa**

Bu çalışmada, Eriyik Yığıma Modelleme (FDM) yöntemi kullanılarak üretilen tungsten, bakır ve bronz takviyeli polilaktik asit (PLA) kompozitlerin mekanik özellikleri deneysel ve istatistiksel olarak araştırılmıştır. Takviyeli ve takviyesiz PLA numunelerin performans özellikleri, çekme dayanımı, yüzey pürüzlülüğü, ağırlık, eğme dayanımı ve yorulma dayanımı bakımından karakterize edilmiştir. Baskı deneylerinin tasarımında Taguchi L16 dizini kullanılmıştır. Baskı parametresi olarak doluluk oranı, doldurma hızı, katman kalınlığı ve nozul çapı seçilmiştir. Baskı parametrelerinin optimum seviyelerini belirlemek ve çıktı parametrelerini matematiksel olarak modellemek için sırasıyla  $S/N$  gürültü, varyans (ANOVA) ve regresyon analizleri uygulanmıştır.  $S/N$  gürültü analiz sonuçlarına göre çekme

dayanımı için baskı parametrelerinin optimum seviyeleri takviyesiz PLA filament, %100 doluluk oranı, 60 mm/s doldurma hızı 0,4 mm katman kalınlığı ve 0,6 mm nozul çapı olarak belirlenmiştir. Bu parametreler kullanılarak üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen çekme testinde çekme dayanımı 53,25 MPa olarak ölçülmüştür. Maximum çekme dayanımının elde edildiği numuneler eğme ve yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Bu çalışmanın sonuçları bakır, bronz ve tungsten takviyeli PLA numunelere göre takviyesiz PLA numunenin çekme dayanımı değerinin sırasıyla %75,22, %99,81 ve %33,62 daha yüksek olduğunu ve ayrıca takviyesiz PLA numunenin takviyeli PLA numunelere göre eğilme ve yorulma dayanımının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğü ve numunelerin ağırlığı bakımından elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri bronz takviyeli PLA numunede 0,545 µm olarak en düşük ağırlık değeri ise takviyesiz PLA numune de 5,005 g olarak elde edilmiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Hızlı Prototipleme, PLA, Mekanik Özellikler, Yüzey Kalitesi, Optimizasyon.

**Bilim Kodu :** 91438

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

# **EXPERIMENTAL AND STATISTICAL INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF TUNGSTEN COPPER AND BRONZE REINFORCED POLYLACTIC ACID (PLA) COMPOSITES PRODUCED BY FUSED DEPOSITION MODELING (FDM) METHOD**

**Yasin KURUOĞLU**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Manufacturing Engineering**

**Thesis Advisors:**

**Prof. Dr. Halil DEMİR**

**Assoc. Prof. Mahir AKGÜN**

**January 2024, 66 pages**

In this study, the mechanical properties of tungsten, copper, and bronze reinforced polylactic acid (PLA) composites produced using the Fused Deposition Modeling (FDM) method were experimentally and statistically investigated. The performance properties of reinforced and unreinforced PLA specimens were characterized in terms of tensile strength, surface roughness, weight, flexural strength and fatigue strength. Taguchi L16 index was used to design the printing experiments. Filling rate, filling speed, layer thickness and nozzle diameter were selected as printing parameters. *S/N* noise, variance (ANOVA) and regression analyses were applied to determine the optimum levels of the printing parameters and to mathematically

model the output parameters, respectively. According to the results of *S/N* noise analysis, the optimum levels of printing parameters for tensile strength were determined as unreinforced PLA filament, 100% filling rate, 60 mm/s filling speed, 0.4 mm layer thickness and 0.6 mm nozzle diameter. In the tensile test performed on the specimens produced using these parameters, the tensile strength was measured as 53.25 MPa. The samples in which maximum tensile strength was obtained were subjected to flexural and fatigue tests. The results of this study show that the tensile strength value of the unreinforced PLA specimen is 75.22, 99.81 and 33.62% higher than the copper, bronze and tungsten reinforced PLA specimens, respectively, and also the flexural and fatigue strength of the unreinforced PLA specimen is higher than the reinforced PLA specimens. When the results obtained in terms of surface roughness and weight of the samples were evaluated, the lowest surface roughness value was obtained as 0.545  $\mu\text{m}$  in the bronze-reinforced PLA sample, and the lowest weight value was obtained as 5.005 g in the unreinforced PLA sample.

**Key Word** : Rapid Prototyping, PLA, Mechanical Properties, Surface quality, Optimization

**Science Code** : 91438



## TEŐEKKÖR

Tez çalıŐmalarım boyunca tecrübesi ve bilgi birikimi ile yol gösteren değerli danıŐman hocam Doç. Dr. Mahir AKGÖN ve Prof. Dr. Halil DEMİR'e yardımları için teŐekkÖr ederim.

ÇalıŐmalarımın gerek deneysel gerekse teorik aŐamalarına katkılarda bulunan değerli çalışma arkadaŐım ve ağabeyim Gökçe ÖZLÖ'ye, kıymetli çalışma arkadaŐlarım Selin GÖNTOP, Zeynep DOğRUDİL ve ağatay KAMALI'ya da ayrıca teŐekkÖr ederim.

Bugüne kadar hayatımın her aşamasında olduğu gibi yüksek lisans aşamasında da desteğini esirgemeyen ve yüksek lisans çalıŐmalarım sırasında gösterdiği sabır ve anlayıŐından ötürü sevgili EŐime tüm içten dileklerle Őükranlarımı sunarım. Kızım Eslem ve oğlum Kerem'e sevgilerimle.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	3
2.1. FDM METHODU İLE KATKILI FİLAMENTLER KULLANILARAK ÜRETİLEN MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	3
BÖLÜM 3 .....	13
KURAMSAL TEMELLER .....	13
3.1. KATMANLI İMALAT .....	13
3.1.1. Bağlayıcı Püskürtme.....	14
3.1.2. Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme.....	14
3.1.3. Malzeme Ekstrüzyonu .....	15
3.1.4. Malzeme Püskürtme .....	15
3.1.5. Toz Yatağı Füzyonu .....	16
3.1.6. Tabaka Lamine .....	16
3.1.7. Vat Fotopolimerizasyon.....	17
3.2. 3 BOYUTLU YAZICILAR .....	17
3.2.1. 3 Boyutlu Yazıcılarda Kullanılan Filamentler.....	19

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 4 .....	22
MATERYAL VE YÖNTEM .....	22
4.1. DENEY MALZEMESİ .....	22
4.2. DENEY PARAMETRELERİ .....	22
4.3. DENEYDE ÖLÇÜLEN MEKANİK ÖZELLİKLER .....	23
4.4. AĞIRLIK ÖLÇÜMLERİ .....	24
4.5. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ .....	24
4.6. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMLERİ.....	25
4.7. ÇEKME TESTLERİ.....	26
4.8. YORULMA TESTLERİ .....	27
4.9. ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ .....	28
4.10. KIRILMA YÜZEYİ İNCELEMELERİ.....	29
4.11. DENEY TASARIMI .....	30
BÖLÜM 5 .....	32
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	32
5.1. ÇEKME DAYANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	32
5.1.1. <i>S/N</i> Oranlarının Analizi.....	32
5.1.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	34
5.1.3. Varyans Analizi (ANOVA) .....	36
5.1.4. Regresyon Analizi .....	37
5.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	39
5.2.1. <i>S/N</i> Oranlarının Analizi.....	39
5.2.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	41
5.2.3. Varyans Analizi (ANOVA) .....	43
5.2.4. Regresyon Analizi .....	44
5.3. AĞIRLIĞIN DEĞERLENDİRİLMESİ .....	47
5.3.1. <i>S/N</i> Oranlarının Analizi.....	47
5.3.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	49
5.3.3. Varyans Analizi (ANOVA) .....	50
5.3.4. Regresyon Analizi .....	51
5.4. EĞİLME DAYANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	53
5.5. YORULMA DAYANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	55

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 6 .....	58
SONUÇLAR .....	58
KAYNAKLAR .....	61
ÖZGEÇMİŞ .....	66

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 4.1.	3 Boyutlu FDM yazıcı. ....	23
Şekil 4.2.	Hassas terazi. ....	24
Şekil 4.3.	Sertlik ölçüm cihazı ve test düzeneği. ....	25
Şekil 4.4.	Yüzey pürüzlülüğü değeri ölçüm cihazı ve test düzeneği. ....	26
Şekil 4.5.	Çekme basma cihazı ve çekme test düzeneği. ....	27
Şekil 4.6.	Dinamik test cihazı. ....	28
Şekil 4.7.	Üç nokta eğme testi test düzeneği. ....	29
Şekil 4.8.	Taramalı elektron mikroskobu (SEM). ....	29
Şekil 5.1.	Numunelerin çekme dayanımı değeri için ortalama $S/N$ oranları üzerinde baskı parametrelerinin etkisi ....	33
Şekil 5.2.	Baskı parametrelerine göre çekme dayanımı değerlerinin dağılımı. ....	35
Şekil 5.3.	Çekme testi sonrası numunelerin kırılma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri: a) PLA, b) Bakır PLA, c) Bronz PLA d) Tungsten PLA. ....	36
Şekil 5.4.	$\sigma_c$ için doğrusal regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması. ....	38
Şekil 5.5.	Numunelerin yüzey pürüzlülüğü değeri için ortalama $S/N$ oranları üzerinde baskı parametrelerinin etkisi ....	41
Şekil 5.6.	Baskı parametrelerine göre yüzey pürüzlülüğü değerlerinin dağılımı. ....	42
Şekil 5.7.	$R_a$ için doğrusal regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması. ....	45
Şekil 5.8.	Numunelerin ağırlık değeri için ortalama $S/N$ oranları üzerinde baskı parametrelerinin etkisi. ....	48
Şekil 5.9.	Baskı parametrelerine göre ağırlık değerlerinin dağılımı. ....	50
Şekil 5.10.	Numunelerin ağırlık değeri için doğrusal regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması. ....	52
Şekil 5.11.	Takviyeli ve takviyesi PLA numunelerin eğilme dayanımı dağılımı. ....	54
Şekil 5.12.	Üç nokta eğme testi sonrası numunelerin kırılma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri: a) PLA, b) Bakır PLA, c) Bronz PLA d) Tungsten PLA. ....	55
Şekil 5.13.	Yorulma testi sonrası numunelerin kopma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri: a) PLA, b) Bakır PLA, c) Bronz PLA d) Tungsten PLA. ....	57

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 4.1. Kullanılan deney parametreleri.....	23
Çizelge 5.1. Çekme dayanımı değerleri ve $S/N$ oranları.....	32
Çizelge 5.2. $\sigma_c$ için $S/N$ yanıt tablosu.....	33
Çizelge 5.3. $\sigma_c$ için varyans analizi sonuçları.....	37
Çizelge 5.4. $\sigma_c$ için çeşitli doğrulama parametreleri. ....	38
Çizelge 5.5. Çekme dayanımı ( $\sigma_c$ ) için doğrulama testi sonuçları. ....	39
Çizelge 5.6. Yüzey pürüzlülüğü değerleri ve $S/N$ oranları. ....	40
Çizelge 5.7. $R_a$ için $S/N$ yanıt tablosu.....	40
Çizelge 5.8. $R_a$ için varyans analizi sonuçları. ....	44
Çizelge 5.9. $R_a$ için çeşitli doğrulama parametreleri.....	45
Çizelge 5.10. $R_a$ için doğrulama testi sonuçları. ....	46
Çizelge 5.11. Ağırlık değerleri ve $S/N$ oranları. ....	47
Çizelge 5.12. Numunelerin ağırlık değerleri için $S/N$ yanıt tablosu. ....	48
Çizelge 5.13. Ağırlık için varyans analizi sonuçları. ....	51
Çizelge 5.14. Numunelerin ağırlık değerleri için çeşitli doğrulama parametreleri....	52
Çizelge 5.15. Ağırlık için doğrulama testi sonuçları.....	53

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- Cu : bakır  
 $Ra$  : ortalama yüzey pürüzlülüğü  
 $fe$  : hata serbestlik derecesi  
 $Ve$  : hata varyansı  
 $R$  : doğrulama deneyleri için tekrar sayısı  
 $n_{eff}$  : etkili yineleme sayısı  
 $T_{dof}$  : toplam serbestlik derecesi  
 $N$  : toplam deney sayısıdır  
 $\alpha$  : anlamlılık düzeyini  
 $\sigma\check{c}$  : ortalama çekme dayanımı

### KISALTMALAR

- FDM : Fused Deposition Modelling (Eriyik Yığıma Modelleme)  
SEM : Scanning Electron Microscope (Tarama Elektron Mikroskobu)  
PLA : Polilaktik asit  
ABS : Akrilonitril Bütadiyen Stiren  
OPF : Oil Palm Filament  
WP fiber : Dokuma Polyester Elyaf  
CB : Carbon Black (Siyah karbon)  
ASTM : American Society for Testing and Materials  
UTS : Ultimate Tensile Strength (Nihai Çekme Gerilimi)  
RSM : Response Surface Methodology (Tepki Yüzeyleri Metodolojisi )  
ENR : Epoxy Natural Rubber (Epoksi Doğal Kauçuk)  
UV : Ultraviyole  
PBAT : Polybutylene Adipate Terephthalate

DMA	: Dynamic Mechanical Analysis (Dinamik Mekanik Analiz)
PGA	: Poliglikolik Asit
CFF	: Continuous Fiber Filament (Sürekli Elyaf Filament)
SLA	: Stereolitografi
SLS	: Selective Laser Sintering
PETG	: Polyethylene Terephthalate Glycol
TPU	: Thermoplastic Polyurethane
3D	: Üç boyutlu
CAD	: Bilgisayar destekli tasarım



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Günümüzde insanlık ve 3D yazıcılar arasındaki ilişki her geçen gün daha da önemli hale gelmektedir. İnsanlar her alanda olduğu gibi üretim alanında da hızlı ve etkin çözümler arayışı içinde yeni yöntemler geliştirirken 3D yazıcılar hayatımıza girmiştir. İlk başta hızlı prototipleme aracı olarak kullanılan bu yazıcılar teknolojik gelişmelerle birlikte kullanım alanını genişleterek üretim kalitesini artırmaya yönelik amaçlar güderek üretim alanında da ciddi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Geline nokta da 3D yazıcılar, endüstride ve gündelik hayatta birçok farklı alanda üretim konusunda önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknoloji, nesnelere üç boyutlu modellerinin bilgisayar ortamında tasarlanması ve ardından katman katman üretim işleriyle fiziksel nesnelere dönüştürülmesini sağlamaktadır. 3D yazıcı teknolojisi sayesinde özelleştirilmiş ürünler üretilerek tüketicilerin ihtiyaçlarına ve tercihlerine daha iyi uyum sağlamanın yanı sıra tasarım konusunda diğer üretim yöntemlerinin kısıtlarından kaynaklı tasarım zorunluluklarını aşarak yüksek esnekliğe sahip tasarımlar yapılmasının önünü açmaktadır.

3D yazıcılar mühendislik, mimarlık, moda ve sanat gibi birçok farklı alanda diğer üretim yöntemleriyle üretilmesi zor olan yenilikçi tasarımların ve ürünlerin üretimini mümkün kılmaktadır. Ayrıca geleneksel üretim yöntemlerinden daha az atık üreten ve geri dönüştürülebilir ürünler ortaya çıkaran 3D yazıcı teknolojisi çevre dostu olması sebebiyle de günümüzde üretim sektöründe etkin olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Elektrikli araçlar, çevre dostu bir alternatif olarak benzinli araçlara göre daha az sera gazı emisyonu yaydırır ve sürdürülebilir bir geleceğe katkıda bulunur. Ancak, elektrikli araçların üretim süreci de çevreye etki edebilir. Bu nedenle, elektrikli araçların üretiminde çevre dostu bir yaklaşım izlenmesi önemlidir. Bu noktada 3D

yazıcılar önemli rol oynayacaktır. 3D yazıcılar, ürünleri üretme esnasında sadece ihtiyaç duyulan malzemeleri kullandıkları için atık malzemelerin miktarını azaltarak sürdürülebilir bir üretim süreci sağlamaktadır. Ayrıca elektrikli otomobillerin yenilikçi tasarımlarında kullanılan özelleştirilmiş ve karmaşık pek çok parçanın üretimi de yine 3D yazıcılarla daha efektif ve maliyet etkin olacaktır. Tüm bunların yanı sıra geleneksel yöntemlerle üretilen özelleştirilmiş parçaların daha hafif olarak üretimine olanak sağlayan bu teknoloji, araçların ağırlıklarının azalmasına da yardımcı olacaktır. Ayrıca yedek parça tedariğinde ve üretimindeki zaman ve maliyet sorunlarını minimuma indirmenin yanı sıra, son kullanıcılara kendi imkânlarıyla söz konusu parçalardan bazılarını üretmelerini mümkün kılabilen kolay bir kullanıma sahiptir.

Bu çalışmada, otomotiv sanayisinde ve özellikle de günümüzde hızla gelişmekte olan elektrikli otomobillerin üretimlerinde oldukça yaygın kullanılan kompozit malzemelere alternatif olabilecek PLA (polilaktik asit), tungsten takviyeli PLA, bakır takviyeli PLA ve bronz takviyeli PLA malzemelerinin mekanik özellikleri, deneysel ve istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Takviyeli ve takviyesiz PLA numunelerin performans özellikleri, çekme dayanımı, yüzey pürüzlülüğü, ağırlık, eğme dayanımı ve yorulma dayanımı bakımından karakterize edilmiştir. Baskı deneyleri Taguchi metoduna göre tasarlanarak baskı parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Baskı parametrelerinin optimum seviyelerini belirlemek ve çıktı parametrelerini matematiksel olarak modellemek için sırasıyla *S/N* gürültü, varyans (ANOVA) ve regresyon analizleri uygulanmıştır. Son olarak, deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçların, Eriyik Yığılma Modelleme (FDM) yönteminin kullanıldığı endüstriyel uygulamalarda baskı kalitesini artırması ve üretim sürecinin daha etkin ve verimli bir şekilde yönetilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

#### 2.1. FDM METHODU İLE KATKILI FİLAMENTLER KULLANILARAK ÜRETİLEN MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Mohd Nazri Ahmad ve arkadaşları, 3D yazıcı için OPF (Oil Palm Filament) / ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) kompozit filament geliştirerek mekanik özelliklerini ölçmüştür. Yapılan çalışmada üretilen numunelere çekme testleri ve eğme testleri yapılarak mekanik özelliklerini karşılaştıran araştırmacılar, bu çalışmanın sonucunda, AP'nin ABS matrisine eklenmesiyle çekme mukavemeti ve Young modülünün bir miktar arttığını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte malzemenin kırılma doğası nedeniyle eğilme mukavemetinde bir azalma gözlemlemiş olan araştırmacılar çalışma sonucunda OPF/ABS kompozit mikroyapısı, liflerin saf ABS ile iyi karışmadığı ve bazı liflerin çözünemez bir formda olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır [1].

M. N. M. Azlin ve arkadaşları, Dokuma Polyester Elyaf (WP fiber) takviyeli PLA kompozitlerin farklı lif-matris bileşimlerinin mekanik, morfolojik ve termal özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, WP'nin PLA ile uyumluluğa sahip olduğunu göstermiş olup ve kompozitlerin özelliklerinde iyileştirmeler sağlamıştır. Yapılan testler sonucunda WP lifinin eklenmesi, kompozitlerin çekme ve darbe dayanıklılığı gibi özelliklerini artırdığını gözlemleyen araştırmacılar, rijitliğin azalmış olduğu ve bu durumun da WP/PLA kompozitlerinin daha elastik hale gelmesine neden olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada kompozitlerin termal özelliklerinin , onları ısıya karşı daha dirençli ve daha stabil hale getirdiği söylenmiş olup araştırmacılar bu çalışma sonucunda WP/PLA katkıli kompozitlerin

daha düşük maliyetle iyi mekanik ve termal performans sergilediği sonucunu çıkarmışlardır [2].

Jose' C. Camargo ve arkadaşları yaptıkları çalışma kapsamında FDM yöntemiyle 3D yazıcıda PLA-grafen kullanılarak üretilen parçaların mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Ayrıca mekanik özellikler ile baskı süresi ve ağırlık arasındaki oranları inceleyerek tasarımcılara karar vermede yardımcı olmayı amaçladıklarını da belirtmişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda doluluk oranı ve katman kalınlığı arttıkça çekme dayanımının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca doluluk oranı ve katman kalınlığı maksimum olduğunda çekme dayanımı/baskı süresi ve çekme dayanımı/ağırlık oranları daha yüksek olduğu, katman kalınlığı ve doluluk oranı arttıkça bükülme dayanımının arttığı ortaya koyulmuştur. Test sonucuna yönelik analizler neticesinde mekanik özelliklerin katman kalınlığı arttıkça çekme dayanımının arttığı sonucuna ulaşılmıştır [3].

Jos'e C. Camargo ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Grafen takviyeli ABS polimerlerin mekanik ve elektriksel davranışlarını incelemişlerdir. Araştırmacılar çalışma kapsamında FDM yöntemi ile 3D baskı sürecinde kullanılan ABS filamentlerine grafen eklenmesinin, üretilen parçaların kullanım amacına bağlı olarak yapılması gerektiği sonucunu ortaya çıkarmışlardır. Eğer üretilen parçaların daha iyi mekanik özelliklere sahip olması isteniyorsa grafen eklenmeden ABS kullanılması önerilmiş olup öte yandan parçalarda elektriksel özellikler isteniyorsa grafen eklenmesi önerilmektedir. Çalışma sonucunda grafen eklenmemiş ABS malzemesinin elektriksel iletkenlik açısından sıfıra eşit olduğu, ancak grafen takviyeli ABS filamentin elektriksel iletkenlikte iyileşme sağlarken mekanik özellikler de ise kötüleşmeye neden olduğu kanıtlanmıştır [4].

Jipeng Guo ve arkadaşları çalışmalarında siyah karbon (CB) ile güçlendirilmiş PLA kompozitlerin iletkenlik ve mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma neticesinde CB içeriğinin artmasıyla birlikte mekanik özellikler, bariyer özellikleri, hidrofobik özellikler, elektriksel iletkenlik ve termal bozunmanın buna göre değiştiğini göstermişlerdir. Bu çalışma sonucunda Jipeng Guo ve arkadaşları

CB takviyeli PLA filamentlerin iletken özellik istenen 3D baskı ürünlerinde kullanılabilir olduğu sonucuna ulaşmışlardır [5].

Arvind Kottasamy ve arkadaşları FDM yöntemi ile üretilen bakır takviyeli PLA kompozitlerin mekanik özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu çalışma kapsamında araştırmacılar tarafından farklı dolgu desenleri ve farklı oranlarda bakır kompozisyonlar kullanılarak ASTM standartlarına uygun test numuneleri üretilmiş olup ASTM standartlarında üretilen test numunelerine gerilme testi, eğme testi ve basma testi gibi mekanik testler uygulanmıştır. Araştırmacılar gerilme testi sonucunda sadece dolgu deseninin young modülüne etkisi olduğunu görmüşler; nihai çekme gerilimi (UTS) ve akma dayanımı için ise dolgu deseni, bakır kompozisyonu ve dolgu deseni ile bakır kompozisyonu etkileşiminin önemli bir etkisi olduğunu göstermişler ve ayrıca basma testinde dolgu deseni ile bakır kompozisyonunun basınç dayanımı üzerinde önemli bir etki gösterdiğini gözlemlemişlerdir [6].

Anna Masek, Karolina Diakowska, Marian Zaborski yaptıkları çalışmada lignoselüloz ile takviye edilmiş epoksi doğal kauçuk/polilaktik asit (ENR/PLA) kompozitlerin fizikomekanik ve termal özelliklerini karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalara göre, lignoselüloz eklenmesi, epoksitlenmiş doğal kauçuk ile polilaktit (PLA) kompozitlerinin mukavemet özelliklerini iyileştirdiğini belirtmişler ve geliştirilen malzemenin; UV ışınları, sıcaklık veya nem gibi iklim koşullarının etkisi altında yüksek bir ayrışabilirlik özelliğine sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Araştırmacılar bu çalışma sonucunda, ENR takviyeli PLA karışımının dağılımını iyileştirmişler ve lif-matris faz sınırında yapışmayı artırdığını kanıtlamışlardır [7].

M. Venkata Pavan, K. Balamurugan, V. Srinivasadesikan, Shyi-Long Lee yaptıkları çalışmada farklı FDM koşullarında basılan bakır takviyeli PLA kompozit filamentin darbe ve kesme davranışını incelemişlerdir. Sertlik, yoğunluk, çekme mukavemeti, bükülme ve sıkıştırma özellikleri üzerinde yapılan test örneklerinin incelenmesine dayanarak, %12 ağırlık oranına sahip bir Cu bileşiminin PLA matrisi ve sıcak ekstrüzyon için uygun olduğu araştırmacılar tarafından belirlenmiş olup, ekstrüzyon sıcaklığının etkisinin darbe direncini %51 ila %58 arasında artırırken sünekliği azalttığı ortaya koyulmuştur. Çalışmada nozül sıcaklığının ve katman kalınlığının

sırasıyla darbe ve kesme yük koşullarında önemli bir etkiye sahip olduğu söylenmiş, bununla birlikte, diğer faktörlerin göz ardı edilemeyeceği ilave edilmiştir. Çalışma sonucunda katman içindeki bakır partiküllerinin yer değiştirmesi ve katmanın bağlama gücünün kompozit filamentin darbe ve kesme mukavemetini belirlediği sonucuna ulaşılmıştır [8].

S. Siengchin tarafından yapılan çalışmada keten mat takviyeli PLA kompozitlerin darbe, termal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Keten takviyeli PLA kompozitlerinde termal ve akrilik etkili darbe düzenleyicilerinin etkisi inceleyen S. Siengchin, PLA sistemlerinin morfolojisi ile darbe, termal ve mekanik özellikleri araştırmış olup, zorlanmış PLA ve kompozitleri, matrisin doğrudan modifikasyonu ile üretme çalışmasını gerçekleştirmiştir. Modifiye edilmiş PLA tabanlı kompozitin, düşük sünek deformasyona işaret eden pürüzsüz bir kırık yüzeyine sahip olduğunu belirten araştırmacı, SEM incelemelerinde bulunmuş, flax mat ve akrilik darbe düzenleyici katkısıyla PLA'nın darbe direncinin önemli ölçüde arttığını kanıtlamıştır. Araştırmacı, modifiye edilmiş PLA'nın çekme mukavemetinin ve depolama modülünün, düz PLA'nın biraz altında olduğunu saptamış, keten matın katılması ile, PLA'nın sertliğinin belirgin şekilde artırdığını, buna ilaveten modifiye edilmiş PLA'nın termal dirençte önemli derecede artış sergilediğini gözlemlemiştir [9].

S.F.K. Sherwani ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, şeker palmye lifi takviyeli polilaktik asit kompozitlerinin fiziksel, mekanik ve morfolojik özelliklerini deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar lif yüklemesi arttıkça yoğunluğun, su emiliminin ve mekanik özelliklerin arttığını göstermiştir. Araştırmacılar tarafından taramalı elektron mikroskobu yardımıyla yapılan morfolojik analiz neticesinde şeker palmye lifi ve PLA matrisinin homojen dağıldığı ve daha iyi ara yüz bağlantısının gerçekleştiği gösterilmiş olup, bu da şeker palmye lifi/PLA kompozitlerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileşmesinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır [10].

Rupinder Singh ve arkadaşları ZnO nanoparçacık takviyeli PLA kompozit malzemelerinin mekanik, termal, morfolojik ve şekil hafızası etkisi üzerine bir

çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar tarafından, bu çalışma için 15 kg yük ve 0.15 Nm tork parametreleri altında hazırlanan PLA-2%ZnO besleme filamentlerinin en iyi mekanik ve termal özelliklere sahip olduğu görülmüş olup bununla birlikte elde edilen tüm verilerin analizin neticesinde bileşimin yeterli dayanıklılığa ve termal stabil özelliklere sahip olduğu sonuçlarına varılmıştır. Önerilen malzeme kombinasyonunun, özelleştirilmiş ve esnek sensörlerin üretimi için kullanılabilir olduğunu belirten araştırmacılar ayrıca Polimer matrisinde ZnO nanoparçacığının bulunmasının, protein, dopamin ve glikoz tabanlı biyosensörlerin 3D baskısı için uygulanabilirliğini mümkün kıldığını belirtmişlerdir [11].

Anith Liyana Mohd Sis, Nor Azowa Ibrahim ve Wan Md Zin Wan Yunus yaptıkları çalışmada PLA/PBAT (Polybutylene adipate terephthalate) karışımına takviye edilmiş kenaf lifinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Mekanik testlerle ortaya çıkan sonuçlara göre, %10 ağırlıkça PBAT eklenerek kırılğan bir polimerden dayanıklı ve esnek bir polimere dönüşmüş olduğu kanıtlanmış, PLA/PBAT (90:10 ağırlıkça) bileşiğine %10 ağırlıkça kenaf lifi eklenmesi ile kompozitin mekanik özelliklerini keskin bir şekilde düşürdüğü ortaya konmuştur. Ancak, APTMS eklenmesinden sonra biyokompozitin, gelişmiş mekanik özellikler sergilemiş olduğunu belirten araştırmacılar; APTMS'nin, kompozit için iyi bir bağlayıcı ajan olabileceğini ortaya koymuşlardır. Çekme, bükülme ve darbe testleri, %2 ağırlıkça APTMS ile güçlendirilmiş PLA/PBAT karışımının kenaf lifi takviyesinde en uygun mukavemeti göstermiş olduğu belirtilmiş, DMA (Dynamic Mechanical Analysis) testi depolama modülünde artış olduğunu ortaya koymuşlardır. Benzer şekilde araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen SEM analizi sonucunda PLA/PBAT karışımı ile kenaf lifi arasındaki etkileşim mekanizması ve arayüzey yapışmasının iyileştiği doğrulanmıştır [12].

Tetsuo Takayama ve arkadaşları biyoyoğun PLA/PGA (poliglikolik asit) lif takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemek amacıyla yaptıkları çalışmada eriyik karıştırma yöntemi kullanılarak üretilen poliglikolik asit (PGA) lif takviyeli polilaktik asit (PLA) kompozitlerinin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Araştırma sonucunda PGA lif dağılımının eğilme dayanımını ve eğilme modülünü artırmış olduğu sonucuna ulaşılmış, DMA (Dynamic Mechanical Analysis)

sonuçlarının, PGA lifinin PLA'nın bir çekirdeklendirici ajan olarak işlev gördüğü gösterilmiş ve bunun da PLA'nın moleküler zincirlerinin kısıtlanmasına neden olduğu ortaya konmuştur. Çalışma sonucunda moleküler zincirlerin kısıtlanmasının, aynı stres koşulunda deformasyonu azalttığı ve PLA'nın bükülme özelliklerinin iyileşmesini sağladığı kanıtlanmıştır [13].

Xinzhou Zhang, Lan Chen, Tom Mulholland ve Tim A. Osswald, FDM (fused deposition modeling) yöntemiyle üretilen PLA ve bakır/PLA kompozit parçaların mekanik özellikleri ve kırılma karakterizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında numuneleri farklı tarama açılarında ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $0^\circ/90^\circ$  ve  $\pm 45^\circ$ ) basan araştırmacılar böylelikle tarama açılarının numunelerin çekme özellikleri ve dinamik mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelemişlerdir. Çekme testi sonrası numunelerin kırılma yüzeylerini SEM ile incelemişler, kırılma modu analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında yaptıkları dinamik mekanik termal analiz ile takviyeli bakır fiberlerin eklenmesi sonucu PLA'nın termal stabilitesinin artırılabilceğini göstermiş olan araştırmacılar bununla birlikte Cu fiberin PLA'ya göre daha düşük çekme dayanımına ve daha yüksek elastikiyete sahip olması nedeniyle, bakır fiber eklenmesiyle Cu/PLA kompozit numunesinin çekme dayanımının azalmış ancak kopma uzaması artmış olduğunu kanıtlamışlardır [14].

S. Garzon-Hernandez ve arkadaşları, FDM 3D baskılı polimerlerin tasarımı üzerine yaptıkları çalışmada, mekanik özelliklerin tahmininde deneysel-modelleme metodolojisi ile ilgili araştırmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla ilk olarak, ABS bileşenlerinin boşluk yoğunluğu ve mekanik performansı üzerinde üç baskı parametresinin etkisini incelemek için deneysel bir karakterizasyon yapmışlar; katman kalınlığı, baskı yönü ve tabaka sayısı parametrelerini değiştirme yoluyla sonuçları incelemişlerdir. Araştırmacılar tarafından daha düşük katman kalınlıkları ve uzunlamasına baskı yönü için daha yüksek elastik modül ve maksimum gerilme değerleri gözlenmiş olup, bu iyileşmede hacimsel boşluk oranının azalmasının da etkisi olduğu yönünde bir yorum yapılmıştır. Çalışma sonucunda katman sayısının artmasının maksimum gerilme hariç olmak üzere daha düşük mekanik özelliklere yol açtığı; bununla birlikte tabaka yüksekliği ve çevre sıcaklığının bu çalışma kapsamındaki en önemli üretim parametreleri olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır [15].



Mohd Shahneel Saharudin ve arkadaşları FDM ve CFF 3D baskı teknolojileri kullanılarak üretilen karbon elyaf takviyeli PLA ve PA temelli malzemelerin yüzey dokusu kalitesi ve mekanik özelliklerini araştırdıkları çalışmanın sonucunda, karbon elyafının eklenmesinin hem çekme dayanımını hem de elastiklik modülünü artırmış olduğu çıkarımlarını yapmışlardır. Yaptıkları deneysel araştırmalar sonucunda sadece seçilen katmanların karbon malzemeden oluştuğu CFF teknolojisiyle üretilen modellerin en yüksek dayanıklılığa sahip olduğunu görmüşler, yapılan SEM mikroskopik fotoğrafların analizi sayesinde ise dayanıklılık açısından karbon elyafının katkı maddelerinin CCF baskı yönteminin daha etkili olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Sadece karbon elyafının eklenmesinin yüksek mekanik özellikleri belirleyen bir faktör olmadığını söyleyen Mohd Shahneel Saharudin ve arkadaşları; 3D baskı yöntemine bağlı olarak elyaf tedarik yönteminin de önemli olduğu görmüşler, ince cidarlı modellerin inşası için CFF teknolojisi ve karbon elyaf takviyeli poliamid malzemenin kullanılmasının, yüzey yapısı ölçümleriyle göstermiş oldukları üzere daha iyi yüzey pürüzlülüğü sağlayan doğru bir çözüm olduğu sonucunu ortaya koymuşlardır [16].

M. Samykano, FDM-3D baskı yöntemiyle üretilen Polilaktik Asit (PLA) malzemesinin mekanik özellikleri ve tahmin modeli üzerine gerçekleştirmiş oldukları bu araştırma çalışmasında üretilen numuneler ile çekme özelliklerini değerlendirmek ve baskı parametrelerinin çekme davranışı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla bir takım testler yapmışlardır. Bu testler neticesinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde maksimum çekme dayanımının dolgu yüzdesinden önemli ölçüde etkilendiği, baskı açısı ve tabaka kalınlığından çok az etkilendiği sonuçlarına varılmış olup, öte yandan, kırılma deformasyonu, elastiklik modülü ve sertlik faktörünün dolgu yüzdesi ve katman kalınlığından daha fazla etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Yaptıkları analizler, dolgu yoğunluğunun çekme davranışını etkileyen ana faktör olduğunu doğrulamış olup, optimum çekme özellikleri için en iyi parametre kombinasyonunun, 0.3 mm tabaka kalınlığı, 40° baskı açısı ve %80 dolgu yoğunluğu olduğu araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir [17].

Wangwang Yu, Jianan Shi, Liwei Sun and Wen Lei, FDM 3D baskı yöntemiyle üretilen Astragalus/Polilaktik Asit biyokütle kompozitlerinin özellikleri üzerinde

baskı parametrelerinin etkilerini incelemek üzere gerçekleştirdikleri bu çalışmada, FDM 3D baskı teknolojisi kullanılarak PLA/ROA biyokütle kompozitleri 3D printer ile basmışlar ve PLA/ROA kompozit numunelerinin özellikleri üzerinde baskı parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre mekanik özelliklerin, baskı sıcaklığının 200 °C'den 220 °C'ye veya dolgu yoğunluğunun %60'tan %100'e artırılmasıyla iyileştirilebilir olduğunu görmüşlerdir. Bununla birlikte baskı hızının 50 mm/s'den 70 mm/s'ye veya baskı kalınlığının 0.1 mm'den 0.2 mm'ye artırılması sonucunda ise mekanik dayanımların azalmış olduğunu gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar ayrıca baskı açısının mekanik özellikler üzerindeki etkilerini de incelemişler, 0° baskı açısına sahip numunenin en yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Çalışma kapsamında FDM 3D baskılı PLA/ROA kompozit numunelerinin termal stabilitesi, baskı sıcaklığı ve dolgu yoğunluğunun artırılması veya baskı hızının ve baskı kalınlığının azaltılmasıyla iyileştirilebilir olduğu kanıtlanmış olup, 0° depozisyon açısında basılan numunenin, 45° veya 90° depozisyon açısında basılanlara göre termal olarak daha stabil olmasına rağmen bunun belirgin bir fark olmadığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar tarafından yapılan tüm deneysel çalışmalar neticesinde; kullanılan tüm parametreler arasında baskı hızı parametresinin, numunenin ıslanabilirliği üzerindeki en önemli etkiye sahip parametre olduğu sonucuna ulaşılmıştır [18].

## **2.2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ ÖZETİ**

Literatür araştırması incelendiğinde, genel olarak PLA malzemeye takviye edilen farklı bileşenler ile oluşturulan kompozit malzemeler kullanılarak üretilen ürünlerin gerek termal, gerek mekanik ve gerekse iletkenlik özelliklerinde iyileşmeler meydana getirdiği gözlenmiştir. Analizler sonucu tespit edilen bu iyileşmeler, yapılan çeşitli testler sonucunda da doğrulanmıştır. Kenaf, PGA, APTSM, PBAT, ZnO, Bakır gibi birçok takviye malzemesi ile farklı kompozit malzemeler üretilerek incelemeler yapılsa da bakır takviyeli, tungsten takviyeli ve bronz takviyeli kompozit filamentlerin yorulma testleri ile ömür analizleri, eğilme modülü ve çekme modülleri üzerine yapılan çalışmaların sınırlı kaldığı ve hatta bazıları ile ilgili henüz bir çalışma yapılmadığı görülmüştür.

Yapılan çalışmaların incelenmesi sonucunda FDM yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özelliklerini belirleyen tek parametrenin filamentin cinsi veya takviye malzemesi olmadığı görülmüş olup bununla birlikte yazdırma sırasında kullanılan bazı parametrelerin de mekanik dayanıma etki ettiği gözlemlenmiştir. Bu parametreler;

- Katman kalınlığı
- Baskı açısı
- Baskı hızı ve
- İç doluluk oranlarıdır.

Bu nedenle bir ürün üretilirken tüm bu parametreleri sayısal olarak modelleyerek endüstriyel uygulamalar için optimizasyon tekniklerinden de faydalanma yoluyla optimum baskı parametrelerinin belirlenerek üretimlerin yapılması ideal mekanik özelliklerin edilmesi ve yüksek kaliteli ürün ortaya çıkarılması için iyi bir yol olacaktır.

Farklı analiz yöntemleri kullanılarak yapılan modellemeler ile takviyeli malzemelerin en ideal oranlarının belirlenmesi ve üretim parametrelerinin optimize edilerek seçilmesi, endüstride gereksiz zaman kayıplarının önüne geçeceği gibi maliyet etkin çalışmalar yaparak kısa zamanda daha az maliyet ile ideal sonuçlara ulaşılmasına önemli katkılar sunacaktır. Analiz yöntemleriyle desteklenen deneysel çalışmalar ortaya çıkabilecek birçok önemli sorunun önceden tahmin edilmesiyle hem zaman kaybını hem de maddi kayıpları en aza indirerek çalışmalara önemli katkılar sağlayacaktır.

Bu çalışmada, literatür çalışmalarından farklı olarak daha önce çalışma yapılmamış olan bakır takviyeli PLA, bronz takviyeli PLA ve tungsten takviyeli PLA filamentler ile PLA filamentlerin çekme testi, üç nokta eğme testi ve yorulma testleri ile mekanik dayanımları karşılaştırılmıştır. Öncelikle üretimlerde her bir malzeme için optimum üretim parametrelerinin belirlenebilmesi amacıyla birkaç farklı üretim parametresi ile numuneler üretilmiş ve bu numuneler üzerinde çekme testleri yapılarak elde edilen sonuçlar Minitab istatistiksel analiz programında Taguchi metodu

kullanılarak optimum üretim parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra elde edilen optimum parametrelerde 4 farklı malzeme ile üretimler gerçekleştirilerek, çekme testleri, 3 nokta eğme testleri, yorulma testleri ve yüzey pürüzlülükleri ile ağırlık ölçümleri yapılarak malzemelerin mekanik özellikleri konusunda bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu çalışma ile özellikle, günümüzde hızla yaygınlaşmakta olan elektrikli araç endüstrisinde karşılaşılan üretim zorluklarına alternatif ve hızlı bir çözüm olarak sunulmak üzere FDM 3D yazıcı ile üretilen parçaların kullanılabilirliği konusundaki yapılacak olan mekanik analizler ile literatüre yenilikçi bir veri ile katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

## BÖLÜM 3

### KURAMSAL TEMELLER

#### 3.1. KATMANLI İMALAT

Katmanlı imalat, bir geometrik ifade ile malzemenin ard arda eklenmesi yoluyla üç boyutlu fiziksel nesnelerin oluşturulduğu bir süreç olarak tanımlanır [19]. Charles Hull tarafından 1980 yılında ticarileştirilen katmanlı imalat ile üç boyutlu baskı işlemlerinde son yıllarda muazzam gelişmeler yaşandığı rahatlıkla söylenebilir [20]. Şu anda üç boyutlu baskı genellikle yapay kalp pompası üretimi, 3D baskı ile kornea üretimi, mücevher koleksiyonlarının oluşturulması, havacılık endüstrisi ile ilgili diğer ürünlerin üretimi ve gıda endüstrisi gibi farklı endüstrilerden geniş bir kullanım alanına sahiptir. Katmanlı imalat teknolojisi, üç boyutlu yapıların bilgisayar destekli tasarım (CAD) çiziminden doğrudan katman katman imalat teknolojisinden türemiştir [21]. Katmanlı imalat teknolojisi, gerçekten yenilikçi bir teknoloji sahnesi olarak ortaya çıkmış olup çok yönlü bir teknoloji olarak geliştiği söylenebilir. Bu yöntem, üretim verimliliğini artırmak isteyen şirketler için yeni fırsatlar sunmuş, böylelikle geleneksel termoplastikler, seramikler, grafen tabanlı malzemeler ve metal katmanlı imalat teknolojisi kullanılarak basılabilmeye başlanmıştır [22]. Katmanlı imalat teknolojisinin endüstride benimsenmesi, üretim hızını artırırken maliyetleri azaltacak devrim niteliğinde bir gelişmedir. Aynı zamanda, tüketicinin talebinin üretim üzerinde daha fazla etkisi olacağı öngörülmektedir. Tüketiciler, nihai ürünler üzerinde daha fazla etkiye sahip olup; gelişen ve değişen dünya şartları gereği sahip olmak istedikleri ürünlerin kendilerine özel olarak üretilmesini yani özelleştirilmesini talep etmeleri yakın gelecekte sıklıkla karşılanabilecek bir durum olarak görülmektedir.

Katmanlı imalat teknolojilerinin çeşitli ihtiyaçlar için geliştirildiği bir dizi yöntem bulunmaktadır. ASTM Standart F2792'ye göre 7 adet katmanlı imalat ile üretim yöntemi bulunmaktadır. Bunlar; binding jetting (bağlayıcı püskürtme), directed

energy deposition (yönlendirilmiş enerji biriktirme), material extrusion (malzeme ekstrüzyonu FDM), material jetting (malzeme püskürtme), powder bed fusion (toz yatağı füzyonu), sheet lamination (tabaka lamine) and vat photopolymerization (vat fotopolimerleştirme)'dir. Yöntemlerin veya teknolojilerin kullanım açısından birbirlerine üstünlüğü söz konusu değildir, çünkü her birinin kullanıldığı farklı bir uygulama alanı vardır. Günümüzde katmanlı imalat teknolojileri, yalnızca prototip kullanımıyla sınırlı değildir, aynı zamanda çeşitli ürünlerin üretiminde de giderek daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [23].

### **3.1.1. Bağlayıcı Püskürtme**

Bağlayıcı püskürtme, bir sıvı bağlayıcı ajanın seçici olarak serpilmiş toz taneciklerini birleştirmek için kullanıldığı hızlı prototipleme ve katmanlı imalat yöntemi olarak tanımlanır. Bağlayıcı püskürtme teknolojisinde, kimyasal bağlayıcıyı yaymak için tozun üzerine püskürtme işlemi uygulanmaktadır. Bağlayıcı püskürtme uygulamaları, döküm kalıpları, ham sinterlenmiş ürünler veya kum benzeri materyallerden büyük hacimli ürünler üretmek için kullanılmakta olup bu yöntem ile metaller, kumlar, polimerler, hibrid ve seramikler de dahil olmak üzere çeşitli malzemeler basılmaktadır. Bu yöntemde kum benzeri bazı malzemeler ek işleme ihtiyaç duymazlar. Ayrıca, bağlayıcı püskürtme işlemi, toz taneciklerinin bir araya yapıştırılması nedeniyle basit, hızlı ve ucuzdur. Son olarak, bağlayıcı püskürtme yönteminin, çok büyük ürünleri de basabilme yeteneğine sahip olduğu söylenebilir.

### **3.1.2. Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme**

Yönlendirilmiş enerji biriktirme, genellikle mevcut bileşenlere malzeme eklemek veya onarımlar yapmak için yaygın olarak kullanılan daha karmaşık bir katmanlı imalat yöntemi olarak tanımlanır. Tane yapısının yüksek derecede kontrol edilebilme yeteneğine sahip bu yöntem üretilen nesnenin yüksek kalitede basılabilmeye olanak sağlamaktadır. Yönlendirilmiş enerji biriktirme süreci, ilkel ekstrüzyon prensibine benzemekte, ancak nozul belirli bir eksene sabitlenmemiş ve çeşitli yönlere hareket edebilmektedir. Ayrıca bu yöntem seramikler ve polimerler ile de kullanılabilir ancak genellikle toz veya tel formundaki metaller ve metal esaslı

hibridlerle birlikte kullanılması tercih edilmektedir. Lazer birleştirme ve lazerle şekillendirme (LENS) gibi lazer birleştirme teknolojileri de bu yöntemde birer örnek olarak verilebilir. Lazer birleştirme, küçük milimetrik parçalardan metrelerce büyüklükteki parçalara kadar birçok farklı parçayı üretmek veya onarmak için kullanılabilen ve yeni sayılabilecek bir teknoloji olarak tanımlanmaktadır. Lazer birleştirme teknolojisi takım, taşımacılık, havacılık ve petrol ve gaz sektörlerinde ölçeklenebilirlik ve çeşitli yetenekler sağlayabildiği için yaygın bir şekilde tercih edilmektedir.

### **3.1.3. Malzeme Ekstrüzyonu**

Malzeme ekstrüzyonu tabanlı katmanlı imalat teknolojisi genelde plastik ve polimer malzemelerin çok renkli üretimine imkan sağlayan bir yöntem olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemin geniş bir uygulama alanı olmasıyla birlikte üretim maliyetleri oldukça düşük olan bir yöntemdir. Ayrıca, bu süreç, ürünün tamamen fonksiyonel parçalarını üretebilmek yeteneğine sahiptir. Füzyonlu çözelti modelleme (FDM), malzeme ekstrüzyon sisteminin ilk örneği olarak gösterilebilir. 1990'ların başında geliştirilmiş olan FDM yönteminde polimer ana malzeme olarak kullanılır. FDM, termoplastik filamentı ısıtarak ve ekstrüde ederek parçaları tabandan tepeye doğru katman katman oluşturan bir yöntemdir. FDM metodunda öncelikle termoplastik, yarı sıvı bir duruma ısıtılır ve ekstrüzyon yolunda ultra ince boncuklar haline gelip nozuldan akıtılarak üretilmektedir [24]. Destek veya tampona ihtiyaç duyulan yerlerde 3D yazıcı ile, iskele görevi gören çıkarılabilir (kırılabilir) yapı oluşturularak üretim aşamaları kolay hale getirilmiş olur.

### **3.1.4. Malzeme Püskürtme**

ASTM Standartlarına göre malzeme püskürtme, yapı malzemesinin bir kafa tarafından damla damla seçici olarak yerleştirildiği bir katmanlı imalat yöntemidir. Malzeme püskürtme yönteminde ışığa tepki veren malzemelerin UV (ultraviyole) ışık altında katman katman ilerlemesi yoluyla parça oluşturulur. Aynı zamanda, malzeme püskürtme yöntemi, çok pürüzsüz bir yüzey bitişi ve yüksek boyutsal doğruluk ile parçalar üretebilmeyi sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem polimerler,

seramikler, kompozitler ve hibrit malzemeler olmak üzere çeşitli malzemeleri içeren geniş bir malzeme yelpazesine sahip olmasıyla bilinmektedir.

### **3.1.5. Toz Yatağı Füzyonu**

Toz yatağı füzyon yöntemi, elektron ışını eritme (EBM), seçici lazer sinterleme (SLS) ve seçici ısı sinterleme (SHS) baskı tekniklerini içeren bir yöntemdir. Bu yöntemde malzeme tozunu birleştirmek veya eritmek için bir elektron ışını veya lazer kullanılır. Bu yöntemde kullanılan malzemelere örnek olarak metaller, seramikler, polimerler, kompozitler ve hibrit bazı malzemeler gösterilebilir. Seçici lazer sinterleme (SLS), toz tabanlı katmanlı imalat teknolojisinin ana örneklerindedir. SLS teknolojisi, 1987 yılında Carl Deckard tarafından geliştirilmiştir. SLS, hızlı bir şekilde işlevsel, yüksek doğrulukta ve çeşitli yüzey bitişine sahip bir yöntemdir. Seçici lazer sinterleme metal, plastik ve seramik nesnelere üretmek için kullanılabilir. SLS yönteminde yüksek güçlü bir lazer, polimer tozlarını sinterlemek için kullanılır. SHS yönteminde ise termoplastik tozlar bir başlıktan dökülerek bir katman oluşturulur ve bu katmanlara parçanın şekline göre sinterlemek için ısı uygulanması yoluyla 3D baskı nesnesi üretimi gerçekleştirir. Tozların sinterlenerek sabitlenmesi için gerekli olan bu ısıyı sağlamak amacıyla termal bir yazıcı kafası kullanılmaktadır [25].

### **3.1.6. Tabaka Lamine**

ASTM tanımına göre tabaka lamine yöntemi, malzeme tabakalarının bir araya getirildiği katmanlı imalat yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemi kullanan katmanlı imalat teknolojilerinin örnekleri laminated object manufacturing (LOM) ve ultrasound additive manufacturing (UAM) olarak sıralanabilir. Bu sürecin avantajları, tam renkli baskılar yapabildiği, nispeten ucuz olması, malzeme işleme kolaylığı ve fazla malzemenin geri dönüştürülebilmesidir. Laminated object manufacturing (LOM) yöntemi, düşük maliyetli üretim ve daha az işletme süresi avantajlarının yanı sıra karmaşık geometrik parçaları üretebilen bir teknolojiye sahip olması ile tanınan bir yöntemdir. Ultrasound additive manufacturing (UAM) ise, sesi



kullanarak özelliiksiz bir folyodan çekilen metal tabakaları birleştiren yenilikçi bir üretim teknolojisi olarak tanımlanabilir.

### **3.1.7. Vat Fotopolimerizasyon**

Endüstride sıklıkla kullanılan temel katmanlı imalat yöntemidir. Genel olarak bir lazer, ışık veya ultraviyole (UV) kullanarak foto reaktif polimerlerin kürleşmesi prensibine dayanan bir fotopolimerizasyon işlemi olarak tanımlanmaktadır. Fotopolimerizasyonu kullanan katmanlı imalat yöntemlerinin örnekleri stereolitografi (SLA) ve dijital ışık işlemesi (DLP) yöntemleridir. SLA sıvı polimerleri katıya dönüştürmek için (UV) ışığa maruz bırakma işlemi olan fotopolimerizasyon yöntemini kullanarak, 3D nesnelerin oluşturulması için kullanılan bir katmanlı imalat yöntemi olmakla birlikte, dijital ışık işlemesi sebebiyle fotopolimerlerle çalışan stereolitografiye benzerliği dikkat çekmektedir. İki yöntemin temel farkının ışık kaynağındaki farklılık olduğu söylenebilir. Dijital Işık İşlemesi yöntemi ise, genellikle Stereolitografi'den daha hızlı yapılmasını sağlayan daha geleneksel bir ışık kaynağını kullanır. Vat Fotopolimerizasyon yönteminin önemli parametreleri maruz kalma süresi, dalga boyu ve güç kaynağı kapasitesidir. Başlangıçta kullanılan malzemeler sıvıdır ve sıvı malzemenin ultraviyole ışığa maruz kaldığında sertleştiği gözlemlenmektedir. Fotopolimerizasyon, iyi detaylar ve yüksek kaliteli bir yüzey ile üst düzey bir ürün sunmaktadır [25].

### **3.2. 3 BOYUTLU YAZICILAR**

3D yazıcılar, üç boyutlu nesnelere katmanlar halinde oluşturan otomasyonlu cihazlardır. Bu cihazlar bir tasarım dosyasını girdi olarak alırlar ve bu dosyadaki geometrik verileri takip ederek malzemeyi katmanlar halinde birleştirme yoluyla nihai nesneyi oluştururlar. Bu teknoloji, endüstriyel üretimden kişisel projelere kadar geniş bir yelpazede kullanılır. Hızlı prototipleme teknolojisi, imalat uygulamalarında, medikal/dental implant yapımında, kavramsal modellemede, doğrudan döküm kalıbı ve parça üretiminde, hassas döküm tekniği ile metal parça ve prototip üretiminde, mimari uygulamalarda, uzay/otomotiv sanayinde, hızlı kalıp imalatında, eğitim amaçlı donanımın yapımında ve takı sektörü gibi birçok farklı alanda

kullanılmaktadır. Hızlı prototip üretiminde ilk adım, herhangi bir CAD yazılımı veya bir lazer ya da optik tarayıcı kullanarak parçanın 3D CAD modelini tersine mühendislik yapmaktır. CAD yazılımları ile hızlı prototipleme makineleri arasında veri transferi için gereken ara yüz, STL (STereoLithography) formatını içermektedir [26].

CAD yazılımları tarafından oluşturulabilen STL dosyaları, hızlı prototiplemede yaygın olarak kullanılan bir dosya formatı olarak tanımlanır. Bu dosyalar, renk, doku veya diğer öznitelikleri temsil etmeyen 3D nesnenin yüzey geometrisini yalnızca üçgen yüzeyler kullanarak tanımlar. Düz yüzeyler az sayıda üçgen yüzeye sahipken, radyuslu yüzeyler çok sayıda küçük üçgen yüzeyden oluşmaktadır. STL dosya formatına dönüştürülen model, hızlı prototip sistemlerinin yazılımlarına aktarılmasının ardından bu dönüşüm aşamasında oluşabilecek hatalar kontrol edilir. Yöntemin üçüncü adımında, model, makinenin özelliklerine ve parça hassasiyetine bağlı olarak dilimlere bölünmektedir. Burada her dilim, modelin ilgili kesit alanını temsil eder ve dilim kalınlığı, iki kesit arası mesafe kadar olur. Bu kesit alanları birbirinden bağımsız olarak ancak ardışık bir şekilde ele alınmaktadır. Çeşitli tarama yöntemleri kullanılarak tarama yolları hesaplanmaktadır. Burada tarama yöntemleri, belirli bir eksene veya modelin kenarına paralel veya açılı hatlar, modelin dış konturları referans alınarak merkez noktasına doğru spiral bir şekilde takip edilen hatlar gibi çeşitli şekillerde olabilmektedir. Ancak, genellikle ortak bir özellik olarak dış konturu takip eden bir hatla çevrelendikten sonra arada kalan boşluğun istenilen tarama metoduyla taranması gösterilebilir. Dış konturların taranma şekli, yüzey pürüzlülüğünü ve ölçüsel tamlığı doğrudan etkileyen bir durumdur. Çünkü imalat aşamasında dilimler ele alındığından, sadece başka bir dilim tarafından kapatılmamış dilimlerde dış konturların yanı sıra dilimin tüm alanının tarama şekli ve hassasiyeti önemli kriterlerdir. Dördüncü adım ise parçanın inşa edilmesi aşamasıdır. Birçok teknikten uygun olan herhangi biri kullanılarak, hızlı prototipleme makineleri modeli katman katman inşa ederler [27].

3 boyutlu yazıcıların farklı çalışma prensipleri mevcuttur. Mekanik olarak malzemeyi katmanlar halinde birleştiren Fused Deposition Modeling (FDM) yönteminde, Plastik filamentler (genellikle PLA, ABS, PETG gibi) eritilir ve

katmanlar halinde tabana eklenir. Mekanik bir nozul, erimiş plastik malzemeyi istenen desene göre tabana uygular, en yaygın kullanılan yöntemlerdendir. İkinci yöntem, Stereolitografi (SLA) yöntemidir, bu yöntemde ultraviyole (UV) ışık kullanılmaktadır. Bir reçine tankında bulunan sıvı reçine, UV lazer ile katmanlar halinde sertleştirilir. Bu şekilde nesne oluşturulur. SLA yazıcılar yüksek ayrıntı seviyelerine sahip ve ince detayları yakalayabilir. Bir diğer yöntem de Selective Laser Sintering (SLS) yöntemidir. Bu yöntemde bir lazer tarafından, ince bir tabaka metal veya plastik tozu ısıtılarak sinterlenir. Sinterlenmiş toz, katmanlar halinde üst üste birleştirilir ve nihai nesne oluşturulur. SLS, çok çeşitli malzemelerle çalışabilmeye yeteneğine sahip bir yöntemdir.

Malzeme çeşitliliği de 3 boyutlu yazıcılar için önemli bir diğer konudur. Plastikler, Polimerler, reçineler, metal tozları gibi çeşitli malzemeler kullanılarak nesnelere üretilir. Bu, kullanım alanlarını genişleten bir özelliktir. Endüstriyel tasarımdan tıp alanına, mimariden eğitime kadar birçok sektörde 3 boyutlu yazıcılar kullanılmaktadır.

3 boyutlu yazdırılabilir nesnelere, özel yazılımlar kullanılarak tasarlanmakta ve bu tasarımlar daha sonra dilimlenerek katmanlara ayrılmaktadır. Sonrasında yazıcı, katmanları üst üste birleştirerek nihai nesne oluşturulur.

3 boyutlu yazıcılar; üretim hızı düşüklüğü, bazen yüzey kalitesinin istenilen düzeyde olmayabilme ihtimali ve kısıtlayıcı malzeme kullanımı gibi bazı dezavantajlara da sahiptir.

### **3.2.1. 3 Boyutlu Yazıcılarda Kullanılan Filamentler**

3 Boyutlu yazıcılarda kullanılan filamentler, 3D baskı işlemi için temel malzemelerdir. Bu filamentler, genellikle plastik veya diğer polimer bazlı malzemelerden üretilir ve 3D yazıcı tarafından eritilerek baskıları yapılmaktadır. Her filament farklı avantajlar ve dezavantajlara sahiptir. Malzeme seçimi, baskı yapılacak nesnenin amacına, mekanik ve termal gereksinimlerine göre belirlenmelidir. Çeşitli

uygulamalardaki farklı gereksinimlere göre bazı katkılı filamentler de bulunmaktadır. Filamentler hakkında bazı bilgiler aşağıdaki gibidir:

**PLA (Polylactic Acid):** PLA, biyo-tabanlı bir termoplastik malzemedir ve en yaygın kullanılan 3D baskı filamentlerinden bir tanesi olarak bilinir. Çevre dostu ve kolay eritilebilir olması ve düşük erime noktasına sahip olması nedeniyle düşük sıcaklıkta çalışan yazıcılarda kullanılabilir. Aynı zamanda renk seçenekleri geniş ve genellikle hoş kokuludur.

**ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene):** ABS, dayanıklılığı ve darbe direnci nedeniyle popüler bir filamenttir. Isıya karşı daha dayanıklıdır, bu nedenle endüstriyel uygulamalarda tercih edilebilirliği daha yüksek bir filamenttir. Ancak, ABS baskı yapmak için daha yüksek sıcaklık gerektirebilir ve kapalı bir alan gerektiren, daha iyi havalandırılan bir ortamda kullanılması önerilmektedir.

**PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol):** PETG, PLA'nın dayanıklılığını ve ABS'nin işlenebilirliğini birleştiren bir filamenttir. Genellikle şeffaf veya yarı şeffaftır. Ayrıca gıda uygunluğu avantajlarına da sahiptir.

**TPU (Thermoplastic Polyurethane):** TPU, esneklik ve elastikiyet gerektiren uygulamalar için kullanılır. Ayakkabı tabanlarından telefon kılıflarına kadar geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptir.

**Nylon:** Nylon, dayanıklılığı ve esnekliği nedeniyle mühendislik uygulamalarında tercih edilen bir filamenttir. Söz konusu filamentin nem emebilme özelliğinin baskı sırasında dikkate alınması gereken bir faktör olduğu söylenir.

**Metal Filled Filaments:** Bu filamentler içerdikleri metal tozları sayesinde baskı sonrasında nesnelere metal benzeri bir görünüm ve ağırlık kazandırır.

**Wood Filled Filaments:** Ahşap tozları içeren filamentler sayesinde baskı sonrasında nesnelere ahşap benzeri bir doku ve görünüm kazandırır.

Reçine Filamentler: UV ışığı ile sertleşen reçineler, SLA veya DLP yazıcılarında kullanılır. Bu filamentler daha yüksek ayrıntı seviyelerine olanak tanıyan bir yapıya sahiptir.

Gümüş veya Altın Kaplamalı Filamentler: Bu tür filamentler, nesnelerin metalik parlaklık ve/veya metalik renge sahip olmasını sağlayan filamentlerdir.

## BÖLÜM 4

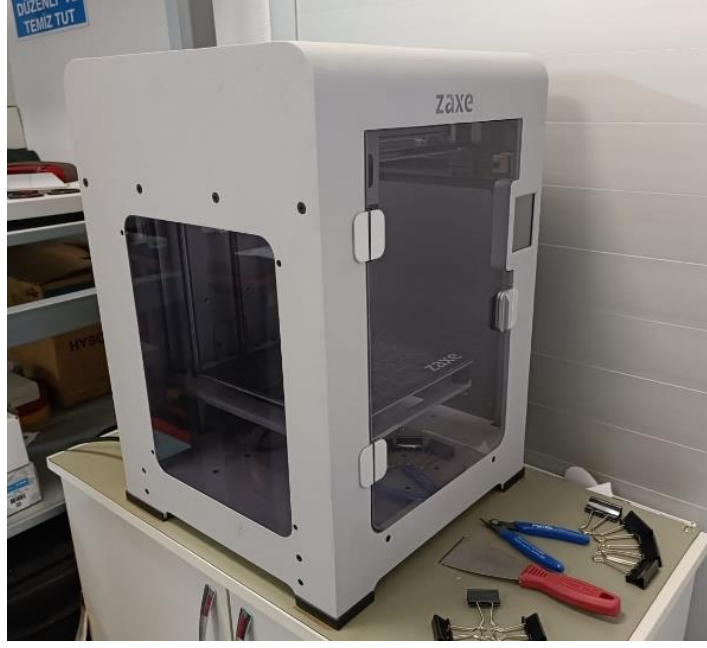
### MATERYAL VE YÖNTEM

#### 4.1. DENEY MALZEMESİ

Bu çalışmada PLA, Demir Katkılı PLA, Bronz Katkılı PLA, Tungsten Katkılı PLA ve Bakır Katkılı PLA gibi çeşitli filamentler kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan filamentlerin hepsi 1.75mm çapındadır. PLA olarak kullanılan filament ise standart bir filament olup ZAXE markasından temin edilmiş olup yerli üretilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan diğer katkılı PLA filamentler (Bronz Katkılı PLA, Tungsten Katkılı PLA ve Bakır Katkılı PLA) ise FROSCH markasından temin edilmiş olup ithaldir. Bu çalışmada kullanılan katkılı filamentler %80 oranında PLA ve %20 oranında da Bronz, Tungsten ve Bakır tozlarının bileşimi ile oluşturulmaktadır.

#### 4.2. DENEY PARAMETRELERİ

Numune üretimlerinde Zaxe marka Z1 model 3D yazıcı kullanılmıştır. Şekil 4.1’de 3 Boyutlu FDM yazıcı görülmektedir. Takviyeli ve takviyesiz PLA numuneler üzerinde baskı parametrelerinin etkisini belirleyebilmek için doluluk oranı, doldurma hızı, katman kalınlığı dört farklı seviyede, nozul çapının ise iki farklı seviyede baskı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu parametrelerin seçiminde kullanılan filament malzemeleri için üretici firmanın önerileri dikkate alınmıştır. Deneylerde kullanılan baskı parametreleri ve seviyeleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. 3 Boyutlu FDM yazıcı.

Çizelge 4.1. Kullanılan deney parametreleri.

<b>Baskı Parametreleri</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>
Filament	PLA	Bakır PLA	Bronz PLA	Tungsten PLA
Doluluk oranı (%)	25	50	75	100
Doldurma hızı (mm/s)	20	40	60	80
Katman kalınlığı (mm)	0,1	0,2	0,3	0,4
Nozul çapı (mm)	0,4	0,6		
Nozul sıcaklığı (°C)	210			
Tabla sıcaklığı (°C)	70			

### 4.3. DENEYDE ÖLÇÜLEN MEKANİK ÖZELLİKLER

PLA ve katkılı PLA malzemelerinin mekanik özellikleri; numune üretim parametrelerine bağlı olarak çekme dayanımı, akma dayanımı, yüzde uzama, elastiklik ve yorulma dayanımı parametreleri ile ölçülerek karşılaştırılmıştır. Her numunenin testlere sokulmadan önce hassas terazi ile ağırlık ölçümü ve yüzey pürüzlülüğü ölçümü gerçekleştirilmiştir. Eğme ve yorulma dayanımını belirlemede test sayısını azaltmak amacıyla her bir numune için maksimum çekme dayanımının elde edildiği optimum parametrelerde 36 adet parça üretilmiştir. Bu numuneler üzerinde eğme ve yorulma dayanımları gerçekleştirilmiştir.

#### 4.4. AĞIRLIK ÖLÇÜMLERİ

Üretilen her bir numunenin ağırlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2’de ağırlık ölçüm cihazı görülmektedir. Ağırlık ölçümü kalibrasyonlu Mettler AM100 marka hassas terazi ile gerçekleştirilerek kayıt altına alınmıştır. Ağırlık ölçümleri dış ortamdan etkilenmemesi için yalıtılmış hazne içerisinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.2. Hassas terazi.

#### 4.5. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Malzeme sertlik testleri, BAREISS marka HPE II tip sertlik ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. SHORE D skalasında gerçekleştirilen testler 5000 g yük altında yapılmıştır. Cihaz SHORE D sertlik ölçüm değeri doğrulaması RB60401 numaralı sertlik bloğu ile yapılmıştır. Sertlik bloğu için tanımlanan standart ölçüm süresi 3 saniyedir. Sertlik ölçümleri 3 saniye tutularak yapılmıştır. Kullanılan SHORE D cihazının özellikleri; Yay kuvveti (spring force) 44450mN, temas noktası baskı



kuvveti (contact pressure force) 5000g, indenter ball 30<sup>0</sup>, ölçüm mesafesi (measuring distance) 2.5mm, range of reading 0-100 şeklindedir. Sertlik ölçümü yapılırken her bir numunenin 4 farklı bölgesinden ölçümler alınarak bu değerler kaydedilmiştir. Şekil 4.3'te sertlik ölçüm cihazı ve test düzeneği görülmektedir.



Şekil 4.3. Sertlik ölçüm cihazı ve test düzeneği.

#### 4.6. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMLERİ

Üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü değeri ölçümleri Mitutoyo marka SJ-310 model yüzey pürüzlülüğü değeri ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri numunelerin 3 farklı bölgesi üzerinde her noktada üçer ölçüm alınarak ortalaması kaydedilecek şekilde gerçekleştirilmiştir ve ortalama Ra değeri kayıt altına alınmıştır. Şekil 4.4'te yüzey pürüzlülüğü değeri ölçüm cihazı ve test düzeneği görülmektedir.



Şekil 4.4. Yüzey pürüzlülüğü değeri ölçüm cihazı ve test düzeneği.

#### 4.7. ÇEKME TESTLERİ

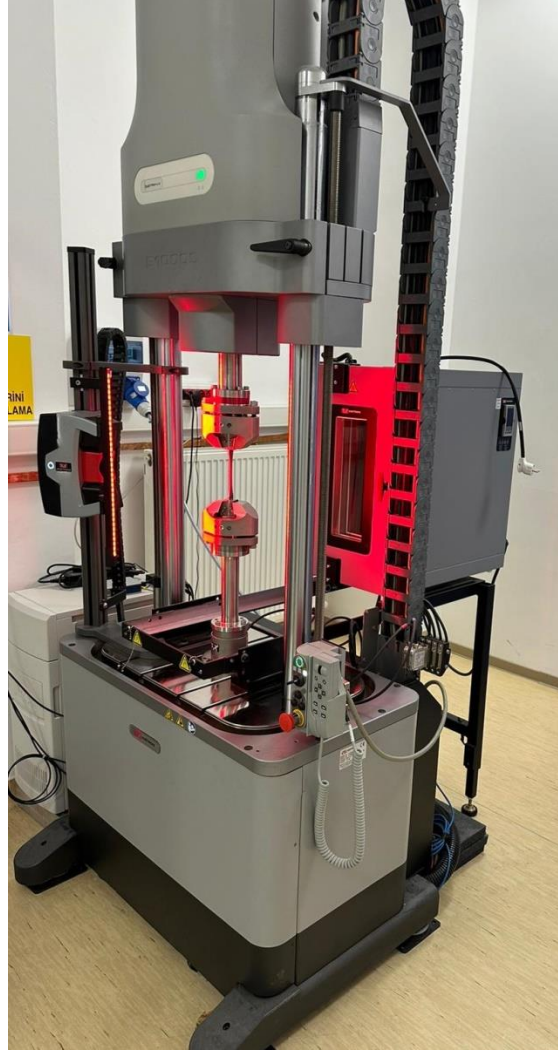
Çekme testleri INSTRON 5982 marka/model statik çekme basma cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda çekme testlerinin ASTM D638-14 standartlarına uygun olarak yapılmasına karar verilmiştir. Bu doğrultuda yine ASTM D638-14 standardına uygun olarak TYPE-IV tipinde test numuneleri üretilerek ilgili çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerden elde edilen akma dayanımı, çekme dayanımı ve yüzde uzama mekanik dayanım verileri kayıt altına alınmıştır. Şekil 4.5'te çekme basma cihazı ve test düzeneği görülmektedir.



Şekil 4.5. Çekme basma cihazı ve çekme test düzeneği.

#### 4.8. YORULMA TESTLERİ

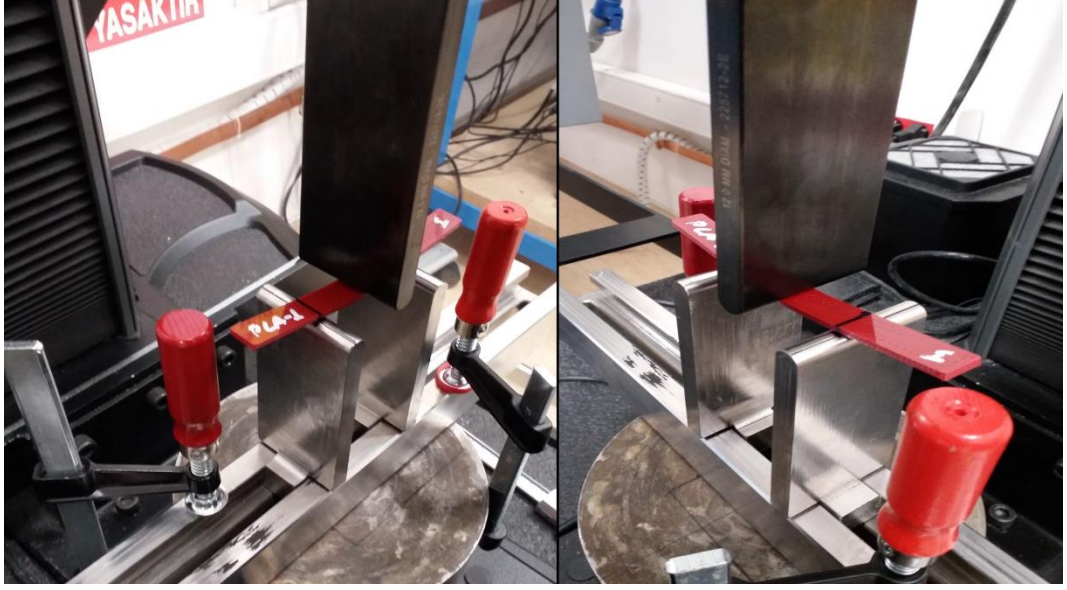
Yorulma testleri INSTRON E 10000 model dinamik test cihazı ile gerçekleştirilmiş olup, mevcut cihaz imkanları dahilinde 10 KN (Kilo Newton) yük hücresi kullanılarak yapılmıştır. Testler kuvvet kontrollü yapılmış olup, uzama kontrolü için AVE2 video ekstensometre de kullanılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda yorulma testlerinin ASTM D7791-17 standartlarına uygun olarak yapılmasına karar verilmiştir. Bu doğrultuda ASTM D638-14 standardına uygun olarak TYPE-IV tipinde test numuneleri üretilerek ilgili yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Yorulma testi öncesinde yapılan statik testlerden elde edilen verilere göre testler elastik bölge içinde kalacak şekilde yapılmıştır. Testler her bir numune grubu için önceden belirlenen stres değerinin %80, %65, %55 ve %40'na denk gelen stres seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Her stres seviyesinde 4'er test yapılarak sonuçlar kayıt altına alınmıştır. Bu çalışmada standartların önerdiği sayılarda testler gerçekleştirilmiş olup, toplamda her malzeme için 16 adet test yapılarak değerler kayıt altına alınmıştır. Şekil 4.6'te dinamik test cihazı görülmektedir.



Şekil 4.6. Dinamik test cihazı.

#### 4.9. ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ

Eğme testleri INSTRON 5982 marka/model statik çekme basma cihazı ile gerçekleştirilmiş olup, mevcut cihaz kabiliyetleri dahilinde 10 KN (Kilo Newton) yük hücresi kullanılarak yapılmıştır. Testlerde ekstensometre kullanılmamıştır ve test öncesinde yük hücresi doğrulaması yapılmıştır. Testler ASTM D790 standardının Prosedür A ve Tip 1 test düzeneklerine göre gerçekleştirilmiştir. Numunelerin alttan destekleme aparatı 5 mm yarıçapa sahip olup, eğme aparatı 6 mm yarıçapa sahiptir. Her malzemeden 5 adet numune test edilmiş ve kayıt altına alınmıştır. Şekil 4.7'de üç nokta eğme test cihazı ve düzeneği görülmektedir.



Şekil 4.7. Üç nokta eğme testi test düzeneği.

#### 4.10. KIRILMA YÜZEYİ İNCELEMELERİ

Numunelerin kırılma yüzeylerinden görüntüler alınarak incelemeler yapılmıştır. Kırılma yüzeyleri SEM kullanılarak incelenmiştir. Metalografik incelemeler Hitachi marka FlexSEM 1000 II model SEM cihazı kullanılarak yapılmıştır. SEM görüntü alma işlemleri sırasıyla; numune hazırlama, iletken kaplama ve mikroskop altında inceleme aşamalarından oluşmaktadır. Şekil 4.8’de taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı görülmektedir.



Şekil 4.8. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

#### 4.11. DENEY TASARIMI

Son yıllarda, Taguchi metodu üretim ve test maliyetlerini düşürmesi sebebiyle mühendislik uygulamalarında, optimizasyon problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır [28]. Eriyik Yığıma Modelleme (FDM) teknolojisi ile üretimde ürünün nihai halini etkileyen birçok proses parametresi vardır. Bu üretim sürecinde ürün kalitesini ve verimliliği artırmak için katman kalınlığı, baskı hızı, doluluk oranı, tarama açısı, tarama genişliği, hava boşluğu, baskı yönü ve nozul çapı gibi proses parametrelerinin en iyilenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada takviyeli ve takviyesiz PLA numunelerinin çekme dayanımı, yüzey pürüzlülüğü ve ağırlığı üzerinde doluluk oranı, baskı hızı, katman kalınlığı ve nozul çapı gibi baskı parametrelerinin etkisini istatistiksel olarak ifade etmek için Taguchi optimizasyon tekniği kullanılmıştır. İstatistiksel analizler Minitab 19 paket programında gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, deney tasarımı Taguchi L16 ( $4^4 \times 2^1$ ) dizinine göre yapılmıştır. Bu dizine göre gerçekleştirilen deneylerde elde edilen veriye sırasıyla  $S/N$  gürültü, varyans (ANOVA) ve regresyon analizleri uygulanmıştır. Bu analizlerde ilk olarak baskı parametrelerinin ideal seviyelerinin belirlenmesi için  $S/N$  sinyal-gürültü oranı analizi kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ve numunelerin ağırlıkları için Eş. 4.1'deki "en küçük en iyi eşitliği" yaklaşımı, çekme dayanımı için ise Eş. 4.2'deki "en büyük en iyi eşitliği" kullanılarak  $S/N$  oranları belirlenmiştir. Ardından çıktı parametreleri üzerinde kesme parametrelerinin etki düzeylerini belirlemek için varyans (Anova) analizi yapılmıştır. Anova tablolarında kesme parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki istatistiksel olarak anlamlılığı iki parametre dikkate alınarak değerlendirilir. Bunlardan birisi ( $P$ ) önem seviyesi diğeri ise ( $F$ ) katkı oranıdır. ( $P$ ) önem seviyesi değeri 0,05'ten küçük olduğunda parametrenin çıktı üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ve ( $F$ ) katkı değeri en büyük olan parametrenin de sonuca en fazla etki eden faktör olduğu kabul edilmektedir [29]. Doğrusal regresyon analizi kullanılarak çekme dayanımı, yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık için tahmin denklemleri geliştirilmiştir. Son olarak geliştirilen bu matematiksel tahmin denklemlerinin doğruluğunu test etmek için Eş. 4.3 ve Eş. 4.4 kullanılarak güven aralığı ( $CI$ ) değerleri hesaplanmış olup her bir çıktı parametresi için optimum ve rastgele baskı parametresi kombinasyonunda hata yüzdeleri hesaplanmıştır. Güven aralığı sınırı ve hata yüzdelerine göre optimize

edilmiş koşulun doğruluğu test edilmiştir.

$$n = \frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4.1)$$

$$n = \frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.2)$$

$$CI_{RaFc} = \sqrt{F_{a,1,fe} V_e \left[ \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (4.3)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1+T_{dof}} \quad (4.4)$$

Eşitlik 4.3 ve 4.4'te yer alan  $F_{a,1,fe}$  ifadesindeki  $F$  oranı %95 güven seviyesini,  $\alpha$  anlamlılık düzeyini,  $fe$  hata serbestlik derecesini ifade ederken,  $V_e$  hata varyansı,  $R$  doğrulama deneyleri için tekrar sayısı,  $n_{eff}$  etkili yineleme sayısı,  $T_{dof}$  toplam serbestlik derecesi ve  $N$  toplam deney sayısı anlamına gelmektedir [30].

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 5.1. ÇEKME DAYANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ

##### 5.1.1. *S/N* Oranlarının Analizi

PLA, Bakır katkılı PLA, Bronz katkılı PLA ve Tungsten katkılı PLA filamentleri ile farklı baskı parametrelerinde üretilen numunelerin ortalama çekme dayanımı ( $\sigma_c$ ) değerleri ile her bir baskı kombinasyonu için bu değerlere karşılık gelen *S/N* değerleri Çizelge 5.1’de yer almaktadır. Ürünün işlevi ve performansı bakımından yüksek dayanım istenilen bir özelliktir. Bu nedenle çekme dayanımının en yüksek değerde olması için *S/N* oranının hesaplanmasında Eşitlik 4.2 “en büyük en iyi” denklemi kullanılmıştır. Çekme testi sonunda, çekme dayanımı için aritmetik ortalama ve ortalama *S/N* oranı değerleri sırasıyla 25,28 MPa ve 15 dB olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1. Çekme dayanımı değerleri ve *S/N* oranları.

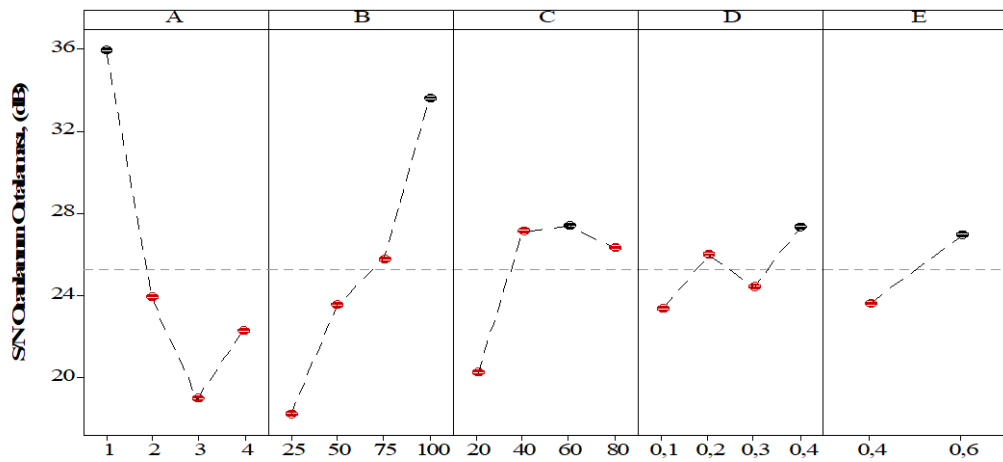
Test No	Baskı Parametreleri					$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_c$ - <i>S/N</i> (dB)
	A ( <i>Fm</i> )	B ( <i>İd</i> )	C ( <i>Dh</i> )	D ( <i>Kk</i> )	E ( <i>Nç</i> )		
1	PLA	25	20	0,1	0,4	19,87	25,964
2	PLA	50	40	0,2	0,4	35,52	31,009
3	PLA	75	60	0,3	0,6	38,60	31,731
4	PLA	100	80	0,4	0,6	49,74	33,934
5	Bakır+PLA	25	40	0,3	0,6	20,26	26,132
6	Bakır+PLA	50	20	0,4	0,6	20,09	26,059
7	Bakır+PLA	75	80	0,1	0,4	22,30	26,966
8	Bakır+PLA	100	60	0,2	0,4	33,05	30,383
9	Bronz+PLA	25	60	0,4	0,4	14,86	23,440
10	Bronz+PLA	50	80	0,3	0,4	15,37	23,733
11	Bronz+PLA	75	20	0,2	0,6	17,55	24,885
12	Bronz+PLA	100	40	0,1	0,6	28,16	28,992
13	Tungsten+PLA	25	80	0,2	0,6	17,88	25,047
14	Tungsten+PLA	50	60	0,1	0,6	23,21	27,313
15	Tungsten+PLA	75	40	0,4	0,4	24,63	27,829
16	Tungsten+PLA	100	20	0,3	0,4	23,46	27,406



Baskı parametreleri olan filament malzemesi, doluluk oranı, doldurma hızı, katman kalınlığı ve nozul çapının çekme dayanımı üzerindeki etkisinin analizi bir "  $S/N$  yanıt tablosu" ile gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.2 deneysel ölçümler ile elde edilen çekme dayanımı değerleri için  $S/N$  oranlarının yanıt tablosunu göstermektedir. Bu tabloda her bir baskı parametresi için  $S/N$  oranının en yüksek değeri optimum kontrol seviyelerini göstermektedir. Şekil 5.1'de bu baskı parametrelerinin seviye değerleri grafik formda gösterilmiştir. Sonuç olarak, en yüksek çekme dayanımı değerinin elde edildiği optimum baskı parametresi kombinasyonu  $A_1B_4C_3D_4E_2$  olarak belirlenmiştir. Başka bir deyişle, maksimum çekme dayanımı değeri için PLA filament malzemesi, %100 iç doluluk oranı, 60 mm/s doldurma hızı, 0,4 mm katman kalınlığı ve 0.6 mm nozul çapı ideal baskı parametreleri seviyeleri olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde gerçekleştirilen üretim sonucunda numunenin çekme dayanımı değeri 53,25 MPa olarak ölçülmüştür.

Çizelge 5.2.  $\sigma_c$  için  $S/N$  yanıt tablosu.

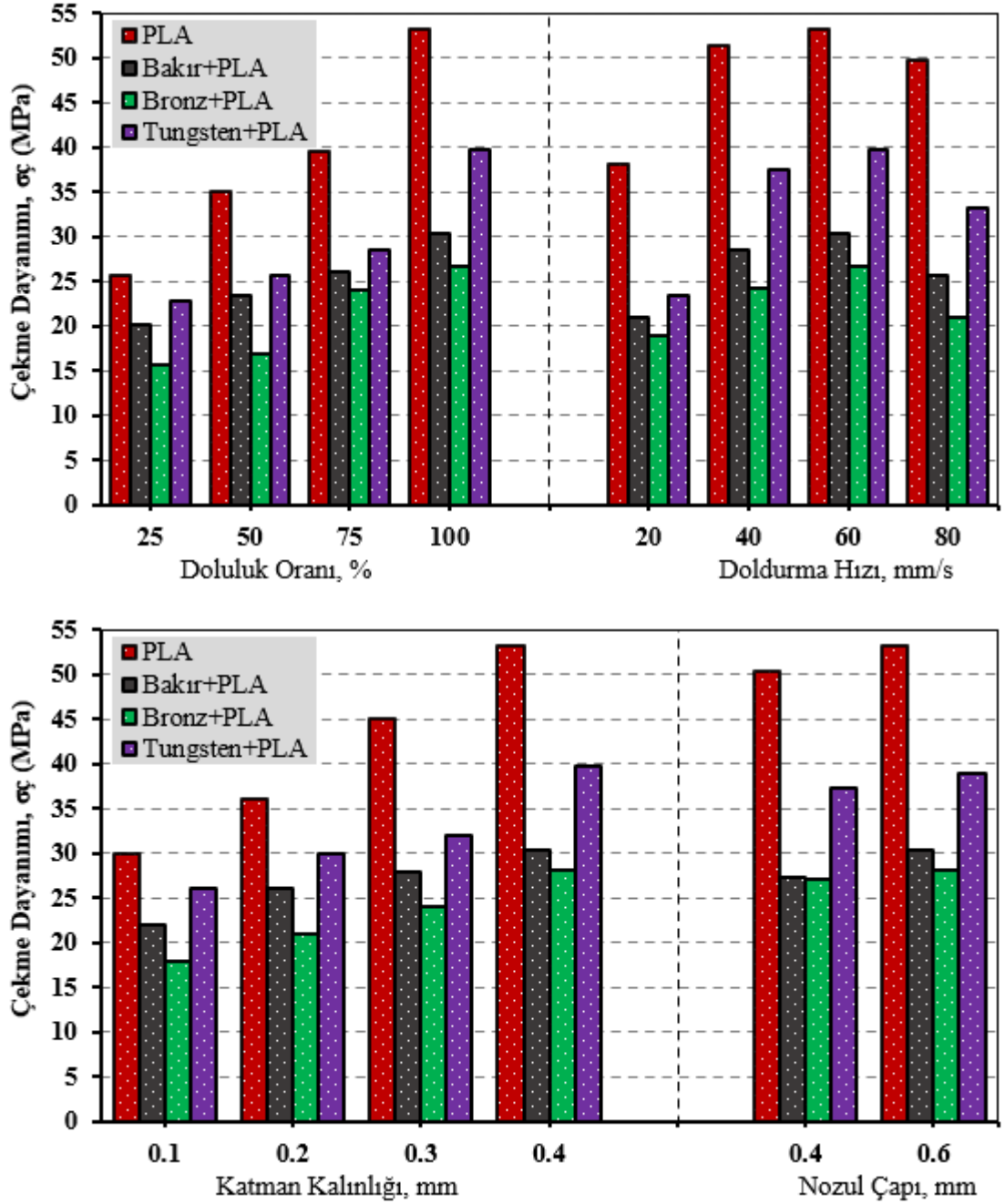
	Baskı parametreleri				
	A	B	C	D	E
$\sigma_c$					
1	<b>30,66</b>	25,15	26,08	27,31	27,09
2	27,39	27,03	28,42	27,82	<b>28,01</b>
3	25,26	27,85	<b>28,49</b>	27,25	-
4	26,90	<b>30,18</b>	27,42	<b>27,83</b>	-
Delta	5,40	5,03	2,41	0,58	0,92



Şekil 5.1. Numunelerin çekme dayanımı değeri için ortalama  $S/N$  oranları üzerinde baskı parametrelerinin etkisi

### 5.1.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

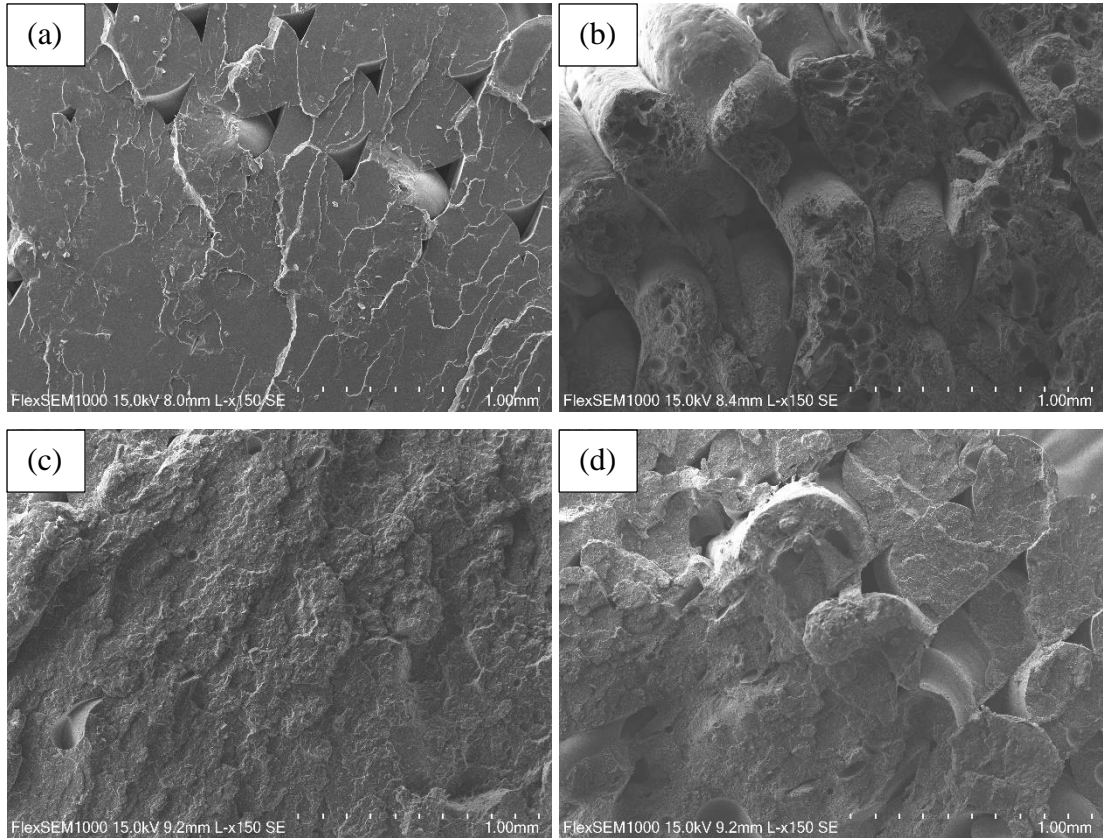
Şekil 5.2'de Bakır bronz ve tungsten takviyeli PLA filament malzemeleri ve PLA filament malzemesi ile üretilen numunelerin farklı baskı parametrelerinde çekme mukavemetlerinin değişimi gösterilmektedir. Şekil 5.2 incelendiğinde bütün numuneler için dolgu oranı ve katman kalınlığının artması ile çekme mukavemetlerinin arttığı görülmektedir. Günay ve arkadaşları yapmış oldukları çalışma kapsamında, dolgu oranındaki artış ile çekme mukavemetinin artmasını, kesit alanındaki dolgu oranının artması sonucunda birim alan başına çekme yükü taşıma kapasitesinin artması ile ilişkilendirmişlerdir [31]. Bütün numuneler için baskı hızındaki artış ile çekme mukavemeti değerinin artış eğiliminde olduğu ancak 60 mm/s baskı hızından sonra azalma eğilimine girdiği görülmektedir. Aydın ve arkadaşları farklı sıcaklık ve baskı hızı parametrelerinde PLA numunenin mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, baskı hızındaki artış ile çekme dayanımının azaldığını bildirmişlerdir [32]. Diğer taraftan, filament malzemesinin çekme mukavemeti üzerinde etkili bir rol oynadığı açıkça görülmektedir. Takviyesiz PLA numunelerinde ölçülen çekme mukavemeti değerleri, tüm baskı koşulları altında bakır, bronz ve tungsten takviyeli PLA numunelerde elde edilen çekme mukavemeti değerlerinden daha yüksektir. Optimum baskı parametrelerinde bütün filament malzemeleri karşılaştırıldığında, bakır, bronz ve tungsten takviyeli PLA numunelere göre takviyesiz PLA numunenin çekme dayanımı değerlerinin sırasıyla %75,22, %99,81 ve %33,62 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Benzer bir çalışmada, Uzun ve Erdoğan, PLA numuneye göre karbon ve bakır katkılı numunelerin çekme mukavemeti değerinin daha düşük olduğunu bildirmişlerdir [33]. Özsoy ve arkadaşları da PLA numunelerinin ABS numunelerine göre daha yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğunu bildirmiş ve bu durumu numune üretim sürecinde katmanlar arasındaki bağlanmanın PLA malzeme numunelerinde ABS numunelerine göre daha iyi olması ile açıklamışlardır [34]. Ayrıca, Zhang ve arkadaşları PLA ve bakır katkılı PLA filament malzemelerinin mekanik özelliklerinin ve kırılma modunun karakterizasyonu üzerine çalıştıkları araştırmalarında, bakır katkılı numunelerin çekme mukavemetinin PLA numunelerine göre daha düşük olduğunu ve tarama açısı arttıkça mukavemetin azaldığını bildirmişlerdir [35].



Şekil 5.2. Baskı parametrelerine göre çekme dayanımı değerlerinin dağılımı.

Şekil 5.3'te çekme testi sonrası numunelerin kırılma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri yer almaktadır. Şekil 5.3 incelendiğinde, tüm filamentler için üst ve alt katmanların birbirine iyi bir şekilde yapıştığı, ancak takviyesiz PLA numuneye kıyasla bakır, bronz ve tungsten takviyeli PLA numunelerde daha fazla hava boşluğu ve katmanlar arasında boşluk içeren gözenekli yapılar olduğu görülmektedir. Bu gözenekli yapıların oluşumunun, bakır, bronz ve tungsten takviyeli PLA numunelerin çekme mukavemetlerindeki düşüşün nedeni olduğu düşünülmektedir. Öteyaka ve

arkadaşları PLA ve karbon elyaf takviyeli PLA numunelerin çekme ve eğilme özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, PLA numuneye göre karbon elyaf takviyeli PLA numunelerin çekme dayanımının daha düşük olduğunu bildirmişlerdir [36]. Bu durumu, katmanlar ve ara yüzlerdeki gözeneklilik ve karbon fiberlerin/matrisin zayıf yapışması ile çatlak başlangıcı ile ilişkilendirmişlerdir. Kısacası, PLA filament malzemesine bakır, bronz ve tungsten takviyesi ile çekme mukavemeti azalmaktadır.



Şekil 5.3. Çekme testi sonrası numunelerin kırılma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri: a) PLA, b) Bakır PLA, c) Bronz PLA d) Tungsten PLA.

### 5.1.3. Varyans Analizi (ANOVA)

Çekme dayanımı ( $\sigma_c$ ) değerleri üzerinde baskı parametrelerinin etkilerini belirlemek için varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizi sonuçları Çizelge 5.3'te yer almaktadır. Çizelge 5.3'e göre  $\sigma_c$  üzerinde (A) filament malzemesi, (B) iç doluluk oranı, (C) doldurma hızı, (D) katman kalınlığı ve (E) nozul çapı için etki oranları sırasıyla %47,88 %35,76 %10,10 %2,64 ve %3,19 olarak belirlenmiştir. Sonuç

olarak, çekme dayanımını etkileyen en önemli parametre %47,88 katkı oranı ile (A) filament malzemesidir.

Çizelge 5.3.  $\sigma_c$  için varyans analizi sonuçları.

Faktörler	Serbestlik Derecesi (DoF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Değeri	P Değeri	Katkı Oranı (%)
A	3	655,40	218,47	74,80	0,013	47,88
B	3	489,54	163,18	55,87	0,018	35,76
C	3	138,22	46,07	15,78	0,060	10,10
D	3	36,19	12,06	4,13	0,201	2,64
E	1	43,66	43,659	14,95	0,061	3,19
Hata	2	5,84	2,921			0,43
Total	15	1368,84				100

#### 5.1.4. Regresyon Analizi

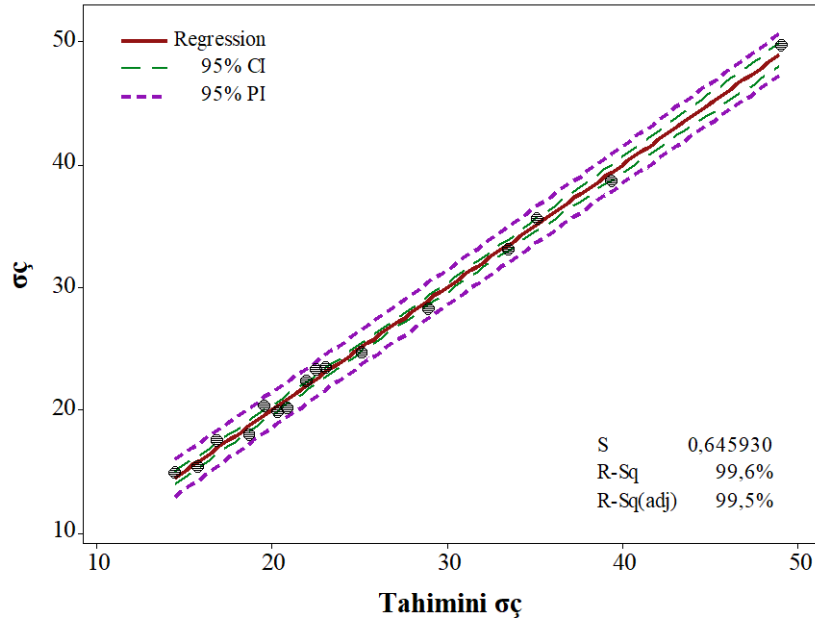
Bağımlı değişken olan çekme dayanımı ( $\sigma_c$ ) değeri ile bağımsız değişkenler olan baskı parametreleri arasındaki ilişki regresyon analizi ile modellenmiştir. Tahmin denklemleri doğrusal regresyon modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Çekme dayanımı ( $\sigma_c$ ) değeri için doğrusal regresyon modeli ile elde edilen tahmin denklemleri aşağıda verilmiştir. Eş. 5.1, Eş. 5.2, Eş. 5.3 ve Eş. 5.4 sırasıyla takviyesiz PLA, bakır takviyeli PLA, bronz takviyeli PLA ve tungsten takviyeli PLA numuneler için tahmin denklemlerini göstermektedir. Şekil 5.4'te doğrusal regresyon modeliyle elde edilen tahmini değerler ile deneysel sonuçların karşılaştırılması yer almaktadır. Çekme dayanımı ( $\sigma_c$ ) için doğrusal regresyon modeli ile geliştirilen tahmin denkleminin  $R^2$  değeri %91,82 olarak elde edilmiştir.

$$\sigma_c = 8,38 + 0,1935B + 0,0926C + 10,26D + 16,52E \quad (5.1)$$

$$\sigma_c = -3,62 + 0,1935B + 0,0926C + 10,26D + 16,52E \quad (5.2)$$

$$\sigma_c = -8,56 + 0,1935B + 0,0926C + 10,26D + 16,52E \quad (5.3)$$

$$\sigma_c = -5,25 + 0,1935B + 0,0926C + 10,26D + 16,52E \quad (5.4)$$



Şekil 5.4.  $\sigma_c$  için doğrusal regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

Şekil 5.4'te görüldüğü gibi tahmin edilen değerler ile test sonuçları arasında oldukça iyi bir ilişki bulunmaktadır. Sonuç olarak, birinci dereceden regresyon modelinin esas çekme dayanımı ( $\sigma_c$ ) değerinin tahmininde başarılı olduğu görülmüştür. Optimize edilmiş koşulun doğrulanması için bir doğrulama deneyi yapılması gerekmektedir. Doğrulama için bir önceki bölümde değinilen aşamalar uygulanmıştır. Öncelikle, Eşitlik 4.3 ve 4.4 kullanılarak  $CI$  güven aralığı değeri belirlenmiştir. Bu hesaplamada Çizelge 5.4'te verilen parametreler kullanılarak çekme dayanımı ( $\sigma_c$ ) için güven aralığı  $CI = 10,07$  olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.4.  $\sigma_c$  için çeşitli doğrulama parametreleri.

$F_{\alpha,1,fe}$	$A$	$fe$	$Ve$	$R$	$n_{eff}$	$T_{dof}$	$N$
18,512	0,05	2	2,921	3	1,142	13	16

$$\sigma_{c_{opt}} = (A_1 - T_{\sigma_c}) + (B_4 - T_{\sigma_c}) + (C_3 - T_{\sigma_c}) + (D_4 - T_{\sigma_c}) + (E_2 - T_{\sigma_c}) + T_{\sigma_c} \quad (5.5)$$

Sonrasında, optimum çekme dayanımı ( $\sigma_c$ ) değerinin tahmininde Eş. 5.5 kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre çekme dayanımı ( $\sigma_c$ ) değeri için ( $A_1, B_4, C_3, D_4, E_2$ ) optimum seviyeleridir.  $T_{\sigma_c}$  (25,28 MPa) deneysel çalışmadan elde edilen tüm çekme dayanımı ( $\sigma_c$ ) değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir. Hesaplamalar

sonucunda  $\sigma_{\zeta_{opt}} = 50,11$  MPa olduğu tahmin edilmiştir. Eş. 5.6’da çekme dayanımı ( $\sigma_{\zeta}$ ) değerinin ( $\sigma_{\zeta_{exp}} = 53,25$  MPa ) güven aralığı sınırı içinde olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, çekme dayanımı ( $\sigma_{\zeta}$ ) için sistem optimizasyonu, Taguchi metodu ile %95 anlamlılık seviyesinde başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Çizelge 5.5’te çekme dayanımı ( $\sigma_{\zeta}$ ) için doğrulama test sonuçları yer almaktadır.

$$[\sigma_{\zeta_{opt}} - CI] < \sigma_{\zeta_{exp}} < [\sigma_{\zeta_{opt}} + CI] = [50,11 - 10,07] < 53,25 < [50,11 + 10,07] = 40,04 < 53,25 < 60,18 \quad (5.6)$$

Çizelge 5.5. Çekme dayanımı ( $\sigma_{\zeta}$ ) için doğrulama testi sonuçları.

Seviye	Taguchi Metot			Doğrusal Tah. Denk.		
	Deneysel	Tahmini	Hata	Deneysel	Tahmini	Hata
A1B4C3D4E2	53,25	52,49	1,42	53,25	47,302	11,16
A4B4C1D3E1	23,46	23,05	1,74	23,46	25,63	8,46

Optimizasyon işleminin doğruluğu, çekme mukavemeti için optimum seviyelerde ve rastgele seviyelerde test edilmiştir. Çekme mukavemeti değerleri güven aralığı sınırları ve hesaplanan hata yüzdeleri kabul edilebilir sınırlar içerisinde ve bu başarılı bir optimizasyonun göstergesidir [37].

## 5.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ

### 5.2.1. S/N Oranlarının Analizi

Takviyeli ve takviyesiz PLA numunelerinin yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde baskı parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Çizelge 5.6’da bakır, bronz ve tungsten takviyeli ve takviyesiz PLA filament malzemeleri ile farklı baskı parametrelerinde üretilen numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri ile her bir baskı kombinasyonu için bu değerlere karşılık gelen S/N değerleri verilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değerini elde etmek için S/N oranının hesaplanmasında Eşitlik 4.1 “en küçük en iyi” denklemi kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü değeri için aritmetik ortalama ve ortalama S/N oranı değerleri sırasıyla 3,285  $\mu\text{m}$  ve 5,998 dB olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.6. Yüzey pürüzlülüğü değerleri ve  $S/N$  oranları.

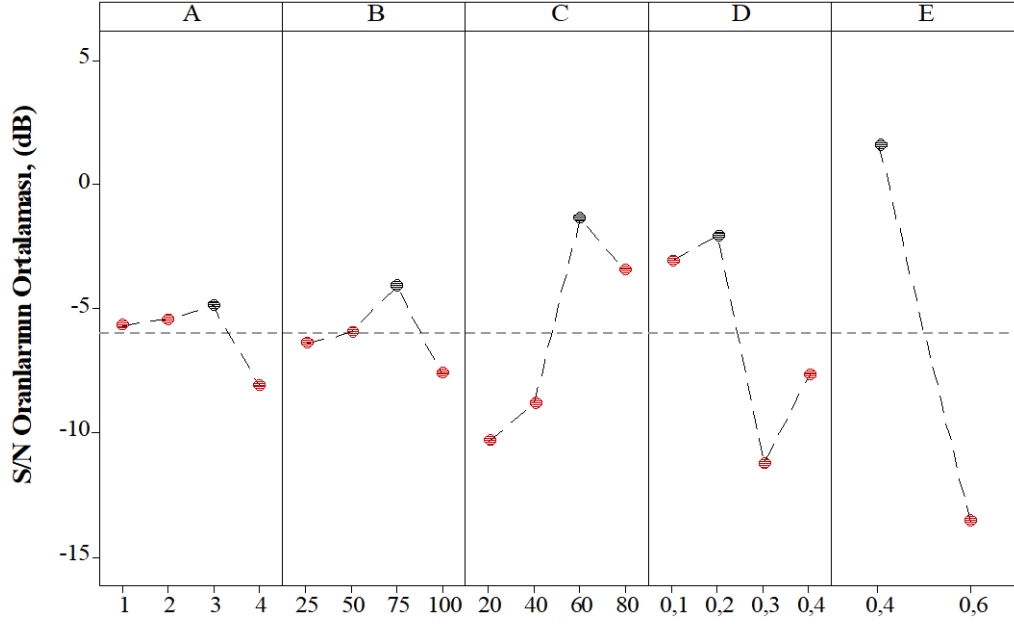
Test No	Baskı Parametreleri					Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ra-S/N (dB)
	A ( $Fm$ )	B ( $\dot{I}d$ )	C ( $Dh$ )	D ( $Kk$ )	E ( $Nç$ )		
1	PLA	25	20	0,1	0,4	1,159	-1,281
2	PLA	50	40	0,2	0,4	0,597	4,480
3	PLA	75	60	0,3	0,6	4,329	-12,727
4	PLA	100	80	0,4	0,6	4,544	-13,148
5	Bakır+PLA	25	40	0,3	0,6	10,803	-20,670
6	Bakır+PLA	50	20	0,4	0,6	9,653	-19,693
7	Bakır+PLA	75	80	0,1	0,4	0,582	10,995
8	Bakır+PLA	100	60	0,2	0,4	0,712	7,702
9	Bronz+PLA	25	60	0,4	0,4	0,762	6,707
10	Bronz+PLA	50	80	0,3	0,4	1,159	-1,281
11	Bronz+PLA	75	20	0,2	0,6	3,179	-10,045
12	Bronz+PLA	100	40	0,1	0,6	5,472	-14,762
13	Tungsten+PLA	25	80	0,2	0,6	3,298	-10,365
14	Tungsten+PLA	50	60	0,1	0,6	2,295	-7,215
15	Tungsten+PLA	75	40	0,4	0,4	1,663	-4,417
16	Tungsten+PLA	100	20	0,3	0,4	3,259	-10,261

Çizelge 5.7 deneysel ölçümler ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri için  $S/N$  oranlarının yanıt tablosunu, Şekil 5.5'te bu baskı parametrelerinin seviye değerlerini grafik formda göstermektedir. Sonuç olarak, en düşük yüzey pürüzlülüğü değerinin elde edildiği optimum baskı parametresi kombinasyonu  $A_3B_3C_3D_2E_1$  olarak belirlenmiştir. Başka bir deyişle, en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri için Bronz katkılı filament malzemesi, %75 iç doluluk oranı, 60 mm/s doldurma hızı, 0,2 mm katman kalınlığı ve 0.4 mm nozul çapı ideal baskı parametreleri seviyeleri olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde gerçekleştirilen üretim sonucunda numunenin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 0,545  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.

Çizelge 5.7. Ra için  $S/N$  yanıt tablosu.

	Baskı parametreleri				
	A	B	C	D	E
<b>Ra</b>					
1	-5,669	-6,403	-10,321	-3,066	<b>1,580</b>
2	-5,417	-5,928	-8,843	<b>-2,057</b>	-13,579
3	<b>-4,846</b>	<b>-4,049</b>	<b>-1,384</b>	-11,235	
4	-8,065	-7,618	-3,450	-7,638	
Delta	3,219	3,569	8,937	9,178	15,159

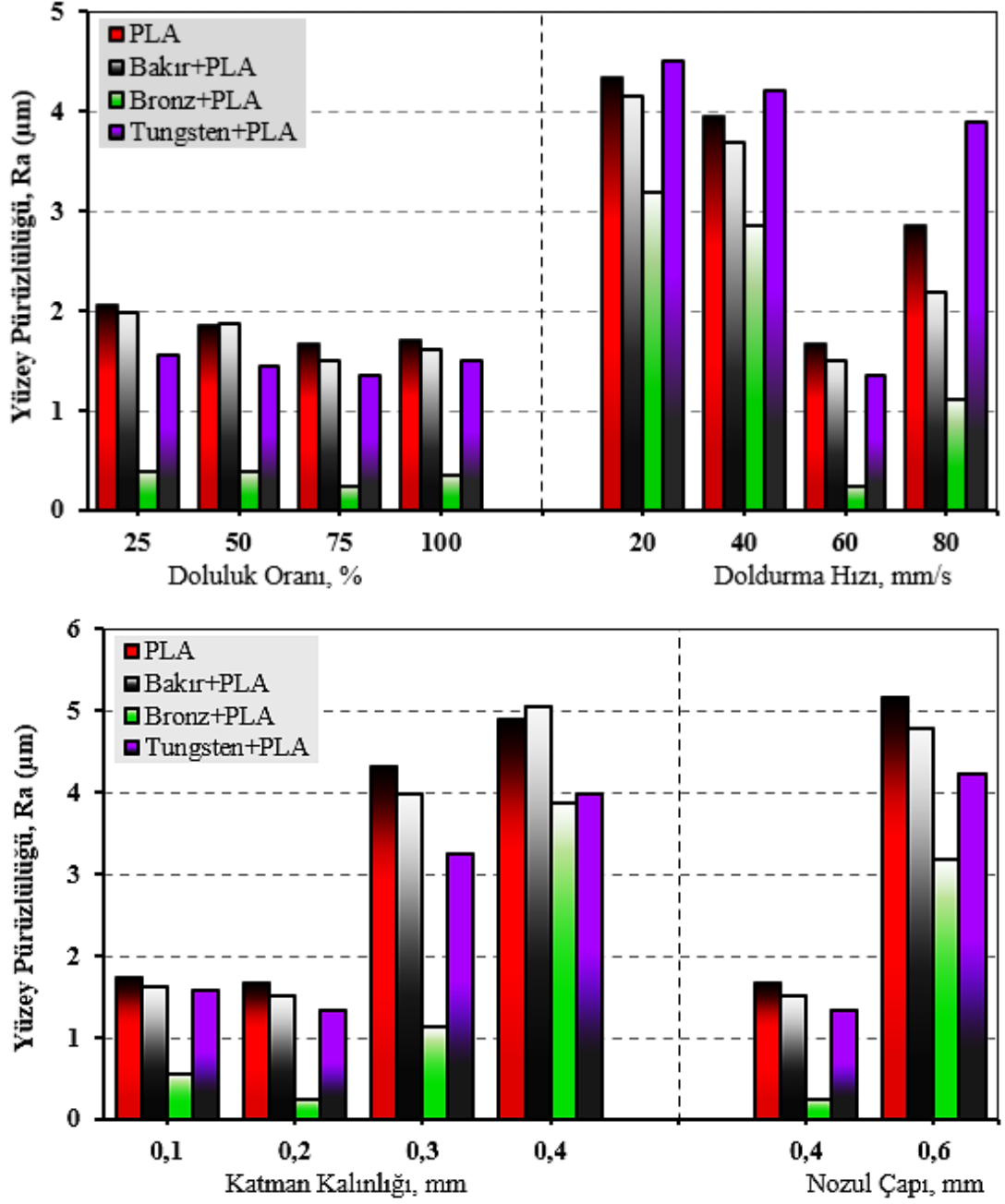




Şekil 5.5. Numunelerin yüzey pürüzlülüğü değeri için ortalama  $S/N$  oranları üzerinde baskı parametrelerinin etkisi

### 5.2.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yüzey kalitesi, mekanik bileşenlerin işlevselliğini ve verimliliğini belirlemede önemli bir rol oynar [38]. Yüzey pürüzlülüğü ( $Ra$ ), işlenmiş bir yüzeyin özelliklerine ilişkin fikir sağlayan önemli bir parametredir. FDM baskılı parçaların kalitesi katman kalınlığı, tarama açısı, tarama genişliği, hava boşluğu, dolgu yoğunluğu, baskı yönü ve doldurma hızı gibi proses parametrelerindeki değişikliklerden etkilenir. Bu yüzden, 3D yazıcı kullanılarak üretilen takviyeli ve takviyesiz PLA numunelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde baskı parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Şekil 5.6 bakır, bronz ve tungsten takviyeli ve takviyesiz PLA filament malzemeleri kullanılarak üretilen numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde baskı parametrelerinin etkilerini göstermektedir.



Şekil 5.6. Baskı parametrelerine göre yüzey pürüzlülüğü değerlerinin dağılımı.

Şekil 5.6 incelendiğinde, doluluk oranının artması ile takviyeli ve takviyesiz PLA numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığı da gözlenmiştir. Sammaiah ve arkadaşları [39], ABS filament malzemesi ile üretilen numunelerin yüzey kalitesine baskı parametrelerinin etkisini araştırdıkları çalışmalarında, dolgu yoğunluğunun artması ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azaldığını bildirmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde doldurma hızı, katman kalınlığı ve nozul çapının etkin rol oynadığı söylenebilir. Bütün filament malzemeleri için doldurma hızındaki artış ile

yüzey pürüzlülüğü değerinin azalış eğiliminde olduğu ancak 60 mm/s doldurma hızından sonra artış eğilimine girdiği görülmektedir. Chohan ve arkadaşları [40] düşük yazdırma hızının daha iyi bir yüzey kalitesiyle sonuçlanabileceğini bildirmişlerdir. Katman kalınlığının artması ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinin belirgin bir şekilde arttığı ve en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri en yüksek katman kalınlığı seviyesinde ölçülmüştür. Shirmohammadi ve arkadaşları [41], yüzey kalitesinin doğrudan katman kalınlığı ile ilişkili olduğunu ve katman kalınlığı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığını ve bu durumu katman kalınlığı arttırılarak yazdırılan numunelerin yüzeyinin daha keskin ve katmanların daha belirgin olması ile ilişkilendirmişlerdir. Nozul çapındaki artışa göre yüzey pürüzlülüğündeki değişim değerlendirildiğinde, nozul çapının 0,4 mm'den 0,6 mm çıkarılması ile yüzey pürüzlülüğü değerinin belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Tezel ve Kovan [42], PLA numunelerin mukavemeti, boyut kalitesi, yüzey kalitesi, yoğunluk ve üretim süresine nozul çapı (0,2 0,4 0,6 0,8 1 ve 1,2 mm) ve tabaka kalınlığının (0,1 0,2 ve 0,3 mm) etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, nozul çapının 0,2 mm'den 1 mm kadar arttırılması ile PLA numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerinin arttığını ve 1,2 mm nozul çapında azaldığını bildirmişlerdir.

Yüzey pürüzlülüğü değeri üzerinde filament malzemelerinin etkinliği kıyaslandığında, bakır takviyeli PLA, tungsten takviyeli PLA ve takviyesiz PLA filament malzemeler ile üretilen numunelerde ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerine göre bronz takviyeli PLA filament malzeme ile üretilen numunelerde ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Her bir filament malzemesi için gerçekleştirilen bütün ölçümlerin ortalamaları dikkate alındığında, bakır takviyeli PLA, tungsten takviyeli PLA ve takviyesi PLA numunelere göre bronz takviyeli PLA numunelerde yüzey pürüzlülüğünün sırasıyla ortalama %3,47 %105,89 ve %2,365 oranında daha az olduğu tespit edilmiştir.

### **5.2.3. Varyans Analizi (ANOVA)**

Numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde baskı parametrelerinin etkilerini belirlemek için varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizi sonuçları Çizelge 5.8'de yer almaktadır. Çizelge 5.8'e göre ağırlık üzerinde (A) filament malzemesi, (B) iç

doluluk oranı, (C) doldurma hızı, (D) katman kalınlığı ve (E) nozul çapı için etki oranları sırasıyla %14,30 %3,49 %15,49 %16,48 ve %49,94 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametre %49,94 katkı oranı ile (E) nozul çapı olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.8. *Ra* için varyans analizi sonuçları.

Faktörler	Serbestlik Derecesi (DoF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Değeri	P Değeri	Katkı Oranı (%)
A	3	21,395	7,1318	30,25	0,032	14,30
B	3	5,219	1,7398	7,38	0,122	3,49
C	3	23,177	7,7256	32,77	0,030	15,49
D	3	<b>24,660</b>	<b>8,2201</b>	<b>34,87</b>	<b>0,028</b>	<b>16,48</b>
E	1	74,736	74,736	317,05	0,003	49,94
Hata	2	0,471	0,2357			0,32
Total	15	149,659				100

#### 5.2.4. Regresyon Analizi

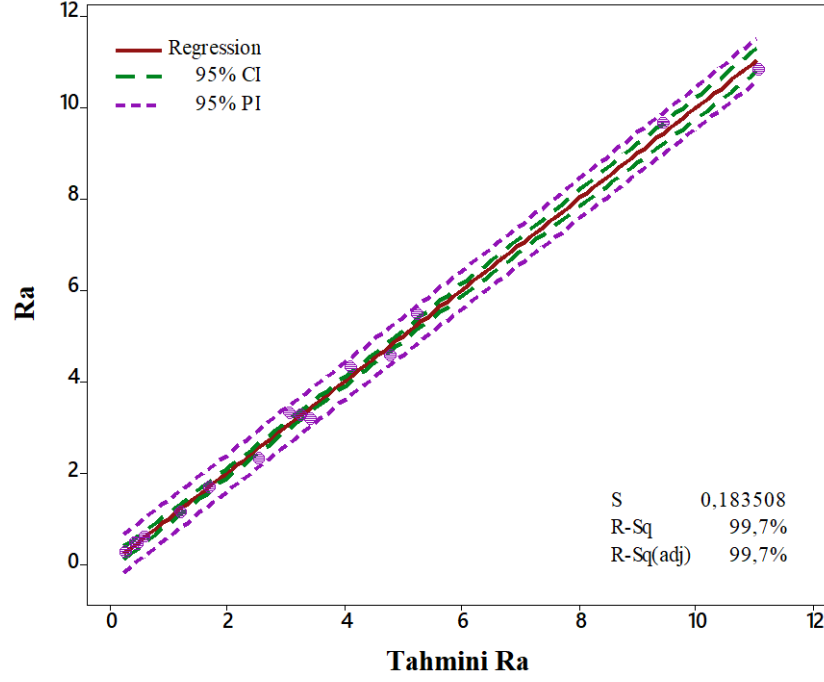
Takviyeli ve takviyesiz PLA numunelerde ölçülen yüzey pürüzlülüğü (*Ra*) değerleri ile baskı parametreleri arasındaki ilişki regresyon analizi ile modellenmiştir. Tahmin denklemleri doğrusal regresyon modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Yüzey pürüzlülüğü (*Ra*) değeri doğrusal regresyon modeli ile elde edilen tahmin denklemleri aşağıda verilmiştir. Eş. 5.6, 5.7, 5.8 ve 5.9 sırasıyla takviyesiz PLA, Bakır takviyeli PLA, Bronz takviyeli PLA ve Tungsten takviyeli PLA için tahmin denklemlerini göstermektedir. Şekil 5.7’de doğrusal regresyon modeliyle elde edilen tahmini değerler ile deneysel sonuçların karşılaştırılması yer almaktadır. Yüzey pürüzlülüğü (*Ra*) için doğrusal regresyon modeli ile geliştirilen tahmin denkleminin  $R^2$  değeri %84,65 olarak elde edilmiştir.

$$Ra = -7,41 - 0,0104B - 0,0437C + 8,35D + 21,61E \quad (5.6)$$

$$Ra = -4,78 - 0,0104B - 0,0437C + 8,35D + 21,61E \quad (5.7)$$

$$Ra = -7,50 - 0,0104B - 0,0437C + 8,35D + 21,61E \quad (5.8)$$

$$Ra = -7,43 - 0,0104B - 0,0437C + 8,35D + 21,61E \quad (5.9)$$



Şekil 5.7.  $Ra$  için doğrusal regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

Şekil 5.7’de görüldüğü gibi tahmin edilen değerler ile test sonuçları arasında oldukça iyi bir ilişki bulunmaktadır. Sonuç olarak, birinci dereceden regresyon modelinin yüzey pürüzlülüğü ( $Ra$ ) değerinin tahmininde başarılı olduğu görülmüştür. Optimize edilmiş koşulun doğrulanması için bir doğrulama deneyi yapılması gerekmektedir. Doğrulama için bir önceki bölümde değinilen aşamalar uygulanmıştır. Öncelikle, Eşitlik 4.3 ve 4.4 kullanılarak  $CI$  güven aralığı değeri belirlenmiştir. Bu hesaplamada Çizelge 5.9’te verilen parametreler kullanılarak yüzey pürüzlülüğü ( $Ra$ ) değeri için güven aralığı  $CI = 2,296$  olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.9.  $Ra$  için çeşitli doğrulama parametreleri.

$F_{\alpha,1,fe}$	$\alpha$	$Fe$	$Ve$	$R$	$n_{eff}$	$T_{dof}$	$N$
18,512	0,05	2	0,2357	3	1,142	13	16

$$Ra_{opt} = (A_3 - T_{Ra}) + (B_3 - T_{Ra}) + (C_3 - T_{Ra}) + (D_2 - T_{Ra}) + (E_1 - T_{Ra}) + T_{Ra} \quad (5.10)$$

Sonrasında, optimum yüzey pürüzlülüğü ( $Ra$ ) değerinin tahmininde Eş. 5.10 kullanılmıştır.  $S/N$  Analiz sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü ( $Ra$ ) değeri için ( $A_3$ ,  $B_3$ ,  $C_3$ ,  $D_2$ ,  $E_1$ ) optimum seviyeleridir.  $T_{\sigma_c}$  ( $3,285 \mu\text{m}$ ) deneysel çalışmadan elde edilen tüm yüzey pürüzlülüğü ( $Ra$ ) değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir. Hesaplamalar sonucunda  $\sigma_{c_{opt}} = 1,84 \mu\text{m}$  olduğu tahmin edilmiştir. Eş. 5.11’de yüzey pürüzlülüğü ( $Ra$ ) değerinin ( $Ra_{exp} = 0,545 \mu\text{m}$ ) güven aralığı sınırı içinde olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğü ( $Ra$ ) değeri için sistem optimizasyonu, Taguchi metodu ile %95 anlamlılık seviyesinde başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Çizelge 5.10’da yüzey pürüzlülüğü ( $Ra$ ) değeri için doğrulama test sonuçları yer almaktadır.

$$[Ra_{opt} - CI] < Ra_{exp} < [Ra_{opt} + CI] = [1,84 - 2,296] < 0,545 < [1,84 + 2,296] = -0,456 < 0,545 < 4,136 \quad (5.11)$$

Çizelge 5.10.  $Ra$  için doğrulama testi sonuçları.

Seviye	Taguchi Metot			Doğrusal Tah. Denk.		
	Deneysel	Tahmini	Hata	Deneysel	Tahmini	Hata
A3B3C3D2E1	0,545	0,502	7,88	0,545	0,588	7,31
A1B2C2D2E1	0,597	0,571	4,35	0,597	0,636	6,532

Optimizasyon işleminin doğruluğu, yüzey pürüzlülüğü ( $Ra$ ) değeri için optimum seviyelerde ve rastgele seviyelerde test edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ( $Ra$ ) değerleri güven aralığı sınırları ve hesaplanan hata yüzdeleri kabul edilebilir sınırlar içerisinde ancak Çizelge 5.6’da yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçüm noktasına bağlı olarak yüksek değişkenlik gösterdiği görülmektedir [43]. Bu değişkenlik, ölçüm konumuna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü hakkında sonuca varmayı zorlaştırmaktadır. Bu yüzden, yüzey pürüzlülük değerini tahmin etmek için modellenen denkleminin  $R^2$  (%84,65) değerinin düşük olduğu düşünülmektedir.

### 5.3. AĞIRLIĞIN DEĞERLENDİRİLMESİ

#### 5.3.1. S/N Oranlarının Analizi

Son zamanlarda, eriyik yığma modelleme yönteminin insansız hava araçları için ağırlık tasarrufunun kritik olduğu bileşenlerin üretiminde etkin rol oynadığı görülmektedir. Bu yüzden takviyeli ve takviyesiz PLA numunelerinin ağırlıkları üzerinde baskı parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Çizelge 5.11’de bakır, bronz ve tungsten takviyeli ve takviyesiz PLA filament malzemeleri ile farklı baskı parametrelerinde üretilen numunelerin ortalama ağırlık değerleri ile her bir baskı kombinasyonu için bu değerlere karşılık gelen  $S/N$  değerleri verilmiştir. En düşük ağırlık değerini elde etmek için  $S/N$  oranının hesaplanmasında Eşitlik 4.1 “en küçük en iyi” denklemi kullanılmıştır. Ağırlık ölçümleri sonucunda, ağırlık için aritmetik ortalama ve ortalama  $S/N$  oranı değerleri sırasıyla 10,270 gr ve 19,968 dB olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.11. Ağırlık değerleri ve  $S/N$  oranları.

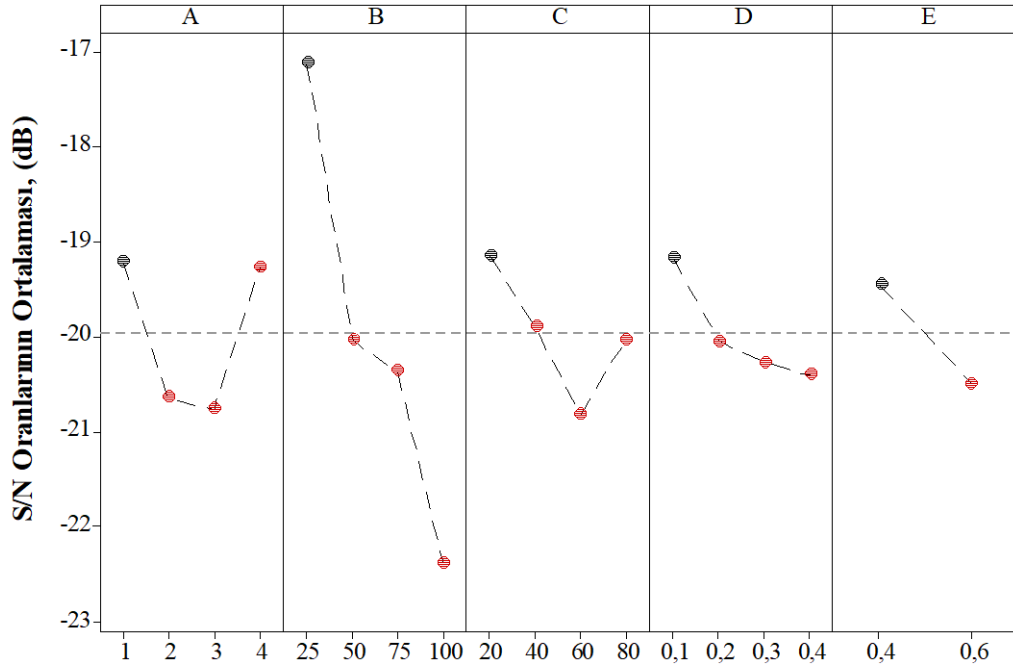
Test No	Baskı Parametreleri					Ağırlık (gr)	Ağırlık-S/N (dB)
	A ( $Fm$ )	B ( $İd$ )	C ( $Dh$ )	D ( $Kk$ )	E ( $Nç$ )		
1	PLA	25	20	0,1	0,4	5,005	-13,988
2	PLA	50	40	0,2	0,4	8,874	-18,962
3	PLA	75	60	0,3	0,6	11,424	-21,156
4	PLA	100	80	0,4	0,6	13,679	-22,721
5	Bakır+PLA	25	40	0,3	0,6	8,536	-18,625
6	Bakır+PLA	50	20	0,4	0,6	10,856	-20,713
7	Bakır+PLA	75	80	0,1	0,4	9,983	-19,985
8	Bakır+PLA	100	60	0,2	0,4	14,523	-23,241
9	Bronz+PLA	25	60	0,4	0,4	8,799	-18,888
10	Bronz+PLA	50	80	0,3	0,4	10,516	-20,437
11	Bronz+PLA	75	20	0,2	0,6	11,234	-21,010
12	Bronz+PLA	100	40	0,1	0,6	13,662	-22,710
13	Tungsten+PLA	25	80	0,2	0,6	7,048	-16,961
14	Tungsten+PLA	50	60	0,1	0,6	9,969	-19,973
15	Tungsten+PLA	75	40	0,4	0,4	9,201	-19,276
16	Tungsten+PLA	100	20	0,3	0,4	11,014	-20,838

Çizelge 5.12 deneysel ölçümler ile elde edilen ağırlık değerleri için  $S/N$  oranlarının yanıt tablosunu, Şekil 5.8’de bu baskı parametrelerinin seviye değerlerini grafik

formda göstermektedir. Sonuç olarak, en düşük ağırlık değerinin elde edildiği optimum baskı parametresi kombinasyonu  $A_1B_1C_1D_1E_1$  olarak belirlenmiştir. Başka bir deyişle, minimum ağırlık değeri için PLA filament malzemesi, %25 iç doluluk oranı, 20 mm/s doldurma hızı, 0,1 mm katman kalınlığı ve 0.4 mm nozul çapı ideal baskı parametreleri seviyeleri olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde gerçekleştirilen üretim sonucunda numunenin ağırlık değeri 5,005 gr olarak ölçülmüştür.

Çizelge 5.12. Numunelerin ağırlık değerleri için  $S/N$  yanıt tablosu.

$\sigma\check{c}$	Baskı parametreleri				
	A	B	C	D	E
1	<b>-19,21</b>	<b>-17,12</b>	<b>-19,14</b>	<b>-19,16</b>	<b>-19,45</b>
2	-20,64	-20,02	-19,89	-20,04	-20,48
3	-20,76	-20,36	-20,81	-20,26	-
4	-19,26	-22,38	-20,03	-20,40	-
Delta	1,55	5,26	1,68	1,24	1,03

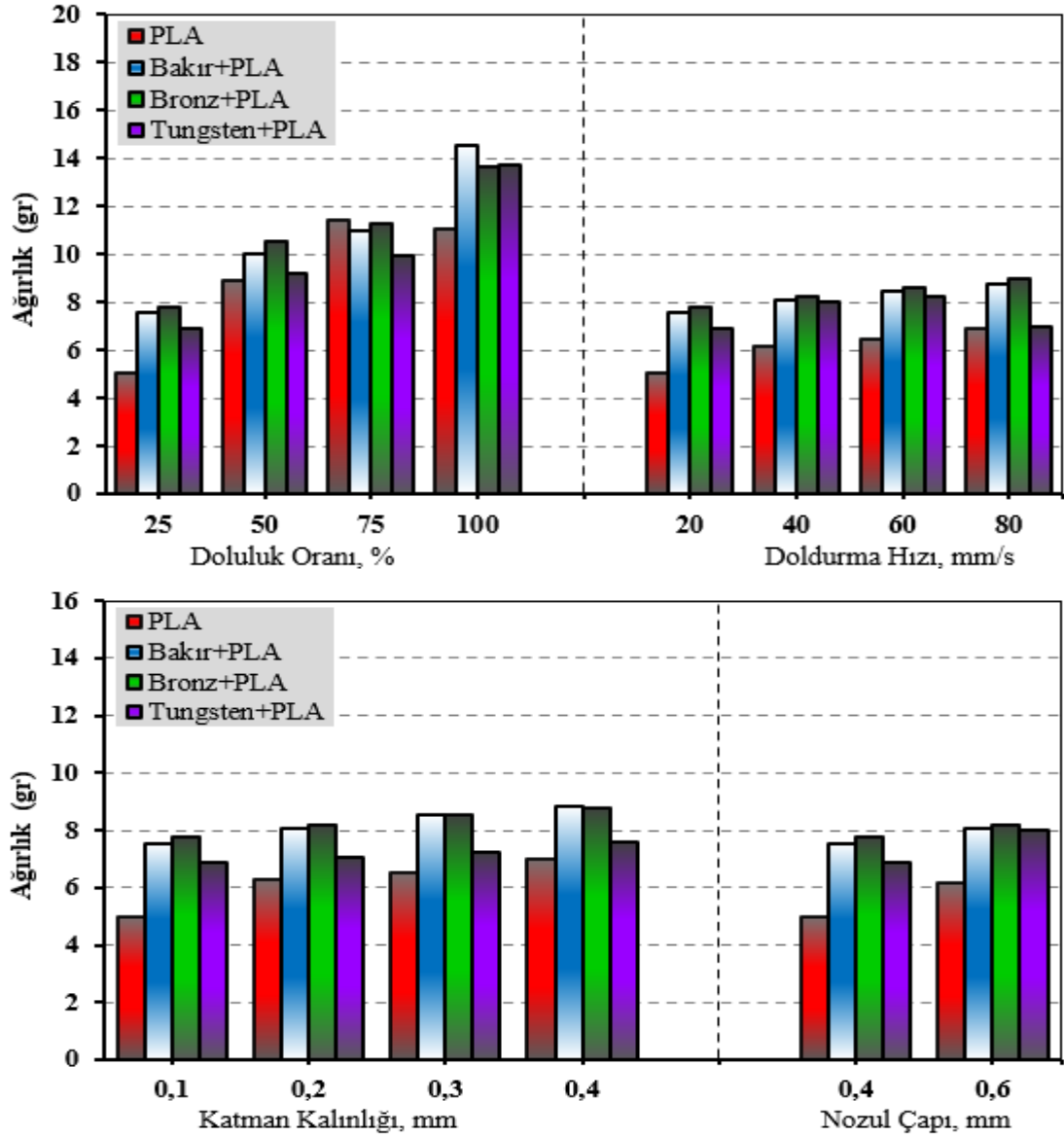


Şekil 5.8. Numunelerin ağırlık değeri için ortalama  $S/N$  oranları üzerinde baskı parametrelerinin etkisi.



### 5.3.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 5.9 takviyeli ve takviyesiz PLA filament malzemeler ile üretilen numunelerin farklı baskı parametrelerinde ağırlıklarındaki değişimi gösterilmektedir. Şekil 5.9 incelendiğinde, takviyesiz PLA numunede ölçülen ağırlık değerleri, tüm baskı koşulları altında bakır, bronz ve tungsten takviyeli PLA numunelerde elde edilen ağırlık değerlerinden daha düşüktür. Optimum baskı parametrelerinde bütün filament malzemeleri karşılaştırıldığında, bakır, bronz ve tungsten takviyeli PLA numunelere göre takviyesiz PLA numunenin ağırlık değerinin sırasıyla %75,22, %99,81 ve %33,62 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bütün numuneler için baskı parametrelerindeki artış ile numunelerin ağırlığının arttığı ve doluluk oranının numunelerin ağırlığı üzerinde etkili bir rol oynadığı açıkça görülmektedir. Takviyeli ve takviyesiz PLA numuneler için doluluk oranını %25'ten %50'ye artırılması ile ağırlığın ortalama %45 arttığı, %50'den %75'e artırılması ile ağırlığın ortalama %60 arttığı, %75'ten %100'e artırılması ile ağırlığın ortalama %60 arttığı tespit edilmiştir. Bu durum hacimsel yoğunluğun artması ile baskı hatları arasındaki boşluğun sistematik olarak küçülmesi ile ilişkilendirilmektedir [44]. Elde edilen sonuçlara ağırlık ve mukavemet arasındaki ilişki açısından bakıldığında, %100 doluluk oranında çekme dayanımı 53,25 Mpa ve ağırlık 11,014 gr iken %25 doluluk oranında çekme dayanımı 25,6 Mpa ve ağırlık 6,424 gr olarak belirlenmiştir. Başka bir deyişle, %25 dolgu yoğunluğuna sahip PLA numunede, %100 dolgu yoğunluğuna sahip PLA numunenin yaklaşık olarak %48'sine varan bir dayanım elde edilmektedir. Dolayısıyla hafiflik gerektiren uygulamalarda düşük doluluk oranı tercih edilebilirken yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda ise yüksek doluluk oranı tercih edilebilir. Benzer bir çalışmada, Boğa ve arkadaşları dolgu tipinin (çizgi, üçgen, altıgen ve 3 boyutlu dolgu) PLA numunelerin mekanik davranışı üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında, üçgen tip dolgu deseninde imal edilen numunenin en yüksek mukavemet/ağırlık oranını verdiği ve hammadde tüketiminde tasarruf sağladığını bildirmişlerdir [45]. Naik ve Thakur baskı yönü ve dolgu yoğunluğunun PLA numunelerin darbe dayanımı üzerindeki etkisini araştırdıkları çalışmalarında, kenar yönünde basılmış %20 dolgu yoğunluğuna sahip çoklu dolgulu desen numunesinin, en yüksek darbe mukavemeti/ağırlık oranına sahip olduğunu bildirmişlerdir [46].



Şekil 5.9. Baskı parametrelerine göre ağırlık değerlerinin dağılımı.

### 5.3.3. Varyans Analizi (ANOVA)

Numunelerin ağırlık değerleri üzerinde baskı parametrelerinin etkilerini belirlemek için varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizi sonuçları Çizelge 5.13'te yer almaktadır. Çizelge 5.13'e göre ağırlık üzerinde (A) filament malzemesi, (B) iç doluluk oranı, (C) doldurma hızı, (D) katman kalınlığı ve (E) nozul çapı için etki oranları sırasıyla %10,16 %76,19 %6,24 %2,39 ve %4,96 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, ağırlığı etkileyen en önemli parametre %76,19 katkı oranı ile (B) iç doluluk oranı olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.13. Ağırlık için varyans analizi sonuçları.

Faktörler	Serbestlik Derecesi (DoF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Değeri	P Değeri	Katkı Oranı (%)
A	3	9,2382	3,0794	95,89	0,010	10,16
<b>B</b>	<b>3</b>	<b>69,3061</b>	<b>23,102</b>	<b>719,40</b>	<b>0,001</b>	<b>76,19</b>
C	3	5,6782	1,8927	58,94	0,017	6,24
D	3	2,1751	0,7250	22,58	0,043	2,39
E	1	4,5082	4,5082	140,38	0,007	4,96
Hata	2	0,0642	0,0321			0,07
Total	15	90,9701				100

#### 5.3.4. Regresyon Analizi

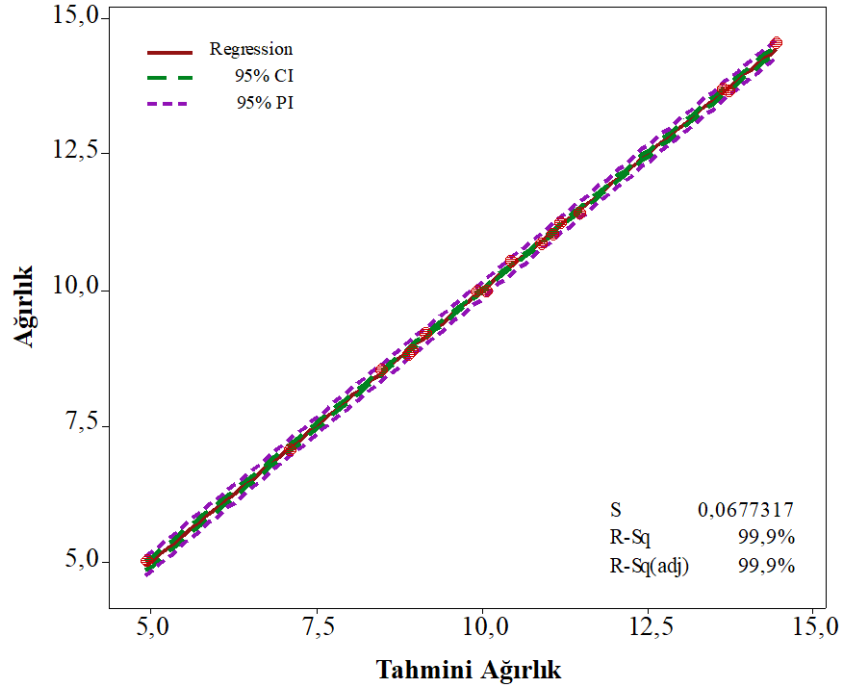
Numunelerin ağırlık değerleri ile baskı parametreleri arasındaki ilişki regresyon analizi ile modellenmiştir. Tahmin denklemleri doğrusal regresyon modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Numunelerin ağırlık değerleri için doğrusal regresyon modeli ile elde edilen tahmin denklemleri aşağıda verilmiştir. Eş. 5.12, 5.13, 5.14 ve 5.15 sırasıyla PLA, bakır takviyeli PLA, bronz takviyeli PLA ve tungsten takviyeli PLA numuneler için tahmin denklemlerini göstermektedir. Şekil 5.10'da doğrusal regresyon modeliyle elde edilen tahmini değerler ile deneysel sonuçların karşılaştırılması yer almaktadır. Numunelerin ağırlık değerlerini tahmin etmek geliştirilen doğrusal regresyon denkleminin  $R^2$  değeri %90,99 olarak elde edilmiştir.

$$Ağırlık = 1 + 0,0721B + 0,0172C + 2,89D + 5,31E \quad (5.12)$$

$$Ağırlık = 2,23 + 0,0721B + 0,0172C + 2,89D + 5,31E \quad (5.13)$$

$$Ağırlık = 2,31 + 0,0721B + 0,0172C + 2,89D + 5,31E \quad (5.14)$$

$$Ağırlık = 0,56 + 0,0721B + 0,0172C + 2,89D + 5,31E \quad (5.15)$$



Şekil 5.10. Numunelerin ağırlık değeri için doğrusal regresyon modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

Şekil 5.10’da görüldüğü gibi tahmin edilen değerler ile test sonuçları arasında oldukça iyi bir ilişki bulunmaktadır. Sonuç olarak, birinci dereceden regresyon modelinin numunelerin ağırlık değerinin tahmininde başarılı olduğu görülmüştür. Optimize edilmiş koşulun doğrulanması için bir doğrulama deneyi yapılması gerekmektedir. Doğrulama için bir önceki bölümde değinilen aşamalar uygulanmıştır. Öncelikle, Eşitlik 4.3 ve 4.4 kullanılarak *CI* güven aralığı değeri belirlenmiştir. Bu hesaplamada Çizelge 5.14’te verilen parametreler kullanılarak ağırlık için güven aralığı  $CI = 0,847$  olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.14. Numunelerin ağırlık değerleri için çeşitli doğrulama parametreleri.

$F_{\alpha,1,fe}$	$A$	$fe$	$Ve$	$R$	$n_{eff}$	$T_{dof}$	$N$
18,512	0,05	2	0,0321	3	1,142	13	16

$$Ağırlık_{opt} = (A_1 - T_{Ağırlık}) + (B_1 - T_{Ağırlık}) + (C_1 - T_{Ağırlık}) + (D_1 - T_{Ağırlık}) + (E_1 - T_{Ağırlık}) + T_{Ağırlık} \quad (5.16)$$

Optimum ağırlık değerinin tahmininde Eş. 5.16 kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre numunelerin ağırlık değeri için (A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>, D<sub>1</sub>, E<sub>1</sub>) optimum seviyeleridir.  $T_{ağırlık}$  (10,27 gr) deneysel çalışmadan elde edilen tüm numunelerin ağırlık değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir. Yapılan hesaplamalar sonucunda  $Ağırlık_{opt}= 4,933$  gr olduğu tahmin edilmiştir. Eş. 5.17’de optimum parametrelerde elde edilen en düşük ağırlık değerinin ( $Ağırlık_{exp}= 5,005$  gr) güven aralığı sınırı içinde olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, numunelerin ağırlık değerleri için sistem optimizasyonu, Taguchi metodu ile %95 anlamlılık seviyesinde başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Çizelge 5.15’te numunelerin ağırlık değeri için doğrulama test sonuçları yer almaktadır.

$$[Ağırlık_{opt} - CI] < Ağırlık_{exp} < [Ağırlık_{opt} + CI] = [4,933 - 0,847] < 5,005 < [4,933 + 0,847] = 4,086 < 5,005 < 5,78 \quad (5.17)$$

Çizelge 5.15. Ağırlık için doğrulama testi sonuçları.

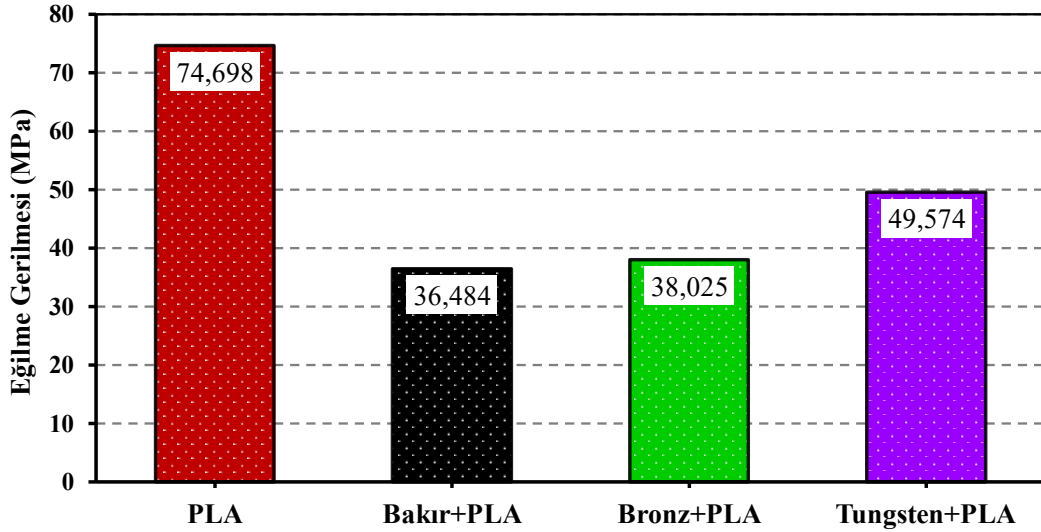
Seviye	Taguchi Metot			Doğrusal Tah. Denk.		
	Deneysel	Tahmini	Hata	Deneysel	Tahmini	Hata
A1B1C1D1E1	5,005	4,935	1,39	5,005	5,551	9,83
A2B4C3D2E1	14,523	14,451	0,49	14,523	13,174	9,28

Optimizasyon işleminin doğruluğu, numunelerin ağırlık değeri için optimum seviyelerde ve rastgele seviyelerde test edilmiştir. Numunelerin ağırlık değerleri güven aralığı sınırları ve hesaplanan hata yüzdeleri kabul edilebilir sınırlar içerisinde ve bu başarılı bir optimizasyonun göstergesidir [37].

#### 5.4. EĞİLME DAYANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ

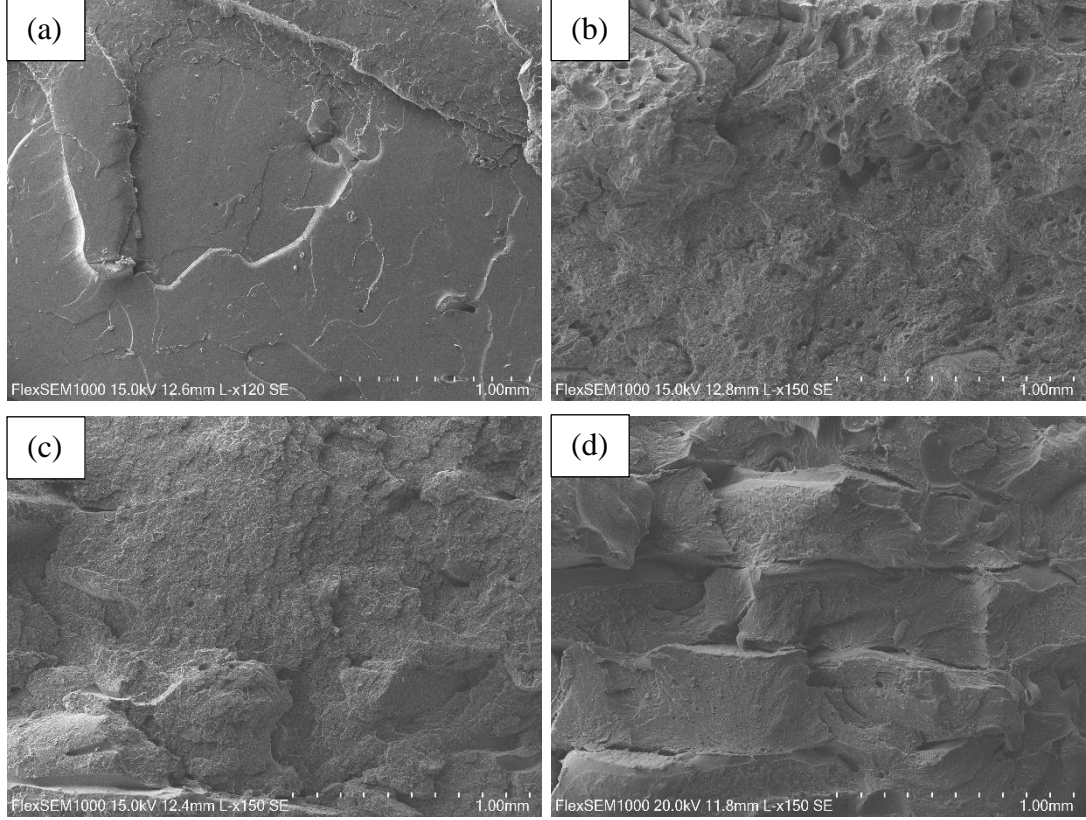
Optimum baskı parametrelerinde üretilen bakır, bronz ve tungsten takviyeli PLA ve takviyesiz PLA numunelerin eğilme dayanımı üç nokta eğme testi kullanılarak belirlenmiştir. Her bir filament malzemesi için optimum baskı parametrelerinde üretilen beş adet numune teste tabi tutularak üç nokta eğme testi gerçekleştirilmiştir. Takviyeli ve takviyesi PLA filament için beş numunede ölçümler ile elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak ortalama eğilme gerilmesi değeri

hesaplanmıştır. Şekil 5.11 optimum baskı parametrelerinde üretilen takviyeli ve takviyesiz PLA numunelerin karşılaştırmalı eğilme dayanımı grafiğini göstermektedir.



Şekil 5.11. Takviyeli ve takviyesi PLA numunelerin eğilme dayanımı dağılımı.

Şekil 5.11 incelendiğinde takviyesiz PLA numunenin takviyeli PLA numunelere göre eğilme dayanımının daha yüksek olduğu görülmektedir. 74,698 MPa ile en büyük eğilme dayanıma sahip olan takviyesiz PLA numuneyi sırasıyla 49,574 MPa ile tungsten takviyeli PLA, 38,025 MPa ile bronz takviyeli PLA ve 36,484 MPa ile bakır takviyeli PLA takip etmektedir. Şekil 5.12'de üç nokta eğme testi sonrası numunelerin kırılma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri yer almaktadır. Şekil 5.12 incelendiğinde, takviyesiz PLA numuneye göre bakır, bronz ve tungsten takviyeli PLA numunelerin katmanlar arasında boşluk içeren gözenekli yapılar daha büyüktür. Bu gözenekli yapıların oluşumu ara yüz yapışmasının daha zayıf olduğunu göstermektedir. Bakır, bronz ve tungsten takviyeli PLA numunelerin eğilme dayanımı üzerinde bu durumun etkili olduğu düşünülmektedir. PLA malzemeye bakır, bronz ve tungsten takviye yapılması numunenin eğilme dayanımını düşürmektedir. Uzun ve Erdoğan [33] bakır ve karbon-fiber takviyelerin PLA malzemenin mekanik özelliklerine etkisini araştırdıkları çalışmalarında, PLA malzemeye bakır ve karbon fiber takviye yapılmasının eğilme dayanımını düşürdüğünü bildirmişlerdir. Bu durumu takviyelerin matrisin sürekliliğini azaltması ve ara yüz yapışmasını zayıflatması ile ilişkilendirmişlerdir.

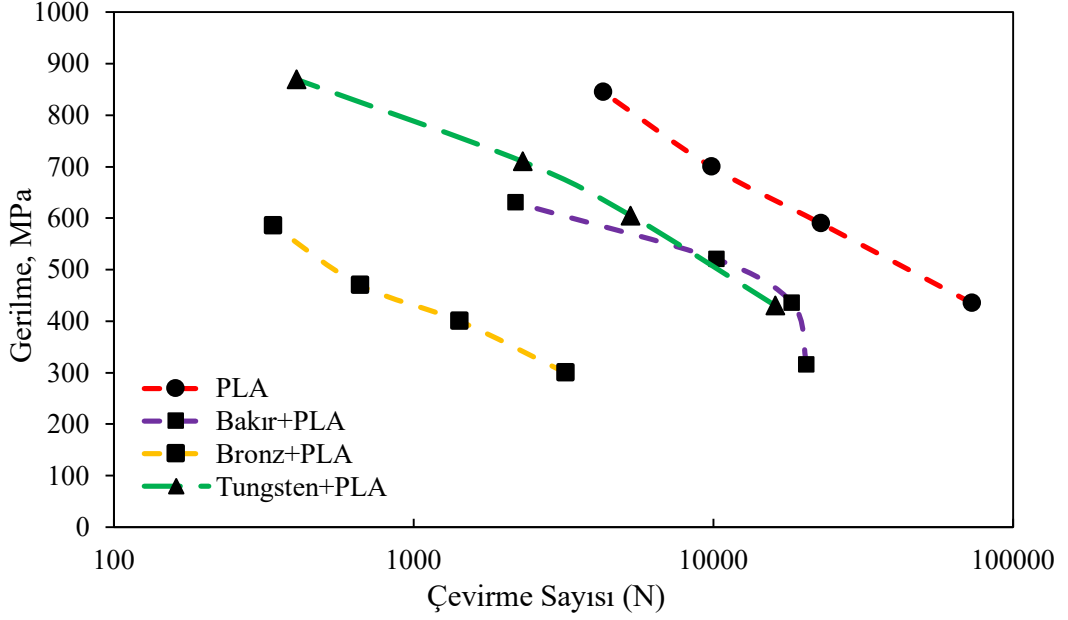


Şekil 5.12. Üç nokta eğme testi sonrası numunelerin kırılma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri: a) PLA, b) Bakır PLA, c) Bronz PLA d) Tungsten PLA.

## 5.5. YORULMA DAYANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Optimum baskı parametrelerinde üretilen bakır, bronz ve tungsten takviyeli PLA ve takviyesiz PLA numunelerinin döngüsel yorulma yükleme koşullarına dayanma yeteneği dönen eğme gerilmesi uygulayan (Wöhler) yorulma test cihazı ile dört farklı gerilme değerinde gerçekleştirilmiştir. Yorulma testi kullanılarak belirlenmiştir. Yorulma deneylerinde başlangıç gerilmelerinin tespiti için numunelere, düşük çevrim değerlerinde akma dayanımının %80'ni geçmeyecek şekilde gerilmeler uygulanarak gerilme değerleri belirlenmiştir. Her bir numune için belirlenene dört farklı gerilme değeri Çizelge 5.16'da verilmiştir. Takviyeli ve takviyesi PLA numunelere ASTM E-466 standardına uygun yüksek çevrimli yorulma testleri uygulanmıştır. Yorulma deneylerinde kullanılan parametreler, yorulma hızı  $R = -1$  ve çalışma frekansı 50 Hz olarak belirlenmiş ve sabit yük genlikli yorulma testi, çekme-basma tipinde

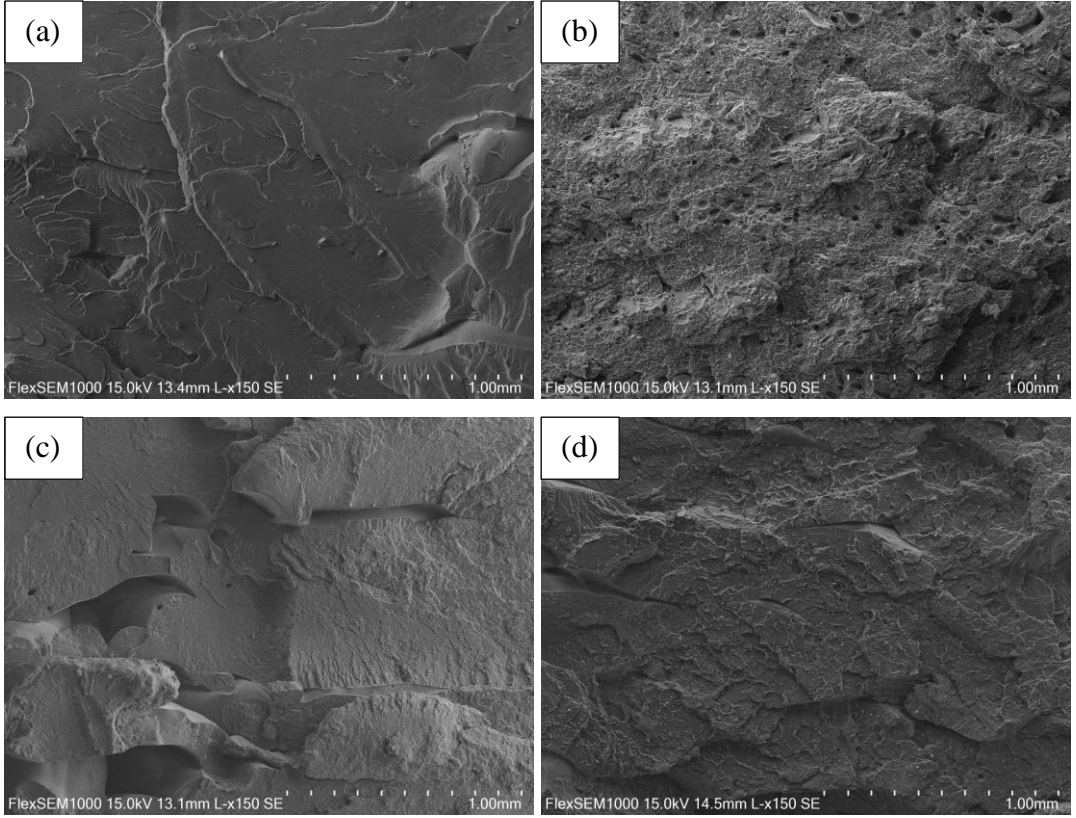
uygulanmıştır. Yapılan bu çalışmada gerilme değerleri deney boyunca sabit tutulmuş, alınan gerilme değerine karşılık hasar çevrim sayısı tespit edilmiştir.



Şekil 5.13. Takviyeli ve takviyesi PLA numunelerin yorulma ömrü dağılımı.

435 MPa gerilme değerinde, 73202 çevrim sayısı ile en iyi sonucu takviyesiz PLA numunesi sağlamıştır. 590, 700 ve 845 MPa gerilme değerlerinde de sırasıyla 22903, 9872 ve 4295 çevrim sayıları ile takviyesiz PLA numunede en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bakır, bronz ve tungsten takviyeli PLA ve takviyesiz PLA numuneler için gerilme değerlerinde elde edilen çevrim sayılarının ortalama değerleri dikkate alındığında, en iyi yorulma dayanımının takviyesi PLA numunede elde edildiği ve bunu sırasıyla bakır takviyeli PLA, tungsten takviyeli PLA ve bronz takviyeli PLA numunelerin takip ettiği görülmüştür. Şekil 5.14'te maksimum çevrim sayısının elde edildiği numunelerin kopma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri yer almaktadır. Şekil 5.14 incelendiğinde, takviyesiz PLA numuneye göre bakır, bronz ve tungsten takviyeli PLA numunelerin katmanlar arasında boşluk içeren gözenekli yapılar daha büyüktür. Bu gözenekli yapıların oluşumuna bağlı olarak ara yüz yapışmasının daha zayıf olduğu ve sonuç olarak PLA malzemeye göre bakır, bronz ve tungsten takviye yapılması yorulma dayanımını düşürmektedir.





Şekil 5.13. Yorulma testi sonrası numunelerin kopma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri: a) PLA, b) Bakır PLA, c) Bronz PLA d) Tungsten PLA

## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR

Bu çalışmada, Eriyik Yığıma Modelleme (FDM) yöntemi kullanılarak üretilen numunelerin mekanik özellikler üzerinde PLA filament malzemesine bakır, bronz ve tungsten katkılarının etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca doluluk oranı, doldurma hızı, katman kalınlığı ve nozul çapı gibi ürün kalitesi üzerinde önemli etkiye sahip baskı parametreleri Taguchi metodu kullanılarak optimum seviyeleri belirlenmiş; çekme dayanımı, ağırlık ve yüzey pürüzlülüğünün tahmini için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Çalışmada kullanılacak numunelerin üretimlerinde kullanılacak olan parametrelerinin optimum seviyelerinin tespitinde *S/N* oranından faydalanılmıştır. En yüksek çekme dayanımı değeri için PLA filament malzemesi, %100 iç doluluk oranı, 60 mm/s doldurma hızı, 0,4 mm katman kalınlığı ve 0.6 mm nozul çapı ideal baskı parametreleri seviyeleri olarak belirlenmiştir.

Optimum üretim parametreleri ile üretilen numuneler üzerinde yapılan çekme testi sonucunda bakır, bronz ve tungsten takviyeli PLA filament malzemelerine göre PLA filament malzemenin çekme dayanımı değerinin sırasıyla %75,22, %99,81 ve %33,62 daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

ANOVA sonuçlarına göre çekme dayanımı değerleri üzerinde baskı parametrelerinin etki oranları, filament malzemesi %47,88 iç doluluk %35,76 doldurma hızı %10,10 katman kalınlığı %2,64 nozul çapı %3,19 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak çekme dayanımını etkileyen en önemli parametre %47,88 katkı oranı ile filament malzemesi olarak belirlenmiştir.

Bağımlı değişken çekme dayanımı ile bağımsız değişkenler baskı parametreleri arasındaki ilişkiye dayanan doğrusal regresyon modelinin 0,918'lik bir korelasyon katsayısına sahip deney sonuçları ile oldukça yüksek bir doğrulukta olduğu görülmüştür.

En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri için bronz takviyeli PLA filament malzemesi, %75 iç doluluk oranı, 60 mm/s doldurma hızı, 0,2 mm katman kalınlığı ve 0.4 mm nozul çapı ideal baskı parametreleri seviyeleri olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde gerçekleştirilen üretim sonucunda numunenin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 0,545 µm olarak ölçülmüştür.

ANOVA sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde baskı parametrelerinin etki oranları, filament malzemesi %14,30 iç doluluk %3,49 doldurma hızı %15,49 katman kalınlığı %16,48 nozul çapı %49,94 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametre %47,88 katkı oranı ile nozul çapı olarak belirlenmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde ölçüm konumuna bağlı olarak sonuçlar büyük ölçüde farklılık gösterebilmektedir. Bu yüzden yüzey pürüzlülüğü değerini tahmin etmek için modellenen denklemin regresyon katsayısı değerinin düşük olduğu düşünölmektedir.

Takviyeli ve takviyesiz PLA numunelerin ağırlıkları üzerinde baskı parametrelerinin etkisi incelendiğinde takviyesiz PLA numunede ölçölen ağırlık değerleri, tüm baskı koşulları altında bakır, bronz ve tungsten takviyeli PLA numunelerde elde edilen ağırlık değerlerinden daha düşöktür.

ANOVA sonuçlarına göre ağırlık değerleri üzerinde baskı parametrelerinin etki oranları, filament malzemesi %10,16, iç doluluk %76,19, doldurma hızı %6,24, katman kalınlığı %2,39 ve nozul çapı %4,96 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak ağırlığı etkileyen en önemli parametre %76,19 katkı oranı ile iç doluluk olarak belirlenmiştir.

Optimum üretim parametreleri ile üretilen numuneler üzerinde yapılan üç nokta eğme testi sonucunda bakır, bronz ve tungsten takviyeli PLA filament malzemelerine göre PLA filament malzemenin eğilme dayanımının değerinin sırasıyla %104,74, %96,44 ve %50,68 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Buna göre PLA malzemeye bakır, bronz ve tungsten takviye yapılması neticesinde matrisin sürekliliğinin azalması ve ara yüz yapışmasının zayıflaması nedeni ile eğilme dayanımını düşürmektedir.

Optimum baskı parametrelerinde üretilen numunelerin döngüsel yorulma yükleme koşullarına dayanma yeteneği incelendiğinde şu sonuçlar elde edilmiştir; gerilme değerlerinde elde edilen çevrim sayılarının ortalama değerleri dikkate alındığında en iyi yorulma dayanımının takviyesiz PLA numunede elde edildiği ve bunu sırasıyla bakır takviyeli PLA, tungsten takviyeli PLA ve bronz takviyeli PLA numunelerin takip ettiği görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- [1] Mohd Nazri Ahmad, Mohammad Khalid Wahid, Mohd Hidayat BIN Ab Rahman, Nurul AIN Maidin, Mhd Hairizal Osman “Mechanical characteristics of oil palm fiber reinforced thermoplastics as filament for fused deposition modeling (FDM)”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (8): 72–81 (2020).
- [2] M. N. M. Azlin, S. M. Sapuan, M. Y. M. Zuhri, and E. S. Zainudin “Mechanical, Morphological and Thermal Properties of Woven Polyester Fiber Reinforced Polylactic Acid (PLA) Composites”, *Fibers and Polymers*, (23): 234–242 (2022).
- [3] Jose´ C. Camargo, A´ lisson R. Machado, Erica C. Almeida, Erickson Fabiano Moura Sousa Silva “Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (103): 2423–2443 (2019).
- [4] Jos´e C. Camargo, Alisson R. Machado, Erica C. Almeida, Victor H. M. de Almeida “Mechanical and electrical behavior of ABS polymer reinforced with graphene manufactured by the FDM process”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (119): 1019–1033 (2022).
- [5] Jipeng Guo, Chi-Hui Tsou, Yongqi Yu, Chin-San Wu, Xuemei Zhang, Zhujun Chen, Tao Yang, Feifan Ge1, Pan Liu, Manuel Reyes De Guzman “Conductivity and mechanical properties of carbon black-reinforced poly(lactic acid) (PLA/CB) composites”, *Iranian Polymer Journal*, (30): 1251–1262 (2021).
- [6] Arvind Kottasamy, Mahendran Samykano, Kumaran Kadirgama, Mustafizur Rahman, Muhamad Mat Noor “Experimental investigation and prediction model for mechanical properties of copper-reinforced polylactic acid composites (Cu-PLA) using FDM-based 3D printing technique”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (119): 5211–5232 (2022).
- [7] Anna Masek, Karolina Diakowska, Marian Zaborski “Physico-mechanical and thermal properties of epoxidized natural rubber/polylactide (ENR/PLA) composites reinforced with lignocellulose”, *J Therm Anal Calorim*, (125): 1467–1476 (2016).
- [8] M. Venkata Pavan, K. Balamurugan, V. Srinivasadesikan, Shyi-Long Lee “Impact and Shear Behavior of PLA/12%Cu Reinforced Composite Filament Printed at Different FDM Conditions”, *Arabian Journal for Science and*

*Engineering*, (46): 12709–12720 (2021).

- [9] S. Siengchin “Reinforced Flax mat/modified Polylactide (PLA) Composites: Impact, Thermal, and Mechanical Properties”, *Mechanics of Composite Materials*, Russian Original 50 (2), 2014.
- [10] S.F.K. Sherwani, SM Sapuan, Z. Leman, E.S. Zainudin, and A. Khalina “Physical, Mechanical and Morphological Properties of Sugar Palm Fiber Reinforced Polylactic Acid Composites”, *Fibers and Polymers*, 22 (11): 3095–3105 (2021).
- [11] Rupinder Singh, Ranvijay Kumar, Mohit Singh, Pawan Kumar, Pawan preet “On Mechanical, Thermal, Morphological and Shape Memory Effect of Sol-Gel Prepared ZnO Nanoparticle Reinforced PLA Composites Materials”, *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, (92): 699–712 (2022).
- [12] Anith Liyana Mohd Sis, Nor Azowa Ibrahim, Wan Md Zin Wan Yunus “Effect of (3-aminopropyl)trimethoxysilane on mechanical properties of PLA/PBAT blend reinforced kenaf fiber”, *Iranian Polymer Journal*, (22): 101–108 (2013).
- [13] Tetsuo Takayama, Youhei Daigaku<sup>1</sup>, Hiroshi Ito and Hideki Takamori “Mechanical properties of bio-absorbable PLA/PGA fiber-reinforced composites”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, (28): 4151–4154 (2014).
- [14] Xinzhou Zhang, Lan Chen, Tom Mulholland, Tim A. Osswald “Characterization of mechanical properties and fracture mode of PLA and copper/PLA composite part manufactured by fused deposition modeling”, *Research Article*, 616: (2019).
- [15] S. Garzon-Hernandez, D. Garcia-Gonzalez, A. Jérusalem, A. Arias “Design of FDM 3D printed polymers: An experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties”, *Materials and Design*, (188): 108414 (2020).
- [16] Mohd Shahneel Saharudin, Jiri Hajnys, Tomasz Kozior, Damian Gogolewski and Paweł Zmarzły “Quality of Surface Texture and Mechanical Properties of PLA and PA-Based Material Reinforced with Carbon Fibers Manufactured by FDM and CFF 3D Printing Technologies”, *Polymers*, (13): 1671 (2021).
- [17] M. Samykano “Mechanical Property and Prediction Model for FDM-3D Printed Polylactic Acid (PLA)”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, (46): 7875–7892 (2021).
- [18] Wangwang Yu, Jianan Shi, Liwei Sun and Wen Lei “Effects of Printing Parameters on Properties of FDM 3D Printed Residue of Astragalus/Polylactic Acid Biomass Composites”, *Molecules*, (27): 7373 (2022).

- [19] ISO/PRF 17296-1,"Additive manufacturing -- General principles -- Part 1: Terminology", (2015).
- [20] P. Holzmann, J. Robert, A. Aqeel Breiteneker, Soomro, & J. S. Erich, "User entrepreneur business models in 3D printing," *Journal of Manufacturing Technology Management*, 28: 75-94 (2017).
- [21] A. M. T. Syed, P. K. Elias, B. Amit, B. Susmita, O. Lisa, & C. Charitidis, "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities," *Materials today*, 1: 1-16 (2017).
- [22] L. Ze-Xian, T.C. Yen, M. R. Ray, D. Mattia, I.S. Metcalfe, & D. A. Patterson, "Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques," *Journal of Membrane Science*, 523: 596-613 (2016).
- [23] W. Yuanbin, Blache, & X. Xun, "Selection of additive manufacturing processes," *Rapid Prototyping Journal*, 23 (2): 434-447 (2017).
- [24] L. Y. Yee, S.E.T. Yong, K.J.T. Heang, K.P. Zheng, Y. L. Xue, Y. Y. Wai, C. H. T. Siang, & L. Augustinus, "3D Printed Bio-models for Medical Applications," *Rapid Prototyping Journal*, 23 (2): 227-235, (2017).
- [25] N. Shahrubudin, T.C. Lee, R. Ramlan. "An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications", *Procedia Manufacturing* 35:1286–1296 (2019).
- [26] İsmet ÇELİK, Feridun KARAKOÇ, M. Cemal ÇAKIR, Alpaslan DUYSAK "Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları", *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31: 108414 (2013).
- [27] G. Dogan, "Mikro ve nano hızlı prototipleme", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2007)
- [28] Kıvak, T. "Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts", *Measurement*, 50: 19-28 (2014)
- [29] Akgün, M. "Optimization of process parameters affecting cutting force, power consumption and surface roughness using taguchi-based gray relational analysis in turning AISI 1040 steel", *Surface Review and Letters*, 29 (03): 2250029 (2022)
- [30] Akgün, M., Yurtkuran, H., Ulaş, H. B. "AA7075 alaşımının işlenebilirliğine suni yaşlandırmanın etkisinin analizi ve kesme parametrelerinin optimizasyonu", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26 (1): 75-81 (2020)

- [31] Günay, M., Gündüz, S., YILMAZ, H., Yaşar, N., & Kaçar, R. “PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu”, *Politeknik Dergisi*, 23 (1): 73-79 (2020)
- [32] Aydın, M., Yıldırım, F., & Çantı, E. “Farklı Yazdırma Parametrelerinde Pla Filamentin İşlem Performansının İncelenmesi”, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3 (2): 102-115 (2019)
- [33] Mahir, U. Z. U. N., & ERDOĞDU, Y. E. “Eriyik yığıma modellemesi ile üretimde takviyesiz ve takviyeli PLA kullanımının mekanik özelliklere etkisinin araştırılması”, *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10 (4): 2800-2808 (2020)
- [34] Özsoy, K., Erçetin, A., & Çevik, Z. A. “Comparison of Mechanical Properties of PLA and ABS Based Structures Produced by Fused Deposition Modelling Additive Manufacturing”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 27: 802-809 (2021)
- [35] Zhang, X., Chen, L., Mulholland, T., & Osswald, T. A. “Characterization of mechanical properties and fracture mode of PLA and copper/PLA composite part manufactured by fused deposition modeling”, *SN Applied Sciences*, 1: 1-12 (2019)
- [36] Öteyaka, M. Ö., Aybar, K., & Öteyaka, H. C. “Effect of infill ratio on the tensile and flexural properties of unreinforced and carbon fiber-reinforced polylactic acid manufactured by fused deposition modeling”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30: 5203-5215 (2019)
- [37] Kara, F., Öztürk, B. “Comparison and optimization of PVD and CVD method on surface roughness and flank wear in hard-machining of DIN 1.2738 mold steel”, *Sensor Review*, 39(1): 24-33 (2018)
- [38] Pérez, M., Medina-Sánchez, G., García-Collado, A., Gupta, M., & Carou, D. “Surface quality enhancement of fused deposition modeling (FDM) printed samples based on the selection of critical printing parameters”, *Materials*, 11 (8): 1382 (2018)
- [39] Sammaiah, P., Rushmamanisha, K., Praveenadevi, N., & Reddy, I. R. “The influence of process parameters on the surface roughness of the 3d printed part in FDM process. In IOP Conference Series”, *Materials Science and Engineering*, 981 (4): 042021 (2020)
- [40] Chohan, J. S., Kumar, R., Yadav, A., Chauhan, P., Singh, S., Sharma, S., ... & Rajkumar, S. “Optimization of FDM printing process parameters on surface finish, thickness, and outer dimension with ABS polymer specimens using



Taguchi orthogonal array and genetic algorithms”, *Mathematical Problems in Engineering*, 2022: 1-13 (2022)

- [41] Shirmohammadi, M., Goushchi, S. J., & Keshtiban, P. M. “Optimization of 3D printing process parameters to minimize surface roughness with hybrid artificial neural network model and particle swarm algorithm”, *Progress in Additive Manufacturing*, 6: 199-215 (2021)
- [42] Tezel, T., & Kovan, V. “Determination of optimum production parameters for 3D printers based on nozzle diameter”, *Rapid Prototyping Journal*, 28 (1): 185-194 (2022)
- [43] Akgün, M., & Demir, H. “Optimization and finite element modelling of tool wear in milling of Inconel 625 superalloy”, *Politeknik Dergisi*, 24 (2): 391-400 (2021)
- [44] Kaygusuz, B., & Özerinç, S. E. Z. E. R. (3). “3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen PLA Bazlı Yapıların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 16 (1): 1-6. (2018)
- [45] Cem, B. O. Ğ. A., Seyedzavvar, M., & Zehir, B. “Experimental investigation on the effects of internal architecture on the mechanical properties of 3D printed PLA components”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 24: 119-124 (2021)
- [46] Naik, M., & Thakur, D. G. “Experimental investigation of effect of printing parameters on impact strength of the bio-inspired 3D printed specimen”, *Sādhanā*, 46 (3): 151 (2021)

## ÖZGEÇMİŞ

Yasin KURUOĞLU, ilk ve orta öğrenimini Ankara ilinde ve lise öğrenimini Keçiören Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi'nde tamamlamıştır. 2009 yılında İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Programında öğrenime başlayıp 2013 yılında mezun olmuştur. Mezuniyet sonrasında Ankara ilinde savunma sanayinde faaliyet gösteren bir kurumda makine mühendisi olarak çalışmaktadır. Ayrıca 2021 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı Yüksek Lisans eğitimine devam etmektedir.