



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ  
KULLANILARAK FARKLI ÜRETİM  
PARAMETRELERİNDE ÜRETİLEN Ti6Al4V  
ALAŞIMININ YAPISAL ve TRİBOLOJİK  
ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU**

**Gürkan KAYA**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Fatih YILDIZ**

**2019**

**Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ KULLANILARAK FARKLI ÜRETİM  
PARAMETRELERİNDE ÜRETİLEN Ti6Al4V ALAŞIMININ YAPISAL ve  
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU**

**Gürkan KAYA**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fatih YILDIZ**

**Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği**

**Erzurum**

**2019**

**Her hakkı saklıdır**

T.C.  
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
TEZ ONAY FORMU

---

**Seçici Lazer Ergitme Yöntemi Kullanılarak Farklı Üretim Parametrelerinde  
Üretilen Ti6Al4V Alaşımının Yapısal ve Tribolojik Özelliklerinin  
Karakterizasyonu**

Doç. Dr. Fatih YILDIZ danışmanlığında, Gürkan KAYA tarafından hazırlanan bu çalışma 14 / 01 / 2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. İrfan KAYMAZ

İmza



Üye : Doç. Dr. Fatih YILDIZ

İmza



Üye : Doç. Dr. Temel VAROL

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

**Doç. Dr. Arzu GÖRMEZ**  
Enstitü Müdürü

## **ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

14 / 01 / 2019

Gürkan KAYA

## ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

### SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ KULLANILARAK FARKLI ÜRETİM PARAMETRELERİNDE ÜRETİLEN Ti6Al4V ALAŞIMININ YAPISAL ve TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU

Gürkan KAYA

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih YILDIZ

Eklemeli üretim yöntemlerinden birisi olan Seçici Lazer Ergitme (SLE) yöntemi, karmaşık geometriye sahip ürünlerin imal edilebildiği yeni nesil bir üretim teknolojisidir. Bu yöntemde esas, toz haldeki malzemenin lazer ile ergitilerek katmanlar şeklinde birbirine bağlanması ve nihai ürünün oluşturulmasıdır. SLE yöntemi ile üretilen parçaların tribolojik özellikleri, üretimde kullanılan parametre/stratejilerden ve üretim sonrası uygulanacak ısıl işlemlerden büyük oranda etkilenmektedir. Dolayısı ile üretimde ve üretim sonrası kullanılacak parametrelerin, malzemenin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisinin bilinmesi/kontrol edilmesi ve optimum üretim şartlarının belirlenmesi son derece önemlidir. Literatürde eklemeli üretim ile üretilen parçaların tribolojik özelliklerinin belirlendiği çalışmalar mevcuttur. Ancak yapılan bu çalışmalarda, Seçici Lazer Ergitme yöntemi ile yapılan üretimlerde, inşa oryantasyonu, yana kayma mesafesi ve üretimden sonra uygulanacak ısıl işlemlerin malzemenin aşınma performansına etkileri yeterince incelenmemiştir. Bu tez çalışmasında, söz konusu üretim parametrelerinin alaşımın aşınma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca bu yeni nesil üretim yöntemi ile üretilen parçaların tribolojik özellikleri konvansiyonel yöntemle (döküm) üretilen parçaların tribolojik özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Aşınma test sonuçlarına göre, SLE ile üretimde yana kayma mesafesinin azalması ile Ti6Al4V alaşımın aşınma direncinin arttığı, üretim tablası üzerinde 45° açı ile gerçekleştirilen üretimin doluluk oranını olumlu yönde etkilediği ve alaşımın aşınma direnci açısından en uygun inşa oryantasyonu olduğu tespit edilmiştir.

**2019, 63 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Seçici lazer ergitme, Ti6Al4V, İnşa oryantasyonu, Yana kayma mesafesi, Isıl işlem, Aşınma

## ABSTRACT

MS. Thesis

### CHARACTERIZATION OF THE STRUCTURAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF Ti6Al4V ALLOY PRODUCED IN DIFFERENT PRODUCTION PARAMETERS USING SELECTIVE LASER MELTING METHOD

Gürkan KAYA

Erzurum Technical University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fatih YILDIZ

Selective Laser Melting (SLM) method, which is one of the additive manufacturing methods, is a new generation production technology in which complex geometry products can be manufactured. In this method, the basis is to form the final product by bonding the powdered material to the layers by laser melting. The tribological properties of the parts produced by the SLM method are greatly influenced by the parameters / strategies used in the production. Therefore, it is very important to know and control the parameters to be used in production on the tribological properties of the material. In the literature, there are studies which determine the tribological properties of the parts produced by SLM. However, in these studies, the effects of build orientation, hatch spacing and heat treatment on the wear performance of the material have not been investigated yet. In this thesis, the effects of these production parameters on wear performance of the alloy were investigated. In addition, the tribological properties of the specimens produced by SLM were compared with the tribological characteristics of the parts produced by conventional method (casting). According to the tribological test results, it was determined that the wear resistance of Ti6Al4V alloy increased with the decreasing of hatch spacing in SLM method and the wear resistance of the 45° angle on the production table positively affected the relative density rate. The most suitable build orientation was determined as 45° in terms of wear resistance of the alloy.

**2019, 63 pages**

**Keywords:** Selective laser melting, Ti6Al4V, Build orientation, Hatch spacing, Heat treatment, Wear

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin boyunca her türlü fedakârlığı gösteren bilgi ve tecrübesini esirgemeyen saygıdeğer danışmanım Sayın Doç. Dr. Fatih YILDIZ'a en samimi duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübesini benimle paylaşan ve bana oldukça fazla zaman ayıran Sayın Arş. Gör. İlyas HACISALİHOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarım sırasında bilgilerini benimle paylaşan değerli arkadaşım Makine Yüksek Mühendisi Yusuf Murat DURMAZ'a teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca manevi desteklerini her zaman hissettiğim aileme ve nişanlım Dilara Elif KOMUT'a teşekkürlerimi sunarım.

**Gürkan KAYA**

**Ocak / 2019**

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	iii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	iv
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	vi
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	vii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	ix
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Üretime Giriş ve Genel Bakış.....	1
1.2. İmalat Malzemeleri.....	1
1.3. Üretim Süreçleri.....	2
1.4. Metal İşlemenin Evrimi.....	3
1.5. Temel Metal Şekillendirme İşlemleri ve Kullanımları.....	4
1.6. Eklemeli Üretimin Amacı: Yeni Uygulamalar ve Tasarımlar.....	5
1.7. Seçici Lazer Ergitme (SLE) Yöntemi.....	7
1.8. Literatürde Yapılan Çalışmalar.....	8
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....	13
2.1. Eklemeli Üretim İşlem Kategorileri.....	13
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	23
3.1. Materyal.....	23
3.2. CAD Modelin Oluşturulması ve STL Formatına Çevrilmesi.....	24
3.3. SLE Yöntemi ile Numunelerin Üretimi.....	25
3.4. X Işını Kırınımı (XRD) Analizi.....	27
3.5. Mikro Yapısal İncelemeler.....	28
3.6. Aşınma Deneyleri.....	29
3.7. Isıl İşlem Deneyleri.....	30
3.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri.....	31
3.9. 3D yüzey profilometre analizleri.....	32
3.10. Mikrosertlik Ölçümleri.....	33
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA</b> .....	35
4.1. Yapısal Özellikler.....	35
4.1.1. SLE yöntemi ile üretimde kullanılan Ti6Al4V toz malzeme boyutu.....	35
4.1.2. XRD analizleri.....	35
4.1.3. Üretim sonrası doluluk oranlarının belirlenmesi.....	37



4.1.4. Isıl işlem öncesi ve sonrası mikroyapı incelemeleri .....	38
4.2. Tribolojik Özellikler.....	39
4.2.1. Isıl işlem öncesi sürtünme katsayıları .....	39
4.2.2. Isıl işlem sonrası sürtünme katsayılarının değişimi .....	42
4.2.3. Aşınma oranları.....	44
4.2.4. Aşınma izlerinin karakterizasyonu.....	46
<b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>55</b>
5.1. Sonuçlar .....	55
5.2. Öneriler .....	57
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>58</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>62</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
$\alpha$	Alfa
$\beta$	Beta
$\text{Å}$	Angstrom
g	Gram
HV	Vickers Sertlik Birimi
N	Newton
°	Derece
s	Saniye
$\lambda$	Dalga boyu
$\mu\text{m}$	Mikronmetre

### **Kısaltmalar**

3B	3 Boyutlu
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CNC	Bilgisayarlı Nümerik Kontrol
COF	Sürtünme Katsayısı
DMLS	Direkt Metal Lazer Sinterleme
EIE	Elektron Işın Ergitme
HMK	Hacim Merkezli Kübik
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SLE	Seçici Lazer Ergitme
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
SPH	Sıkı Paket Hegzagonal
STL	Standart Üçgen Eleman
UV	Ultraviyole

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Üretimi tanımlamanın 2 yolu: (a) teknik süreç, (b) ekonomik süreç .....	1
Şekil 2.1. Eklemeli üretim metal işlemleri.....	13
Şekil 2.2. Püskürtmeli bağlamanın şematik görüntüsü .....	16
Şekil 2.3. Yönlendirilmiş enerji biriktirmenin şematik görüntüsü .....	17
Şekil 2.4. Malzeme ekstrüzyonun şematik görüntüsü .....	18
Şekil 2.5. Malzeme püskürtme yönteminin şematik görüntüsü .....	19
Şekil 2.6. Sıvı haznesi içerisinde fotopolimerizasyonun şematik görüntüsü .....	20
Şekil 2.7. Levha katmanlaştırma yönteminin şematik görüntüsü .....	21
Şekil 3.1. 45°'lik numunenin CAD ortamında modellenmesi .....	24
Şekil 3.2. Destek yapıları eklenmiş numune.....	25
Şekil 3.3. Concept Lazer MLab R SLE cihazı .....	26
Şekil 3.4. SLE süreci esnasında üretim platformunun görüntüsü .....	26
Şekil 3.5. Üretim sonrası elde edilen numunelere ait görüntü .....	27
Şekil 3.6. SLE prosesi sonrası üretim tablasında tozdan arındırılmış numunelere ait görüntü.....	27
Şekil 3.7. XRD cihazı.....	28
Şekil 3.8. Optik mikroskop cihazı.....	29
Şekil 3.9. Aşınma test cihazı .....	30
Şekil 3.10. Isıl işlemlerin gerçekleştirildiği sistem .....	31
Şekil 3.11. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	32
Şekil 3.12. 3D Profilometre cihazı .....	33
Şekil 3.13. Mikrosertlik cihazı .....	34
Şekil 4.1. Ti6Al4V toz malzemeye ait SEM görüntüsü.....	35
Şekil 4.2. XRD grafikleri .....	36
Şekil 4.3. 0, 45 ve 90° inşa oryantasyonlarındaki ve 60 µm 75 µm ve 90 µm yana kaymalardaki optik mikroskop görüntüleri (a1) 60 - 0° (b1) 75 - 0° (c1) 90 - 0° (a2) 60 - 45° (b2) 75 - 45° (c2) 90 - 45° (a3) 60 - 90° (b3) 75 - 90° (c3) 90 - 90° .....	37
Şekil 4.4. Yana kayma ve inşa oryantasyonuna bağlı olarak doluluk oranı değişimi grafiği .....	38

Şekil 4.5. Mikroyapı SEM görüntüleri (a) Döküm Ti6Al4V, (b) Döküm Ti6Al4V + ısıl işlem, (c) 60 – 45° (d) 60 – 45° + ısıl işlem.....	39
Şekil 4.6. 60µm yana kayma ile üretilen numunelere ait COF grafiği .....	40
Şekil 4.7. 75µm yana kayma ile üretilen numunelere ait COF grafiği .....	40
Şekil 4.8. 90µm yana kayma ile üretilen numunelere ait COF grafiği .....	41
Şekil 4.9. 60µm yana kayma ile üretilen numunelere ait COF grafiği .....	42
Şekil 4.10. 75µm yana kayma ile üretilen numunelere ait COF grafiği .....	43
Şekil 4.11. 90µm yana kayma ile üretilen numunelere ait COF grafiği .....	44
Şekil 4.12. Isıl işlem öncesi farklı inşa oryantasyonlarında elde edilen aşınma oranları.....	45
Şekil 4.13. Isıl işlem sonrası farklı inşa oryantasyonlarında elde edilen aşınma oranları.....	45
Şekil 4.14. Isıl işlem öncesi aşınma izlerinin SEM ve 3D optik profilometre görüntüleri (a) 60 – 0° (b) 60 – 45° (c) 60 – 90° (d) Döküm Ti6Al4V alaşımı.....	47
Şekil 4.15. Isıl işlem öncesi aşınma izlerinin SEM ve 3D optik profilometre görüntüleri (a) 75 – 0° (b) 75 – 45° (c) 75 – 90° (d) Döküm Ti6Al4V alaşımı.....	49
Şekil 4.16. Isıl işlem öncesi aşınma izlerinin SEM ve 3D optik profilometre görüntüleri (a) 90 -0° (b) 90 – 45° (c) 90 – 90° (d) Döküm Ti6Al4V alaşımı.....	50
Şekil 4.17. Isıl işlem sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D optik profilometre görüntüleri (a) 60 – 0° (b) 60 – 45° (c) 60 – 90° (d) Döküm Ti6Al4V alaşımı.....	51
Şekil 4.18. Isıl işlem sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D optik profilometre görüntüleri (a) 75 – 0° (b) 75 – 45° (c) 75 – 90° (d) Döküm Ti6Al4V alaşımı.....	52
Şekil 4.19. Isıl işlem sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D optik profilometre görüntüleri (a) 90 – 0° (b) 90 – 45° (c) 90 – 90° (d) Döküm Ti6Al4V alaşımı.....	53

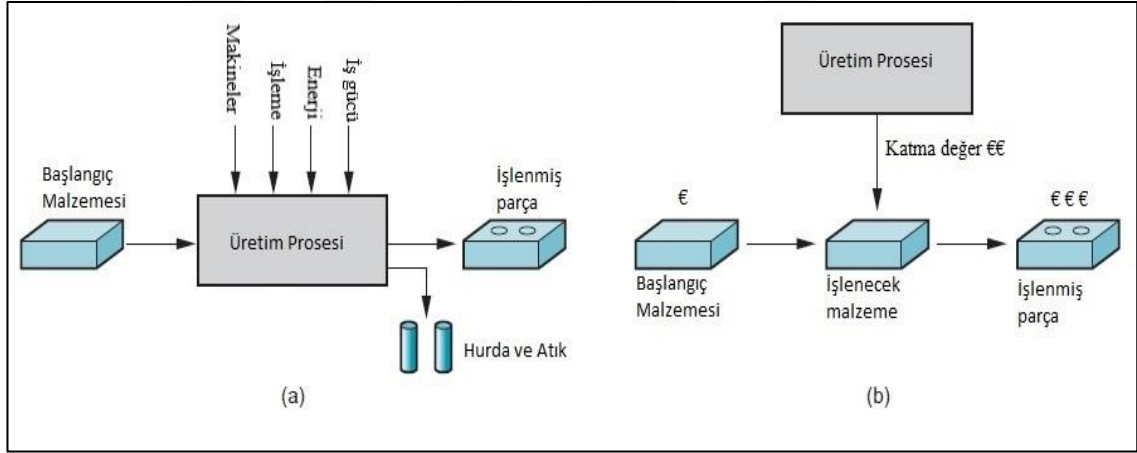
## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Mühendislik malzemelerinin sınıflandırılması .....	2
Çizelge 1.2. Üretim süreçlerinin sınıflandırılması .....	3
Çizelge 2.1. Toz yatak füzyonuna genel bir bakış .....	15
Çizelge 2.2. Püskürtmeli bağlamaya genel bakış .....	16
Çizelge 2.3. Yönlendirilmiş enerji biriktirmeye genel bakış .....	17
Çizelge 2.4. Malzeme ekstrüzyonuna genel bakış .....	18
Çizelge 2.5. Malzeme püskürtme yöntemine genel bakış .....	19
Çizelge 2.6. Tank içerisinde fotopolimerizasyon yöntemine genel bakış .....	20
Çizelge 2.7. Levha katmanlaştırma yöntemine genel bakış .....	21
Çizelge 3.1. Ti6Al4V'nin kimyasal bileşimi .....	23
Çizelge 3.2. Ti6Al4V'nin fiziksel özellikleri .....	23
Çizelge 3.4. Üretim parametreleri .....	25
Çizelge 3.5. Aşınma parametreleri .....	30
Çizelge 4.1. 60µm yana kayma ile üretilen numunelere ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri .....	40
Çizelge 4.2. 75µm yana kayma ile üretilen numunelere ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri .....	41
Çizelge 4.3. 90 µm yana kayma ile üretilen numunelere ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri .....	41
Çizelge 4.4. 60µm yana kayma ile üretilen numunelere ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri .....	43
Çizelge 4.5. 75µm yana kayma ile üretilen numunelere ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri .....	43
Çizelge 4.6. 90µm yana kayma ile üretilen numunelere ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri .....	44
Çizelge 4.7. Farklı yana kayma parametrelerindeki aşınma izlerinin ortalama hacim değerleri .....	54

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Üretime Giriş ve Genel Bakış

Üretim, doğada bulunan maddeleri istenilen biçim ve özellikteki ürünlere dönüştürmek olarak tanımlanır. Bir çalışma alanı olarak üretim, teknik ve ekonomik olmak üzere iki şekilde tanımlanabilir (Şekil 1.1). Teknik olarak üretim, parça veya ürün yapmak için belirli bir başlangıç malzemesinin geometrisini, özelliklerini veya görünümünü değiştirmek için uygulanan fiziksel ve kimyasal işlemler olup üretim, ürün ortaya çıkarmak için birden fazla parçanın montajını da içerir. Ekonomik süreç açısından üretim, bir veya daha fazla işlem ile malzemelerin katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesidir. Üretimin en önemli özelliği malzemeye, şekli ve özelliklerini değiştirerek veya benzer şekilde değiştirilmiş diğer malzemeler ile birleştirerek değer katmasıdır.

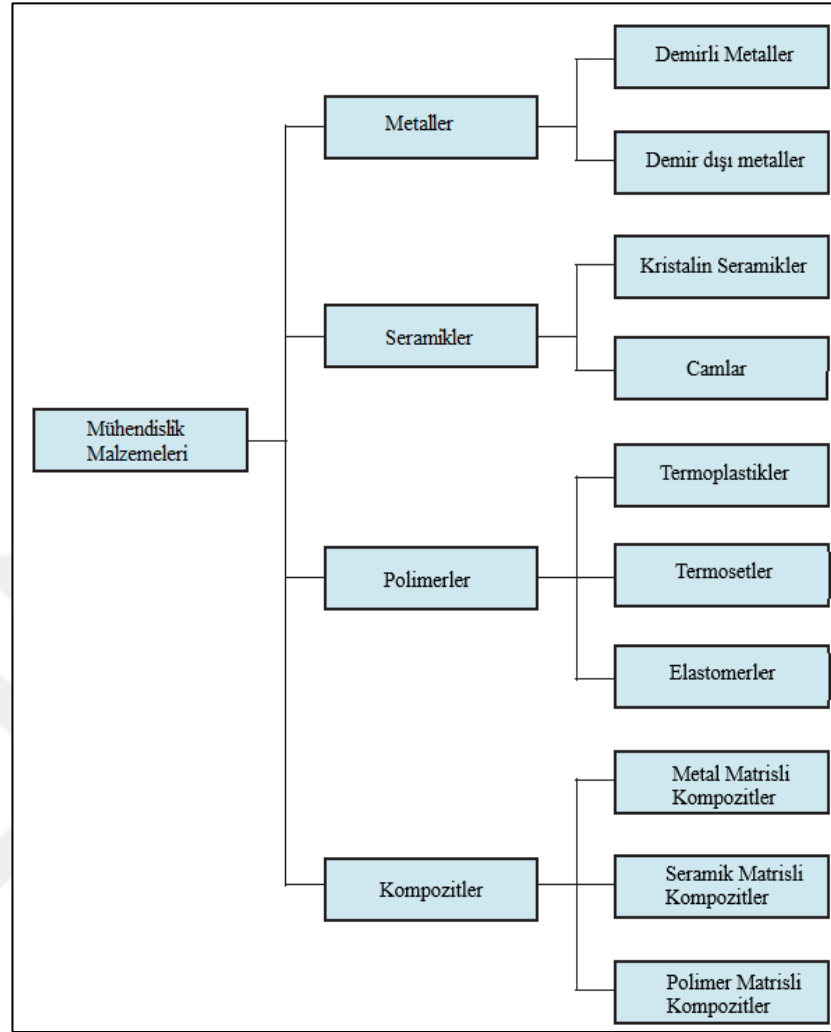


Şekil 1.1. Üretime tanımlamanın 2 yolu: (a) teknik süreç, (b) ekonomik süreç (Groover 2015)

### 1.2. İmalat Malzemeleri

Mühendislik malzemeleri metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler olmak üzere dört temel grupta sınıflandırılır. Bu malzemelerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri farklıdır ve bu farklılıklar ürün üretmek için kullanılacak üretim süreçlerini etkiler. Çizelge 1.1’de mühendislik malzemelerinin alt bileşenleri ile birlikte bir sınıflandırması verilmiştir.

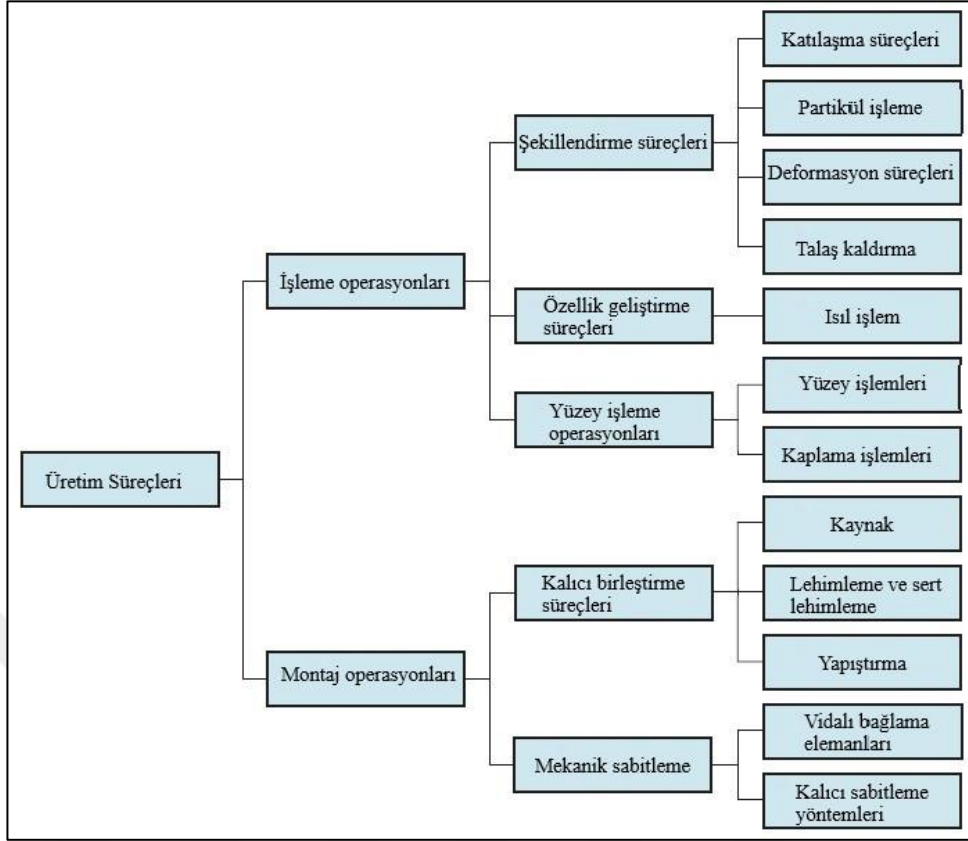
Çizelge 1.1. Mühendislik malzemelerinin sınıflandırılması (Groover 2015)



### 1.3. Üretim Süreçleri

Üretim prosesi, malzemenin değerini arttırmak amacıyla bir başlangıç çalışma malzemesine fiziksel veya kimyasal değişiklikler ile sonuçlanan tasarlanmış bir prosedür olarak ifade edilebilir. Üretim süreçleri temelde, işleme operasyonları ve montaj operasyonları olarak iki kısma ayrılır. Üretim süreçlerinin sınıflandırılması Çizelge 1.2’de gösterilmiştir (Groover 2015).

Çizelge 1.2. Üretim süreçlerinin sınıflandırılması (Groover 2015)



### 1.4. Metal İşlemenin Evrimi

Neolitik dönemlerde, milattan önce 6000-3000 yıllarında, altın ve bakır gibi doğal metal formları putlar, tılsımlar veya kişisel süs eşyaları gibi maddelere soğuk olarak işlenmiştir. Bronz çağı başladığında, milattan önce 3000 yılında bakır, arsenik veya kalay ile alaşımli olarak dayanıklı alet ve silah yapımında döküm ve dövme işlemlerinde kullanılmıştır. Demir, Mısır Firavunları için hançer gibi nesnelere kullanılmıştır. Demir çağı başladığında, milattan önce 1400-1200 yıllarında, Hititler fetih için demir araçları ve silahları nasıl üreteceklerini öğrenmeye başlamışlardır. Yeni metallerin keşifleri, milattan sonra 1700'lerin ortalarından 1800'lü yılların sonlarına kadar geçen zaman diliminde ortaya çıktığı görülmüş, titanyum, tungsten, kobalt ve alüminyum gibi önemli metaller keşfedilmiştir. 1850'lerin ortalarında endüstriyel ölçekli çelik üretimi için Bessemer prosesi, kaynak için karbon ark prosesi 1800'lerin sonlarında geliştirilmiş, 1950'lerin sonlarında ise elektron ışın kaynağı bulunmuş, lazerler ise ilk olarak 1960 yılında ortaya çıkmıştır. Bilgisayar kontrollü tornalar 1960 ve 1970'lerde işleme endüstrisinde devrim



yaratmıştır. Üretiminde % 85 oranında titanyum alaşımı kullanılmış bir yapıya sahip olan SR-71 keşif uçağı, ilk uçuşunu 1968’de gerçekleştirmiştir (Milewski 2017).

### 1.5. Temel Metal Şekillendirme İşlemleri ve Kullanımları

Mekanik üretim işlemleri olarak da bilinen metal şekillendirme işlemleri, bir metal veya alaşım kütlesinin mekanik kuvvetlere maruz kaldığı birincil şekillendirme işlemleridir. Bu tür kuvvetlerin etkisi altında, metal parçanın şekli ve boyutu değişime uğrar. Mekanik şekillendirme, yeterince dövülebilir ve eğilebilir olan metaller veya alaşımlara uygulanması mümkündür. Mekanik işlem, malzemenin işlenmesi sırasında “plastik deformasyona uğramasını” gerektirir. Pek çok farklı metal şekillendirme prosesi vardır ve bunlardan soğuk metal şekillendirme işlemleri, sıcak işlemlere kıyasla daha iyi şekil, boyut ve yüzey kalitesi sağlar (Gupta et al. 2009).

Mekanik işleme sürecinin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Mekanik çalışma, sünekliği azaltırken, nihai çekme dayanımı, aşınma direnci, sertlik ve akma noktası gibi malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirir.
- Mekanik olarak çalışılan kısımda tane akış hatlarının gelişmesine neden olarak tane akışı, parça kullanımdayken kırılmaya karşı mukavemeti artırır.

Üretim yöntemleri içerisinde en çok kullanılan yöntemlerden birisi de talaşlı imalattır. Talaşlı imalat yöntemleri birincil üretim yöntemi olarak kullanılabilceği gibi, döküm ve plastik şekil verme yöntemleriyle üretilmiş malzemelerin uygulamada kullanılması için son işlem olarak da kullanılmaktadır. Talaşlı imalat yönteminde üretilecek iş parçasına istenilen geometriyi kazandırmak için uygun takım tezgâhı ve kesici takımlar kullanılıp talaş kaldırılarak, hedeflenen boyut ve yüzey kalitesi sağlanır (Yürekli 2012 ; Durmaz 2018).

Talaşlı imalat yönteminde kesme işlemi, iş parçasının kesici takım önündeki plastik deformasyonu ve deforme olan bu katmanın atık talaşa dönüşmesi ile gerçekleşir. Bu yöntem çoğunlukla metalleri şekillendirmek için uygulansa da diğer malzemeler (polimerler ve kompozit malzemeler) de aynı yöntem ile şekillendirilebilir. Günümüzde

## 1. GİRİŞ

---

hala yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat yöntemlerinin en önemli dezavantajları, atık malzeme sarfiyatının yüksek olması ve ön takımlandırma ve proses tasarımı ile oldukça zaman alıcı olmasıdır. Talaşlı imalat sonucu oluşan talaşlar, geri dönüşümü mümkün olmasına rağmen atık malzemelerdir. Ayrıca talaş kaldırma işlemleri, belirli bir parça için plastik şekil verme, döküm veya toz metalürjisi gibi alternatif yöntemlere göre daha fazla zaman alır.

Yaygın olarak kullanılan temel üretim yöntemlerinden diğer bir başlık ise döküm yöntemidir. Yöntemin sınırları çok geniş olup, hem çok küçük parçaların hem de tonlarca ağırlıktaki parçaların üretimine uygun döküm teknikleri bulunmaktadır. Seri üretime uygun döküm yöntemleri geliştirilmiş olup, karmaşık biçimli ve içi boş parçaların üretimi de ancak bu yöntem ile üretimi mümkündür. Ancak az sayıda parça üretimi için genellikle ekonomik olmayan döküm işlemi ile ince kesitlerin elde edilmesi de çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Döküm yönteminin diğer önemli bir dezavantajı ise hassas boyut toleranslarının ve iyi yüzey kalitelerinin elde edilmesinin oldukça güç oluşudur.

### 1.6. Eklemeli Üretimin Amacı: Yeni Uygulamalar ve Tasarımlar

Teknolojik ilerlemelerin çok hızlı yaşandığı günümüz dünyasında, karmaşık geometriye sahip parçaların tek bir üretim prosesi ile kolay ve kısa zamanda üretilmesi önemli bir zorunluluk haline gelmiştir. Karmaşık geometriye sahip tasarımların üretilebilmesi için en uygun ve hızlı yöntemlerden birisi, eklemeli/katmanlı üretim (Additive manufacturing) teknolojisidir. Lazer ve elektron demeti gibi ısı kaynakları ile malzemenin kontrollü olarak ergitilmesi ve kalıplama teknolojilerine ihtiyaç duymaksızın metalin eriyik veya yarı eriyik formdan kontrollü katılmasına ile bilgisayar destekli tasarımı (Computer Aided Design – CAD) yapılmış olan tüm parçaların/elamanların katmanlı olarak üretilmesi, eklemeli imalat olarak tanımlanmaktadır. Atık malzeme miktarının oldukça az olması, talaşlı imalatı zor malzemelerin ve geleneksel talaş uzaklaştırma prensibine sahip yöntemler ile üretilmesi imkansız olan karmaşık geometrilerin üretilebilmesini mümkün kılan eklemeli imalat yöntemleri son dönemde oldukça ilgi çekmektedir. Eklemeli imalat yöntemlerinde malzemeyi ergitecek olan ısı girdisinin elektron demeti veya lazer demeti ile sağlanması söz konusudur.

## 1. GİRİŞ

---

Bir eklemeli üretim yöntemi olan Seçici Lazer Ergitme (SLE) metodu, toz formundaki malzemeyi lazer ile ergitmesi esnasında vakum ortamına ihtiyaç duymaması sebebiyle bakım maliyetlerinin nispeten düşüklüğü ve proses kolaylığı ile elektron demeti kullanan sistemlere kıyasla üstünlük sağlamaktadır. Lazer demetinin elektron demetine göre sahip olduğu daha küçük boyutlar ve toz formundaki malzemenin iletken veya yalıtkan özelliklerinden etkilenmeksizin tüm malzemelere uygulanabilmesi ile lazer kullanım ve hassasiyet yönünden elektron demeti kullanan sistemlerden daha üstün yeteneklere sahiptir.

SLE yöntemi, karmaşık geometriye sahip ürünlerin imal edilebildiği yeni nesil bir üretim teknolojisidir. Bu yöntemde esas, toz haldeki malzemenin lazer ile ergitilerek katmanlar şeklinde birbirine bağlanması ve nihai ürünün oluşturulmasıdır. Bilinen isminin yanı sıra hızlı prototipleme, serbest şekil fabrikasyonu, katmanlı üretim gibi isimlerin de atfedildiği proses, talaşlı imalattaki kesici takımları kullanmadan veya kalıp gibi aparatlar oluşturulmadan, üretilmesi hedeflenen ürünün 3B tasarımının yapılarak kullanılabilir ürüne dönüştürülmesi işlemidir. SLE yönteminin başlıca avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ Giderek hızlanan ürün geliştirme ve farklı tasarımların hızlıca üretilmesinde ayrıcalık katan bir yöntemdir.
- ✓ Klasik yöntemlerle üretilmeyecek kadar karmaşık parçalar hızlıca üretilmektedir.
- ✓ Mühendislik, tıp ve diğer disiplinler arası çalışma alanlarına cevap verebilen bu teknoloji, implant üretiminde büyük bir avantaja sahiptir. Özellikle MR ile tomografi datalarını kullanarak imalat yapılabilmesi, standart ölçülerde implant üretimindeki olumsuzlukları gidererek hastaya özel implant tasarımlarının üretilmesi çok ciddi bir üstünlük sağlamaktadır.
- ✓ Toz bileşiminin değiştirilebilmesi ile değişik stokiyometriye sahip, farklı özellikte malzemelerin üretilmesine olanak sağlamaktadır.

### 1.7. Seçici Lazer Ergitme (SLE) Yöntemi

Son yıllarda fonksiyonelliği arttırılan kompleks şekillerin üretimi ile pek çok endüstriyel alanda kullanımı yaygınlaşmaya başlayan SLE yöntemi, medikal, otomotiv, savunma ve havacılık gibi pek çok alanda dikkat çekmektedir (Yan et al. 2014 ; Thompson et al. 2015 ; Guo et al. 2017). Bu proste son ürüne yakın geometrilerin sağlanması ile üretim döngüsündeki zamanın azaltılmasının yanı sıra atık malzeme miktarındaki düşüş ile çevreci bir yaklaşımdır ( Levy et al. 2003 ; Ahn 2011). Başlangıçta tekil kullanım için fonksiyonel prototiplerin üretildiği bu proses zamanla son kullanıcıya direkt olarak ürünün teslim edildiği hızlı üretim tekniği şeklinde anılmaya başlamıştır. Özellikle medikal ve otomotiv sektörü bu üretim yöntemine oldukça büyük ilgi ve ihtiyaç duyan sektörler arasında başı çekmektedir.

SLE sistemlerinde fiber lazerler kullanılmakta olup lazerin zamanla neredeyse hiç dalgalanma olmadığı sürekli karakterli lazer vuruşu ile çalışmaktadırlar. Lazer kaynağından çıkan lazer demeti galvano aynalar tarafından yönlendirilerek tozun serili olduğu üretim platformuna planlanan tarama hızı ile etkileşim sağlanmaktadır. SLE sisteminde lazerin radyasyonu ile sağlanan ısı girdisi toz tarafından absorbe edilir ve seçici lazer sinterleme yönteminden farklı olarak tamamen ergime gerçekleştirilerek bir önceki katman ile bağ kurması sağlanır. Çalışılan parçaya ait kısım oluşturulduktan sonra, bir önceki katman ile birleştirilmesi ve bu tekrarın tüm parçayı oluşturana kadar devam etmesi sonucu parça üretilmiş olur. Birçok üretim parametresi, oluşturulan ürüne ait kimyasal, morfolojik, mikro yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerin değişimine neden olur. Bu etkenler;

- Lazer gücü,
- Demet çapı, vuruş modu,
- Tarama hızı,
- Tarama stratejisi,
- İnşa oryantasyonu,
- Tabaka/katman kalınlığı,
- Üretim sonrası uygulanan yüzey ve ısıl işlemler, şeklinde sıralanabilir.

Lazer ergitmede, katmanları ve bitişik eriyik havuzları arasında dayanım artırılması ve bütünlük sağlanması gerekmektedir. Bu bütünlük, üretim parametreleri olarak bilinen lazer gücü ( $P$ ), katman kalınlığı ( $t$ ), lazer tarama hızı ( $V$ ), yana kayma mesafesinin ( $h$ ) değişimi ile kontrol edilen enerji yoğunluğu ( $E$ ) ve bu enerjinin eriyikten uzaklaştırılma hızı ile sağlanmaktadır. Tüm bu değişkenler eriyik oluşturulması için gereken enerji yoğunluğuna etki etmekte olup, mekanik özellikler üzerinde direkt olarak etkilidir (Thijs et al. 2010). Enerji yoğunluğu ve proses parametreleri arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$E = \frac{P}{V.h.t} \quad (1.1)$$

### 1.8. Literatürde Yapılan Çalışmalar

Seçici Lazer Ergitme yöntemi ile üretilen parçaların tribolojik özellikleri, üretimde kullanılan parametre/stratejilerden ve üretim sonrası uygulanacak ısıtma işlemlerinden büyük oranda etkilenmektedir. Dolayısıyla üretimde ve üretim sonrası ısıtma işlemlerde kullanılacak parametrelerin, malzemenin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisinin bilinmesi/kontrol edilmesi ve optimum üretim şartlarının belirlenmesi son derece önemlidir. Literatürde bu amaç doğrultusunda yapılan çalışmalar oldukça sınırlı olmakla birlikte, mevcut çalışmalar aşağıdaki paragraflarda kısaca özetlenmiştir.

Bartolomeu ve arkadaşları, SLE, sıcak presleme ve döküm yöntemi ile üretilen Ti6Al4V biyomedikal alaşımının mikroyapısal ve tribolojik davranışını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Ti6Al4V'nin X ışını kırınımı (XRD) analizi, mikrosertlik testi ve aşınma testleri ile kapsamlı bir metalurjik, mekanik ve tribolojik karakterizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Sıcak presleme ve döküm ile karşılaştırıldığında soğuma hızının yüksek olmasından dolayı SLE ile üretilen Ti6Al4V alaşımı için en yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Bartolomeu et al. 2017).

Gu ve arkadaşları, SLE yöntemi ile üretilen saf Titanyumun mikroyapısal ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. SLE yöntemi ile üretimde değişken parametre olarak lazer tarama hızı seçilmiştir. Çalışmada tarama hızı değiştirilerek dört farklı lineer enerji yoğunluğunda (900, 450, 300 ve 225 J/m) üretilen numunelerin aşınma

## 1. GİRİŞ

---

performansları incelenmiştir. İncelenen parametreler arasında en yüksek doluluk oranı, mikrosertlik ve aşınma direncinin 300 J/m lineer enerji yoğunluğunda üretilen numuneler için sağlandığı rapor edilmiştir (Gu et al. 2012).

Zhu ve arkadaşları, SLE ve geleneksel yöntem ile üretilen 316L paslanmaz çelik parçaların yağlı temas koşulu altında tribolojik performansını incelemiştir. Aşınma testlerinde karşıt malzeme olarak pirinç kullanılan çalışmada, SLE üretim parametreleri sabit tutularak sadece bir enerji yoğunluğunda üretim yapılmıştır. Seçilen üretim parametrelerine göre SLE ile üretilen parçaların geleneksel yöntemle üretilen malzemeye kıyasla daha düşük aşınma oranına sahip olduğu ifade edilmiştir. SLE ile üretim sonrası tane yapısının daha homojen ve küçük olması sebebiyle plastik deformasyonun azalması neticesinde aşınma direncinin geleneksel çeliğe göre arttığı rapor edilmiştir (Zhu et al. 2016).

Sun ve arkadaşları, farklı lazer tarama hızları altında SLE ile üretilen 316L paslanmaz çelik numunelerin tribolojik davranışlarını incelemiştir. Çalışmada, SLE ile üretilen çeliğin aşınma miktarının, doluluk oranına bağlı olduğu ve artan doluluk oranı ile aşınma direncinin arttığı tespit edilmiştir. Benzer çalışmaların aksine, seçilen test koşullarına göre SLE ile üretilen 316L numunelerinin aşınma oranının, standart dökme 316L paslanmaz çelikten 6-17 kat daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. SLE ile üretilen parçalarda temel aşınma mekanizmasının kırılma olduğu ve üretimden kaynaklı porozitelerin çatlak başlangıcı oluşturarak aşınma testi esnasında malzeme kaybını artırdığı belirlenmiştir (Sun et al. 2014).

Li ve arkadaşları, SLE yöntemi ile farklı üretim parametrelerinde üretilen 316L paslanmaz çeliğin tribolojik özelliklerini incelemiştir. Prizmatik test numunelerinin üretildiği çalışmada SLE ile üretimde farklı lazer güçleri ve inşa oryantasyonları, aşınma testlerinde ise farklı normal yükler kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre düşük lazer gücünde üretilen numunelerin düşük sertlik ve doluluk oranlarına sahip olduğu belirtilmiştir. Ancak lazer gücü ve inşa oryantasyonunun çeliğin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı ifade edilmiştir (Li et al. 2018)

Kumar ve Kruth, SLE yöntemi ile ürettikleri 4 farklı malzemenin aşınma davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmada 316L paslanmaz çelik,

## 1. GİRİŞ

---

takım çeliği, Ti6Al4V ve CoCrMo alaşımları kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, paslanmaz çeliğin aşınma direncinin takım çeliğinden daha yüksek olduğu, Ti6Al4V ve CoCrMo alaşımlarının ise en düşük aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ancak yapılan üretimlerde %100 doluluk oranları elde edilemediği için SLE yönteminde kullanılan parametrelerin en yüksek doluluk oranını sağlayacak şekilde optimize edilmesi gerektiği vurgulanmıştır (Kumar and Kruth 2008).

Attar ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, SLE ve döküm yöntemleri kullanılarak üretilen ticari olarak saf titanyum (CP-Ti) parçaların aşınma özelliklerini araştırmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri, SLE tarafından üretilen CP-Ti parçaların martenzitik ( $\alpha'$ ) mikro yapıya sahip olduğunu göstermektedir; burada döküm olarak üretilen CP-Ti numuneleri plaka benzeri  $\alpha$  fazı mikro yapı göstermektedir. SLE numunelerinde aşınma izleri, döküm parçalara kıyasla çok sığ bulunmuştur. Hem SLE hem de dökme CP-Ti, benzer aşınma mekanizmaları sergilemesine rağmen, SLE CP-Ti, martenzitik mikro yapısı ile daha ince tane boyutu ve üstün mikro sertliği nedeniyle daha iyi aşınma direnci göstermiştir (Attar et al. 2015).

Bruschi ve arkadaşları, Elektron Işınıyla Ergitme (EIE) üretimi sonrası ısıtma işlem ve talaşlı imalat kombinasyonunun, Ti6Al4V alaşımının aşınma davranışına etkisini araştırmışlardır. Çalışmada tuzlu su çözeltisinde ve sıcaklık kontrollü ortamda ileri-geri aşınma testleri yapılmıştır. Sonuçlarda ısıtma işlem görmüş numunelerin, ısıtma işlem uygulanmayanlara kıyasla daha düşük bir sürtünme katsayısı ve aşınma oranı sergilediği bildirilmiştir. Isıtma işlemi EIE ile üretilen Ti6Al4V aşınma direncini arttırmak için etkili bir yöntem olabileceği ifade edilmiştir (Bruschi et al. 2017).

Liverani ve arkadaşları, SLE ile üretilen 316L paslanmaz çelik numunelerin lazer gücü, tarama hızı, bindirme mesafesi ve inşaa oryantasyonunun mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlar ve bu parametreler için optimum işlem şartlarını oluşturmuşlardır (Liverani et al. 2017). Cherry ve arkadaşları, SLE proses parametrelerinin 316L paslanmaz çeliğin fiziksel özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki etkisini araştırdıkları çalışmalarında, lazer gücünün numunenin gözenekliliğini ve sertliğini etkileyebileceğini bildirmişlerdir. Minimum gözeneklilik oranını,  $104.52 \text{ J/mm}^3$  enerji yoğunluğunda % 0.38 olarak gözlemlemişlerdir (Cherry et al. 2014). Mekanik

## 1. GİRİŞ

---

özelliklerin incelendiği bu çalışmalarda aşınma özellikleri açısından bir değerlendirme yapılmamıştır.

Prashanth ve arkadaşları, Al-12Si-TNM kompozit yapıyı SLE yöntemiyle üretmişlerdir. Detaylı yapısal ve mikroyapısal analizler, TNM takviyesinin SLE sırasındaki Al-12Si matrisi ile reaksiyona girmesi nedeniyle Al<sub>6</sub>MoTi intermetalik fazının oluşumunu göstermektedir. Hem Al-12Si matrisi hem de Al-12Si-TNM kompozitleri için aşınma testleri yapılmıştır. Kompozitler kuru aşınma koşulları altında daha iyi performans göstermiştir ve aşınma oranının artan yüklerle beraber arttığı tespit edilmiştir. Yüksek yüklerde, aşınma üç farklı oranda gerçekleşmiş ve artan deney süresi ile aşınma oranının düştüğü gözlenmiştir (Prashanth et al. 2016).

Kao ve arkadaşları, SLE ile üretilen Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V alaşım numunelerine 900°C’de nitrürleme işlemi uygulamış, daha sonra kapalı alan magnetron sıçratma yöntemi kullanarak ince filmlerle kaplamışlardır. Çeşitli örneklerin mikro yapıları, mekanik özellikleri ve kaplama adezyon dayanımları sırasıyla XRD analizi, nanoiz testleri ve Rockwell sertlik testleri ile değerlendirilmiştir. Numunelerin tribolojik özellikleri NaCl çözeltisi içerisinde incelenmiştir. Genel olarak, nitrürleme ve DLC kaplaması uygulanmış (dubleks işlem) Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V alaşımının iyi bir kaplama adezyonu, yüksek aşınma ve korozyon direncinin yanı sıra mükemmel biyouyumluluk sergilediği tespit edilmiştir (Kao et al. 2018).

Li ve arkadaşları, SLE ile üretilen 316L paslanmaz çelik numuneler için inşa oryantasyonları ve farklı test koşullarının tribolojik davranışlar üzerindeki etkilerini incelemişleridir. Aşınma testleri farklı yükler, sıcaklıklar ve frekanslar altında yapılmıştır. Sonuçlar, inşa oryantasyonunun sürtünme katsayısı ve aşınma oranı üzerindeki etkilerinin anlamlı olmadığını göstermiştir. Yağlayıcı olarak görev yapan oksit tabakaları nedeniyle yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısının önemli ölçüde azaldığı ve numunelerin aşınma direncinin arttığı tespit edilmiştir. Daha yüksek temas basınçlarında, aşınma oranı daha yüksek bulunmuş, ancak sürtünme katsayısının belirgin şekilde etkilenmediği belirtilmiştir (Li et al. 2018).

Zhang ve arkadaşları, çalışmalarında lazer gücünün SLE ürünlerinin mikroyapısına etkilerini araştırmışlardır. Daha yüksek lazer gücüyle yeterli giriş



enerjisinin kesintisiz erimiş izler üretebileceğini ve nispeten yoğun bir bileşenle sonuçlandığını tespit etmişlerdir. Ayrıca güç yoğunluğunun, merkezden eriyik havuzunun kenarına kadar farklı sıcaklık gradyanlarına yol açabileceğini tespit etmişler, bu nedenle farklı mikroyapılar ortaya çıktığını öne sürmüşlerdir (Zhang et al. 2011).

Kumar, SLS yöntemi ile üretilen demir esaslı iki farklı markaya ait alaşımın fretting aşınma davranışını incelemiştir. Çalışma sonucunda malzemelerin sertliği ve aşınma direnci arasında açık bir ilişki olmadığı, malzemelerin kimyasal kompozisyonun temel faktör olarak dikkate alınması gerektiği ifade edilmiştir (Kumar 2009).

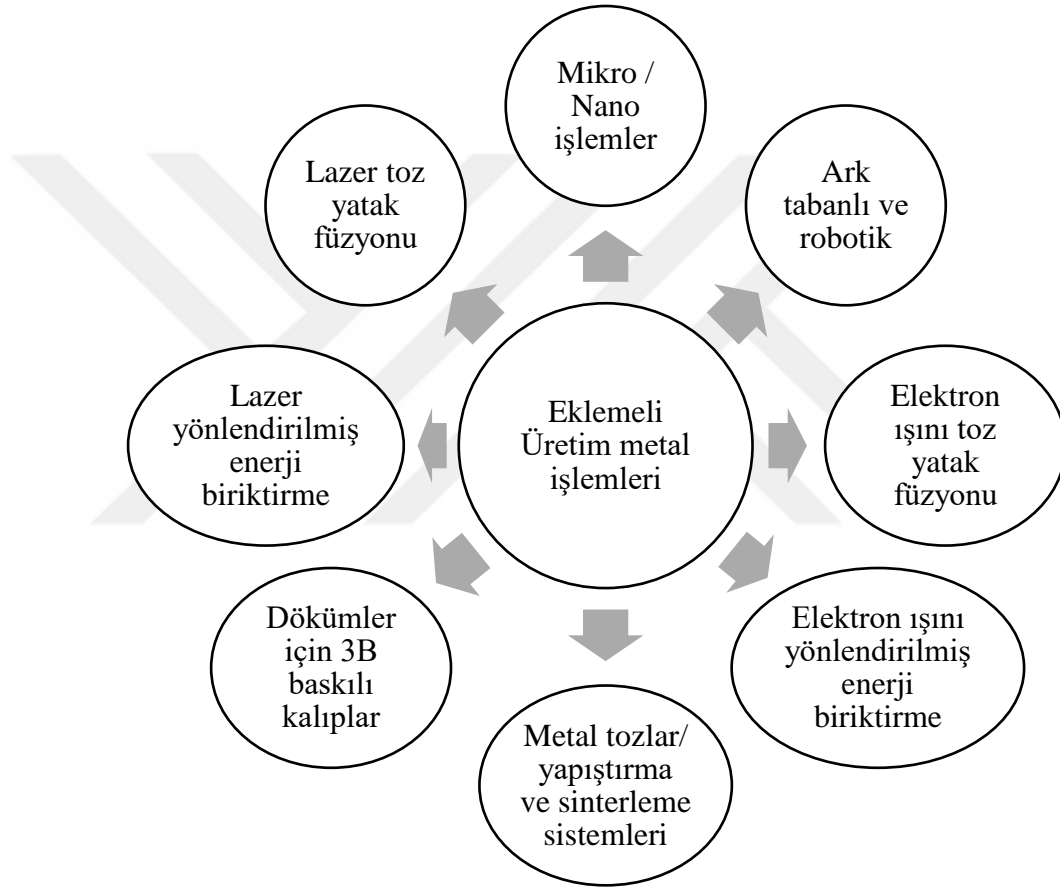
Sander ve arkadaşları, SLE ve geleneksel döküm ile üretilen FeCrMoVC malzemenin mikroyapı, mekanik davranış ve aşınma özelliklerini karşılaştırdıkları çalışmalarında SLE ile üretilen örneklerin daha düşük aşınma oranı ve kırılma özellikleri gösterirken, daha yüksek sertlik ve basınç dayanımı gösterdiğini tespit etmişlerdir (Sander et al. 2017).

Literatürde eklemeli üretim yöntemi ile üretilen parçaların tribolojik özelliklerinin belirlendiği çalışmalar mevcuttur. Ancak yapılan bu çalışmalarda, Seçici Lazer Ergitme yöntemi ile yapılan üretimlerde, inşa oryantasyonu, yana kayma mesafesi ve üretimden sonra uygulanacak ısıl işlemlerin malzemenin aşınma performansına etkileri henüz incelenmemiştir. Bu tez çalışmasında, söz konusu üretim parametrelerinin Ti6Al4V alaşımının aşınma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca bu yeni nesil üretim yöntemi ile üretilen parçaların tribolojik özellikleri konvansiyonel yöntemle (döküm) üretilen parçaların tribolojik özellikleri ile karşılaştırılmıştır.

### 2. KAYNAK ÖZETLERİ

#### 2.1. Eklemeli Üretim İşlem Kategorileri

Bu bölüm, eklemeli üretim metal işlemlerinin türüne, nasıl çalışıklarına, ne için kullanıldığına ve ne gibi bir avantaj sağladığına dair bir giriş ve genel bakış sağlamaktadır. Şekil 2.1' de eklemeli üretim metal işlemleri gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Eklemeli üretim metal işlemleri

En yaygın uygulanan ve belki de en çok gelişen eklemeli üretim metal teknolojisi toz yatak havuzunda birleştirme (Powder Bed Fusion) yöntemidir. Mevcut durumda tozun yüksek maliyeti sınırlayıcı bir faktör olarak görülmektedir. STL modeli olarak tarif edilen mevcut geometrik yüzey modeli temsili, PBF'nin benimsenmesini basitleştirmiş ve hızlandırmıştır (Milewski 2017). Bu sistemin temelinde toz içerisinde tasarımın bir kesiti lazer ile eritilir ve üzerine yeni bir katman toz ilave edilerek sıradaki katman eritilerek

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

eklenir. Böylece katmanlar şeklinde birbirlerine bağlanarak nihai ürün oluşana kadar işlem devam etmektedir.

Polimer toz kullanan seçici lazer sinterleme (SLS) işlemleri, toz yatak füzyon kategorisindeki en eski varyanttır. Yakın geçmişte, Lotus F1 ve Boeing, polimerler ile birleştirilmiş daha küçük ve daha büyük parçacıklarda geri dönüşümlü karbon fiber kullanan bir teknolojiyi geliştirmişlerdir, bu durumun daha düzgün bir yapı sağladığı bilinmektedir (Molitch 2014).

Direkt metal lazer sinterleme teknolojisi (DMLS) SLS'ye benzer şekilde metaller ve seramiklerde kullanılmakta olup DMLS ile alınan sonuç, metaller ve seramikler için SLS'den daha yoğundur ve gerektiğinde tamamen yoğun hale getirmek için süzme işlemi yapmanın mümkün olduğu tespit edilmiştir (Wahlström and Sahlström 2016).

SLE yöntemi metaller ve seramikler üzerinde kullanılabilen ve SLS ile aynı temel şemayı kullanmaktadır. Sonuçta süzme işlemi gerekmeden tamamen yoğun bir parça elde edilir. Üretim sırasında parçanın sıcaklığının artmasına rağmen, ortaya çıkan malzeme karakteristikleri döküm malzemelerinden çok farklıdır (Wahlström and Sahlström 2016).

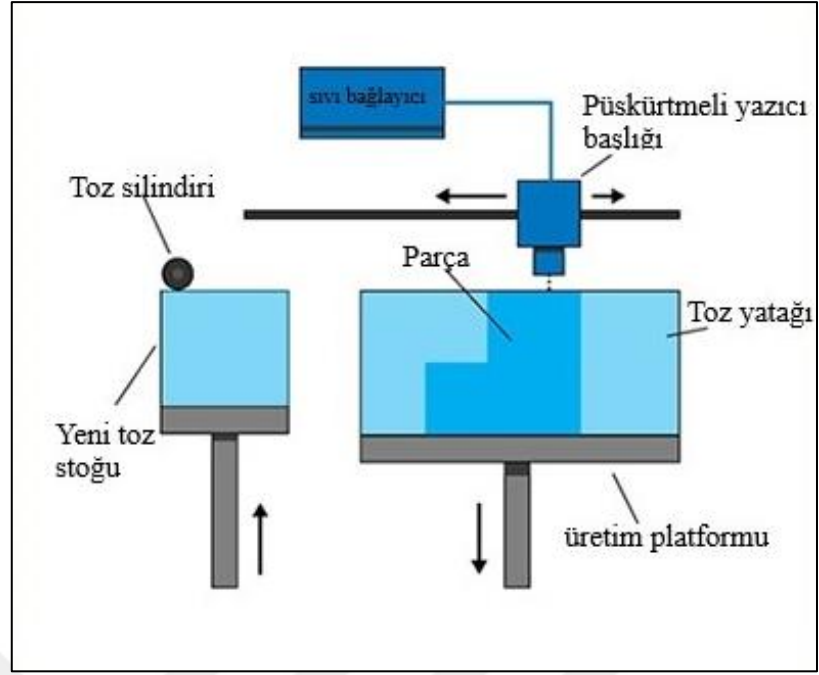
EIE yöntemi enerji kaynağı olarak lazer yerine yüksek enerjili bir elektron ışını kullanır. SLE'den daha homojen bir ısıl karaktere sahip olması ile döküm ile elde edilen malzemelerinin özelliklerinin bu yöntem ile elde edilmesini mümkün kılmaktadır (Wahlström and Sahlström 2016).

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.1. Toz yatak füzyonuna genel bir bakış

<b>Kullanılan Malzemeler</b>	Polimerler, Kompozitler, metal ve seramikler SLS: Plastik DMLS, SLE: Paslanmaz çelik, titanyum, alüminyum, kobalt krom, çelik EIE: titanyum, kobalt krom, paslanmaz çelik, alüminyum ve bakır
<b>İşlem sonrası</b>	Makineye ve geometriye bağlı olarak, öncelikle parçanın makinede soğumasına izin verilmesi gerekebilir. Daha sonra kalıntı tozu çıkarılabilir.
<b>Teknolojiler</b>	Seçici lazer ergitme (SLE) Seçici lazer sinterleme (SLS) Elektron ışını ergitme (EIE) Direkt metal lazer sinterleme (DMLS)
<b>Makine imalatçıları</b>	3D Systems, Arcam, EOS, Matsuura, SLM Solutions, ReaLizer, Renishaw ve Sodick.

Püskürtmeli bağlama (PB) Şekil 2.2' de gösterildiği gibi bir toz yatağına bu toz partikülleri bir arada tutacak bağlayıcı bir sıvının enjekte edilmesi ve modelin katman katman oluşumu prensibine dayanmaktadır. Tipik bir PB sürecinde toz tüm yapı üzerine dağıtılır. Malzemenin kimyasal olarak birleştirilmesine neden olan parçanın kesitini oluşturmak için bağlayıcı dağıtılır. Bir sonraki katman için üretim plakası aşağı indirilir ve parça tamamlanana kadar işlem tekrarlanır. Isıtılmış bir yapı haznesi işlemi hızlandırabilir ve yapışmayı daha hızlı hale getirebilir (Wahlström and Sahlström 2016). Bağlanma yönteminden ötürü, malzeme özellikleri her zaman yapısal parçalar için uygun değildir (Anonymous 2012).



Şekil 2.2. Püskürtmeli bağlamanın şematik görüntüsü (Anonymous 2012).

Yapı tamamlandığında, bileşen genellikle (yapıştırıcıya bağlı olarak) soğumaya bırakılır ve ardından parça makineden çıkarılıp kalıntı tozundan ayrıştırılır.

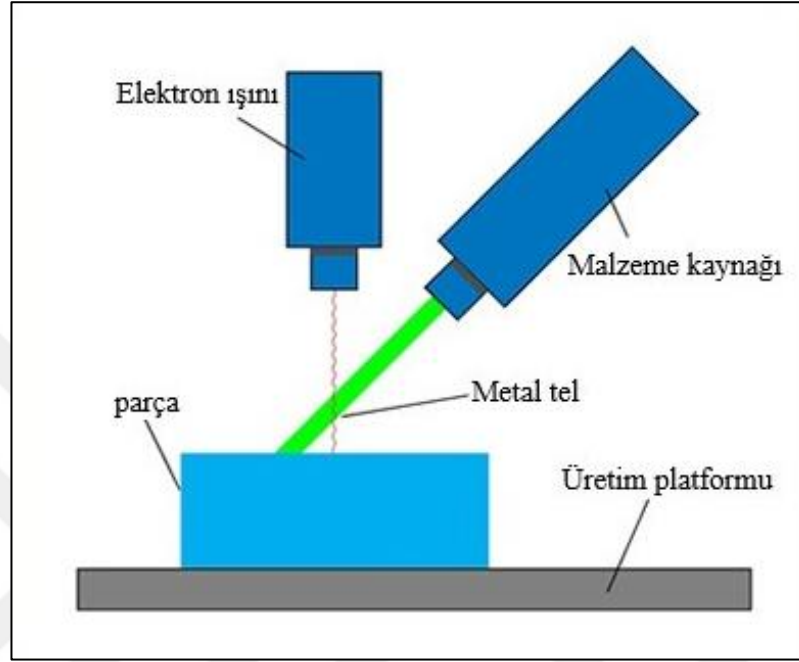
Çizelge 2.2. Püskürtmeli bağlamaya genel bakış

<b>Kullanılan Malzemeler</b>	Polimerler, Kompozitler, Metal ve Seramikler, Paslanmaz çelik, bakır, tungsten, Inconel, nikel, ABS, PA,PC, cam
<b>Bazı kullanım alanları</b>	Modelleme ve prototip imalat. Düşük hacimli üretim. Döküm modelleri için yatırım. PB her zaman yapısal parçalar için uygun değildir.
<b>İşlem sonrası</b>	Genellikle makineye ve parçaya bağlı olarak ilk önce makine içerisinde soğumaya bırakılması izin verilebilir. Daha sonra kalıntı tozlar ayrıştırılır. Metaller için destek yapının ayrılması gerekir.
<b>Makine imalatçıları</b>	3D Systems, Digital Metal, ExOne, Voxeljet Technology GmbH

Yönlendirilmiş enerji biriktirme işleminde (Directed Energy Deposition), malzeme temel olarak lazer tarafından sağlanan enerji ile oluşturulan bir eriyik havuzuna beslenir (Şekil 2.3). Lazer kaplama ismi genellikle yönlendirilmiş enerji biriktirme kategorisi ile eş anlamlı olarak kullanılır. Bu işlemde çeşitli varyantlar vardır; yapı malzemesi metal toz veya tel olabilmektedir. Toz kullanıldığında yönlendirilmiş enerji

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

biriktirme püskürtülmüş toz olarak da ifade edilebilmektedir. Yönlendirilmiş enerji biriktirme kategorisi altındaki teknolojiler genellikle çok eksenli hareket sistemleri ve robotik kollarla birleştirilir, yani yapı düşey katmanlarla sınırlı olmayıp çok eksenli üretime olanak sağlamaktadır.



Şekil 2.3. Yönlendirilmiş enerji biriktirmenin şematik görüntüsü (Anonymous 2012).

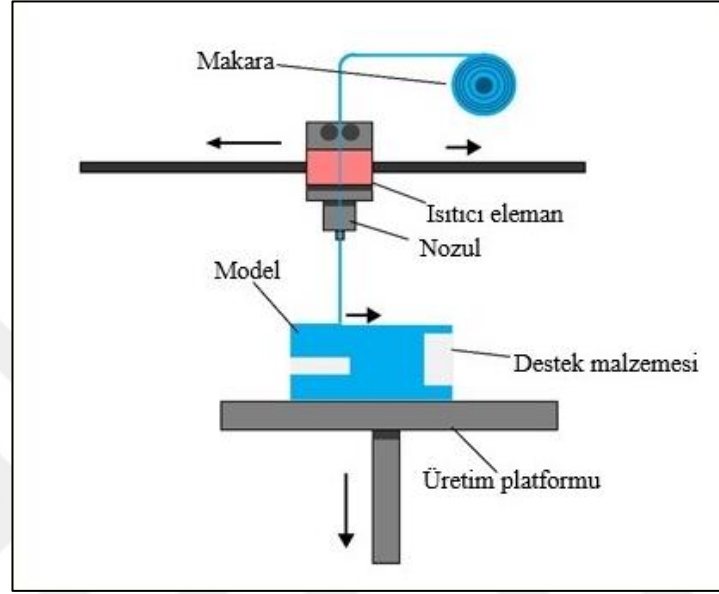
Çizelge 2.3. Yönlendirilmiş enerji biriktirmeye genel bakış

<b>Kullanılan Malzemeler</b>	Kobal krom ve titanyum gibi malzemeler, Tungsten karbür matris malzemeleri, Bronz ve pirinç alaşımları, Krom-kobalt-molibden alaşımları, Kaynaklanabilir takım çeliği.
<b>İşlem Varyantları</b>	Elektron ışınli direkt imalat, Doğrudan metal biriktirme, Lazerle konsolide etme, Lazer mühendisliği net şekillendirme.
<b>Makine imalatçıları</b>	BeAM, Optomec, RPM Innovations, Trumpf, Sciaky, DMG Mori Seiki, Hermle, Hurco, Hybrid Manufacturing Technology ve Mazak.

Malzeme ekstrüzyon prosesinde, parça bir nozul veya bir ağız aracılığıyla ilgili alanı doldurması ile gerçekleştirilir. Malzeme ekstrüzyonun şematik görüntüsü Şekil 2.4' te gösterilmektedir. Malzeme, parçanın enine kesiti üzerinde alt kesimler için destek yapısı ile ekstrüde edilir ve üst katmanlar bir önceki katmanın üzerine eklenerek modelin

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

tamamlanması prensibi ile çalışmaktadır. Malzemeler erimiş halde olduğu için tabakalar çöküntü üzerinde birlikte kaynaştırılır (Anonymous 2012). Malzeme ekstrüzyon prosesinde kullanılan en yaygın teknoloji birleştirilmeli yığılma modellemesidir. Bu teknoloji, parçayı oluşturmak için nozulun ucunda eritilen termoplastik filament makaralarını kullanır. Malzemeyi besleyen bir veya birkaç nozul olabilir.



Şekil 2.4. Malzeme ekstrüzyonun şematik görüntüsü (Anonymous 2012).

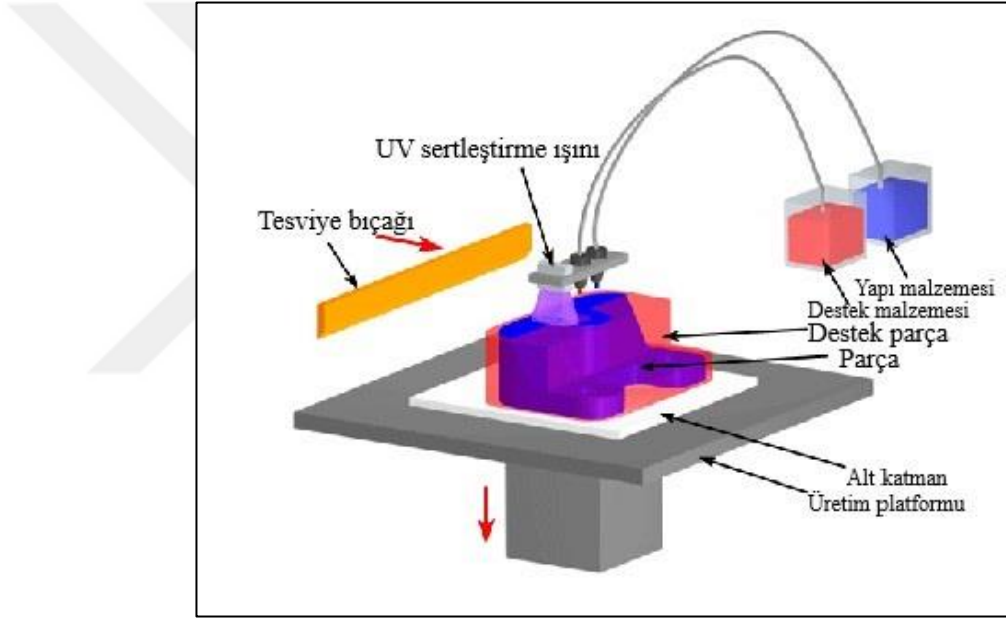
Yaygın ve pahalı olmayan bir süreç olması sebebiyle avantajlı bir uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca iyi yapısal özelliklere sahip ve kolayca erişilebilen Akrilonitril bütadien stiren (ABS) plastiğin kullanılması da diğer bir avantaj sayılabilir. Ancak boyutsal doğruluk ve üretim hızı diğer süreçlere göre sınırlı ve nihai modelin boyutsal doğruluğu malzeme nozul kalınlığı ile sınırlı olması dezavantaj olarak sayılabilir.

Çizelge 2.4. Malzeme ekstrüzyonuna genel bakış

<b>Kullanılan Malzemeler</b>	Polimerler ve polimer karışımları. Termoplastikler (ABS,ASA,PC,ABA gibi)
<b>Bazı kullanım alanları</b>	Modelleme ve prototip imalatı.
<b>İşlem sonrası</b>	Genellikle makineye ve parçaya bağlı olarak makine içerisinde soğumaya bırakılması izin verilebilir.
<b>Makine imalatçıları</b>	Aleph Objects, Beijing Tiertime, MakerBot Industries, Stratasys ve Ultimaker.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Malzeme püskürtme kategorisine ait işlemler, bir parça oluşturmak için damlacıkları seçici bir şekilde biriktirir ve genellikle dikey yönde katmanlanır. Yönteme ait şematik bir gösterim Şekil 2.5’ te sunulmuştur. Malzeme tabakaları ultraviyole (UV) ışığı kullanılarak katılaştırılır. Malzemelerin damlalar halinde biriktirilmesi gerektiğinden, kullanım için mevcut malzeme sayısı sınırlıdır. Polimerler viskoz yapıları ve damla oluşturma kabiliyetleri nedeniyle yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Çalışma prensibi, malzeme damlacıklarının termal veya piezoelektrik yöntem kullanılarak, baskı kafasından gerektiği yerde yüzeye bırakılması, damlacıkların katılarak ilk tabakayı oluşturması ve diğer katmanların bir öncekine benzer şekilde bağlanması şeklinde açıklanabilir. Üretim sonrası destek tabaka parçadan ayrılır.



Şekil 2.5. Malzeme püskürtme yönteminin şematik görüntüsü (Anonymous 2012).

Çizelge 2.5. Malzeme püskürtme yöntemine genel bakış

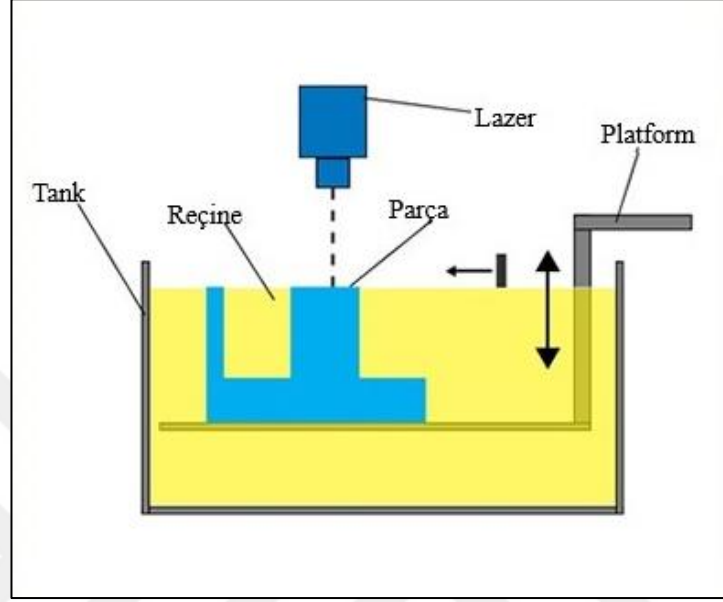
<b>Kullanılan Malzemeler</b>	Bazı tür polimerler ve polimer karışımları
<b>Bazı kullanım alanları</b>	Genellikle modelleme ve prototipleme amaçları için doğrudan parça imalatında da kullanılır.
<b>İşlem sonrası</b>	Genellikle makineye ve parçaya bağlı olarak makine içerisinde soğumaya bırakılması izin verilebilir.
<b>Makine imalatçıları</b>	Stratasys, Solidscap, 3D Systems, Optomec, Nscrypt ve Voxel8.

Fotopolimerizasyon, bir hazne içindeki sıvı fotopolimerin ışıkla aktive edilerek polimerizasyonla seçici olarak sertleştirildiği katmanlı üretim sürecidir (Şekil 2.6). Parça



## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

aşağıdan yukarıya ya da yukarıdan aşağıya yaklaşım metoduyla üretilebilir (Wahlström and Sahlström 2016). UV ışını reçine tabakasını katman katman sertleştirir. Platform hareket ettikçe diğer katmanlar bir öncekinin üzerine inşa edilerek işlem devam ettirilir. Üretim sonrası tank reçineden süzülür ve parça çıkarılır (Anonymous 2012).



Şekil 2.6. Sıvı haznesi içerisinde fotopolimerizasyonun şematik görüntüsü (Anonymous 2012).

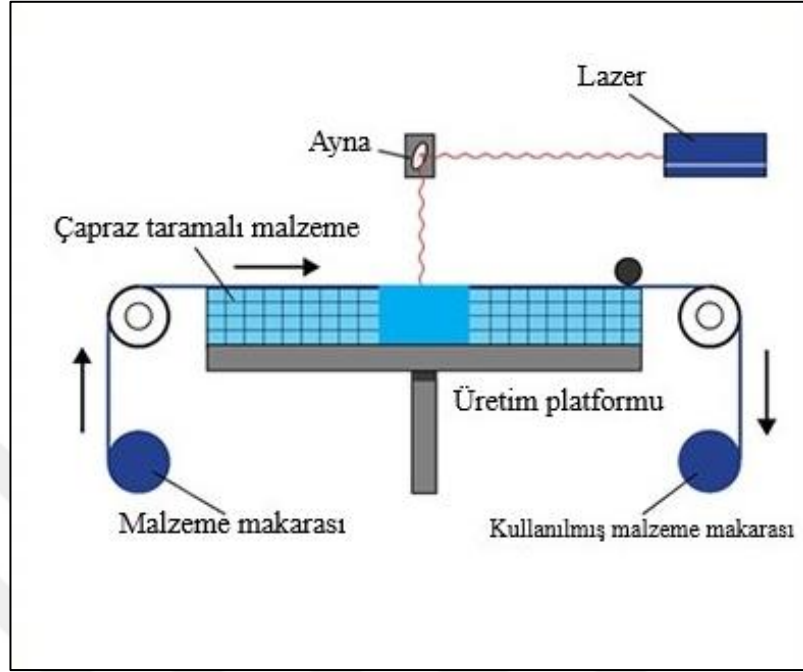
Çizelge 2.6. Tank içerisinde fotopolimerizasyon yöntemine genel bakış

<b>Kullanılan Malzemeler</b>	Polimerler, polimer karışımları ve seramikler
<b>İşlem sonrası</b>	Genellikle UV ile katılaştırmadan sonra destek yapının ayrılması ve parçanın temizlenmesi gerekir
<b>Makine imalatçıları</b>	3D Systems, Asiga, Carbon3D, DWS, Envisiontech, Lithos, Prodways ve Rapid Shape

Bir parça oluşturmak için malzeme tabakalarının bağlandığı ilave üretim yöntemi levha katmanlaştırma yöntemidir (Şekil 2.7). Ultrasonik katmanlı imalat ve katmanlı nesne üretimi olmak üzere iki süreçten oluşur. Ultrasonik katmanlı imalat işlemi, ultrasonik kaynak kullanarak sac veya şeritleri birbirine bağlar. Yüksek frekanslarda titreşerek tabakaların erimesine (sürtünme ile) neden olan sonotrot (ultrasonik kaynak elemanı) kullanır. Katmanlı nesne üretimi, ısıya duyarlı yapışkan ile önceden lamine edilmiş tabakalar kullanılmakta, bu tabakaların seçici olarak ısıtılması ve enine kesitin

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

konturu lazer kullanılarak kesilmesi ile üretim gerçekleşmiş olur. Bu işlem farklı malzemeleri birbirine bağlayabilir ve metal erimedığı için nispeten az enerji gerektirir.



Şekil 2.7. Levha katmanlaştırma yönteminin şematik görüntüsü (Anonymous 2012)

Çizelge 2.7. Levha katmanlaştırma yöntemine genel bakış

<b>Kullanılan Malzemeler</b>	Polimerler, polimer karışımları, metaller ve hibrid metaller.
<b>Teknolojiler</b>	Ultrasonik katmanlı imalat, Katmanlı nesne üretimi
<b>İşlem sonrası</b>	Genellikle makineye ve parçaya bağlı olarak makine içerisinde soğumaya bırakılması izin verilebilir. Destek yapı ayrılır ve parça temizlenir.
<b>Makine imalatçıları</b>	Fabrisonic, Helisys ve Mcor Technologies

Metallerin eklemeli üretim için kullandığı teknolojiler kendi içlerinde ayrışmakta ve farklı ilkeler doğrultusunda ürünlerini üretmektedir. Metallerin eklemeli üretim imalatında toz, tel ve sac olmak üzere üç temel malzeme formu kullanılmaktadır. (Kruth et al. 2006 ; Yilmaz ve Uğla 2017 ; Poyraz ve Kuşhan 2018). Tel ve sac malzemeler hızlı imalat konusunda avantajlı olmakla birlikte, bazı durumlarda işlem sonrası ortaya çıkan geometrik ve metalürjik sorunlar sebebiyle parça üretiminde toz malzemeler kadar yaygın kullanılmamaktadır. Ayrıca bir diğer dezavantaj, toz malzemelere kıyasla, tel ve sac malzemelerin daha kalın olması ince geometrik yapıların üretilmesi konusunda tasarım serbestliğinin düşük olmasına neden olmaktadır (Herderick 2011 ; Poyraz ve Kuşhan

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

2018). Toz formunda direk ergitme yapan teknolojiler de kendi aralarında enerji girdisi ve malzeme ekleme açısından farklılıklar göstermektedir. Temelde lazerle toz ergitme ve elektron ışınıyla toz ergitme şeklinde iki proses bulunmaktadır. Lazerle ergitme yöntemi literatürde farklı kısaltmalar ve ticari isimlere sahiptir. Bu kısaltmalar ve ticari isimler arasında seçici lazer ergitme (SLE) ve doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) yer almaktadır. Elektron ışınıyla ergitme prosesinin lazerle ergitmeden temel farkı enerji girdisinin elektron olmasıdır. Bu proses literatürde elektron ışınıyla ergitme (EIE) ismiyle geçmektedir. Bunların dışında bir diğer proses ise seçici lazer sinterleme (SLS) prosesidir. SLS, SLE ile benzerlik göstermektedir ancak aralarındaki en önemli farkı SLS işleminde toz malzeme tam ergime yerine sinterleme işlemidir (Poyraz ve Kuşhan 2018).



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Bu tez çalışmasında Ti6Al4V alaşımına ait toz halindeki malzemeden SLE yöntemi ile 12 x 12 x 6mm boyutlarında üretilen prizmatik numuneler kullanılmıştır.

Titanyum alaşımları mükemmel mukavemet, korozyon direnci, biyouyumluluk, düşük ısıl genleşme ve hafif ağırlık sunar. En yaygın kullanılan titanyum alaşımı %6 alüminyum %4 vanadyum ve titanyumun birleşiminden oluşan Ti6Al4V'dur. Çalışmada kullanılan Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri sırasıyla Çizelge 3.1 ve 2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Ti6Al4V'nin kimyasal bileşimi (Anonymous 2018)

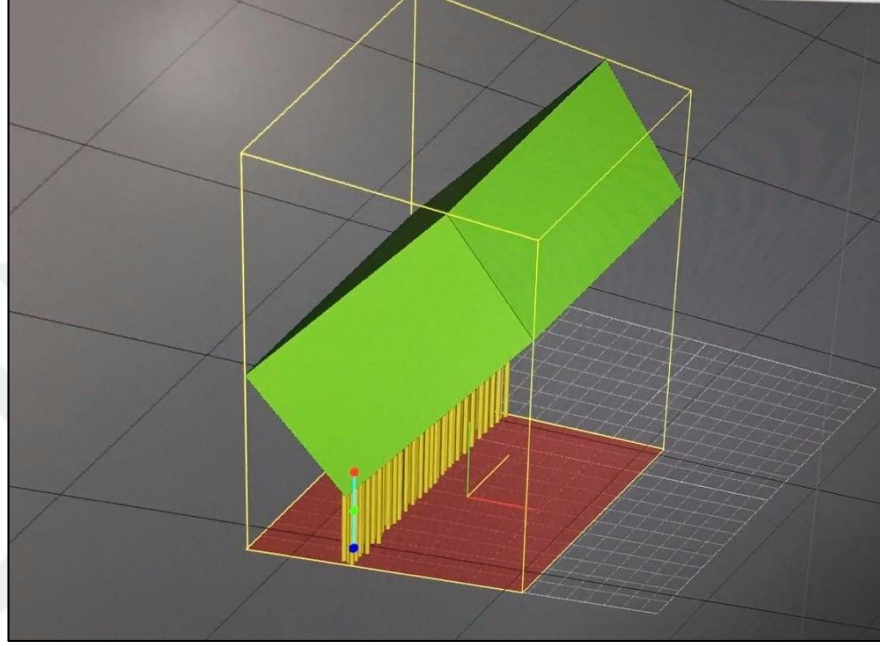
<b>Kimyasal Bileşim</b>	<b>Değerler (% ağırlık)</b>
Alüminyum	5,5 – 6,5
Vanadyum	3,5 – 4,5
Demir	0 – 0,25
Oksijen	0 – 0,13
Karbon	0 – 0,08
Azot	0 – 0,05
Hidrojen	0 – 0,012
Titanyum	Kalan

Çizelge 3.2. Ti6Al4V'nin fiziksel özellikleri

Özkütle (g/cm <sup>3</sup> )	4,429
Erime noktası (°C)	1650
Isıl iletkenlik (W/m°C)	6,6
Özgül ısı (J/Kg°C)	565

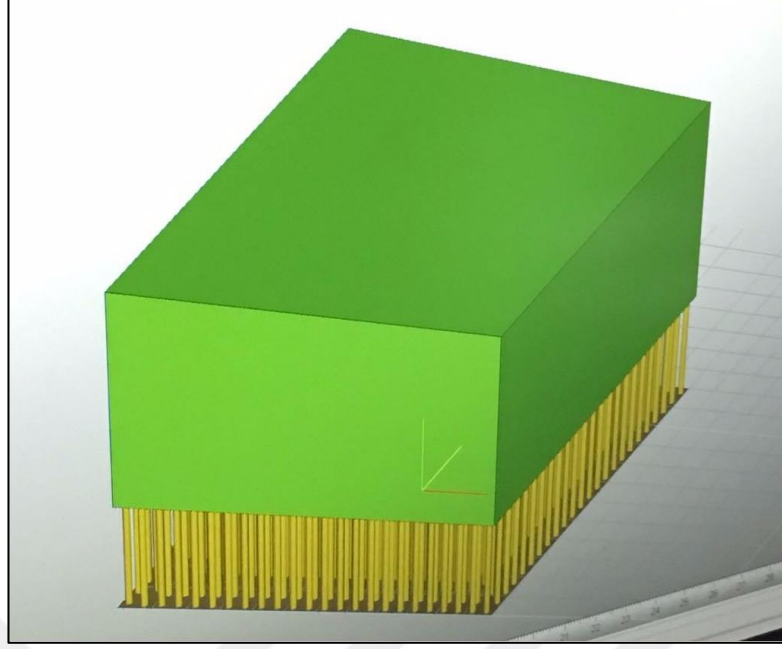
#### 3.2. CAD Modelin Oluşturulması ve STL Formatına evrilmesi

Bu tez kapsamında SLE yöntemi ile üretilmesi hedeflenen aşınma test numuneleri AutoFab yazılımında 0° , 45° ve 90° açılarında modellenmiştir. şekil 3.1' de numunenin 45°'lik açı ile CAD ortamında modellenmesi gösterilmiştir.



şekil 3.1. 45°'lik numunenin CAD ortamında modellenmesi

Oluşturulan CAD modeli, SLE cihazında üretilmek için STL formatına dnştrlmştir. Üretilcek parçaya destek sağlaması ve numunelerin üretim tablasına yapışmasını engellemek için numunelerin çeşitli bölgelerine destek yapılarının eklenmiş görüntüsü şekil 3.2' de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Destek yapıları eklenmiş numune

#### 3.3. SLE Yöntemi ile Numunelerin Üretimi

Aşınma test numuneleri Şekil 3.3' te gösterilen Concept Lazer M LabR SLE cihazı ile Çizelge 3.3' te verilen üretim parametreleri kullanılarak üretilmiştir. Şekil 3.4 - 6 sırası ile üretim aşması, üretim sonrası ve tozlardan arındırılmış numunelere ait görüntüleri içermektedirler.

Çizelge 3.3. Üretim parametreleri

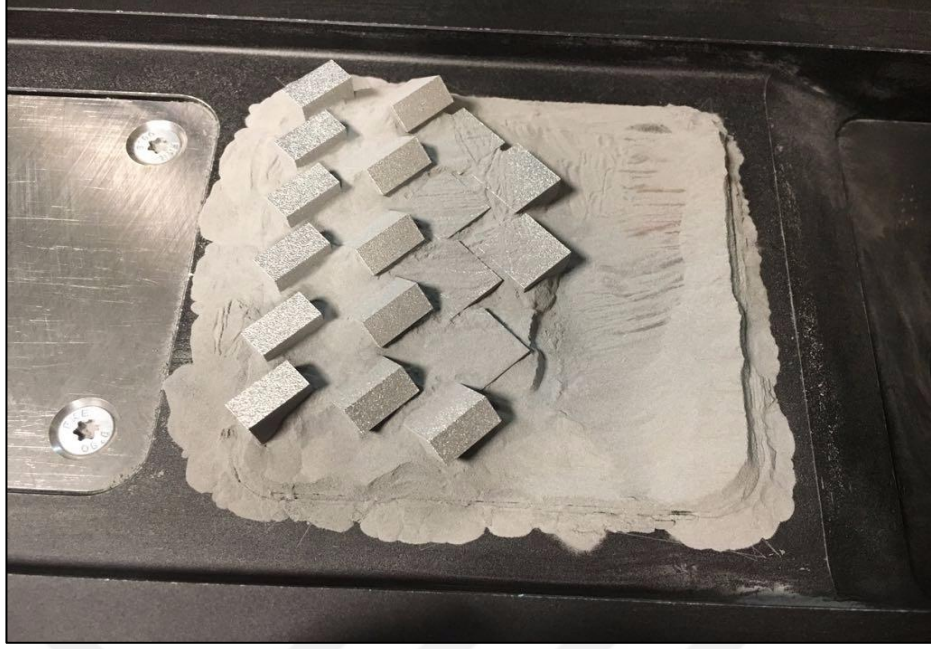
Üretim parametreleri	Değerler
Lazer gücü (W)	95
Tarama hızı (mm/s)	1350
Katman kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	25
İnşa oryantasyonu (Derece)	0, 45 ve 90
Yana kayma ( $\mu\text{m}$ )	60, 75 ve 90



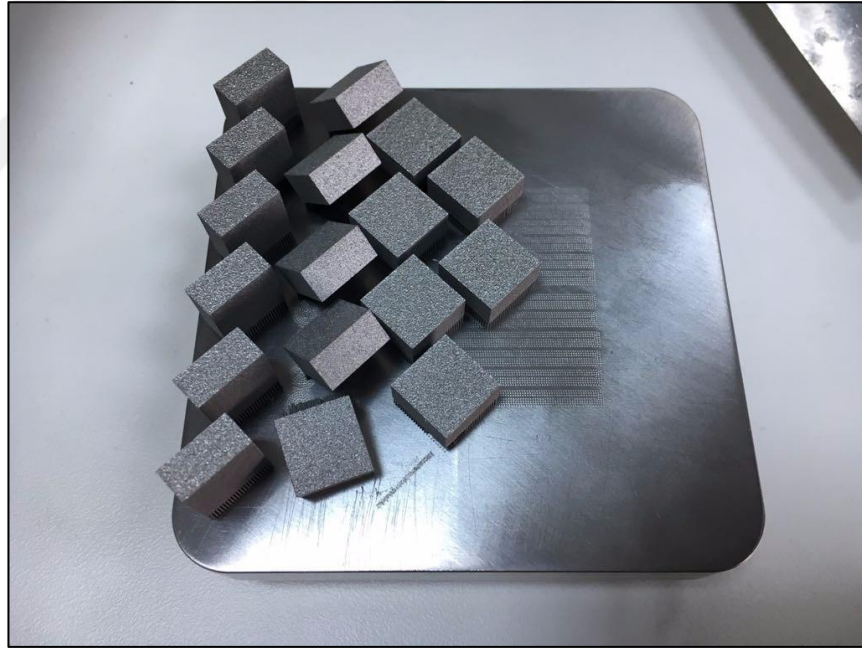
Şekil 3.3. Concept Lazer MLab R SLE cihazı



Şekil 3.4. SLE süreci esnasında üretim platformunun görüntüsü



Şekil 3.5. Üretim sonrası elde edilen numunelere ait görüntü



Şekil 3.6. SLE prosesi sonrası üretim tablasında tozdan arındırılmış numunelere ait görüntü

#### 3.4. X Işını Kırınımı (XRD) Analizi

SLE yöntemi ile üretilen numuneler üzerinde oluşan fazlar  $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$  dalga boyuna sahip Cu-K $\alpha$  radyasyonu kullanılarak Şekil 3.7' de gösterilen GNR-Explorer marka XRD cihazı ile tespit edilmiştir.



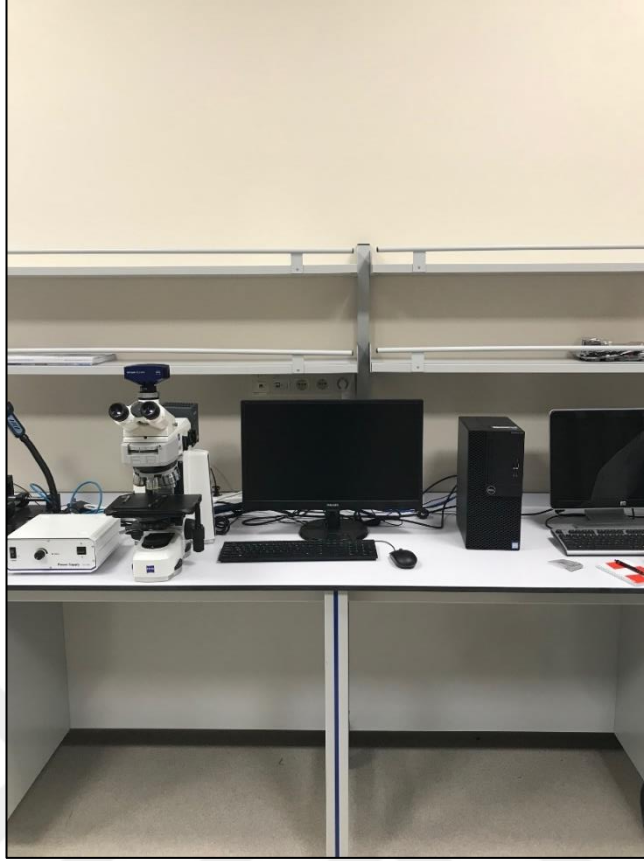


Şekil 3.7. XRD cihazı

Ölçümler simetrik tarama konfigürasyonu ile 30-75 derece aralığında saniyede 0.05 derece adımlar ile gerçekleştirilmiş elde edilen pik kartları Match yazılımı ile analiz edilmiştir.

#### 3.5. Mikro Yapısal İncelemeler

SLE yöntemi ile üretilen numunelerin boşluklu yapılarını tespit etmek için Şekil 3.8' de gösterilen Carl Zeiss Scope A1 marka optik mikroskop cihazı kullanılmıştır. Ayrıca ısıtma işlemi öncesinde ve sonrasındaki numunelerin mikroyapılarını karşılaştırmak ve dağıtma sonrası içyapıdaki değişiklikler optik mikroskop cihazı ile belirlenmiştir.



Şekil 3.8. Optik mikroskop cihazı

#### 3.6. Aşınma Deneyleri

Numunelerin aşınma deneyleri Şekil 3.9’ da gösterilen Bruker – UMT markalı tribometre test cihazı ile yapılmıştır. Numunelerin aşınma oranları aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$\text{Aşınma oranı} \left( \frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right) = \frac{\text{Aşındırılan Hacim (mm}^3\text{)}}{\text{Uygulanan yük (N)} \times \text{Aşınma mesafesi (m)}} \quad (3.1)$$

Aşınma deneylerine ait deney parametreleri Çizelge 3.4’ te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Aşınma parametreleri

Deney parametreleri	Değerler
Test türü	İleri – Geri
Uygulanan yük (N)	5
Aşınma stroğu (mm)	4
Aşındırma hızı (mm/s)	8
Aşındırma süresi (s)	3600
Karşı bilye malzemesi	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Sıcaklık (°C)	Oda sıcaklığı (23±2)
Ortam	Kuru şartlar



Şekil 3.9. Aşınma test cihazı

### 3.7. Isıl İşlem Deneyleri

SLE ile üretilen numunelere ısıl işlem deneyi Şekil 3.10’da gösterilen Protherm Furnaces markalı ısıl işlem fırınında yapılmıştır. Deneyler ortamın oksitleyici etkisini azaltmak amacı ile Argon gaz atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Isıl süreçler numunelerin 4 saatte 840°C ‘ye çıkılıp 2 saat bu sıcaklıkta bekletilmesi ve ardından fırında soğutulması

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

şeklinde gerçekleştirilmiştir. Isıl işlem sürecinin tümünde koruyucu gaz atmosferi sağlanmıştır.



Şekil 3.10. Isıl işlemlerin gerçekleştirildiği sistem

#### 3.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri

Toz numunelerin morfolojik analizleri, elde edilen aşınma izleri, doluluk oranlarının belirlenmesi amacı ile gerekli olan yüzey görüntülerinin incelenmesi için Şekil 3.11’ de gösterilen QUANTA – FEG 250 markalı taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.



Şekil 3.11. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

#### 3.9. 3D yüzey profilometre analizleri

Aşınma deneyleri sonrası numunelerin aşınma hacimlerinin ve üretim sonrası yüzey pürüzlülüğü değerlerinin belirlenmesi için Şekil 3.12’ de gösterilen Bruker Contour GT markalı 3D profilometre cihazı kullanılmıştır. Her bir aşınma izinden ortalama 10 ölçüm alınarak belirlenen aşınma izi kesit alanı her bir iz uzunluğu ile çarpılarak aşınma hacimleri elde edilmiştir.



Şekil 3.12. 3D Profilometre cihazı

#### 3.10. Mikrosertlik Ölçümleri

Numunelerin mikrosertlik değerleri Şekil 3.13' te gösterilen SHIMADZU HMV-G20 markalı mikro sertlik cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümler, Vickers yöntemi ile 300 gr yük altında 10 saniye bekleme süresi ile numune yüzeylerinin çeşitli yerlerinden en az 10 ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir.



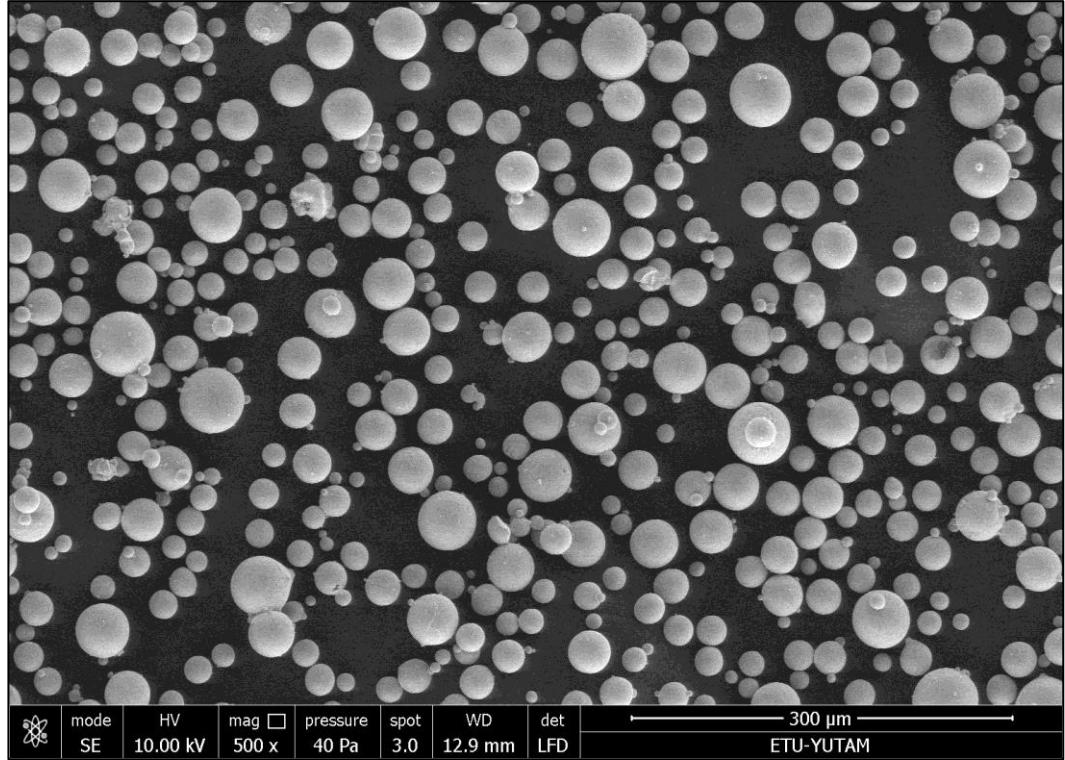
Şekil 3.13. Mikrosertlik cihazı

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

##### 4.1. Yapısal Özellikler

##### 4.1.1. SLE yöntemi ile üretimde kullanılan Ti6Al4V toz malzeme boyutu

Bu tez çalışması kapsamında SLE yöntemi ile üretimde kullanılan Ti6Al4V toz malzemeye ait partikül analizi gerçekleştirilmiş ve toz boyutu  $D_{50} \approx 28 \mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir. Ti6Al4V toz malzemeye ait SEM görüntüsü Şekil 4.1’ de verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde kullanılan tozun küresel geometrik özellikler sergilediği, kümelenme davranışının neredeyse olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.1. Ti6Al4V toz malzemeye ait SEM görüntüsü

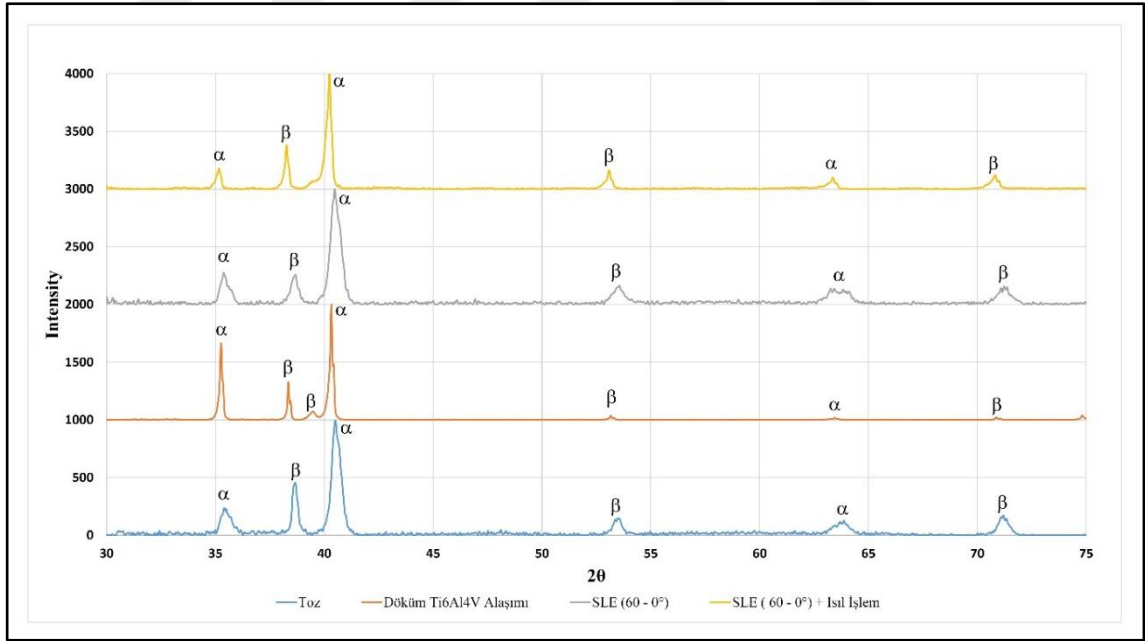
##### 4.1.2. XRD analizleri

Çalışmada kullanılan döküm ve toz Ti6Al4V alaşımı, SLE yöntemi ile üretilen ve ısıl işlem uygulanmış numunelerin XRD grafikleri Şekil 4.2’ de verilmiştir. XRD grafiklerinden görüldüğü üzere tüm numuneler  $\alpha$  (SPH) +  $\beta$  (HMK) fazlarından



#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

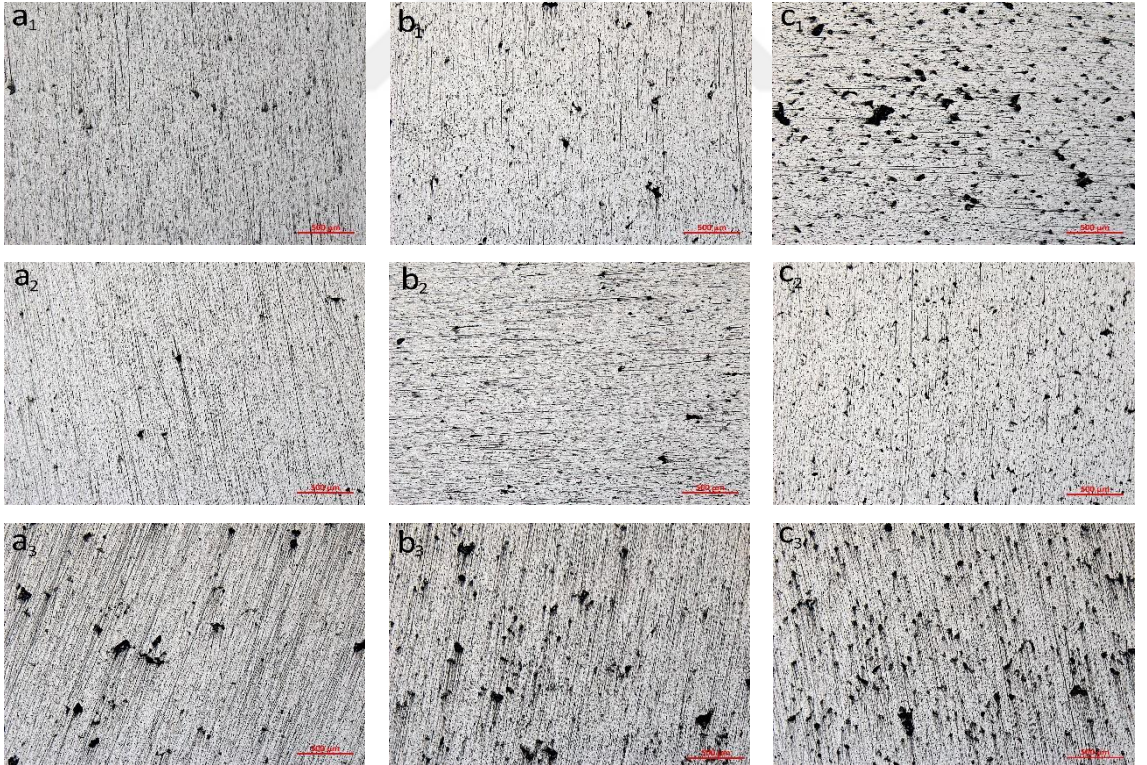
oluşmaktadır. Ancak fazların yoğunluklarında önemli farklılıklar dikkat çekmektedir. Bu farklılığın sebebi üretim yöntemlerindeki soğuma hızlarının değişiklik göstermesidir. Soğuma hızı arttıkça  $\alpha$  fazı yoğunluğu artmaktadır (Bartolomeu et al. 2017). SLE ile üretimde kullanılan Ti6Al4V toz malzeme hızlı soğuma ile elde edildiği için  $\alpha$  fazı yoğunluğunun  $\beta$  fazından daha yüksek olduğu görülmektedir. Benzer durum SLE ile üretilen ve üretimden sonra ısıtılmış numunelerde de görülmektedir. Ancak döküm yöntemi ile üretimde, soğuma hızının düşük olması sebebiyle  $\beta$  fazı piklerinde artış dikkati çekmektedir. SLE ile üretim sonrası ısıtılmış numuneye ait pikler ile ısıtılmamış numuneye ait pikler aynı faz ve yoğunluğa sahiptir. SLE yöntemi kullanılarak üretilen numune ile döküm Ti alaşımına ait XRD pikleri karşılaştırıldığında, aynı faza ait piklerde kayma meydana gelmiştir. Bu durum SLE ile üretim sonrası kalıntı gerilmelerin oluştuğunu açık bir şekilde göstermektedir. SLE ile üretim sonrası gerilme giderme tavlaması uygulanmış numunede ise piklerde meydana gelen kaymalar ortadan kalkmış ve döküm yöntemi ile üretilen numuneye ait pik açıları yeniden sağlanmıştır.



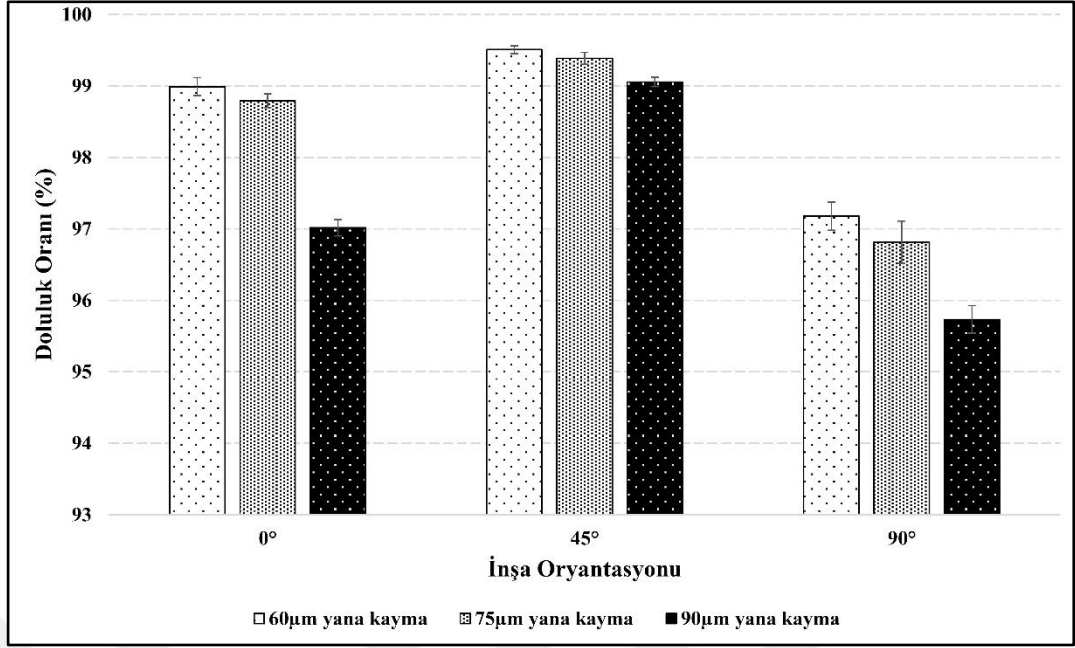
Şekil 4.2. XRD grafikleri

## 4.1.3. Üretim sonrası doluluk oranlarının belirlenmesi

SLE yöntemi ile farklı inşa oryantasyonları ve yana kayma mesafelerinde üretilen numunelerin optik mikroskop yüzey görüntüleri Şekil 4.3' te verilmiştir. Ayrıca görüntü analizi sonrası belirlenen % doluluk oranları grafiği Şekil 4.4' te sunulmuştur. Üretilen numuneler içerisinde, 45°'lik inşa oryantasyonunda yazdırılan numunelerin doluluk oranlarının diğer yönlerde üretilen (0° ve 90°) numunelere oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca yana kayma mesafesinin artışı ile doluluk oranının azaldığı, diğer bir ifade ile gözenek miktarının arttığı gözlenmiştir. 45°'lik inşa oryantasyonunda ve 60 µm yana kayma mesafesi ile üretilen numunenin doluluk oranının % 99'un üzerinde olduğu ve üretilen numuneler içerisinde en yüksek doluluk oranına sahip olduğu tespit edilmiştir. Yana kayma miktarının 90 µm olması sonucu doluluk oranının 60 µm yana kayma ile üretilen numunelere kıyasla yaklaşık olarak % 1,3 azaldığı görülmüştür. 45° açılı inşa oryantasyonunda üretilen numunelerin doluluk oranının 90° açıyla üretilen numunelerin ortalama doluluk değerlerinden % 2,5 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.3. 0, 45 ve 90° inşa oryantasyonlarındaki ve 60 µm, 75 µm ve 90 µm yana kaymalardaki optik mikroskop görüntüleri (a<sub>1</sub>) 60 - 0° (b<sub>1</sub>) 75 - 0° (c<sub>1</sub>) 90 - 0° (a<sub>2</sub>) 60 - 45° (b<sub>2</sub>) 75 - 45° (c<sub>2</sub>) 90 - 45° (a<sub>3</sub>) 60 - 90° (b<sub>3</sub>) 75 - 90° (c<sub>3</sub>) 90 - 90°

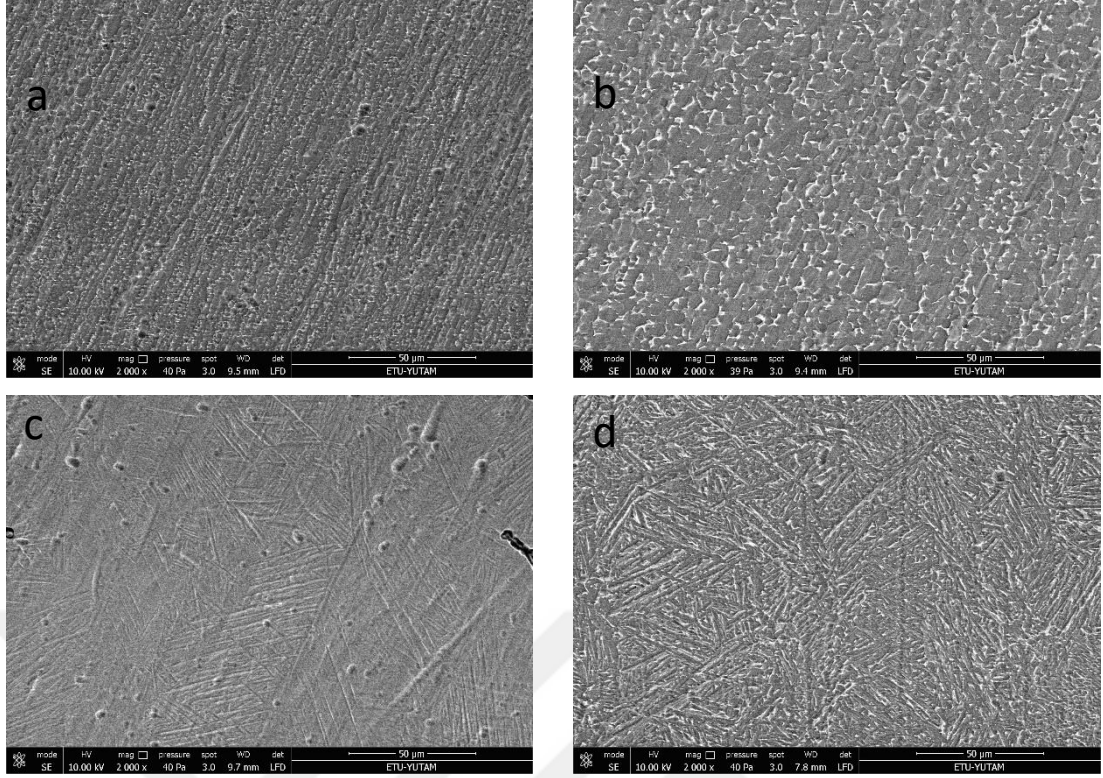


Şekil 4.4. Yana kayma ve inşa oryantasyonuna bağlı olarak doluluk oranı değişimi grafiği

#### 4.1.4. Isıl işlem öncesi ve sonrası mikroyapı incelemeleri

Döküm ve SLE yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımı numunelerin ısıl işlem öncesi ve sonrası dağlanmış mikroyapı SEM görüntüleri Şekil 4.5' te verilmiştir. Şekil 4.5.a'da döküm yöntemi ile üretilen ve ısıl işlem uygulanmamış numunenin mikroyapısı görülmektedir. Mikroyapı,  $\alpha$  fazı (koyu renkli bölgeler) ve  $\beta$  fazından (açık renkli bölgeler) oluşmaktadır (Bartolomeu et al. 2017). Söz konusu fazların varlığı XRD dataları ile de desteklenmiştir (Şekil 4.2). Gerilme giderme tavlaması uygulanmış Ti6Al4V alaşımında (Şekil 4.5.b) ise ısıl işlem sıcaklığının faz dönüşüm sıcaklığının altında olması sebebiyle fazlarda herhangi bir değişim olmamıştır. Ancak yüksek sıcaklığın etkisi ile tanelerde büyüme görülmüştür.

SLE yöntemi ile 60  $\mu$ m yana kayma ve 45°'lik inşa oryantasyonunda üretilen Ti6Al4V alaşımının ısıl işlem öncesi ve sonrası dağlanmış mikroyapı SEM görüntüleri Şekil 4.5.c. ve d' de verilmiştir. Isıl işlem uygulanmamış numunede, SLE yöntemi ile üretimde meydana gelen hızlı ergime ve katılaşmanın bir sonucu olarak  $\alpha'$  (asiküler martenzit) ve  $\beta$  fazlarından oluşmaktadır. Isıl işlem uygulanmış numunede ise herhangi bir faz dönüşümü olmamakla birlikte daha iri taneli bir yapının oluştuğu ve asiküler martenzit fazına ait iğnemsî yapının daha yumuşak bir form aldığı tespit edilmiştir.



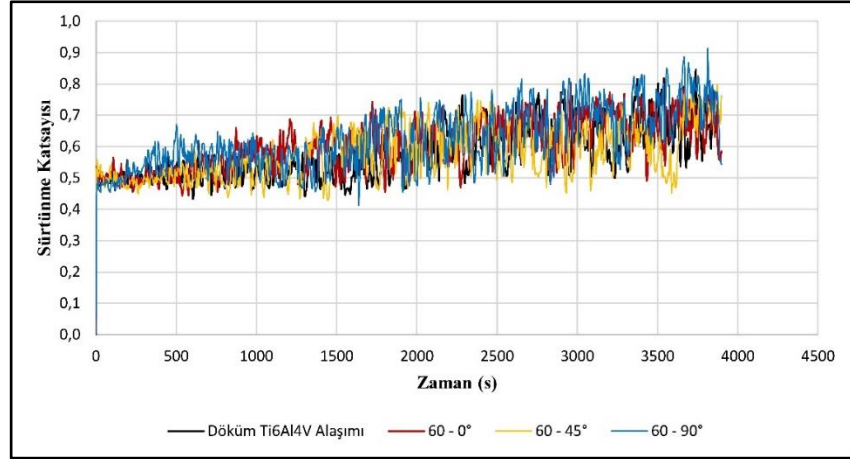
Şekil 4.5. Mikroyapı SEM görüntüleri (a) Döküm Ti6Al4V, (b) Döküm Ti6Al4V + ısıt işlemler, (c) 60 - 45° (d) 60 - 45° + ısıt işlemler

## 4.2. Tribolojik Özellikler

### 4.2.1. Isıl işlem öncesi sürtünme katsayıları

Seçici Lazer Ergitme yöntemi ile farklı yana kayma mesafeleri ve inşa oryantasyonları kullanılarak üretilen ve ısıt işlem uygulanmamış numuneler ile döküm Ti6Al4V alaşımına ait sürtünme test sonuçları Şekil 4.6 - 8' de verilmiştir. Tüm numuneler, aşınma testi uygulanmadan önce metalografik yöntemler kullanılarak zımparalanmış ve parlatılmıştır. SLE yöntemi ile farklı üretim parametrelerinde ve geleneksel yöntemle üretilmiş numuneler için sürtünme katsayısı (COF) değerleri aşınma testinin başlangıcında ilk temas ile yükselmiş ve testin ilerleyen kısımlarında daha kararlı bir form almıştır. Sürtünme katsayısı - zaman grafiklerinin kararlı durum (steady - state) bölgelerinde sürtünme katsayısındaki salınımlar dikkati çekmektedir. Bu durumun sebebi, aşınma bölgesinde meydana gelen üç gövde etkisi (three body effect) olarak yorumlanmıştır (Bartolomeu et al. 2017).

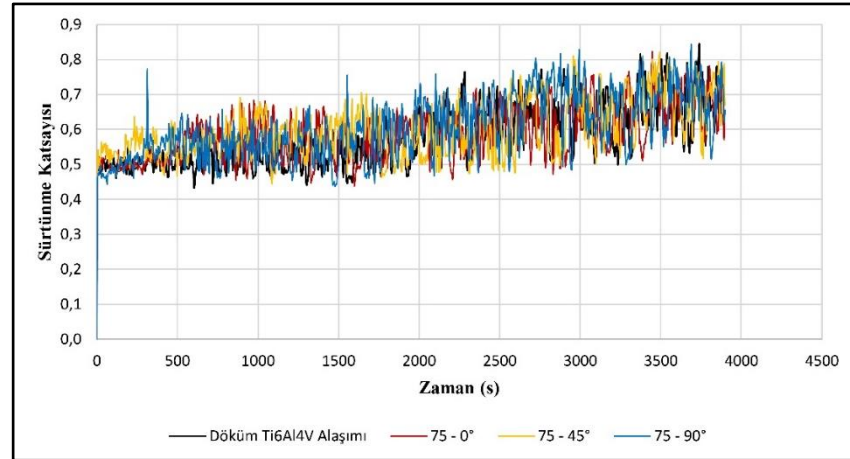
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.6. 60µm yana kayma ile üretilen numunelere ait COF grafiği

Çizelge 4.1. 60µm yana kayma ile üretilen numunelere ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri

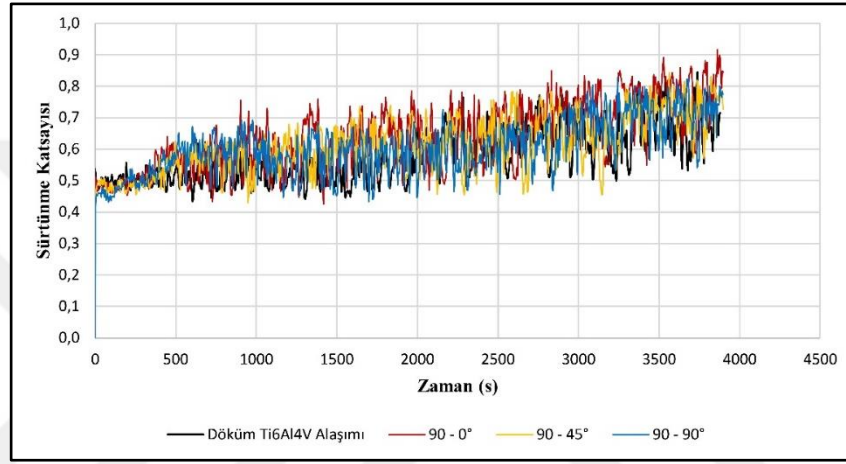
Parametre	Ortalama Sürtünme Katsayısı
Döküm Ti6Al4V alaşımı	0,578 ± 0,0834
60 - 0°	0,605 ± 0,0794
60 - 45°	0,579 ± 0,0804
60 - 90°	0,626 ± 0,0950



Şekil 4.7. 75µm yana kayma ile üretilen numunelere ait COF grafiği

Çizelge 4.2. 75µm yana kayma ile üretilen numunelere ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri

Parametre	Ortalama Sürtünme Katsayısı
Döküm Ti6Al4V alaşımı	0,578 ± 0,0834
75 - 0°	0,590 ± 0,0716
75 - 45°	0,600 ± 0,0465
75 - 90°	0,606 ± 0,0864



Şekil 4.8. 90µm yana kayma ile üretilen numunelere ait COF grafiği

Çizelge 4.3. 90 µm yana kayma ile üretilen numunelere ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri

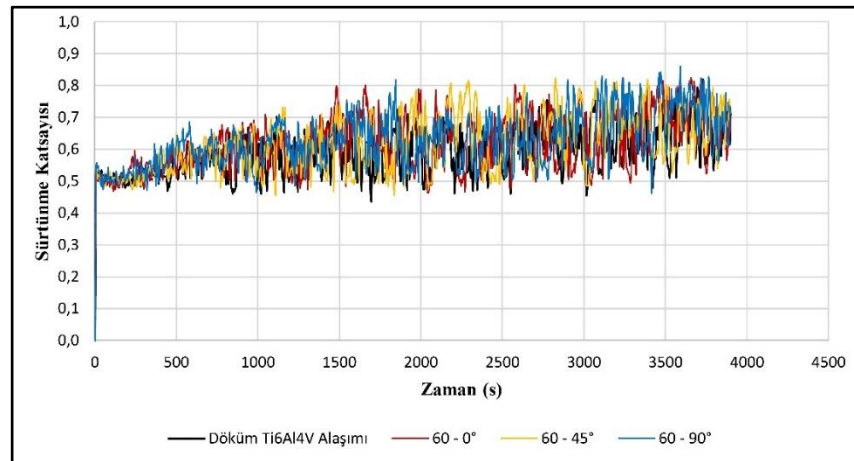
Parametre	Ortalama Sürtünme Katsayısı
Döküm Ti6Al4V alaşımı	0,578 ± 0,0834
90 - 0°	0,642 ± 0,1056
90 - 45°	0,616 ± 0,0862
90 - 90°	0,607 ± 0,0847

SLE ile üretimde kullanılan üç farklı yana kayma (60 - 75 - 90 µm) ve inşa oryantasyonlarında (0 - 45 - 90°) üretilen numunelerin sürtünme katsayıları karşılaştırıldığında önemli bir farklılık görülmemiştir. Elde edilen sürtünme katsayısı değerleri literatürde yapılan çalışmalar ile uyumludur (Wendler and Pawlak 2008; Chen et al. 2014; Bartolomeu et al. 2017). Genel olarak döküm Ti alaşımının ortalama sürtünme katsayısı değeri, SLE yöntemi ile farklı parametrelerde üretilen alaşımın sürtünme

katsayısı değerlerinden daha düşük olarak elde edilmiştir. SLE yöntemi ile üretilen aşınma test numuneleri içerisinde en düşük sürtünme katsayısı 60 µm yana kayma değeri ve 45° inşa oryantasyonuna sahip numuneden elde edilmiştir.

#### 4.2.2. Isıl işlem sonrası sürtünme katsayılarının değişimi

Seçici Lazer Ergitme yöntemi ile farklı yana kayma mesafeleri ve inşa oryantasyonları kullanılarak üretilen ve 840° C’de gerilme giderme tavlaması uygulanmış numuneler ile döküm Ti6Al4V alaşımına ait sürtünme test sonuçları Şekil 4.9 - 11’ de verilmiştir. Hertzian teması sebebiyle testin başlangıcında artış gösteren sürtünme katsayısı değerleri, yaklaşık 500 saniye sonrası kararlı rejime girmiştir. Ancak, ısıl işlem uygulanmamış numunelerde olduğu gibi sürtünme katsayısı değerleri aşınma testinin sonuna kadar salınımlar sergilemiştir. Farklı yana kayma değerleri ve inşa oryantasyonları kullanılarak üretilen numunelerin sürtünme katsayıları arasında önemli bir değişiklik görülmemektedir. Ancak ısıl işlem öncesi test edilen numuneler ile karşılaştırıldığında ısıl işlem sonrası artan yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak sürtünme katsayılarının bir miktar arttığı ve 0,6 – 0,7 aralığında değiştiği görülmektedir. Isıl işlem öncesi uygulanan aşınma testlerinde elde edilen sonuçlara benzer eğilim ile SLE yöntemi ile üretilen numuneler içerisinde en düşük sürtünme katsayısı değeri, 60 µm yana kayma ve 45° inşa oryantasyonu kullanılarak üretilen numune için elde edilmiştir.

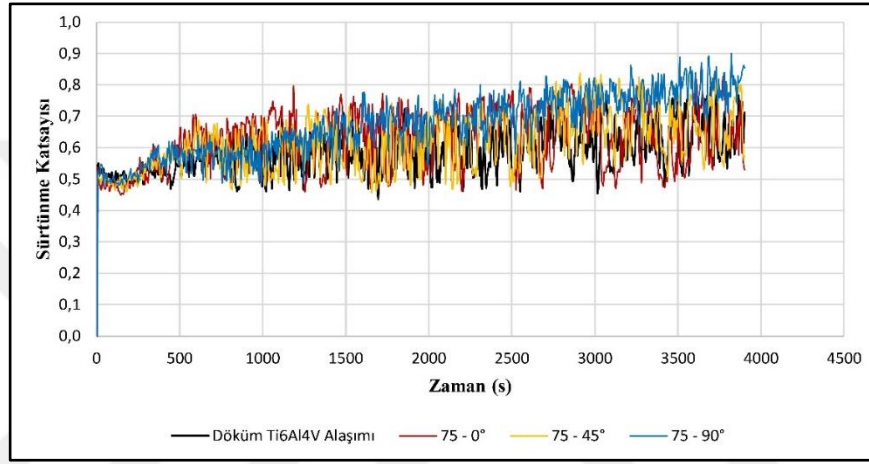


Şekil 4.9. 60µm yana kayma ile üretilen numunelere ait COF grafiği

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çizelge 4.4. 60µm yana kayma ile üretilen numunelere ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri

Parametre	Ortalama Sürtünme Katsayısı
Döküm Ti6Al4V alaşımı	0,590 ± 0,0687
60 - 0°	0,620 ± 0,0824
60 - 45°	0,620 ± 0,0868
60 - 90°	0,627 ± 0,0805

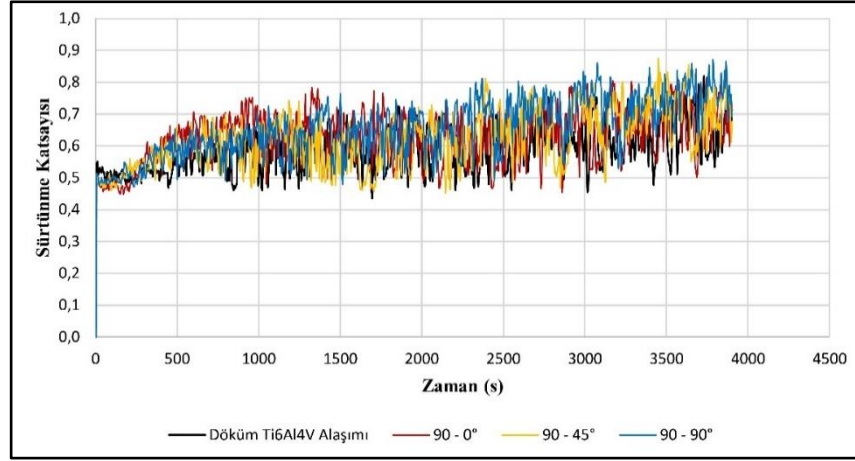


Şekil 4.10. 75µm yana kayma ile üretilen numunelere ait COF grafiği

Çizelge 4.5. 75µm yana kayma ile üretilen numunelere ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri

Parametre	Ortalama Sürtünme Katsayısı
Döküm Ti6Al4V alaşımı	0,590 ± 0,0687
75 - 0°	0,629 ± 0,0878
75 - 45°	0,619 ± 0,0869
75 - 90°	0,675 ± 0,0945





Şekil 4.11. 90µm yana kayma ile üretilen numunelere ait COF grafiği

Çizelge 4.6. 90µm yana kayma ile üretilen numunelere ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri

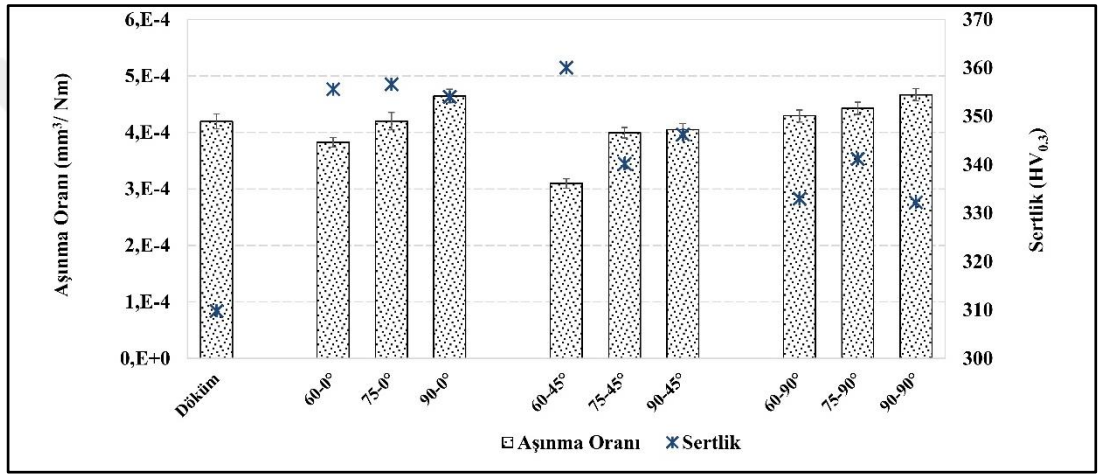
Parametre	Ortalama Sürtünme Katsayısı
Döküm Ti6Al4V alaşımı	0,590 ± 0,0687
90 - 0°	0,631 ± 0,0781
90 - 45°	0,623 ± 0,0865
90 - 90°	0,657 ± 0,0880

#### 4.2.3. Aşınma oranları

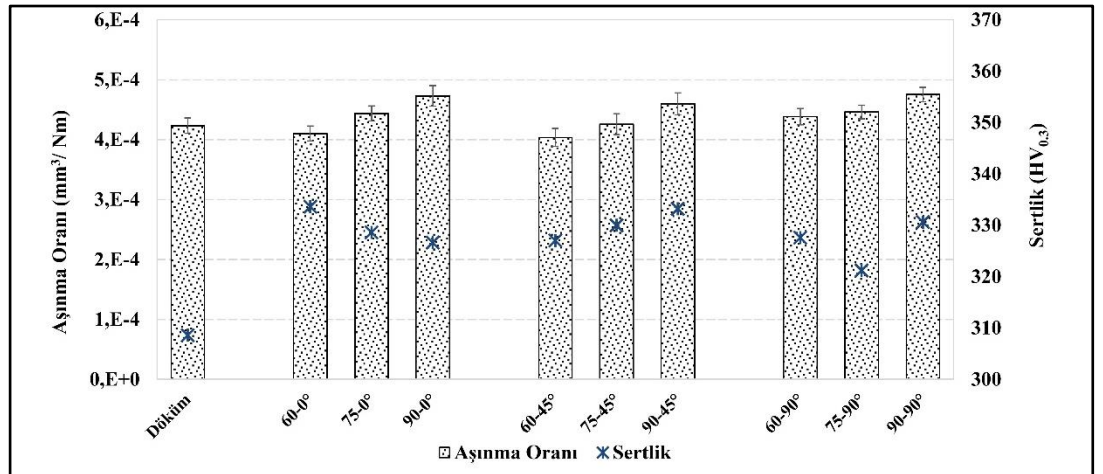
Döküm ve SLE yöntemi ile farklı yana kayma mesafeleri ve inşa oryantasyonları kullanılarak üretilen Ti6Al4V alaşımının ısı işlem öncesi ve sonrası aşınma oranı ve sertlik değerlerini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 4.12 ve 4.13' te verilmiştir. Döküm yöntemi ile üretilen alaşımın sertlik değeri yaklaşık olarak 310 HV<sub>0.3</sub> olarak ölçülmüştür. SLE yöntemi ile üretilen numunelerde hızlı soğumanın etkisi ile değişen mikroyapının bir sonucu olarak sertlik değeri artmıştır. SLE ile üretilen numunelerin sertlik değerleri, üretimde kullanılan parametrelere bağlı olarak 330-360 HV<sub>0.3</sub> aralığında değişmektedir. Döküm yöntemi ile üretilen numunenin mikroyapısı yavaş soğumanın bir etkisi olarak α+β fazlarından oluşmaktadır (Şekil 4.2). Ancak SLE ile üretilen numunelerde bu fazların yanı sıra hızlı ergime ve katılaşmanın bir sonucu olarak α' (asiküler martenzit) fazı da oluşmaktadır. SLE ile üretilen numunelerdeki sertlik artışı bu fazın varlığı ile ilişkilendirilmiştir (Bartolomeu et al. 2017). Ancak α' fazı ile α fazı aynı kristal yapıya

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

sahip olduğu için  $\alpha'$  fazı XRD grafiğinde gösterilememiştir. SLE ile üretilen ve ısıtılma işlem uygulanmamış numuneler arasında yapılan değerlendirmede, inşa oryantasyonu ve yana kayma mesafesindeki değişimin sertlik üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Numuneler arasında en yüksek yüzey sertliği, en yüksek doluluk oranının elde edildiği 60  $\mu$ m yana kayma ve 45° lik inşa oryantasyonunda (60 – 45°) üretilen numune için elde edilmiştir. Isıl işlem uygulanmış numunelerde ise döküm yöntemi ile üretilen numuneler için sertlik değişimi gözlenmemiştir. Ancak, SLE ile üretilen numunelerde gerilme giderme tavlama sürecinin etkisi ile numunelerin sertliğinde nispeten azalma görülmüştür.



Şekil 4.12. Isıl işlem öncesi farklı inşa oryantasyonlarında elde edilen aşınma oranları



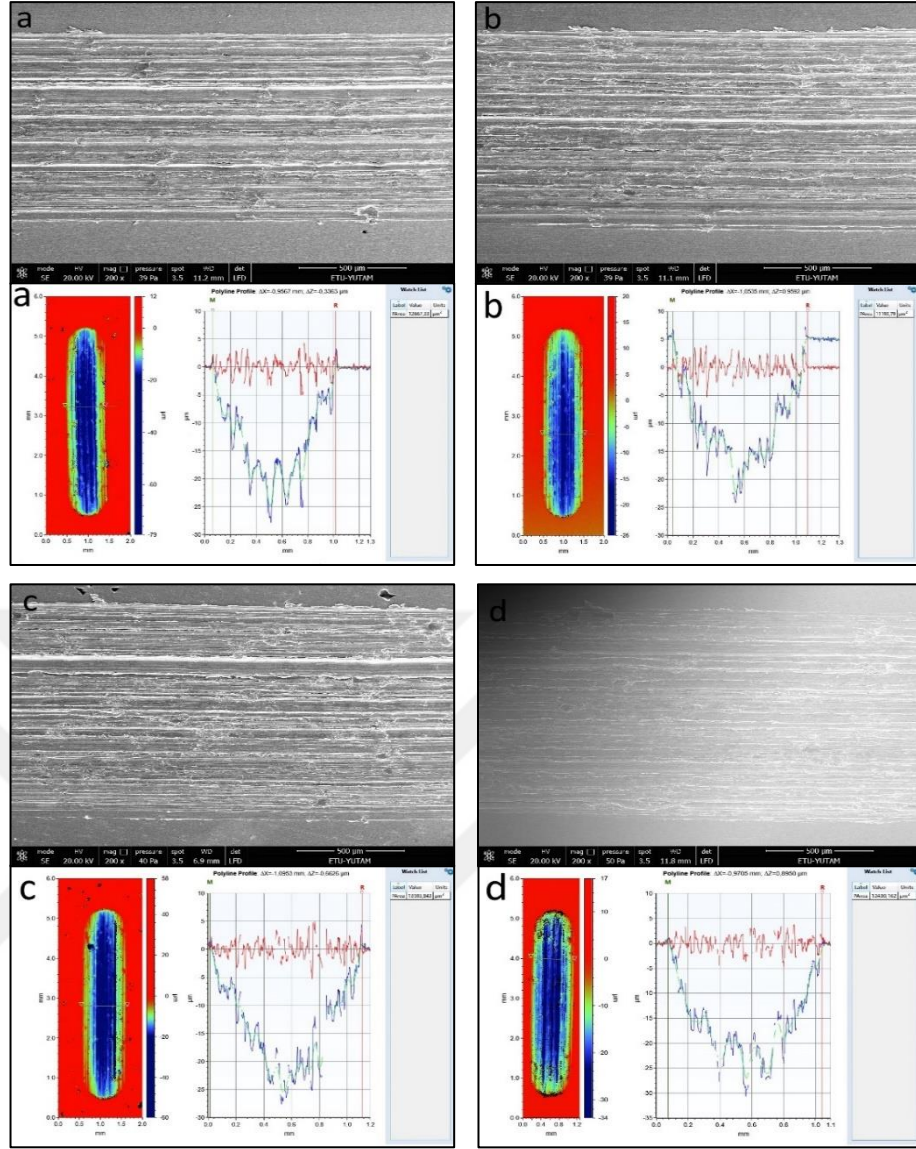
Şekil 4.13. Isıl işlem sonrası farklı inşa oryantasyonlarında elde edilen aşınma oranları

Şekil 4.12 ve 4.13'te verilen ısıl işlem öncesi ve sonrası aşınma oranı değerlerine göre, SLE ile üretilen numunelerde yana kayma miktarı arttıkça aşınma oranının arttığı

görülmektedir. Üç farklı inşa oryantasyonu için de en düşük yana kayma miktarı olan 60 µm değeri için aşınma oranları diğer yana kayma miktarları ile üretilen numunelerin aşınma oranlarından daha düşük olarak elde edilmiştir. En düşük aşınma oranı değeri, en yüksek doluluk oranı ve en yüksek yüzey sertliğinin elde edildiği 60 µm yana kayma ve 45°'lik inşa oryantasyonunda (60 – 45°) üretilen numune için elde edilmiştir. Bu numunenin aşınma oranı, döküm yöntemi ile üretilen numunenin aşınma oranından % 26 daha düşük olarak elde edilmiştir. 90 µm yana kayma mesafesi ile üretilen numunelerdeki gözeneklilik miktarının fazla olması veya yapının boşluklu olması sebebiyle, elde edilen aşınma oranlarının döküm yöntemi ile üretilen numunenin aşınma oranından daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu artış, 90 µm yana kayma mesafesi ve 90°'lik inşa oryantasyonunda üretilen numune için yaklaşık % 11 olarak belirlenmiştir. Benzer durum ısıtılma işlem uygulanmış numuneler için de geçerlidir. 60 µm yana kayma ve 45°'lik inşa oryantasyonunda üretilen ve ısıtılma işlem uygulanmış numunenin aşınma oranı, döküme göre yaklaşık % 5 daha düşük olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla numunelere uygulanan ısıtılma işleminin alaşımın aşınma oranları üzerinde çok büyük bir değişime sebep olmadığı belirlenmiştir. Ancak yine de bu durum, SLE ile üretim sonrası yapılması gereken gerilme giderme tavlama işleminin gerekliliğini ortadan kaldırmamaktadır. Çünkü uygulanan ısıtılma işlemi üretilen parçanın sadece tribolojik özellikleri açısından değil, aynı zamanda mekanik özellikleri açısından da değerlendirilmelidir.

#### 4.2.4. Aşınma izlerinin karakterizasyonu

SLE yöntemi ile farklı yana kayma mesafeleri ve inşa oryantasyonları kullanılarak üretilen Ti6Al4V alaşımının ısıtılma işlem öncesi ve sonrası aşınma izi SEM resimleri ve 3D optik profilometre görüntüleri Şekil 4.14-19' da verilmiştir. İlgili şekillerde, SLE yöntemi ile farklı üretim parametrelerinde üretilen numunelerin aşınma izleri, referans olarak döküm yöntemi ile üretilen numunenin aşınma izi ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca aşınma izlerine ait ortalama hacim değerleri Çizelge 4.7' de sunulmuştur.



Şekil 4.14. Isıl işlem öncesi aşınma izlerinin SEM ve 3D optik profilometre görüntüleri (a) 60 - 0° (b) 60 - 45° (c) 60 - 90° (d) Döküm Ti6Al4V alaşımı

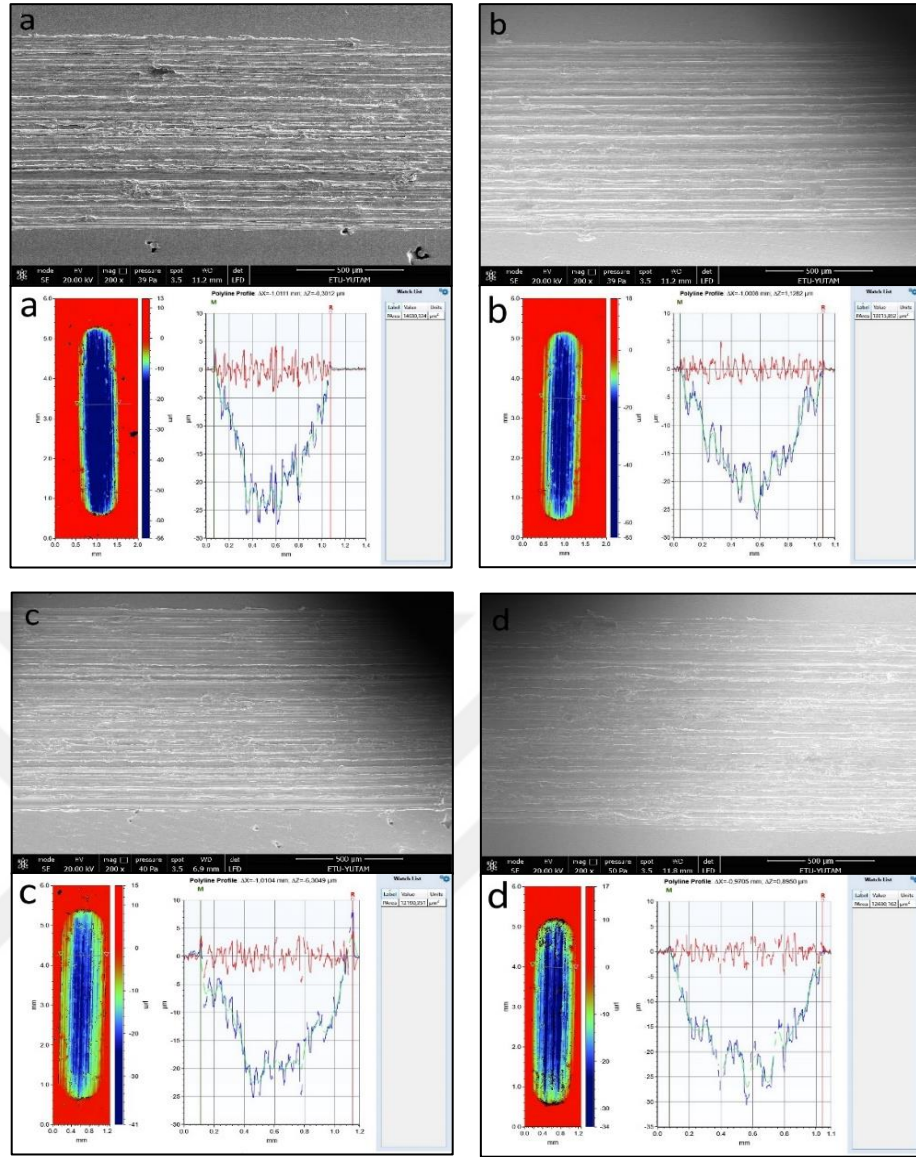
Şekil 4.14' te SLE yöntemi ile 60  $\mu\text{m}$  yana kayma değerinde ve farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelerin aşınma izleri verilmiştir. Tüm resimlerde abrazif aşınmanın bir sonucu olarak aşınma yivleri (sliding grooves) açık bir şekilde görülmektedir ve aşınma mekanizması tüm numuneler için benzer karakterdedir. Aşınma iz genişlikleri arasında belirgin bir farklılık olmamasıyla birlikte, göreceli olarak en düşük aşınma iz genişliği, en yüksek yüzey sertliği ve doluluk oranı değerlerine sahip olan 60  $\mu\text{m}$  yana kayma ve 45° lik inşa oryantasyonunda üretilen numune için elde edilmiştir. 90° lik inşa oryantasyonunda üretilen numunenin aşınma izi dışındaki gözenekler dikkat

çekmektedir (Şekil 4.14.c). SLE ile üretim sonrası oluşan bu gözenekliliklerin, abrazif aşınmayı hızlandırdığı ve aşınma oranını arttırdığı düşünülmektedir.

75 µm yana kayma değeri ve farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelerin aşınma iz genişlikleri ve optik profilometre görüntüleri Şekil 4.15'te verilmiştir. Aşınma mekanizması olarak abrazif aşınmanın etkin olduğu SEM görüntülerinde görölmektedir. Söz konusu yana kayma değeri için en düşük aşınma iz genişliği ve abrazif aşınma etkilerinin en az olduğu inşa oryantasyonu 45° olarak belirlenmiştir. Benzer durum 90 µm yana kayma değeri üretilen numuneler için de geçerlidir.

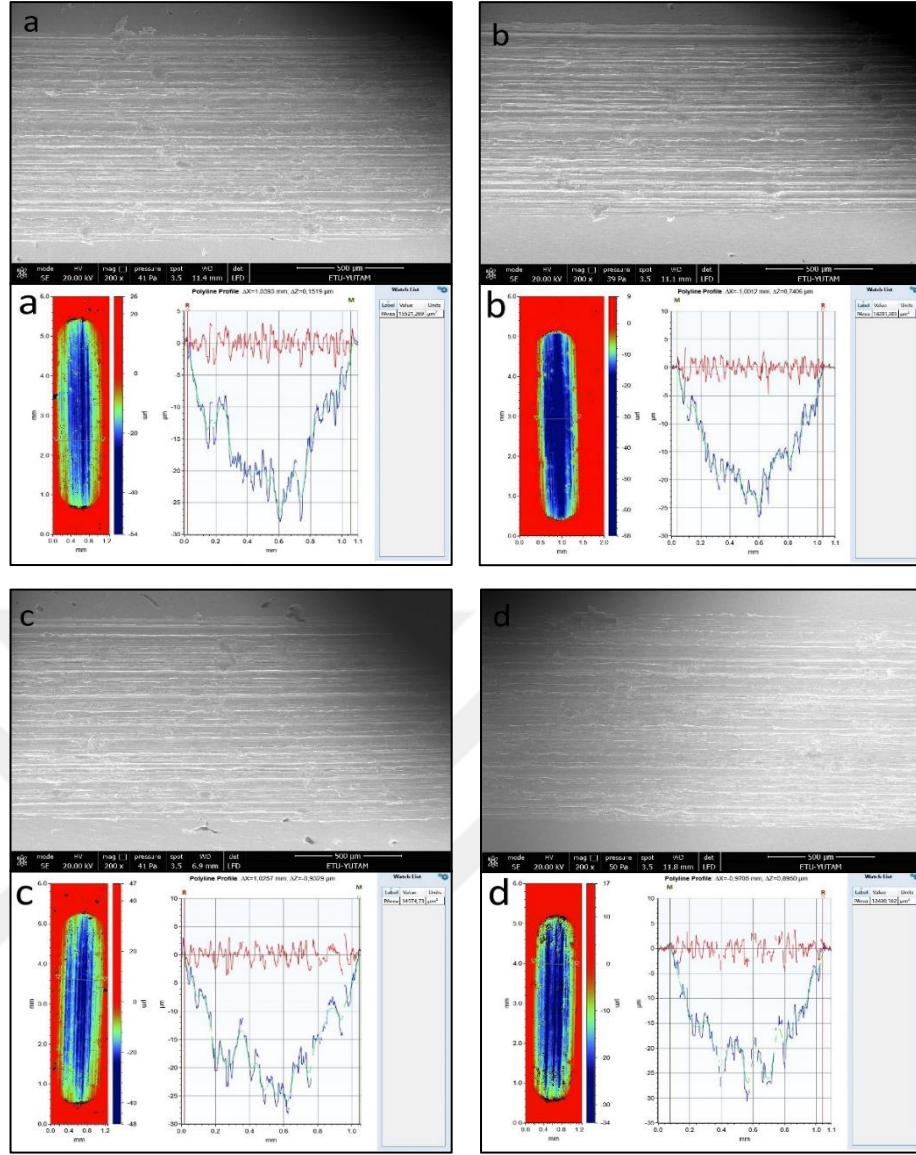
Görüntüler bir bütün olarak ele alındığında, yana kayma miktarının artışı ile aşınma direncinin azaldığı açık bir şekilde görölmektedir. Tüm yana kayma değerleri için aşınma direnci açısından yapılan değerlendirmeye göre en uygun inşa oryantasyonunun 45° olduğu belirlenmiştir. Üretim tablasına dik doğrultuda (90°) yapılan üretimlerin, aşınma direnci açısından uygun olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca alınan SEM görüntüleri aşınma oranı değerlerini desteklemektedir (Şekil 4.12).

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



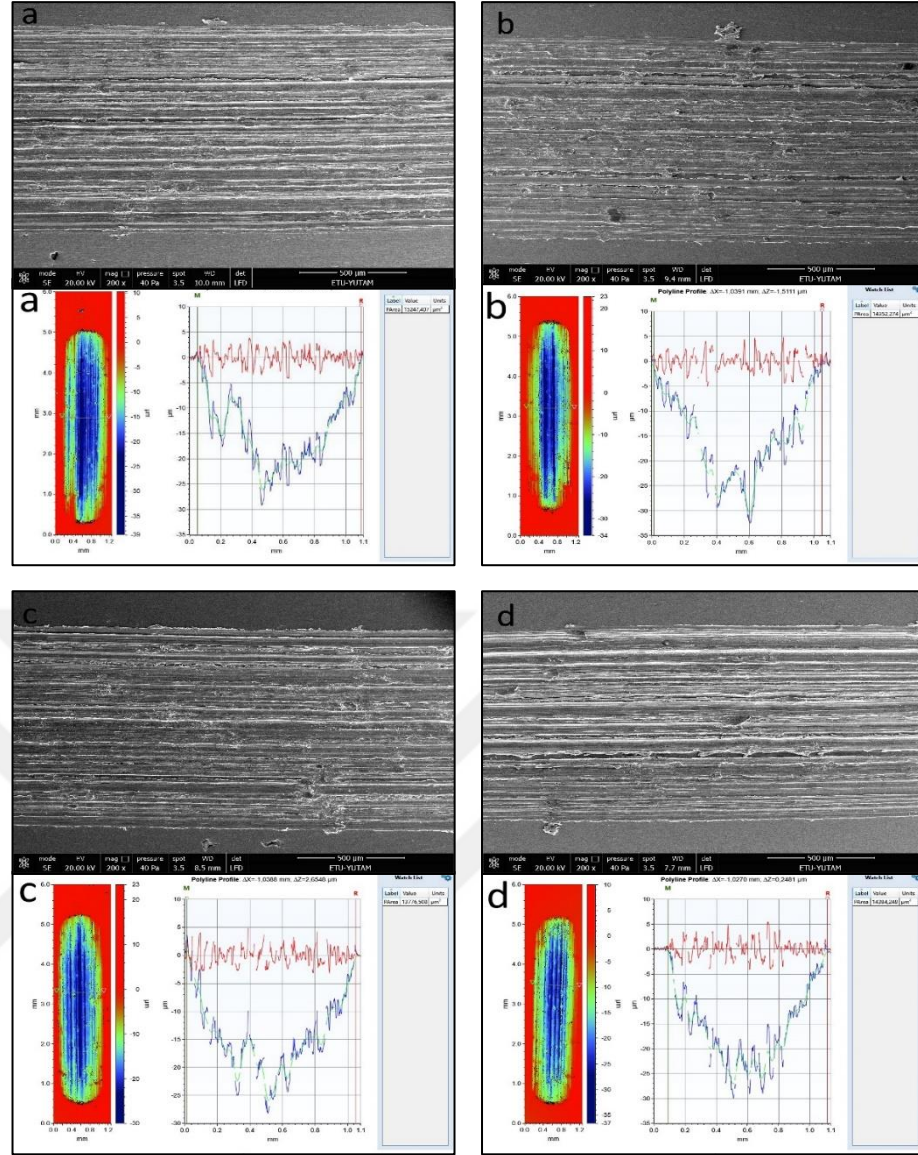
Şekil 4.15. Isıl işlem öncesi aşınma izlerinin SEM ve 3D optik profilometre görüntüleri (a) 75 - 0° (b) 75 - 45° (c) 75 - 90° (d) Döküm Ti6Al4V alaşımı

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



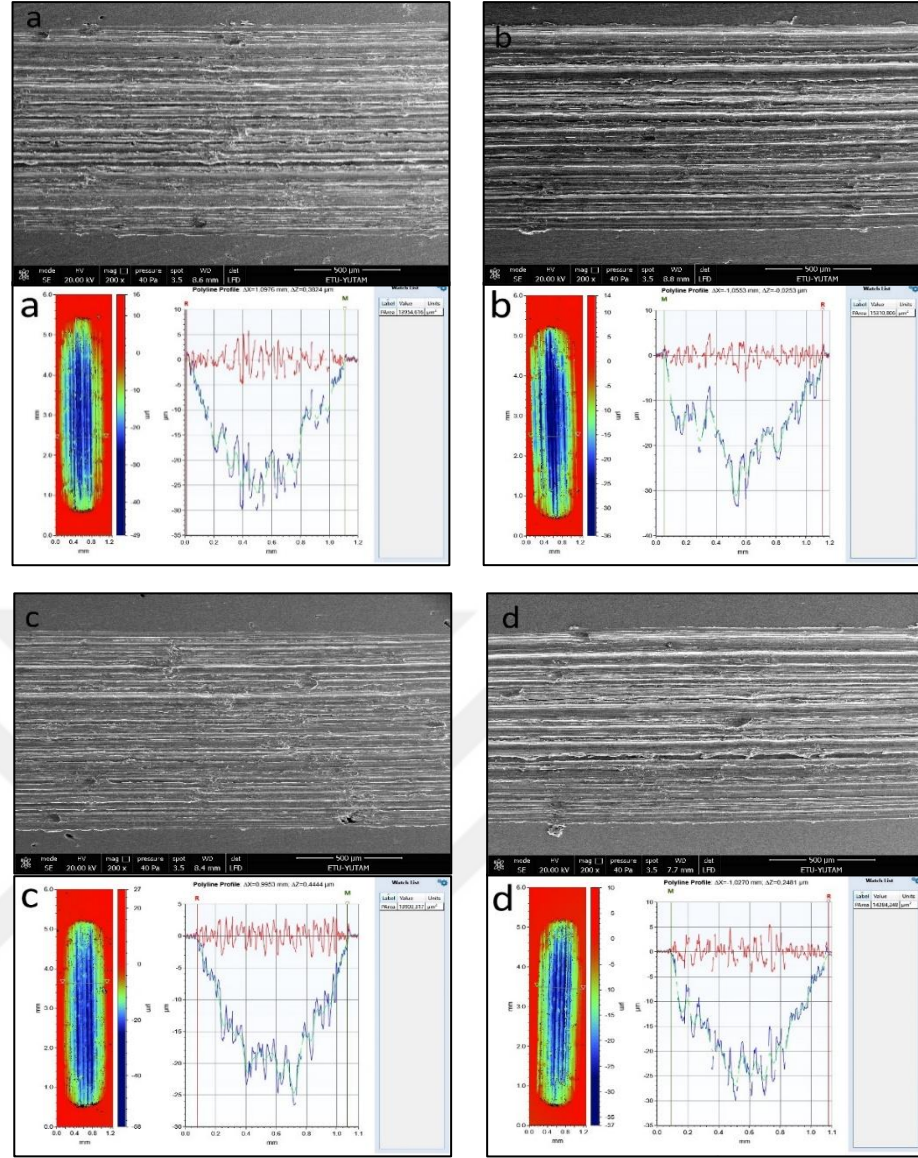
Şekil 4.16. Isıl işlem öncesi aşınma izlerinin SEM ve 3D optik profilometre görüntüleri (a) 90 - 0° (b) 90 - 45° (c) 90 - 90° (d) Döküm Ti6Al4V alaşımı

Döküm ve SLE yöntemi ile üretim sonrası ısıl işlem uygulanmış numunelerin aşınma izleri Şekil 4.17-19’ da verilmiştir. Isıl işlem sonrası aşınma iz genişlikleri, numunelerde meydana gelen sertlik düşüşüne bağlı olarak bir miktar artmıştır. Ancak ısıl işlem sonrası aşınma mekanizması değişmemiş ve abrasif aşınma etkisinin daha baskın olduğu SEM görüntülerinde açık bir şekilde görülmektedir. SEM görüntüleri bir bütün olarak ele alındığında, ısıl işlem uygulanmış numunelerde de yana kayma miktarının artışı ile aşınma direncinin azaldığı tespit edilmiştir. Tüm yana kayma değerleri için aşınma direnci açısından yapılan değerlendirmeye göre en uygun inşa oryantasyonunun 45° olduğu görülmektedir.



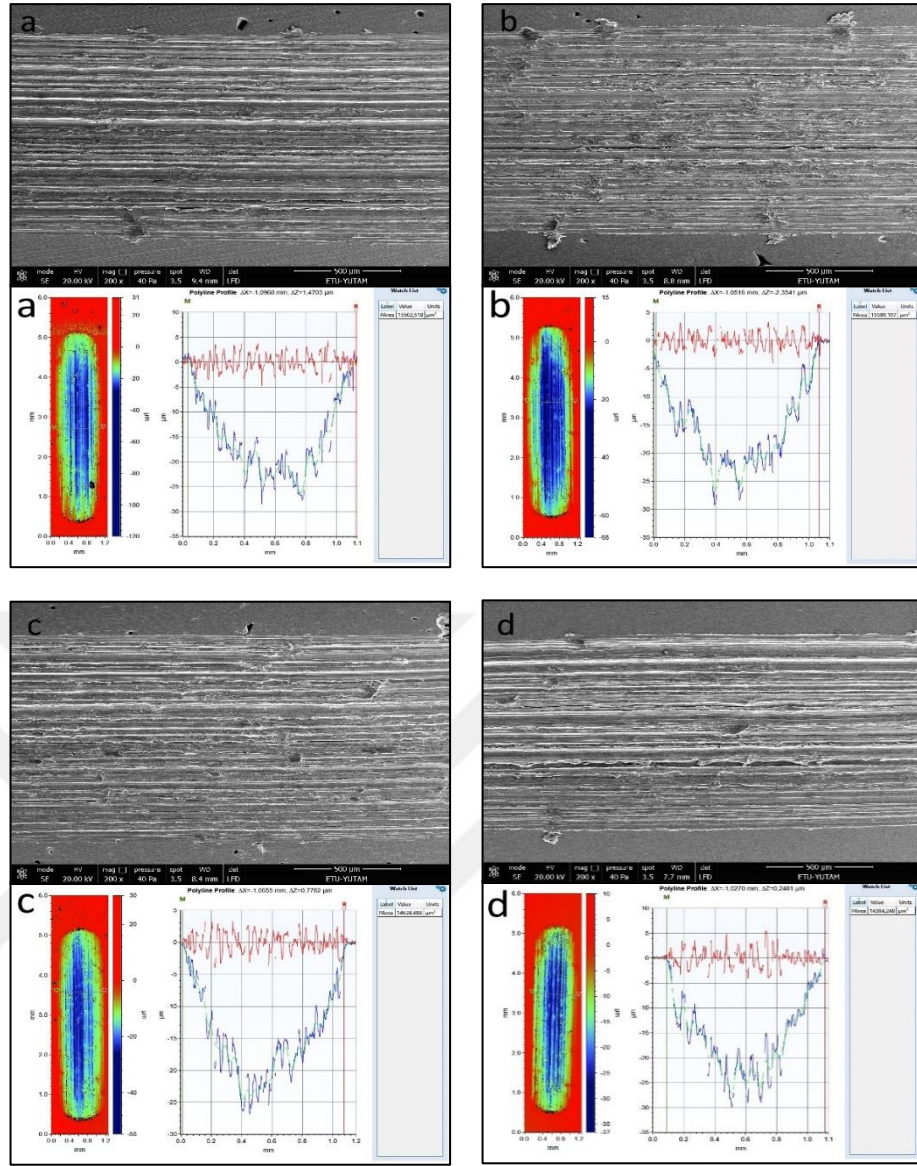
Şekil 4.17. Isıl işlem sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D optik profilometre görüntüleri  
(a) 60 - 0° (b) 60 - 45° (c) 60 - 90° (d) Döküm Ti6Al4V alaşımı





Şekil 4.18. Isıl işlem sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D optik profilometre görüntüleri (a) 75 - 0° (b) 75 - 45° (c) 75 - 90° (d) Döküm Ti6Al4V alaşımı

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.19. Isıl işlem sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D optik profilometre görüntüleri  
(a) 90 - 0° (b) 90 - 45° (c) 90 - 90° (d) Döküm Ti6Al4V alaşımı

Çizelge 4.7. Farklı yana kayma parametrelerindeki aşınma izlerinin ortalama hacim değerleri

<b>Parametre</b>	<b>Ortalama Hacim Değeri (mm<sup>3</sup>)</b>
Döküm Ti6Al4V alaşımı	0,0604 ± 0,009
Döküm Ti6Al4V alaşımı + ısıl işlem	0,0609 ± 0,008
60 - 0°	0,0550 ± 0,006
60 - 0° + ısıl işlem	0,0590 ± 0,009
60 - 45°	0,0445 ± 0,005
60 - 45° + ısıl işlem	0,0581 ± 0,005
60 - 90°	0,0617 ± 0,007
60 - 90° + ısıl işlem	0,0631 ± 0,009
75 - 0°	0,0604 ± 0,005
75 - 0° + ısıl işlem	0,0638 ± 0,008
75 - 45°	0,0574 ± 0,006
75 - 45° + ısıl işlem	0,0612 ± 0,006
75 - 90°	0,0637 ± 0,007
75 - 90° + ısıl işlem	0,0642 ± 0,008
90 - 0°	0,0668 ± 0,007
90 - 0° + ısıl işlem	0,0681 ± 0,006
90 - 45°	0,0583 ± 0,007
90 - 45° + ısıl işlem	0,0661 ± 0,006
90 - 90°	0,0671 ± 0,008
90 - 90° + ısıl işlem	0,0684 ± 0,008

### 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

#### 5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, yeni nesil bir üretim yöntemi olan seçici lazer ergitme yöntemi ve geleneksel bir yöntem olan döküm yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımının yapısal ve tribolojik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Seçici lazer ergitme yöntemi ile gerçekleştirilen üretimlerde üç farklı inşa oryantasyonu ve yana kayma mesafesi değerleri kullanılmış ve söz konusu üretim parametrelerinin alaşımın aşınma performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca her iki yöntemle üretilen deney numunelerine ısıtma işlemi uygulanmış ve uygulanan ısıtma işleminin Ti alaşımının yapısal ve tribolojik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonrası elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- XRD sonuçlarına göre, döküm ve SLE yöntemi ile üretilen numuneler  $\alpha$  (SPH)+ $\beta$  (HMK) fazlarından oluşmuştur. Ancak fazların yoğunluklarında önemli farklılıklar tespit edilmiştir. SLE ile üretimde kullanılan Ti6Al4V toz malzeme hızlı soğuma ile elde edildiği için  $\alpha$  fazı yoğunluğunun  $\beta$  fazından daha yüksek olduğu görülmüştür. Benzer durum SLE ile üretilen ve üretimden sonra ısıtma işlemi uygulanmış numunelerde de ortaya çıkmıştır. Ancak döküm yöntemi ile üretimde soğuma hızının düşük olması sebebiyle  $\beta$  fazı piklerinde artış meydana gelmiştir.
- SLE ile üretilen numuneler içerisinde, 45°'lik inşa oryantasyonunda yazdırılan numunelerin doluluk oranlarının diğer yönlerde üretilen (0 ve 90°) numunelere oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca yana kayma mesafesinin artışı ile doluluk oranının azaldığı, diğer bir ifade ile gözenek miktarının arttığı gözlemlenmiştir. 45°'lik inşa oryantasyonunda ve 60  $\mu$ m yana kayma mesafesi ile üretilen numunenin doluluk oranının % 99'un üzerinde olduğu ve üretilen numuneler içerisinde en yüksek doluluk oranına sahip olduğu tespit edilmiştir.
- SLE yöntemi ile üretimde meydana gelen hızlı ergitme ve katılaşmanın bir sonucu olarak numunelerin mikroyapısı  $\alpha'$  (asiküler martenzit) ve  $\beta$  fazlarından oluşmuştur. Isıtma işlemi uygulanmış numunede ise herhangi bir faz dönüşümü olmamakla birlikte daha iri taneli bir yapının oluştuğu asiküler martenzit fazına ait iğnemsiz yapının daha yumuşak bir form aldığı tespit edilmiştir.

- Aşınma test sonuçlarına göre, SLE ile üretimde kullanılan üç farklı yana kayma (60 - 75 - 90  $\mu\text{m}$ ) ve inşa oryantasyonunda (0 - 45 - 90°) üretilen numunelerin sürtünme katsayıları arasında önemli bir farklılık görülmemiştir. Genel olarak, döküm Ti6Al4V alaşımının ortalama sürtünme katsayısı değeri, SLE yöntemi ile farklı parametrelerde üretilen alaşımın sürtünme katsayısı değerlerinden bir miktar daha düşük olarak elde edilmiştir. SLE yöntemi ile üretilen aşınma test numuneleri içerisinde en düşük sürtünme katsayısı yana kayma değeri 60  $\mu\text{m}$  ve inşa oryantasyonu için 45°' lik açı kullanılan numune için elde edilmiştir. Isıl işlem sonrası artan yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak sürtünme katsayılarının bir miktar arttığı tespit edilmiştir.
- Döküm yöntemi ile üretilen alaşımın sertlik değeri yaklaşık olarak 310 HV<sub>0.3</sub> olarak ölçülmüştür. SLE yöntemi ile üretilen numunelerde hızlı soğumanın etkisi ile değişen mikroyapının bir sonucu olarak sertlik değeri artmıştır. SLE ile üretilen numunelerin sertlik değerleri, üretimde kullanılan parametrelere bağlı olarak 330-360 HV<sub>0.3</sub> aralığında değişmektedir. Numuneler arasında en yüksek yüzey sertliği, en yüksek doluluk oranının elde edildiği 60  $\mu\text{m}$  yana kayma ve 45°' lik inşa oryantasyonunda üretilen numune için yaklaşık olarak 360 HV<sub>0.3</sub> olarak elde edilmiştir. Isıl işlem uygulanmış numunelerde ise döküm yöntemi ile üretilen numuneler için sertlik değişimi gözlenmemiştir. Ancak, SLE ile üretilen numunelerde gerilme giderme tavlamaasının etkisi ile numunelerin sertliğinde nispeten azalma görülmüştür.
- Üretilen numuneler arasında en düşük aşınma oranı değeri; en yüksek doluluk oranı ve en yüksek yüzey sertliğinin elde edildiği 60  $\mu\text{m}$  yana kayma ve 45°' lik inşa oryantasyonunda üretilen numune için elde edilmiştir. Söz konusu numunenin aşınma oranı, döküm yöntemi ile üretilen numunenin aşınma oranından % 26 daha düşük olarak elde edilmiştir. SLE ile üretimde yana kayma miktarının artışı ile aşınma oranının arttığı tespit edilmiştir. Numunelere uygulanan ısıl işlemin alaşımın aşınma oranları üzerinde önemli bir değişime sebep olmadığı görülmüştür.

### 5.2. Öneriler

Yapılan bu tez çalışması, geleneksel yöntem ve eklemeli üretim yöntemi ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımının yapısal ve tribolojik özellikleri arasında önemli farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur. Bir eklemeli üretim yöntemi olan Seçici Lazer Ergitme (SLE) yönteminde kullanılan üretim parametre/stratejilerinin alaşımın aşınma performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Tez çalışması kapsamında SLE yöntemi ile yapılan üretimlerde, daha önce literatürde incelenmemiş olan inşa oryantasyonu, yana kayma mesafesi ve üretimden sonra uygulanacak ısı işlemlerin Ti6Al4V alaşımının aşınma performansına etkileri incelenmiştir.

Bu çalışma sonrası yapılacak diğer çalışmalar ile farklı toz malzemelerin aşınma performansları incelenebilir. Ayrıca bu çalışmada seçilen üretim ve üretim sonrası parametreleri olan inşa oryantasyonu, yana kayma mesafesi ve ısı işlem parametrelerinin haricinde, SLE ile üretimde kullanılan diğer parametrelerin etkilerinin de saptanması ve bir optimizasyon çalışması yapılarak çalışmanın devamlılığı sağlanabilir.

## KAYNAKLAR

- Ahn, D. G. 2011. Applications of Laser Assisted Metal Rapid Tooling Process to Manufacture of Molding & Forming Tools - State of the Art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 12(5):925–38.
- Anonymous, 2012. The 7 categories of additive manufacturing. (n.d.). Web sitesi: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/> Erişim tarihi: 06.11.2018
- Anonymous, 2018. Web sitesi: [https://www.concept-laser.de/fileadmin//user\\_upload/Datasheet\\_CL\\_41TI\\_ELI.pdf](https://www.concept-laser.de/fileadmin//user_upload/Datasheet_CL_41TI_ELI.pdf) Erişim tarihi 12.01.2019
- Attar, H., Prashanth, K. G., Chaubey, A. K., Calin, M. , Zhang, L. C., Scudino, S., ve Eckert, J. 2015. Comparison of Wear Properties of Commercially Pure Titanium Prepared by Selective Laser Melting and Casting Processes. *Materials Letters* 142:38–41.
- Bartolomeu, F., Buciumeanu, M., Pinto, E., Alves, N., Silva, F. S., Carvalho, O., ve Miranda. G., 2017. Wear Behavior of Ti6Al4V Biomedical Alloys Processed by Selective Laser Melting, Hot Pressing and Conventional Casting. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)* 27(4):829–38.
- Bruschi, S., Bertolini,R., ve Ghiotti,A. 2017. Coupling Machining and Heat Treatment to Enhance the Wear Behaviour of an Additive Manufactured Ti6Al4V Titanium Alloy. *Tribology International* 116(July):58–68.
- Chen, J., Zhang, Q., Li, Q. A., Fu, S. L., ve Wang, J. Z. 2014. Corrosion and Tribocorrosion Behaviors of AISI 316 Stainless Steel and Ti6Al4V Alloys in Artificial Seawater. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)* 24(4):1022–31.
- Cherry, J. A., Davies, H. M., Mehmood, S., Lavery, N. P., Brown, S. G. R., ve Sienz, J. 2014. Investigation into the Effect of Process Parameters on Microstructural and Physical Properties of 316L Stainless Steel Parts by Selective Laser Melting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 76(5–8):869–79.
- Durmaz, Y. M. 2018. TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN Seramik Filmleri ile Kaplanmış Karbür Takımların Yüksek Hızlı Frezeleme İşleminde Aşınma Performansının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi.Erzurum Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine

Mühendisliği Anabilim Dalı, 64, Erzurum.

- Groover, M. P. 2015. Fundamentals of Modern Manufacturing. Statewide Agricultural Land Use Baseline,1012.
- Gu, D., Hagedom, Y. C., Meiners, W., Meng, G., Batista, R. J. S., Wissenbach, K., ve Poprawe, R. 2012. Densification Behavior, Microstructure Evolution, And Wear Performance of Selective Laser Melting Processed Commercially Pure Titanium. *Acta Materialia*, 60 (2012), 3849 - 3860.
- Guo, P., Zou, B., Huang, C., ve Gao, H. 2017. Study on Microstructure, Mechanical Properties and Machinability of Efficiently Additive Manufactured AISI 316L Stainless Steel by High-Power Direct Laser Deposition. *Journal of Materials Processing Technology* 240:12–22.
- Gupta, H. N., Gupta, R. C., ve Mittal. A. 2009. *Manufacturing Processes*,179, New Delhi.
- Herderick, E. 2011. Additive Manufacturing of Metals: A Review. *Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2011* 2(176252):1413–25.
- Kao, W. H., Su, Y. L., Horng, J. H., ve Chang, C. Y. 2018. Tribological, Electrochemical and Biocompatibility Properties of Ti6Al4V Alloy Produced by Selective Laser Melting Method and Then Processed Using Gas Nitriding, CN or Ti-C:H Coating Treatments. *Surface and Coatings Technology* 350(June):172–87.
- Kruth, J. P., Wang, X., ve Laoui, T. 2006. Research Article Lasers and Materials in Selective Laser Sintering.
- Kumar, S. 2009. Sliding Wear Behavior of Dedicated Iron-Based SLS Materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 43(3–4):337–47.
- Kumar, S., ve Kruth, J. P. 2008. Wear Performance of SLS/SLM Materials. *Advanced Engineering Materials* 10(8):750–53.
- Li, H., Ramezani, M., Li, M., Ma, C., ve Wang, J. 2018. Effect of process parameters on tribological performance of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting. *Manufacturing letters*, 16, 36-39.
- Li, H., Ramezani, M., Li, M., Ma, C., ve Wang, J. 2018. Tribological Performance of Selective Laser Melted 316L Stainless Steel. *Tribology International* 128(July):121–29.
- Liverani, E., Toschi, S., Ceschini, L., ve Fortunato, A. 2017. Effect of Selective Laser Melting (SLM) Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of 316L Austenitic Stainless Steel.” *Journal of Materials Processing Technology* 249(May):255–63.



- Milewski, J. O. 2017. Additive Manufacturing of Metals. Springer Series in Materials Science,343, Santa Fe
- Molitch, M. (2014, July 16). Boeing and Lotus F1 team to 3D print carbon reinforced parts. Web sitesi: [www.3dprintingindustry.com/2014/07/16/boeing-lotus-f1-team-3d-print-carbon-reinforced-parts](http://www.3dprintingindustry.com/2014/07/16/boeing-lotus-f1-team-3d-print-carbon-reinforced-parts) Erişim tarihi: 03.11.2018
- Poyraz, Ö. ve Kuşhan, M. C. 2018. Metallerin Lazer Katmanlı İmalatında Farklı Proses Parametrelerin Etkisinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 2018(2018):729–42.
- Prashanth, K. G., Scudino, S., Chaubey, A. K., Löber, L., Wang, P., Attar, H., Schimansky, F. P., Pyczak, F., ve Eckert, J. 2016. Processing of Al-12Si-TNM Composites by Selective Laser Melting and Evaluation of Compressive and Wear Properties. Journal of Materials Research 31(1):55–65.
- Sander, J., Hufenbach, J., Giebler, L., Bleckmann, M., Eckert, J. ve Kühn, U. 2017. Microstructure, Mechanical Behavior, and Wear Properties of FeCrMoVC Steel Prepared by Selective Laser Melting and Casting. Scripta Materialia 126:41–44.
- Sun, Y., Moroz, A., ve Alrbaey, K. 2014. Sliding Wear Characteristics and Corrosion Behaviour of Selective Laser Melted 316L Stainless Steel. Journal of Materials Engineering and Performance 23(2):518–26.
- Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J. V., ve Kruth, J. P. 2010. A Study of the Microstructural Evolution during Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V. Acta Materialia 58(9):3303–12.
- Thompson, S. M., Bian, L., Shamsaei, N. ve Yadollahi, A. 2015. An Overview of Direct Laser Deposition for Additive Manufacturing; Part I: Transport Phenomena, Modeling and Diagnostics. Additive Manufacturing 8:36–62.
- Wahlström, T. ve Sahlström, J. 2016. Additive Manufacturing in Production: For the Automotive Industry. 20–40.
- Wendler, B. G. ve Pawlak, W. 2008. Low Friction and Wear Resistant Coating Systems on Ti6Al4V Alloy. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 26(2):207–10.
- Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P., ve Raymont, D. 2014. Advanced Lightweight 316L Stainless Steel Cellular Lattice Structures Fabricated via Selective Laser Melting. Materials and Design 55:533–41.
- Yilmaz, O. ve Uğla, A. A. 2017. Microstructure Characterization of SS308LSi Components Manufactured by GTAW-Based Additive Manufacturing: Shaped

Metal Deposition Using Pulsed Current Arc. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89(1–4):13–25.

Yürekli, Y. 2012. Frezeleme İşleminde Eş Yönlü ve Ters Yönlü Talaş Kaldırmanın CVD/PVD Kaplanmış Sert Metal Uçların Ömrüne Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 111, Ankara.

Zhang, D., Cai, Q., Liu, J., ve Li. R. 2011. Research on Process and Microstructure Formation of W-Ni-Fe Alloy Fabricated by Selective Laser Melting. *Journal of Materials Engineering and Performance* 20(6):1049–54.

Zhu, Y., Zou, J., Chen, X., ve Yang, H. 2016. Tribology of Selective Laser Melting Processed Parts: Stainless Steel 316 L under Lubricated Conditions. *Wear* 350–351:46–55.

## ÖZGEÇMİŞ

### **Kişisel Bilgiler**

Adı-Soyadı : Gürkan KAYA  
Uyruğu : T.C  
Doğum Tarihi ve Yeri : 05.07.1991 / Trabzon  
Medeni Hali : Bekar  
Telefon : +90 536 573 6161  
e-mail : gurkan.kaya@erzurum.edu.tr

### **Eğitim**

<b>Derece</b>	<b>Üniversite</b>	<b>Mezuniyet Yılı</b>
Yüksek Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi	2019
Lisans	Uludağ Üniversitesi	2015
Lise	Vakıfkebir Anadolu Lisesi	2009

### **Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl**

Hexagon Studio - 2016

### **Yayınlar (SCI, SCI-Expanded)** (Yayın yılları dikkate alınmalıdır)\*

### **Hakemli Dergiler** (Yayın yılları dikkate alınmalıdır)

### **Ulusal Kongre Sunum** (Sunum tarihleri dikkate alınmalıdır)

### **Uluslararası Kongre Sunum**

1- F. Yıldız, İ. Hacısalihoğlu, F. Murat, O. C. Akar, H. Tekdir, **G. Kaya**, Y. M. Durmaz.  
“Seęici Lazer Ergitme Yöntemi ile Farklı Üretim Parametrelerinde Üretilen 316L  
Paslanmaz Çeliğin Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, IMSEC 2018,  
Adana, Türkiye.

