

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**EKLEMELİ İMALAT VE GELENEKSEL İMALAT  
YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN Tİ6AL4V ALAŞIMI  
PARÇALARIN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ABDULBAKİ YILDIRIM**

**DENİZLİ, EKİM, 2022**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**



**EKLEMELİ İMALAT VE GELENEKSEL  
İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN Tİ6AL4V  
ALAŞIMI PARÇALARIN TRİBOLOJİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ABDULBAKİ YILDIRIM**

**DENİZLİ, EKİM, 2022**

## **ETİK BEYANI**

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

**31/10/2022**

**Abdulbaki YILDIRIM**

.....

## ÖZET

### EKLEMELİ İMALAT VE GELENEKSEL İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN Ti6Al4V ALAŞIMI PARÇALARIN TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS  
ABDULBAKİ YILDIRIM  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM  
DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DOC. DR. YAVUZ KAPLAN)

DENİZLİ, 2022

Eklemeli İmalat (Eİ) yöntemi karmaşık geometrili parçaların daha kolay üretilmesine olanak sağladığı için günden güne endüstrinin ilgi odağı haline gelmiştir. Eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi mümkün olmayan parçaların üretiminde kolaylık sağlamaktadır. Mekanik özelliklerden dolayı uzay, havacılık ve biyomedikal alanlarda tercih edilen bir yöntem haline gelmektedir. Fakat üretilen parçalarda kalıntı gerilmeler oluşmakta ve bu durum malzemenin mukavemetini azaltmaktadır. Malzemelerin yapısal ve mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla üretim sonrası bazı ek işlemlerin uygulanması gerekebilmektedir. Geleneksel imalat yöntemiyle üretilen numune soğuk haddeleme yöntemi kullanılarak üretilmiş olup numune hazır olarak alınmıştır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, Ti6Al4V malzemedan DMLS (Direkt Metal Lazer Sinterleme) yöntemiyle lazer gücü (w), katman kalınlığı (mm), işlem hızı (mm/sn), Enerji yoğunluğu ( $j/mm^3$ ) gibi farklı üretim parametreleri kullanılarak test numuneleri üretilmiştir. Eİ yöntemi ile üretilen numunelere kısmi argon gazı ortamında 1 saatte 650°C dereceye çıkarılıp 3 saat boyunca 650°C derecede gerilim giderme ısıl işlemi uygulanmıştır. Geleneksel imalat yöntemi (haddeleme) ile üretilen ve DMLS yöntemi ile farklı parametrelerde üretilen Ti6Al4V numunelerin mikroyapı, sertlik, hacim kaybı (mm), aşınma katsayısı ( $mm^3/Nm$ ) ve aşınmış yüzey FESEM (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri grafiksel olarak incelenmiş ve yorumlanmıştır. Deneysel çalışmalar doğrultusunda elde edilen verilere göre aşınma direnci istenen parçalarda Eİ yöntemi uygun parametreler kullanılarak geleneksel imalat yönteminin yerini alacak iyi bir aday olarak görülmüştür.

**ANAHTAR KELİMELER:** Eklemeli İmalat (Eİ), Ti6Al4V, DMLS (Direkt Metal Lazer Sinterleme), Triboloji, Mikroyapı Analizi

# **ABSTRACT**

## **INVESTIGATION OF THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF Ti6Al4V ALLOY PARTS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING AND TRADITIONAL MANUFACTURING METHOD**

**MASTERS DEGREE  
ABDULBAKİ YILDIRIM  
PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF MECHANICAL AND MANUFACTURING  
ENGINEERING  
(SUPERVISOR: ASSOCIATE PROF. YAVUZ KAPLAN)  
DENİZLİ, 2022**

Additive Manufacturing (AM) method has become the focus of attention of the industry day by day, as it allows easier production of parts with complex geometries. Additive manufacturing provides convenience in the production of parts that cannot be produced with traditional manufacturing methods. Due to its mechanical properties, it is becoming a preferred method in space, aviation and biomedical fields. However, residual stresses occur in the produced parts and this reduces the strength of the material. In order to improve the structural and mechanical properties of the materials, some additional processes must be applied after production. The sample produced by the traditional manufacturing method was produced using the cold rolling method and the sample was taken ready-made.

In this master's thesis, test samples were produced from Ti6Al4V material using DMLS method using different production parameters such as laser power (w), layer thickness (mm), processing speed (mm/sec), Energy density (j/mm<sup>3</sup>). The samples produced by the EI method were increased to 650oC in 1 hour in a partial argon gas environment and stress relief heat treatment was applied at 650oC for 3 hours. The microstructure, microhardness, volume loss (mm), wear coefficient (mm<sup>3</sup>/Nm) and worn surface FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscope) images of the Ti6Al4V sample produced by the traditional manufacturing method

(Cold rolling) and the Ti6Al4V samples produced in different parameters by the DMLS method were examined graphically as a result of the abrasion test and interpreted. Experimental studies have shown that the AM method can be a good candidate to replace the traditional manufacturing method by using appropriate parameters for the parts requiring wear resistance.

**KEYWORDS: Additive Manufacturing (AM), Ti6Al4V, DMLS (Direct Metal Laser Sintering), Tribological, Microstructure Analysis**

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....	<b>xiv</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>xv</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>16</b>
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>20</b>
2.1. Eklemeli İmalat İle Yapılan Çalışmalar .....	20
2.2. DMLS (Direkt Metal Lazer Sinterleme) Üretim Yöntemi İle İlgili Yapılan Çalışmalar .....	22
<b>3. EKLEMELİ İMALAT</b> .....	<b>25</b>
3.1 Eklemeli İmalat İşlem Adımları .....	27
3.1.1 3B Modelleme .....	28
3.1.2 Dosya Türü ve Kayıt .....	29
3.1.3 Dilimleme .....	29
3.1.4 Dosya Transferi .....	30
3.1.5 3B Baskı .....	31
3.1.6 Son İşlem .....	31
3.2 Eklemeli İmalat Yöntemleri .....	31
3.2.1 Fotopolimerizasyon .....	34
3.2.2 Malzeme Ekstrüzyon .....	35
3.2.3 Malzeme Püskürtme .....	36
3.2.4 Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat .....	37
3.2.5 Toz eritme / Sinterleme Yöntemi .....	38
3.2.6 Direkt Enerji Depolama .....	40
3.2.7 Levha / Sac Laminasyon Metodu .....	41
3.3 Toz yataklı / Beslemeli Eklemeli İmalat Yöntemlerinde İşlem Parametreleri .....	42
3.3.1 Lazere Bağlı Parametreler .....	44
3.3.2 Taramaya Bağlı Parametreler .....	46
3.3.3 Toza Bağlı Parametreler .....	49
3.3.4 Sıcaklığa Bağlı Parametreler .....	56
<b>4. SÜRTÜNME VE AŞINMA</b> .....	<b>56</b>
4.1 Sürtünme .....	56
4.2 Aşınma .....	57
4.2.1 Aşınma Çeşitleri .....	59
4.2.1.1 Adhesiv Aşınma .....	59
4.2.1.2 Abrasiv Aşınma .....	60
4.2.1.3 Yorulma Aşınması .....	60
4.2.1.4 Korozi Aşınma .....	61
4.2.1.5 Erozyon Aşınması .....	61
<b>5. MATERYAL VE METOT</b> .....	<b>62</b>
5.1 Deney Numunelerinin Üretimi .....	62
5.2 Numunelerin Üretildiği DLMS Makinesi ve Üretilen Numuneler .....	64
5.3 Sertlik Ölçümleri .....	65

5.4	Metalografik İncelemeler .....	66
5.5	Pin-on-disk Aşınma Testi .....	67
<b>6.</b>	<b>BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>70</b>
6.1	Mikroskop Görüntülerinin İncelenmesi.....	70
6.2	Sertlik Deney Sonuçları.....	80
6.3	Aşınma Deney Sonuçları .....	82
6.4	FESEM ve EDS Analizleri .....	85
<b>7.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>103</b>
<b>8.</b>	<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>107</b>



# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 2.1: DMLS (Direkt Metal Lazer Sinterleme) çalışma mantığı (Yan ve Yu 2015).....	22
Şekil 3.1: 2017-2018 yıllarında kullanılan 3B yazıcı teknolojileri (Sürmen 2019).....	27
Şekil 3.2: 2018 yılında en fazla tercih edilen 3B baskı malzemeleri (Sürmen 2019).....	27
Şekil 3.3: Eklemeli imalat aşamaları (Wohlers ve Gornet 2014). ....	28
Şekil 3.4: 45° kuralına göre destek bölgeler (Jacobs 1992).....	29
Şekil 3.5: Parçanın dilimleme şekline göre konumlandırılması .....	30
Şekil 3.6: Eklemeli imalat yöntemlerinin ASTM F42 standardıyla sınıflandırılması (Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies 2012). ....	32
Şekil 3.7: Fotopolimerizasyon sisteminin şematik gösterimi ve üretilen parçalar (Özsoy ve Duman 2017). ....	35
Şekil 3.8: a) malzeme ekstrüzyon yöntemi şematik gösterimi (Dreams 2017), b) çift ağız içeren EYM yöntemi (Gibson ve diğ. 2010), c) EYM ürünü (Marhellabs 2017).....	35
Şekil 3.9: Malzeme püskürtme sisteminin şematik gösterimi ve üretilen parçalar (Özsoy ve Duman 2017). ....	37
Şekil 3.10: a) Yapıştırıcı ile katmanlı imalat (binder jetting) imalatının şematik gösterimi (Threading 2017), b) üretilen parça (Xometry 2017) .....	38
Şekil 3.11: Metal lazer sinterleme sisteminin şematik gösterimi ve üretilen parçalar (Özsoy ve Duman 2017).....	39
Şekil 3.12: Direk enerji depolama sisteminin şematik gösterimi ve üretilen parçalar (Özsoy ve Duman 2017).....	41
Şekil 3.13: a) Tabakalı obje üretim metodu şematik gösterimi (Custom 2017), b) üretilen parçalar (Ouden 2017) .....	42
Şekil 3.14: DMLS işlem parametreleri (Aboulkhair ve diğ. 2014) .....	43
Şekil 3.15: İmalat parametreleri, imalat sırasındaki oluşumlar ve ürün kalitesi hiyerarşisi (Mani ve diğ. 2015).....	43
Şekil 3.16: a) İşlem parametreleri, b) işlem parametreleri ile ortaya çıkan özellikler (Mani ve diğ. 2015).....	44
Şekil 3.17: Çeşitli malzemelerin dalgaboyuna karşılık gelen % emicilik oranları (Lazov ve Angelov, 2010; Ion 2005).....	46
Şekil 3.18: a) Lazer tarama açısı, b) farklı lazer tarama açılarıyla tarama, c) yapım yönü (Guan ve diğ. 2013) .....	48
Şekil 3.19: a) Gaz atomizasyonun şematik gösterimi (Rahmi, 2017), b) gaz atomizasyonu uygulanmış tozun FESEM görüntüsü (Eklemeli, 2018), c) döner plazma elektrot toz üretim ünitesi (Yamanoğlu, 2017).....	51
Şekil 3.20: Toz özelliklerinin sınıflandırılması (Austin ve diğ. 2016) .....	52
Şekil 3.21: Toz morfolojilerinin imalat tablası üzerine diziliş şekilleri,.....	53
Şekil 3.22: Tozların akış karakteri (Clayton 2014).....	54
Şekil 3.23: Eklemeli imalata uygunluk araştırması .....	55
Şekil 4.1: (a) Statik sürtünme (b) Dinamik sürtünme sırasında cisme etki eden kuvvetler....	57
Şekil 4.2: Aşınma görüntüleri; (a) mil, (b) yatak, (c) piston, (d) dişli çark .....	58
Şekil 4.3: Makine öğeleri ve yağlayıcılar .....	58
Şekil 4.4: Adhesiv Aşınma (Varol 2016).....	59
Şekil 4.5: Abrasiv Aşınma (Varol 2016). ....	60
Şekil 4.6: Yorulma Aşınması (Kato ve Adachi 2001) .....	61
Şekil 4.7: Korozif Aşınma (Kato ve Adachi 2001).....	61

Şekil 4.8: Erozyon aşınması türleri(Kato ve Adachi 2001; Yıldız ve Gür 2006).....	62
Şekil 5.1: EOSINT M280 DMLS cihazı.....	64
Şekil 5.2: DMLS yöntemiyle numune üretim aşamaları (a) DMLS cihazının ilk toz katman tabakasını lazer enerjisi ile oluşturması, (b) DLMS yöntemi ile Ti6Al4V numunelerin üretim aşaması, (c) DLMS yöntemi ile Ti6Al4V toz malzemesinden üretilen numuneler.....	65
Şekil 5.3: Matsuzawa sertlik ölçüm cihazı .....	66
Şekil 5.4: (a) Sertliği ölçülmeden önceki Ti6Al4V numunesi (b) Sertliği ölçülen Ti6Al4V numunesi.....	66
Şekil 5.5: Hardway zımparalama makinesi .....	67
Şekil 5.6: Optik Mikroskop.....	67
Şekil 5.7: Aşınma cihazının fotoğraf ile gösterimi .....	68
Şekil 5.8: Hassas Elektronik Tartı .....	69
Şekil 6.1: Ti6AL4V alaşımının mikroyapısı (Attar ve diğ. 2014).....	70
Şekil 6.2: Ti6Al4V'nin elektron ışını erimesindeki gözeneklilik: (a) füzyon eksikliği (b) gaz gözenek (Galarraga ve diğ. 2016).....	71
Şekil 6.3: Numune-1 Optik Mikroskop Görüntüsü (200x Büyütme) .....	72
Şekil 6.4: Numune-2 Optik Mikroskop Görüntüsü (100x Büyütme) .....	73
Şekil 6.5: Numune-3 Optik Mikroskop Görüntüleri (100x Büyütme) .....	74
Şekil 6.6: Numune-4 Optik Mikroskop Görüntüleri (100x Büyütme) .....	75
Şekil 6.7: Numune-5 Optik Mikroskop Görüntüleri (200x Büyütme) .....	76
Şekil 6.8: Numune-6 Optik Mikroskop Görüntüleri (100x Büyütme) .....	77
Şekil 6.9: Numune-7 Optik Mikroskop Görüntüleri (200x Büyütme) .....	77
Şekil 6.10: Numune-8 Optik Mikroskop Görüntüleri (100x Büyütme) .....	78
Şekil 6.11: Numune-9 Optik Mikroskop Görüntüleri (100x Büyütme) .....	79
Şekil 6.12: Ti6Al4V Optik Mikroskop Görüntüleri (100x Büyütme).....	80
Şekil 6.13: Sertlik Ölçüm Sonuçları .....	81
Şekil 6.14: Üç farklı yük altında hacim kaybı grafiği.....	82
Şekil 6.15: Üç farklı yük altında spesifik aşınma oranı grafiği .....	83
Şekil 6.16: Numunelerin aşınma testi boyunca sürtünme katsayısı grafiği (15 N yük altında) .....	85
Şekil 6.17: 100 µm FESEM görüntüsü .....	86
Şekil 6.18: 20 µm FESEM görüntüsü.....	72
Şekil 6.19: 20 µm FESEM görüntüsü .....	86
Şekil 6.20: 100 µm FESEM görüntüsü.....	72
Şekil 6.21: 20 µm FESEM görüntüsü .....	86
Şekil 6.22: EDS analiz görüntüleri .....	87
Şekil 6.23: 100 µm FESEM görüntüsü.....	74
Şekil 6.24: 20 µm FESEM görüntüsü .....	88
Şekil 6.25: 100 µm FESEM görüntüsü.....	74
Şekil 6.26: 20 µm FESEM görüntüsü .....	88
Şekil 6.27: EDS analiz görüntüleri .....	89
Şekil 6.28: 100 µm FESEM görüntüsü.....	76
Şekil 6.29: 20 µm FESEM görüntüsü .....	90
Şekil 6.30: 100 µm FESEM görüntüsü.....	76
Şekil 6.31: 20 µm FESEM görüntüsü .....	90
Şekil 6.32: EDS analiz görüntüleri .....	90
Şekil 6.33: 100 µm FESEM görüntüsü.....	78
Şekil 6.34: 20 µm FESEM görüntüsü .....	92
Şekil 6.35: 100 µm FESEM görüntüsü.....	78
Şekil 6.36: 20 µm FESEM görüntüsü .....	92
Şekil 6.37: EDS analiz görüntüleri .....	92

Şekil 6.38: 100 µm FESEM görüntüsü.....	80
Şekil 6.39: 20 µm FESEM görüntüsü .....	93
Şekil 6.40: 100 µm FESEM görüntüsü.....	80
Şekil 6.41: 20 µm FESEM görüntüsü .....	94
Şekil 6.42: 100 µm FESEM görüntüsü.....	81
Şekil 6.43: 20 µm FESEM görüntüsü .....	94
Şekil 6.44: 100 µm FESEM görüntüsü.....	81
Şekil 6.45: 20 µm FESEM görüntüsü .....	95
Şekil 6.46: EDS analiz görüntüleri .....	95
Şekil 6.47: 100 µm FESEM görüntüsü.....	82
Şekil 6.48: 20 µm FESEM görüntüsü .....	96
Şekil 6.49: 100 µm FESEM görüntüsü.....	83
Şekil 6.50: 20 µm FESEM görüntüsü .....	96
Şekil 6.51: EDS analiz görüntüleri .....	97
Şekil 6.52: 100 µm FESEM görüntüsü.....	84
Şekil 6.53: 20 µm FESEM görüntüsü .....	98
Şekil 6.54: 100 µm FESEM görüntüsü.....	84
Şekil 6.55: 20 µm FESEM görüntüsü .....	98
Şekil 6.56: EDS analiz görüntüleri .....	98
Şekil 6.57: 100 µm FESEM görüntüsü.....	86
Şekil 6.58: 20 µm FESEM görüntüsü .....	99
Şekil 6.59: 100 µm FESEM görüntüsü.....	86
Şekil 6.60: 20 µm FESEM görüntüsü .....	100
Şekil 6.61: EDS analiz görüntüleri .....	100
Şekil 6.62: 100 µm FESEM görüntüsü.....	87
Şekil 6.63: 20 µm FESEM görüntüsü .....	101
Şekil 6.64: 100 µm FESEM görüntüsü.....	88
Şekil 6.65: 20 µm FESEM görüntüsü .....	101
Şekil 6.66: EDS analiz görüntüleri .....	102

## TABLO LİSTESİ

### **Sayfa**

Tablo1.1: Titanyum elementinin fiziksel ve mekanik özellikleri (Ivasyshy ve Aleksandrov 2008) .....	18
Tablo 3.1: Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Annual Book of ASTM Standards 2012) .....	33
Tablo 3.2: Eklemeli imalatta kullanılan şirketler ve özellikleri (Monzon ve diğ. 2015; Lee ve diğ. 2017) .....	45
Tablo 3.3: Metalik tozlarda eklemeli imalat parametrelerinin üretim hızına etkisi.....	47
Tablo 3.4: Eklemeli imalatta kullanılan bazı tozların üretim yöntemleri (Kurt, 2010) .....	49
Tablo 3.5: Eklemeli imalatta kullanılan bazı tozların özellikleri (Dawes ve Bowerman 2015) .....	50
Tablo 5.1: DLMS üretim işlem parametreleri.....	63
Tablo 5.2: Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi.....	63
Tablo 6.1: Eklemeli imalat üretim parametreleri için enerji yoğunluğu ve sertlik değerleri....	81
Tablo 6.2: 10 N, 15 N ve 20 N yük altında ortalama sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) değerleri.....	84

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ

<b><math>\alpha</math></b>	:	Alfa
<b><math>\beta</math></b>	:	Beta
<b>C</b>	:	Karbon
<b>H</b>	:	Hidrojen
<b>N</b>	:	Azot
<b>O</b>	:	Oksijen
<b>V</b>	:	Vanadyum
<b>W</b>	:	Watt
<b>Al</b>	:	Alüminyum
<b>Cu</b>	:	Bakır
<b>Eİ</b>	:	Eklemeli İmalat
<b>F<sub>n</sub></b>	:	Normal Kuvvet
<b>F<sub>s</sub></b>	:	Sürtünme Kuvveti
<b>HF</b>	:	Hidrojen Florür
<b>HS</b>	:	Yüksek hız
<b>Nd</b>	:	Neodymium Doped
<b>Mg</b>	:	Magnezyum
<b>Mo</b>	:	Molibden
<b>Sn</b>	:	Kalay
<b>Ti</b>	:	Titanyum
<b>TM</b>	:	Toz Metalürjisi
<b>UV</b>	:	Ultraviyole
<b>BDT</b>	:	Bilgisayar Destekli Tasarım
<b>CNC</b>	:	Bilgisayar Sayısal Kontrol
<b>SİP</b>	:	Sıcak-izostatik Presleme
<b>DED</b>	:	Doğrudan Enerji Depolama
<b>HRC</b>	:	Hardness Rockwell C
<b>EIE</b>	:	Elektron Işını Eritme
<b>EDX</b>	:	Enerji Dağıtıcı X-Işını
<b>MJF</b>	:	Multijet Eritme
<b>EYM</b>	:	Eriyik Yığıma Modelleme
<b>FESEM</b>	:	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>SLE</b>	:	Seçmeli Lazer Ergitme
<b>SLS</b>	:	Seçimli Lazer Sinterleme
<b>HNO<sub>3</sub></b>	:	Nitrik Asit
<b>CoCr</b>	:	Kobalt Krom
<b>DMLS</b>	:	Direkt Metal Lazer Sinterleme
<b>TAEİ</b>	:	Tel Ark Eklemeli İmalat

## ÖNSÖZ

Tezimin yürütülmesinde bilgisini, desteğini ve emeğini hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım değerli Doç. Dr. Yavuz KAPLAN'a ve yardımlarından dolayı sayın Dr. Öğretim Üyesi Berkay ERGENE'ye teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tezimin deneylerini gerçekleştirdiğim Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi personellerine katkılarından ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim. Tez çalışma sürecinde beni yalnız bırakmayan ve hep destek olan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

**Abdubaki YILDIRIM**

DENİZLİ, 2022

# 1. GİRİŞ

Titanyum elementi ilk olarak yaptığı araştırmalar sonucunda kimyager bilim insanı olan William Gregor tarafından bulunmuştur. Bu buluştan birkaç sene sonra, titanyum elementinin adı Yunan mitolojisinde geçen Titanların efsanevi kahramanlarından esinlenerek Martin Klaproth tarafından isimlendirilmiştir. İlk titanyum alaşımı 1940'ların sonlarında geliştirilmiştir. Ti6Al4V alaşımı piyasada en çok kullanılan titanyum alaşımıdır. Bu nedenle, son 60 yılda Ti6Al4V alaşımının yoğunluğunu ve özelliklerini iyileştirmek için birçok çalışma yapılmıştır (Leyens 2003).

Magnezyum ve alüminyum hafif metal olarak bilinmelerine rağmen titanyumun ( $4.5\text{g/cm}^3$ ) yoğunluğu da demirden ( $7.7\text{g/cm}^3$ ) oldukça düşüktür. Bu öz kütle titanyum ile mukayese edildiğinde demirin öz kütesinin yaklaşık %60'ı kadardır. Dünya çapında uluslararası pek çok ülkede bu materyalin önemini kabul etmekte ve araştırma, geliştirme ve uygulamalı araştırmaları desteklemektedir. Titanyum mühendislik, dişçilik ve tıbbi uygulamalar için özellikle ilgi çekici bir malzemedir (Subaşı ve Karataş 2012).

Titanyum düşük yoğunluk ( $4.5\text{ g/cm}^3$ ) yüksek mukavemet, yüksek yorulma direnci, çatlak ilerlemesine karşı direnç, yüksek korozyon direnci gibi birçok etkileyici özelliğe sahiptir. Titanyum alaşımları için en yüksek çalışma sıcaklığı ortalama  $550^\circ\text{C}$  ile  $700^\circ\text{C}$  civarlarındadır. (Ivasyshy ve Aleksandrov 2008; Chunxiang ve diğ. 2011).

Titanyumun sahip olduğu özellikler sebebiyle tıp, denizcilik, nükleer teknoloji, havacılık ve uzay teknolojisi gibi alanlarda tercih edilmektedir. Titanyumu yüksek biyoyumluluğu sayesinde implant malzemesi olarak tercih edilmektedir. Kapsamlı olarak titanyum alaşımını değerlendirdiğimizde, diğer biyoyumlu metallere kıyasla (paslanmaz elik, kobalt-krom alaşımları vb.) titanyum ve alaşımları uzun kullanım ömrü gibi mükemmel özelliklere sahiptir (Milan ve diğ. 2006).

Ti6Al4V alaşımının kullanımı, tüm titanyum alaşımları içinde %75-85 oranındadır. 1954 'te Amerika Birleşik Devletleri'nde Ti6Al4V alaşımının başarılı bir

şekilde geliştirilmesi, titanyum uygulamaları için ısı direnci, mukavemet, süneklilik, tokluk, şekillenebilirlik, kaynaklanabilirlik, korozyon direnci ve biyouyumluluk gibi özellikleri geliştirilmiştir. Diğer tüm titanyum alaşımları, Ti6Al4V alaşımının modifikasyonları olarak kabul edilebilir. Titanyum elementinin fiziksel ve mekanik özel nitelikleri Tablo 1.1'de verilmiştir. Dünya çevresinde birçok titanyum alaşımı geliştirilmiştir. Bunlardan en çok bilinenler; Ti-6Al-4V, Ti-5Al-2,5Sn, Ti-2Al-2.5Zr, Ti-32Mo, Ti-Mo-Ni, Ti-Pd, Ti-811, Ti-6242, Ti-1023, Ti-10-5-3, Ti-1100, BT9, BT20, IMI829, IMI834, 10-2-3, SP700, 15-3-3-3 ( $\beta$ -Ti olarak bilinir), 22-4 ve DAT51'dir. (Ivasyshy ve Aleksandrov 2008; Gonzalez ve diğ. 2008; Kearns 2005).



**Tablo1.1:** Titanyum elementinin fiziksel ve mekanik özellikleri (Ivashy ve Aleksandrov 2008).

<b>ÖZELLİK</b>	<b>TANIM VEYA DEĞER</b>
Atom Numarası	22
Atom Ağırlığı	47,90
Atom Hacmi	10,6 W/D
Kolavent yarıçapı	1.32 Å
İyonlaşma Potansiyeli	6,8282 V
Isıl Nöron Soğutma Kesiti	5,6 brans/atom
Kristal Yapısı	
Alfa ( $\leq 882,5$ °C)	Kapalı Paket Hegzagonal
Beta ( $\geq 882,5$ °C)	Hacim Merkezli Kübik
Renk	Koyu Gri
Yoğunluk	4,51 g/cm <sup>3</sup>
Erime Noktası	1668 ± 10 °C
Katılma/Sıvılaşma	1725 °C
Kaynama Noktası	3260 °C
Özgül ısı (25 °C de)	0.5223 kJ/kg.K
Isıl İletkenlik	11,4 W/m.K
Füzyon ısısı	440 kJ/kg
Buharlaşma ısısı	9,83 MJ/kg
Özgül Ağırlık	4,5 g/cm <sup>3</sup>
Sertlik	70-74 HRB
Kopma Dayanımı	240 MPa
Elastisite Modülü	120 Gpa
Poisson Oranı	0,361
Sürtünme Katsayısı	
40 m/min	0,8
300 m/min	0,68
Doğrusal ısıl genişleme katsayısı	8,41 µm/m.K
Elektrik iletkenliği	%3 IACS (Bakır = 100 IACS)
Elektriksel Direnç (20 °C)	420 nΩ . M
Elektronegatiflik	1,5 Pauling
Elektriksel direnç sıcaklık katsayısı	0,0026 / °C

Ti6Al4V biyouyumluluk ve mekanik özelliklerinden dolayı 1930 yılından beri biyomalzeme olarak en çok tercih edilen metaldir. Ti6Al4V alaşımının başarılı bir şekilde geliştirilmesi, titanyum uygulamaları için hava sanayi ve otomotiv sektörü gibi birçok bölümde çalışma alanı oluşturulması sağlanmaktadır. Başka bir özellik olarak, titanyum ve titanyum alaşımları temel problemleri olan zayıf mekanik nitelikleri sebebiyle sürtünme ve aşınmanın önemli olduğu mühendislik çalışmalarında kullanılmamaktadır (Dong ve Bell 2000; Long ve Rack 1998; Molinari ve diğ. 1997; Ayhan 2002).

Eİ teknolojileri 1980'li yıllarda ortaya çıkmıştır. Hızlı prototipleme teknolojisi ifadesi ilk defa prototip üretimine ihtiyaç olarak kullanıldıklarından bu şekilde ifade edilmiştir. Genel olarak teknolojiye en son uygulama alanı fonksiyonel ve karmaşık şekilli parçaların üretiminde uygulandığından ve katman katman üretildiği için eklemeli imalat olarak adlandırılmaktadır.

Eİ prosesinde üretim parametreleri belirlenerek sinterleme ve mikro yapının kalitesi kontrol edilebilir ve istenilen yüzey ve mekanik özellikleri elde edilebilir. Sonuç olarak istenilen özelliklerde üretim kalitesi artırılabilir, parçanın uygulama yerine bağlı olarak uygulanan işlem sonrası aşamalar azaltılabilir bunlara göre zaman kaybı ve maliyetler önlenir (Turhan 2016).

Bu çalışmanın amacı, geleneksel (haddeleme) ve eklemeli imalat yöntemi ile farklı parametrelerle üretilen Ti6Al4V numunelerin sertlik, mikroyapı ve tribolojik özelliklerinin karşılaştırarak eklemeli imalat ile üretilen parçaların endüstride kullanılabilirliğinin incelenmesidir. Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) yöntemiyle farklı lazer gücü (w), katman kalınlığı (mm), tarama hızı (mm/sn), enerji yoğunluğu (j/mm<sup>3</sup>) parametreleri kullanılarak Ti6Al4V alaşımının mikroyapı, sertlik, hacim kaybı, aşınma oranı ve aşınmış yüzey FESEM görüntüleri incelenmiştir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. Eklemeli İmalat İle Yapılan Çalışmalar

Eklemeli imalat (Eİ) yöntemlerinde polimerler, seramikler, metaller ve alaşımlar gibi çeşitli malzemeler ve bu malzemelerin birleştirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemeler üretilmektedir. Son yıllarda, tribolojik özellikleri iyi olduğu için metal tozlarının imalat süreçlerinde kullanımı artmıştır. Eklemeli imalatla en çok tercih edilen metal malzemeler paslanmaz çelik, kobalt-krom ve titanyum alaşımlarıdır. Metal malzemeler arasında, Ti6Al4V alaşımı, korozyon direnci, yüksek mukavemet/yoğunluk oranı ve yüksek sıcaklık direncinden dolayı tercih edilmektedir. Sağlık alanında ve havacılık sektöründe kullanılan önemli bir alaşımdır. (Song ve diğ. 2012; Calignano ve diğ. 2013).

Eİ teknolojilerinde kullanılan yöntemler, katmanların birbiriyle kaynama şekillerine bakıldığında bu özellikler eklemeli imalatı birbirinden ayırmaktadır. Daha ayrıntılı özellik olarak incelendiğinde üretim parametrelerinden olan lazer tarama hızı ve gücü, katman kalınlığı kullanılan malzeme bakımından çeşitlenme gösterilmektedir (Ning 2005).

DMLS işlem parametreleri; katman kalınlığı, lazer gücü, tarama hızı, çalışma alanı sıcaklığı, zaman aralığı özellikleri ile küçük parça üretimi ve birbirleriyle bağlantılı üretilen parçaların boyutsal doğruluğunu düzeltmek için çalışmalar yapılmıştır. Bir sinir ağı modeli oluşturulup boyutsal tasarım ile işleme parametreleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Kaliteli ürünler üretmek için sinir ağı modelini kullanarak daha uygun üretim yöntemlerini seçmenize olanak sağlamıştır (Wang ve diğ. 2007).

Ngo ve diğerleri (2018), Eİ ve diğer üretim yöntemleri arasındaki bağlantının önemini araştırmışlardır. Farklı üretim parametrelerinin çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve yoğunluk gibi malzeme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Parçanın üretim ölçülerinin ve üretilen parça mukavemetinin belirlenmesini etkileyen faktörlerin; katman kalınlığı, parça tasarımı ve imalatında kullanılan makine üretim hacmine ve optimize edilmiş kapasiteye, ağırlığa, maliyete ve destek fonksiyonlarına

göre belirlendiğini bildirmişlerdir. Katmanlı imalat yöntemleri, malzemeler ve bunların mevcut uygulamalardaki gelişimi hakkında tam bir inceleme yapılmıştır. Anizotropik davranış, sınırlamalar ve bilgisayar tasarımının katmanlı görünümü ile temel işleme kısıtlamaları irdelenmiştir (Ngo ve diğ. 2018; Doyle ve diğ. 2015).

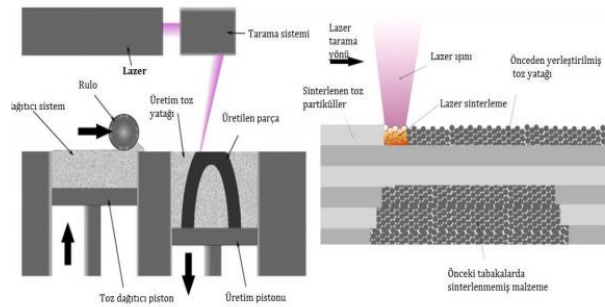
Shi ve diğ. (2017), Eİ yöntemlerinden SLE (Seçici Lazer Ergitme) ile TAEİ (Tel Ark Eklemeli İmalat) yöntemi kullanılarak üretilen Ti6Al4V metalinin tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Bu incelemelerde, mikroyapı gerilme özelliklerini analiz etmek ve bu numuneleri TAEİ numuneleri ile karşılaştırmak amacıyla TAEİ işlemi için altlık olarak yatay ve dikey SLE numuneleri kullanmışlardır. SLE yöntemi ile TAEİ yönteminin birleştirilmesiyle oluşturulan numunelerin çekme dayanımları, tek başına TAEİ ile üretilenlere göre üstün olduğu gözlemlenmiştir (Shi ve diğ. 2017).

Röttger ve diğ. (2016), DMLS ile üretilmiş 316 L paslanmaz çeliğin farklı yağlama şartı altında sürtünme ve aşınma hareketlerini incelemişlerdir. Geleneksel yöntemlerle üretilen örneklerle ve aynı yüzey işlemleri karşılaştırılmıştır. DMLS işleminde malzemenin yoğunluğunu artırarak mekanik özelliklerinin geleneksel üretimden daha iyi olabileceğini vurgulamışlar. Başka bir çalışmada; Farklı üretim parametreleriyle imal edilen 316L östenitik çeliğin imalat aşamasının, malzemenin mikro yapısı ve mekanik nitelikleri incelenmiştir. Üç farklı üretim yöntemi, sıcak izotermal presleme (SİP), Döküm ve DMLS' nin mikro yapısı ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. DMLS yöntemi Döküm veya SİP ile karşılaştırıldığında oluşturulan örneklerin fazla yoğunluğa ait olduğu, mekanik değerleri yeterince daha iyi bulunduğunu belirtmişlerdir (Röttger ve diğ. 2016; Zhu ve diğ. 2016).

Bandyopadhyay ve diğ. (2018) yeni geliştirilen eklemeli imalat teknikleri ile çeşitli malzemelerden çok işlevli parçalar meydana getirmiş bu sebeple araştırmacıların üzerinde durması gerektiğini vurgulamışlardır. Eİ gelişmelerini, polimer esaslı metal-metal ve metal-seramik kullanımlarının avantajlarını ve dezavantajlarını araştırmışlardır (Bandyopadhyay ve Heer 2018).

## 2.2. DMLS (Direkt Metal Lazer Sinterleme) Üretim Yöntemi İle İlgili Yapılan Çalışmalar

DMLS yöntemi, polimerler gibi bağlayıcı malzemeler kullanmadan seramik ve metal tozlarını doğrudan ısıtmak için bir lazer ışını kullanılır. DMLS yöntemi, tozların katı sinterlenmesine (SSS) dayanmaktadır. SSS işleminde toz, ergimedenden taneler arası birleşme meydana geldiği bir sıcaklığa ısıtılır. Bu sıcaklık genellikle  $T_m$  (ergime noktası) / 2 ile  $T_m$  arasındadır. Sinterleme sırasında, bitişik toz parçacıkları arasında yapışmalar oluşur, bu da parçacıklar arası yüzey enerjisini azaltır ve yeniden birleşir (Dahotre ve Harimkar 2008).



Şekil 2.1: DMLS (Direkt Metal Lazer Sinterleme) çalışma mantığı (Yan ve Yu 2015).

Benzer durum lazer sinterleme makinesiyle metal işleme için de geçerlidir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi makine lazer tarayıcının xy konturları oluşturduğu, partikül boyutu  $50\mu\text{m}$ 'ye eşit veya daha büyük olan tozlarla dolu bir üretim odasından oluşur. Üretim odasının alt kısmında z düzeyinde ayarlanabilen hareketli piston bulunmaktadır. Toz yatağının üst kısmı üretim alanı olarak isimlendirilir ve katmanlar orada meydana getirilir. Üretim odası, lazer gücünü en aza indirmek için önceden ısıtılır ve oksidasyonu önlemek için süreç koruyucu gaz atmosferinde gerçekleştirilir (Yan ve Yu 2015).

Belirgin bir çalışmada istenen niteliklere ulaşmak amacıyla materyal tercihi önemlidir. Uygun değerlere ulaşmak için proses parametrelerini de göz önünde bulundurulmalıdır. Günümüzdeki çalışmalarda DMLS prosesinde pek çok alaşımlardan biri olan Titanyum alaşımları, tercih edilmesi sebebiyle en çok yararlanılan alaşımlardır. Titanyum alaşımının geleneksel imalat yöntemleriyle

işlenmesinin zor olmasından dolayı DMLS yönteminden çokça yararlanılmaktadır. DMLS/SLS'nin bir başka avantajı, titanyum ve diğer metal tozlarını ek alet kullanmadan doğrudan işleme yeteneğidir. Döküm kalıbı veya modeli oluşturmaya gerek olmadığı için üretim süresi ve fabrika çıkış fiyatları düşer. Ek olarak, döküm işlemi kullanarak karmaşık şekillerin üretimi zordur. DMLS/SLS yöntemleri ile kompleks parça üretimleri daha kolaydır. Uyumlu parametreler oluşturmak için elde edilen parçaların yüksek doğruluğunun önemli olduğunu belirtmişlerdir (Gibson ve Rosen 2010; Ning 2005).

Yüksek lazer gücü ve düşük tarama hızı yüksek enerji yoğunlukları oluşturularak yüksek yoğunluklu ve dayanıklı parçalar meydana getirir. Bununla birlikte, daha yüksek enerji yoğunlukları aşırı sinterleme ile sonuçlanır. Daha fazla lazer gücü, her seferinde daha büyük bir toz eritme bölgesi oluşturur ve bu da parçanın doğruluğunu etkiler. Ayrıca lazer tarama hızı arttıkça sinterlenmiş tabakanın yüzey pürüzlülüğü de artar. Bu nedenle lazer gücü ve tarama hızı için uygun değerlerin elde edilmesi önemlidir (Gebhardt 2011).

Lazerle direkt metal sinterlemede, farklı teknik uygulamalarını geliştirmek için düşük yüzey kalitesi, düşük korozyon direnci, sünek yapı ve gözenekliliğin ortak eksiklikleri dikkate alınmıştır. Elektro kaplama ve yarı parlak nikel kaplama tek başına veya aynı anda kullanılarak istenilen performansa en yakın sonuç alınabilir. Metallerin direkt lazer sinterlenmesi sürecinde C, Cu, Mo ve Ni gibi farklı elementlerin karışımından oluşan bir demir tozu geliştirilmiştir. Çok bileşenli demir tozunun sinterleme davranışını, mekanik özelliklerini ve mikro yapı özelliklerini inceleyerek, lazer tarama aralığı ve tarama tipi gibi proses parametrelerinin optimize edilmesiyle yüksek yoğunluklu parçaların üretilebileceği belirtilmiştir (Tay ve diğ. 2002; Simchi ve diğ. 2003).

Direkt lazer metal sinterlemenin bir ürünü olan paslanmaz çeliğin üretim sürecinin etkisini incelemiştir. Araştırmalar, belirli yüzey ve mekanik özelliklerin elde edilmesi için üretim sonrası süreçlerin gerekli olabileceğini göstermiştir. Elde edilen ürünün mekanik özelliği, enerji yoğunluğu ve farklı üretim parametreleri kullanılarak belirlenebileceği vurgulanmıştır. Fakat yüzey pürüzlülüğü

enerji yoğunluğunun değerine değil, lazer ışığının miktarına ve tarama hızına bağlı olduğunu belirtilmiştir. Bu tasarlanan ürünün malzemesine bağlı olarak doğru proses parametreleri kombinasyonunu bulma ihtiyacını vurgulanmıştır (Pal ve diğ. 2016).

Yu (2005), DMLS üretim parametrelerinin araştırmasında, yapılan deneyler sonucunda lazer gücü arttıkça tarama hızı, tarama aralığı ve tabaka kalınlığının düştüğü sonucuna ulaşmıştır. Yu'nun (2005) değerlerine göre Simchi (2006), değerlerinin benzerliği incelenmiştir. Sonuç olarak, lazer gücünün artmasıyla çekme dayanımının arttığı, tarama hızı, tarama aralığı ve tabaka kalınlığının artmasıyla da çekme dayanımının düştüğü sonucuna varılmıştır. Yu (2005), DMLS'de artan lazer gücünün ve artan enerji yoğunluğunun toz parçacıkları arasındaki temas alanını arttırdığını ve artan sinterlenmiş bağ oluşumunun (boyun) gözenekliliğinin azalttığını ve bunun 190 mm ile sonuçlandığını bildirmiştir. İşlem mesafesi ve tabaka kalınlığı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığını belirlemiştir. Ayrıca artan lazer kuvvetinin ya da azalan işlem hızının, parçanın sinterleme yönü tarafınca yapısal değişimini (büzülme) arttırdığını bildirmiştir. Bu büyük yapısal farklılaşma nedeniyle sinterleme ve termal büzülmenin, metal parçacıkları sinterlenirken daha fazla lazer enerjisi emmesi nedeniyle oluştuğunu ifade etmektedir (Yu 2005; Simchi 2006).

Bilgin ve diğ. Geleneksel döküm, talaşlı imalat ve direkt metal lazer sinterleme gibi üç farklı yöntemle üretilen Co-Cr malzemelerinin gerilme mukavemetini test etmişlerdir. Metallerin geleneksel döküm ve direkt lazer metal sinterlenmesi (DMLS) ile üretilen Co-Cr numuneleri benzer çekme dayanımı gösterirken, talaşlı imalat ile üretilen malzemelerin daha yüksek dayanım gösterdiğini belirtmişlerdir (Bilgin ve diğ. 2016).

DMLS yöntemiyle gözenekli AISI 316 paslanmaz çelik malzemeler üretmek için enerji yoğunluğu 3400-6000 J/m ve işlem hızı 0,06 m/s'den az olmalıdır. Gözeneklilik, daha düşük lazer gücü, daha yüksek toz tabakası kalınlığı ve tarama hızı ile artar. Çalışma sonucunda optimum parametreler kullanılarak üretilen parçalar %21-55 gözenekli yapıya ve 152 MPa çekme dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir (Gu ve Shen 2008).

Eİ ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde son yıllarda yapılan çalışmaların arttığını görülmektedir. Genel olarak farklı üretim parametrelerinin Eİ ile üretilen parçanın mukavemetine etkisi incelenmiştir. Fakat tribolojik özellikleri alanında yapılan çalışmaların yeterli olmadığı görülmüştür. Yapılacak tez çalışması ile DMLS yöntemi ile üretilen parçaların tribolojik özellikleri incelenmesi hedeflenmiştir.

### **3. EKLEMELİ İMALAT**

Eİ metalleri, plastikleri, kompozitleri ve organik malzemeleri kullanarak bir nesnenin üç boyutlu (3B) geometri verileriyle üretilen pratik bir imalat yöntemidir. Eskiden hızlı prototipleme olarak bilinen eklemeli imalat, öncelikle prototip üretiminde kullanılan bir yöntemdir. 1980'lerde stereolitografi (Stereolitografi-SL) teknolojisi kullanılarak oluşturulan bu metot, 3B Systems firması tarafından ilk defa tanıtılmıştır. Pek çok Eİ metodu geliştirilen dönemde birçok patent başvurusu yapılmıştır. Şirketler gelişen bu teknolojileri ticarileştirmiştir. 1990'larda Helysis Şirketi lamine nesne imalatı (Laminat Nesne İmalatı -LOM), Stratasys Şirketi eriyik yığarak modelleme (Eriyik Biriktirme Modelleme -EYM), DTM Şirketi seçmeli lazer sinterleme (Selective Laser Sintering-SLS), EOS Şirketi direkt metal tozu lazer sinterleme (Direkt Metal Lazer Sinterleme -DMLS), Cubital Şirketi katı zemin kütleme (Katı Zemin Kütleme-SGC) ve Soligen Şirketi 3B baskı (Üç Boyutlu Baskı-3BP) gelişmeleri ticarileştirerek piyasaya sürmüşlerdir (Danforth ve Safari 1996; Wohlers ve Gornet 2014; Jacobs 1992).

3B baskı esasen Massachusetts Institute of Technology'den (MIT) lisanslı bir katmanlı modelleme teknolojisidir. Sıvı bağlayıcı, nozülden püskürtülür ve katmanlama için kesme yazılımı tarafından oluşturulan 3 boyutlu verilere dayalı olarak toz katmanına hareket eder. Toz tabaka daha sonra katman kalınlığına indirilir, toz malzeme serilir ve mevcut tabakanın üzerine yeni bir tabaka oluşturmak için geometri verilerine göre katılaştırma işlemi tekrarlanır. Bu şekilde tüm parça üretilir ve tozlar temizlenerek işlem sonlandırılır (Yan ve Gu 1996).

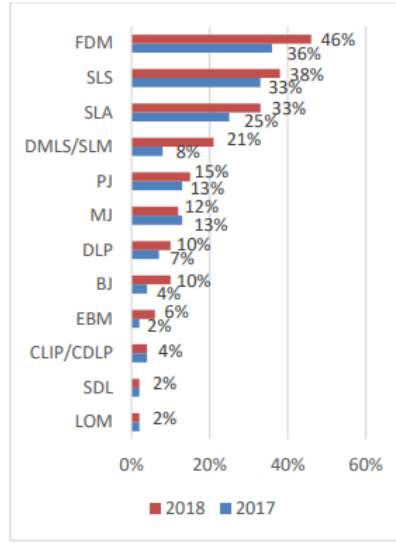
Ayrıca bu teknoloji iki boyutlu yazıcılarda uygulanan inkjet teknolojisine benzediği için üç boyutlu baskı, bu teknolojiyi kullanan makinelere ise 3 boyutlu



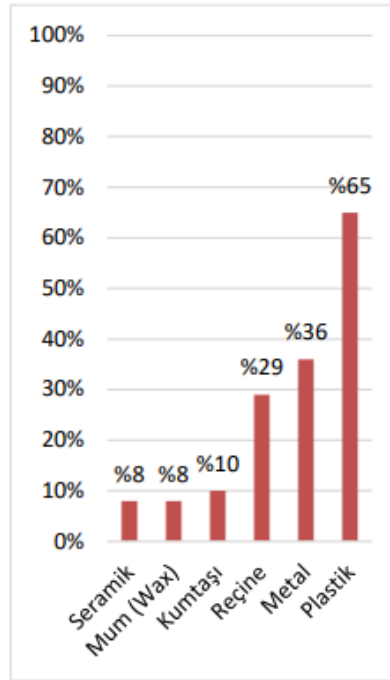
yazıcılar denilmektedir. Daha sonra masaüstü bilgisayarlarda kullanılan teknolojinin aynı mantığı geliştirilerek pek çok kişinin evinde ve ofisinde kullanımına sunulmuştur. Bu tekniklere dayanan üretim yöntemlerine genellikle 3B baskı denir. Çeşitli teknolojileri birleştiren 3B baskı, dijital ortamda tasarlanan nesnelere laminasyon yoluyla fiziksel nesnelere dönüştürülmesini sağlayan uygun bir üretim yöntemidir. 3B baskı laminasyonunun temel mantıksal üretim süreci, CNC frezeleme ve torna tezgâhları gibi bilgisayar destekli üretim süreçlerine dayanan işleme yönteminin tersidir. İşleme, bir malzeme bloğunun parçalarını keserek ve çıkararak 3B nesnelere elde etmenizi sağlar. 3B baskı, sürekli olarak üretilen malzeme katmanlarını birleştirerek tasarlanan 3B nesnelere elde edilmesini sağlar. Bu nedenlerle, çok katmanlı üretim süreci, daha az malzeme ile 3B nesnelere elde edilmesini sağlar. 3B baskı teknolojisini tercih etmenizin temel nedeni, üretim hattı kurmak veya kalıp tasarlamak gibi ek üretim adımlarına gerek duymadan tasarımınızı hızlı bir şekilde üretime geçirebilmenizdir. Aynı zamanda, geometrik hassasiyet ve yüksek çözünürlükle 3B üretebilen ev ofis 3B yazıcılarının geliştirilmesi, bu teknolojiyi diğer çıktılarının diğer üretim yöntemlerinden etkin bir şekilde ayırt etmek için çok katmanlı üretimi teşvik eder (Danforth ve Safari 1996).

Eklemeli imalat katman modelleme konseptinin sağladığı üretim esnekliği, serbest biçimli yüzey nesnelere üretim için büyük faydalar sunar. 3B baskı özellikli yazıcının bir başka avantajı da bulut tabanlı üretime olanak sağlamasıdır. Bu sayede sipariş yazıcıya gönderilerek, kalıp veya hat kullanılmadan doğrudan üretilen 3 boyutlu yazıcılar ile hızlı üretime olanak sağlar. Sensörler, kablosuz iletişim, robotik kollar ve bulut teknolojisi gibi teknolojileri içeren 3 boyutlu yazıcılar, Endüstri 4.0'da çok önemli bir yer tutacaktır. 3B baskının tüm avantajlarına rağmen şu an için seri üretime uygun değildir. Üretilen parçalar 3B yazıcının boyutu ile sınırlıdır ve yavaş üretim hızı bu yöntemin kullanımını sınırlar. Ayrıca 3B baskıda uygulanan ürün türleri de kısıtlıdır. Fakat belirli bir süreden sonra çeşitli materyallerin kullanılacağı yeni yöntem ve teknolojiler geliştirilebilir. Günümüzde 3B baskı üretiminde çok çeşitli plastikler, metaller, kompozitler ve organik malzemeler kullanılabilir. Scupteo'nun 3B Baskı Durumu raporuna göre, 2018 için kullanıcılar tarafından tercih edilen 3B baskı teknolojileri ve malzemeleri sırasıyla Şekil 3.1 ve 3.2'de

gösterilmektedir (Sürmen 2019).



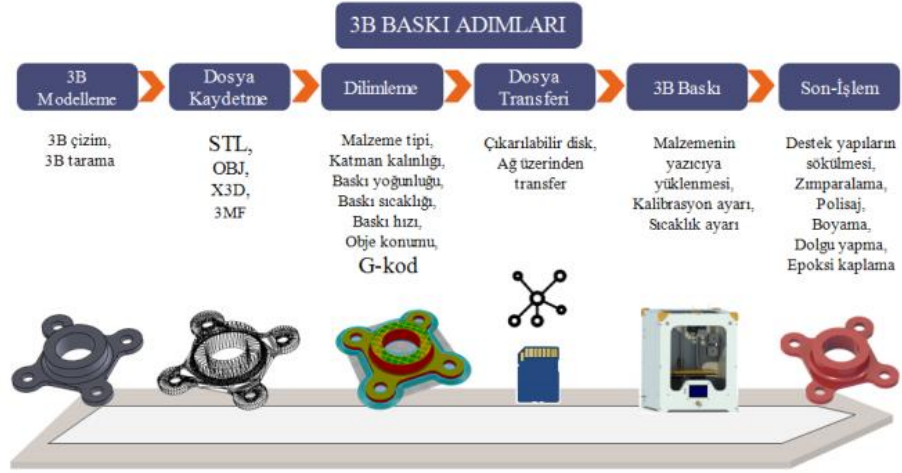
Şekil 3.1: 2017-2018 yıllarında kullanılan 3B yazıcı teknolojileri (Sürmen 2019).



Şekil 3.2: 2018 yılında en fazla tercih edilen 3B baskı malzemeleri (Sürmen 2019).

### 3.1 Eklemeli İmalat İşlem Adımları

Eklemeli imalat üretim aşamaları genellikle altı temel adımdan oluşmaktadır.



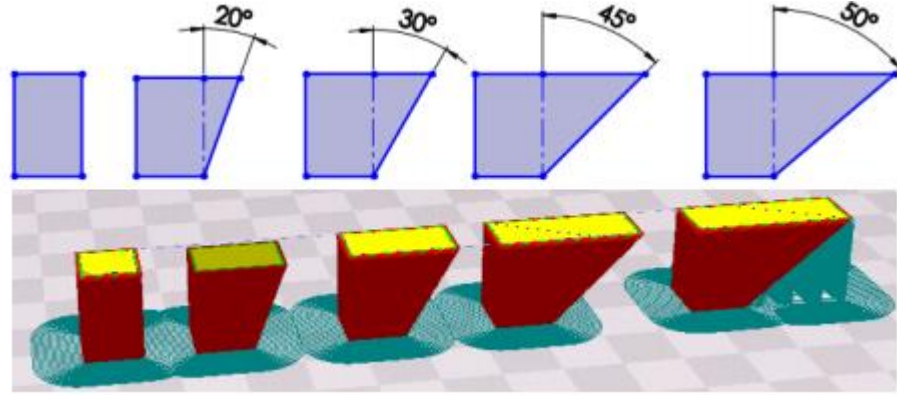
**Şekil 3.3:** Eklemeli imalat aşamaları (Wohlers ve Gornet 2014).

Eİ üretim sisteminde bir parça üretmek için ilk işlem aşaması olarak üretilecek parça bilgisayar ortamında 3 boyutlu çizimi yapılmaktadır. Stl formatı ile kaydı alınmaktadır. Sonraki aşamada parçanın üretiminin yapılabilmesi için bilgisayar ortamında parça katmanlara ayrılmaktadır. Bu oluşturulan parça makineye taşınmaktadır. Makine de hangi özelliklerde üretilmesini isteniyorsa onun ayarları yapılmaktadır. Parça üretimi bittiğinde parça üzerindeki destekler temizlenmektedir. Yüzeysel parlatma işlemleri uygulanmaktadır. Kaplama gibi bir işlem isteniyorsa son işlem olarak onlar uygulanmakta ve istenilen parçayı elde edilmektedir. Eklemeli imalat aşamaları Şekil 3.3'te görülmektedir (Turhan 2016).

### 3.1.1 3B Modelleme

3B üretim yapılması için, öncelikle üretilecek parçanın 3B modeli oluşturulmaktadır. Bu model, çeşitli bilgisayar destekli tasarım (BDT) programları ve 3B tarama sistemleri (lazer, optik, RM, CT, fotoğraf) kullanılarak yapılabilir. 3B üretim yönteminde kullanılan hassasiyet ile tasarım yapılarak daha verimli sonuçlar alınabilir. Destek yapılarını kullanan teknolojiler için genellikle 45° kuralı geçerlidir. Bu kurala göre 45°'ye kadar uzanan bir çatı eğimi yapısal destek gerektirmez ve 45°'den sonra desteğe takılabilir (Şekil 3.4). Modelleme yaparken 45° kuralının göz önüne alınması, zamandan ve malzemedan kazanç sağlamaktadır. Eşzamanlı bir baskı

montajında hareketli parçalar arasındaki mesafeyi belirlerken, 3B yazıcının yetenekleri göz önünde bulundurulmalıdır. Modeli 3B tarama sistemine aktardıktan sonra modeli derinlemesine incelemeniz gerekir. Yüzey kusurluysa, modeli mesh kurtarma yazılımı ile değiştirmeniz ve boyutları istenilen ölçülere göre kontrol edilmesi gerekmektedir (Turhan 2016).



Şekil 3.4: 45° kuralına göre destek bölgeler (Jacobs 1992).

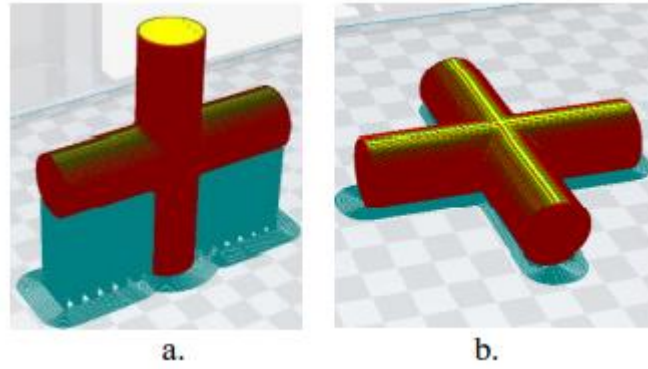
### 3.1.2 Dosya Türü ve Kayıt

3B modeli istenilen ölçülerde ve şekilde oluşturulduktan sonra eklemeli imalat yapılacak makineye bu çizim aktarılmaktadır. Çizimi makineye aktarmak için makinenin istediği STL formatına dönüştürmektedir. 3B baskı için kullanılan en yaygın dosya formatı STL'dir. Ayrıca, birçok yazılım .obj, .X3B, .3MF gibi diğer biçimleri tanır. Dosyayı dönüştürdükten sonra modeli düzenlenemez, ancak modelin boyutunu büyütebilir / küçültebilir ve modeli yeniden yönlendirebilir. Ancak, son zamanlarda STL formatının modelini sınırlı ölçüde değiştirebilen bir yazılım (thinkerCAD) geliştirilmiştir (Turhan 2016).

### 3.1.3 Dilimleme

Makinenin istediği formatta kaydedilen model, 3B baskı öncesi 3B kesim yazılımına aktarılacaktır. Yazılımın amacı, 3B parça üretimini katman katman ayırmak ve 3B yazıcının parçaları oluştururken ihtiyaç duyduğu G kodlarını elde etmektedir. Bu yazılımı kullanarak, 3B yazıcı tezgahında nesnenin konumunu ve

yönünü, katman kalınlığını, malzeme türünü, sıcaklığını, baskı yoğunluğunu ve baskı hızını ayarlanabilmektedir. Parçaların baskı plakası yapısındaki tarafı, baskı zamanını ve sarf ürün tutarıyla doğrudan bağlantılıdır. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, parçanın yatay konumu daha düşük bir destek yapısı gerektirmektedir. Parça konumu, baskıdan sonra destek yapısını temizlemek için gereken süreyi ve çabayı da etkilemektedir (Sürmen 2019).



**Şekil 3.5:** Parçanın dilimleme şekline göre konumlandırılması

- a. Dikey olarak konumlandırılan parça. (Baskı süresi 2 sa 21 dk, harcanan malzeme miktarı 21 gr'dır).
- b. Yatay olarak konumlandırılan parça. (Baskı süresi 2 sa 10 dk, harcanan malzeme miktarı 17 gr'dır.) (Sürmen 2019).

Eİ imalat üretimi için istenilen tüm parametreler yapıldıktan sonra model bölünecek ve G kodu üretilmektedir. Simülasyon ile ön izleme yapılarak, modelinizin üretim aşamalarını üretimden önce takip etmenizi sağlamaktadır. Bu nedenle, 3B baskı işleminde olası hataları önceden tahmin edilebilmekte ve zamanında önlem alınabilmektedir (Sürmen 2019).

### 3.1.4 Dosya Transferi

3B kesim yazılımından elde edilen G kodlarını Eİ makinesine aktarma işlemi taşınabilir bellek veya kablolu/kablosuz ağlar üzerinden 3B yazıcılara aktarılabilmektedir. Bu nedenle eklemeli imalat makinesi (3B yazıcı) satın almadan

önce kart okuyucu, kablolu giriş ve kablosuz ağ erişimi gibi özellikleri kontrol edilerek alınmaktadır (Turhan 2016).

### **3.1.5 3B Baskı**

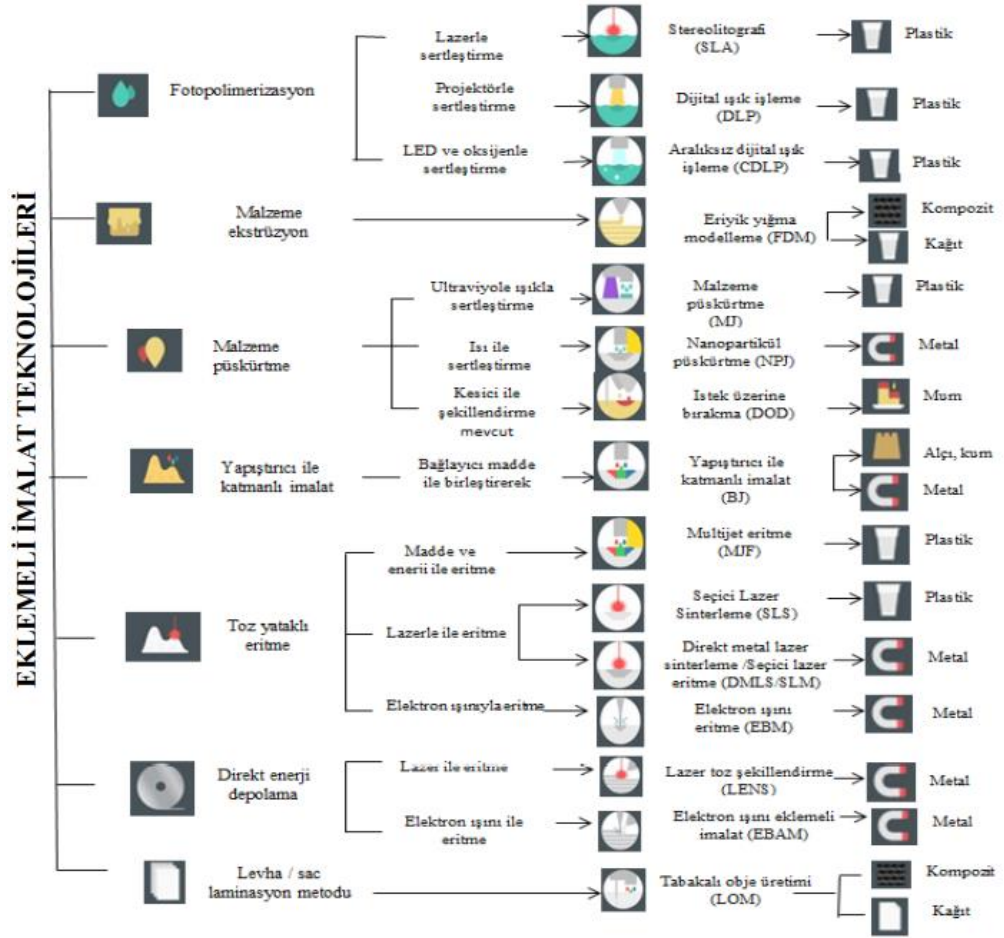
Eİ üretimine başlamadan önce makinenin düz bir zeminde olmasına dikkat edilmektedir. Makine kalibrasyonları ayarlanmaktadır. Dosya aktarımı tamamlandıktan sonra makine sıcaklık değerleri istenilen dereceye geldiğinde makine üretime başlamaktadır. Baskı işlemi, kullanılan 3B baskı teknolojisine bağlıdır ve baskı süresi değişebilmektedir. Üretim süresi, belirtilen yazdırma hızına, malzeme yoğunluğuna, şekline ve boyutuna, kullanılan kâğıt miktarına ve gereken çözünürlüğe bağlı olarak değişmektedir (Sürmen 2019).

### **3.1.6 Son İşlem**

Üretim (yazdırma) işlemi tamamlandığında parça 3B yazıcı tablasından alınır ve destek sistemi temizlenir. Yüzeysel parlatma işlemleri uygulanır. Kaplama gibi bir işlem isteniyorsa son işlem olarak onlar uygulanır ve istenilen parçayı elde edilmiş olunur (Turhan 2016).

## **3.2 Eklemeli İmalat Yöntemleri**

Genel olarak, eklemeli imalat üretim şekline göre sınıflandırılmaktadır. Eklemeli imalat üretim yönteminde kullanılan malzemeler eriyik, toz, tel ve sac gibi biçimlerde bulunabilmektedir. Üretim yapımı anında üretilen yapının katılaşması için pekiştiren ürünün biçimine göre belirli bir seride eriyik katılaşması ve katı durumda bütünleşme biçiminde yapılandırılır.



**Şekil 3.6:** Eklemeli imalat yöntemlerinin ASTM F42 standardıyla sınıflandırılması (Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies 2012).

Temel olarak, ASTM'nin Lamine Modelleme ekibi, bu dinamik yüksek teknoloji üretim yöntemini ASTM F42'ye (Annual Book of ASTM Standards 2012) göre yedi kategoride sınıflandırmıştır. Şunları içerir; Fotopolimerizasyon (photopolymerization), Malzeme püskürtme (material jetting), Bağlayıcı püskürtme (binder jetting), Malzeme ekstrüzyon (material extrusion), Toz yataklı eritme (powder bed fusion), Levhalı sac yöntemi (sheet lamination process) ve Direkt enerji depolama (directed energy deposition) teknolojileridir (Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies 2012). Dizgisel olarak, bu metotlar Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Bu bölümde, ASTM F42'de belirtilen yedi alt başlık altında Tablo 3.1'de katmanlı modelleme tekniklerini incelenmiştir.

**Tablo 3.1:** Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Annual Book of ASTM Standards 2012).

<b>Kategori</b>	<b>Teknoloji</b>	<b>Kullanılan Malzeme</b>	<b>Güç Kaynağı</b>	<b>Avantaj ve Dezavantajları</b>
Malzeme Ekstrüzyon	Eriyik Yığıma Modelleme (EYM)	Termoplastik Metal Macunu Seramik Macunu	Isıl Enerji	Ucuz makine fiyatları Malzeme çeşitliliği fazladır Kötü yüzey kalitesi
Toz Yataklı Ergitme	Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS) Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) Seçmeli Lazer Ergitme (SLE) Elektron Işınlı Ergitme (EIE)	Poliamid/Poli mer Atomize metal tozları (paslanmaz çelik,Kobalt krom,Titanyum Ti6Al4V),Seramik tozları	Yüksek Güçlü Lazer Işını	Yüksek doğruluk ve detay Yüksek özgül dayanım ve rijitlik Destek malzemesi gerekli değil Kötü yüzey kalitesi Zaman alıcı
Fotopolimerizasyon	Stereolitografi (SLA)	Fotopolimer, Seramikler(Alüminyum oksit, Zirkon)	Foton Enerjisi	Yüksek işleme hızı Yüksek yüzey kalitesi Yüksek ekipman ve hammadde maliyeti
Malzeme Püskürtme	Polijet Mürekkep Püskürtme Yazdırma	Fotopolimer	Elektrik Enerjisi	Çoklu malzeme üretme Yüksek yüzey kalitesi Düşük dayanımlı malzemeler
Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat	Dolaylı Mürekkep Püskürtme Yazdırma	Polimer tozu(alçı tozu, reçine), Seramik tozu, metal tozu	Elektrik Enerjisi	Renkli baskı yapabilme imkanı Malzeme çeşitliliği fazladır Üretilen parçalarda yüksek gözeneklilik miktarı
Levha / Sac Laminasyon	Katmanlı Nesne üretim (LOM)	Plastik film, Metal plaka, Seramik Şerit	Lazer Işını	Yüksek yüzey kalitesi Düşük malzeme, ekipman ve işletme maliyeti
Direkt Enerji Depolama	Elektron Işın Kaynaklama (EBW) Lazerle İşlenmiş Net Şekillendirme (LENS)	Erimiş Metal Tozu	Lazer Işını	Hasara uğramış parçaların tamirini mümkün kılar Fonksiyonel olarak kademelendirilmiş parçaların üretimi mümkündür Üretim sonrası işlemler gereklidir

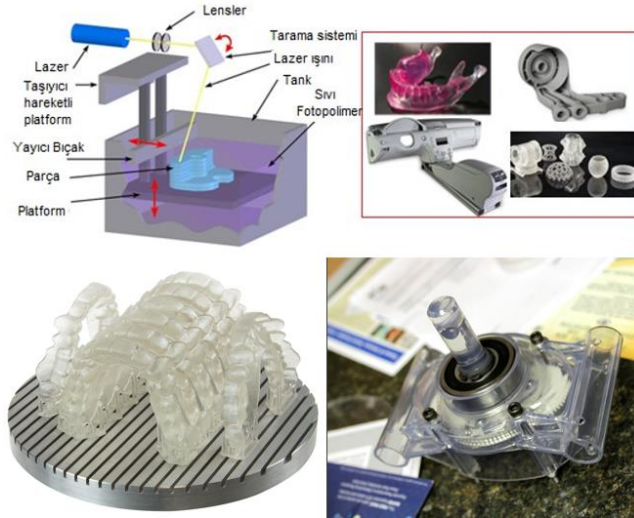


### 3.2.1 Fotopolimerizasyon

Fotopolimerizasyon, kısa sürede ilk olarak kaplama ve baskı sektöründe ve birçok ticari sektörde yaygın olarak kullanılmaya başlandı. Diş hekimliğinde kağıt ve kartonun parlak kaplamasına ek olarak, kürlenmiş ve kullanıma hazır dişlerde olası çürümeyi önlemek için ışıkla sertleşen reçineler kullanılmıştır. Fotopolimerizasyon, ultraviyole (UV) radyasyonla foto reaksiyona girebilen ve kimyasal olarak reaksiyona girebilen sıvı reçineler veya fotopolimerik malzemeler kullanılmıştır (Gibson ve diğ. 2015).

Fotopolimerizasyon uygulaması Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Bu yapılan üretimde, lazer ve optik yardımıyla üretim gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, üretimin yapılacağı tabla, katman kalınlığı kadar reçine haznesinin üstünden aşağı indirilmiştir ve UV ışığı sayesinde reçineyi üç boyutlu katı hale getirmiştir. Reçinenin başlangıç katmanı katılaştıncaya, temel incelik ve katılan tabakanın üzerine ek tabakalar inşa edilmeye devam edilir. Son olarak reçine ile doldurulan hazne boşaltılır ve parça geri çekilir. Parçanın oluşmasında kullanılan katman kalınlığı 0.025 - 0.5 mm'dir (Chua ve diğ. 2010; Additive Manufacturing Research Group 2017).

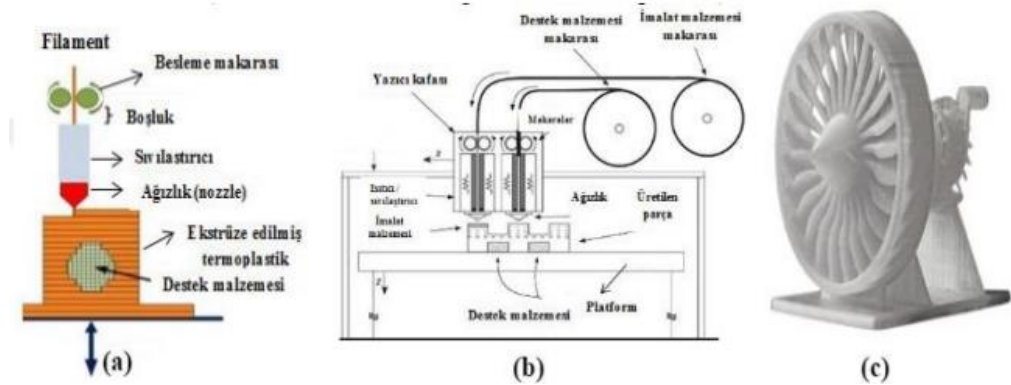
Eİ çeşitlerinden olan Fotopolimerizasyon işleminin faydaları; yüksek düzeyde ölçüsel hassasiyeti, yüzey kalitesi ve hızlı bir üretim zamanı meydana gelirken, fakat; pahalı olması, üretim zamanının uzun olması, reçine malzemelerin kullanımının kısıtlı olması ve imal edilen parçaların yüksek mukavemetli olması için destek yapı kullanımına ihtiyaç duyulması gibi dezavantajları mevcuttur.



Şekil 3.7: Fotopolimerizasyon sisteminin şematik gösterimi ve üretilen parçalar (Özsoy ve Duman 2017).

### 3.2.2 Malzeme Ekstrüzyon

Şekil 3.8'de gösterilen malzeme ekstrüzyon imalat işleminde, sıvılaştırılan ve platformu üzerine dökülen besleme silindiri tarafından sağlanan liflerin hareketi, x ve y yatay olarak hareket edebilen bir nozul ile z eksenini boyunca hareket ettirilebilmektedir. Eriyik yığın modellemesi (EYM) olarak da bilinen bu yöntem, polimerlerden, reçinelerden ve kompozitlerden yapılmış lifler tercih edilmektedir (Additive Manufacturing Research Group 2017).



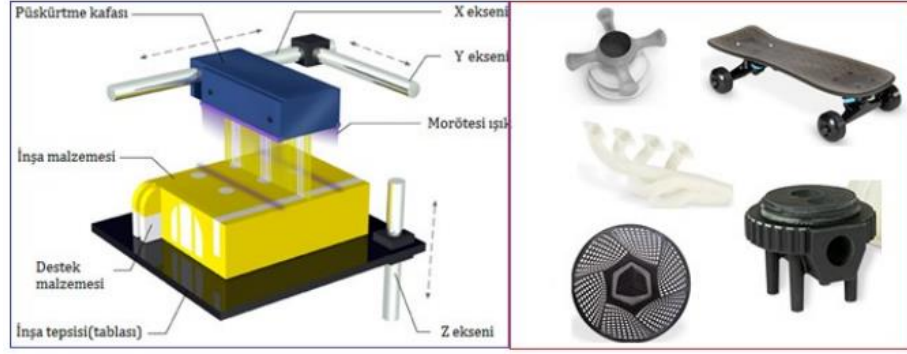
Şekil 3.8: a) malzeme ekstrüzyon yöntemi şematik gösterimi (Dreams 2017), b) çift ağızlı EYM yöntemi (Gibson ve diğ. 2010), c) EYM ürünü (Marhellabs 2017).

Eİ Araştırma Grubu (2017), yöntem olarak, enjeksiyon kalıplamaya göre düşük hacimli ürünler üretmenin daha uygun bir yöntemi olarak tanımlamıştır. Chua ve diğerleri (2010), EYM metoduyla iyi bir yüzey kalitesi oluşturmak için birçok etkene

bakılması gerektiğini belirtmişlerdir. Bunlardan en önemli etken; malzemenin içinden geçen nozülün kare olmasıdır. Katman kalınlığının 0.178 mm - 0.356 mm arasında olduğunu vurgulamışlardır. Anizotropik özelliklerinden dolayı EYM ile yapılan parçaların mekanik özellikleri tabaka yönüne bağlı olarak değişmektedir. Tabaka yönü uygulanan çekme yüküne 90° açı yapıyorsa ürün mukavemeti düşüktür, Tabaka yönü uygulanan çekme yüküne paralel ise ürün mukavemeti daha yüksektir. Katman, ürün mukavemeti düşüktür, eğilme yükü tabakaya dik ise, ürün mukavemetinin daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu söylenir. Krar ve diğerleri (2003) de bu metodu diğer Eİ metotlarıyla karşılaştırmışlar ve üretim hızının düşük olduğuna ve nihai ürünün kalitesinin malzemenin kalınlığına bağlı olduğuna inanmışlardır. Gibson ve diğerleri (2010), yüksek boyutsal doğruluk gerektiren ürünler üretilirken yerçekimi ve yüzey geriliminin dikkate alınmasıyla ve net sonuçlar bulmak için nozuldan çıkan malzemenin belirli bir basınç ve hızda olması gerektiğinin önemi vurgulanmıştır (Redwood 2017).

### **3.2.3 Malzeme Püskürtme**

Bu yöntem 2B mürekkep püskürtmeli yazıcıya benzer ve çeşitli renklerde polimerler, mumlar ve metaller kullanılarak üretilmektedir. Yani levha, sürekli veya isteğe bağlı bir yöntemle üretim platformunda yatay olarak hareket eden nozullardan malzeme püskürtülerek üretilmiştir ve plakalar ultraviyole (UV) kullanılarak kürlenmiştir. Bu ilkenin yapısı Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Gördüğümüz gibi, baskı kafası önce yapı platformuna yerleştirilmiş ve malzeme, ısı veya piezoelektrik kullanılarak baskı kafasından platform üzerine damlacıklar halinde bırakılmaktadır. Alt tabaka üzerine düşen damlacıkların UV ışığı ile katılaştırılmasıyla birinci katman oluşturulmaktadır ve diğer katmanlar da aynı prensibe göre bu katman üzerine yapılmaktadır. Son işlemde, daha dayanıklı bir yapı elde etmek için katmanların daha fazla soğutulduğu veya UV ışığı ile külendiği belirtilmiştir (Additive Manufacturing Research Group 2017).



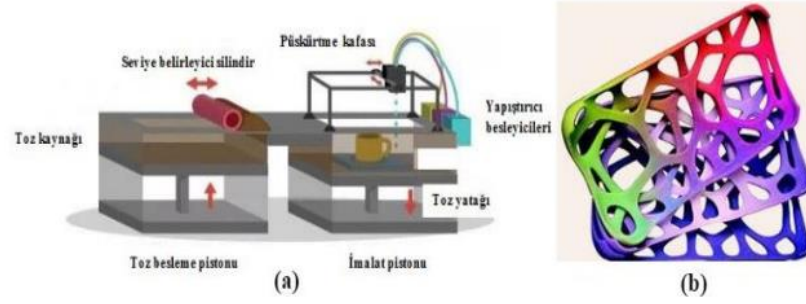
Şekil 3.9: Malzeme püskürtme sisteminin şematik gösterimi ve üretilen parçalar (Özsoy ve Duman 2017).

Malzeme püskürtme prensibi temelinde geliştirilen Partikül püskürtme Metodu (NPJ), metal nanopartiküller içeren özel bir sıvı karışımı mürekkep kartuşu şeklinde bir yazıcıya yükler ve karışımı bir alt tabaka üzerine püskürtür. İnce damlacıklar halinde püskürtülen karışımla ürün elde edilmektedir. Sistem, katmanları katılaştırmak için UV ışığı kullanılmıştır ve bu süre zarfında oluşan ısı ile karışımdaki sıvıyı buharlaştırarak malzemedan uzaklaştırılmıştır. Sürekli malzeme püskürtme metotlarından ve bu metotta iki adet baskı nozulü kullanılır. Biri ana malzemeyi biriktirmek için, diğeri ise taşıyıcı malzemeyi püskürtmek için kullanılır. Her katman yapıldıktan sonra, bu makinelerle mükemmel düz bir yüzey elde etmek ve katmanları incelemek için bir sıyırıcı kullanılır (Redwood 2017).

Bu yöntemin uygun malzeme tüketimi ve renkli malzemelerin yaygın kullanımı gibi avantajları olmasına rağmen, destekleyici malzemelere duyulan ihtiyaç genellikle bir kayıp olarak nitelendirilmektedir (Additive Manufacturing Research Group 2017).

### 3.2.4 Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat

Katı modelin oluşturulmasında kullanılan toz parçacıklarının birbirine yapışmasını sağlamak için sıvı halde bulunan yapıştırıcı kullanılmaktadır.



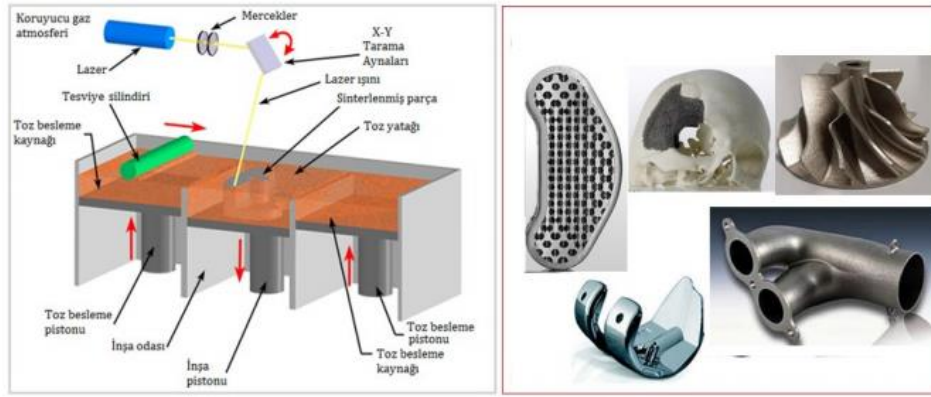
Şekil 3.10: a) Yapıştırıcı ile katmanlı imalat (binder jetting) imalatının şematik gösterimi (Threeding 2017), b) üretilen parça (Xometry 2017).

Eklemeli İmalat Araştırma Grubuna (2017) göre, Şekil 3.10'da gösterilen bağlayıcı kullanılarak yapılan eklemeli imalat işlemi sırasında, toz halindeki malzeme, silindirler kullanılarak imalat platformuna dağıtılmakta ve daha sonra x ve y boyunca hareket ettirilmektedir. Yapının temel seviyesi, model seviyelerinin kalınlığına göre düşürülmekte ve ikinci katman inşa edilebilir seviye, bir önceki seviyenin üzerine çıkmaktadır. Ürün toz ve sıvının birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu üretim döngüsü, üretim sürecinin sonuna kadar uygulanmıştır. Araştırmacılar bu yöntemde avantaj ve dezavantajların olduğunu belirtmişlerdir. Avantajlar olarak; metal, seramik gibi malzemelerin kullanılmasıyla oluşan bu yöntem başka yöntemlere göre hızlı ve birçok toz yapıştırıcı malzeme türüne zemin oluşturmuştur. Dezavantaj olarak ise yapıştırıcı malzemenin bazı malzemelerin parçalarını olumsuz etkilediğini söylemişlerdir (Class Additive Manufacturing Research 2017). Ayrıca yapıştırıcının ince ayarlı parçaların mekanik özelliklerini iyileştirir ve parçaların soğutulması imalat sürecini uzatır ki bu da olumsuz bir yöntem olarak kabul edildiği sonucuna varmışlardır (Gibson ve diğ. 2010). Bu şekilde yapılan ürünler genellikle ek işleme gerek kalmadan kumdan yapılır ama diğer malzemeler sertleştirilmekte ve sinterlenmektedir. Ayrıca yüksek yoğunluk gerektiren metal parçalara sıcak izotermal presler uygulanabilmektedir (Exone 2017).

### 3.2.5 Toz eritme / Sinterleme Yöntemi

Toz parçacıklarını eriterek birbirine kaynaması için kullanılan yöntemler, DMLS, elektron ışını eritme (EIE), seçici lazer eritme (SLE), SLS ve multijet eritme (MJF) olmak üzere alt sınıflara ayrılmaktadır. Lazer ve elektron ışığı kullanılarak toz

parçacıkları eritilerek kaynaştırılması sağlanır. Tüm toz tabakası eritme işlemleri vakum gerektirir ve toz tabakasının altındaki boşluktan toz, bir rulo veya yayıcı kullanılarak ortalama 0.1 mm kalınlığında toz yatağı üzerine yayılır. Şekil 3.11'de görüldüğü gibi, açığa çıkan bu tozun lazer sinterlenmesi ile ürünün ilk tabakası oluşturulmakta ve aynı üretim döngüsü tekrarlanarak diğer tabakalar oluşturulmaktadır. Böylelikle parça oluşumu sağlanmaktadır (Additive Manufacturing Research Group, 2017).



**Şekil 3.11:** Metal lazer sinterleme sisteminin şematik gösterimi ve üretilen parçalar (Özsoy ve Duman 2017).

SLS yönteminin prensibi DMLS yöntemiyle aynıdır. SLS yöntemi polimer ve seramik tozlarından ürün üretmek için kullanılan sinterleme işlemini tanımlanmıştır (Redwood 2017; Additive Manufacturing Research Group 2017). SLS metotunda, polimer bazlı toz, üretim platformuna yayılır ve ardından lazer sinterleme ile kürlenmiştir. Son olarak üretilen parçalar genellikle basınçlı hava ile temizlenmiştir. DMLS yönteminin alaşımları kullandığı ve SLE'nin alüminyum gibi tek bileşenli metalleri kullandığı söylenmektedir (Redwood 2017). SLS'den farklı olarak, SLE ve DMLS yöntemleri, üretim süreci sırasında üretilen yüksek kalıntı gerilimleri karşılamak için toz destek elemanları ve dahili gerilim giderme süreçleri gerektirir (Redwood 2017).

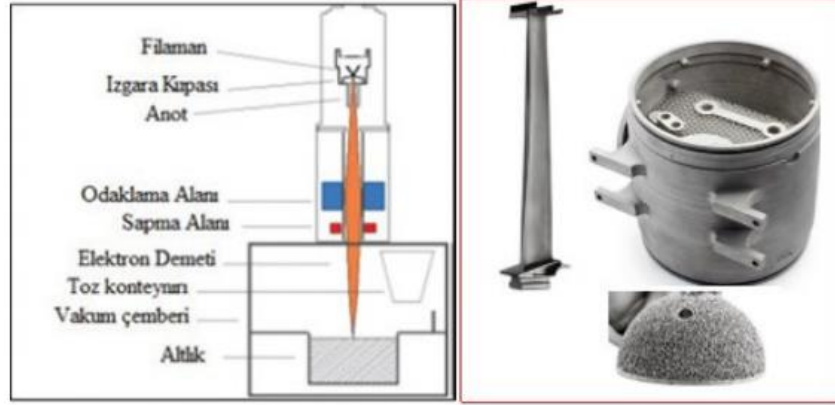
Farklı toz yatağı eritme yöntemlerinden olan, EIE (Elektron Işını Eritme) imalatı kullanılırken, metal tozu parçacıkları arasındaki erimeyi sağlamak için lazerlere karşılık olarak yüksek enerjili elektron ışınları kullanılmıştır. Bir noktaya yönelmiş elektron ışını ince toz yüzeyini tarar ve seçili bir kesit alanında bölgesel

olarak ergiyerek katılmıştır. EIE kullanılarak üretilen parçalarda daha az kalıcı gerilim vardır ve destek yapılarına az gereksinim duyulur (Redwood 2017). EIE üretim yöntemi SLS'ye göre daha hızlı enerji ihtiyacı duyan yöntemdir. Kullanılan toz boyutu ve katman kalınlığı SLS yönteminden daha fazladır (Redwood 2017). Kalite bakımından EIE ürününün yüzey kalitesi SLE ve DMLS 'ye göre daha düşüktür (Redwood 2017).

Multi-jet füzyon (MJF), toz yataklı üretim metotlarından biridir. Bu üretim metodu toz yataklı füzyon üretim teknolojileri gibi özdeş ilkelere sahiptir. Bu üretim metotunda, öncelikle; üretim düzlemine polyamid toz parçası yerleştirilmektedir. Sonrasında eritilmesi gereken parçanın yapısına partiküllerin tercihine göre eritici madde seçici bir şekilde işlem yapılmaktadır. Devamında, erimenin azaltılması veya artırılmasının gerekebileceği yerlerde ayrıntılaması için yerel bir malzeme uygulanmaktadır. Ayrıntılama uygulamasıyla, maddenin belirli bir kısmının ince kenarlarında ve sivri bölümlerinde eksiltilerek daha hassas ürün meydana getirebilmektedir. MJF ile SLS metotları kıyaslandığında, MJF yönteminin üretim hızı, boyutsal doğruluk ve çekme mukavemeti açısından avantajlı olduğu gösterilmiştir (Redwood 2017). Raporlara göre, toz tabakasının eritilmesinde esas olarak yüzey kaplama, kısmi büzülme, toz taşıma ve işleme ile ilgili zorluklar var (Redwood 2017). Rapora göre DMLS ve SLE metotlarında paslanmaz çelik, titanyum, alüminyum, kobalt ve çelik tozları uygulanmaktadır. Bu metotlarda titanyum, kobalt-krom, alüminyum ve bakır alaşım tozlarıyla daha iyi verim meydana gelmektedir (Arcam 2014).

### **3.2.6 Direkt Enerji Depolama**

Direk Enerji Depolama (DED), parçaları oluşturmak için malzemelerin kaynaştırılması ilkesine dayanır. Şekil 3.12'de görüldüğü gibi, DED'nin tel veya toz halindeki bir malzeme olarak sınıflandırılması, ekstrüzyon, lazer/elektron ilkesine benzer şekilde çok eksenli mobil nozuldaki üretim platformuna aktarılmaktadır. Toz veya tel şeklinde metalik, polimerik ve seramik malzemeler bu işlemde yaygın olarak kullanılmaktadır (Redwood 2017).



Şekil 3.12: Direk enerji depolama sisteminin şematik gösterimi ve üretilen parçalar (Özsoy ve Duman 2017).

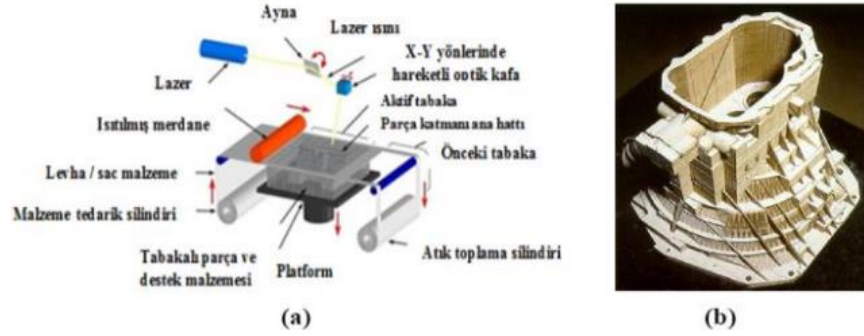
Doğrudan bir enerji depolama yöntemi olan Lazer Toz şekillendirme Teknolojisi (LENS), sistematik bir teknoloji içerir. Bunlar katmanları eritmek ve katmanlar oluşturarak katı hale dönüştürmek için lazer optikleri, toz ağızlığı ve inert gaz bileşenini içerir. Bu yöntem, imal etmek için bir metal plaka kullanır, lazer bu plaka üzerinde bir eriyik havuzu birikintisi oluşturduktan sonra, toz bir nozul aracılığıyla eriyik havuzu birikintisine püskürtülür ve katman katman püskürtülür. Üretim süreci, tozun eritilip katılaştırılmasıyla gerçekleşir. Öte yandan, Elektron ışını ile eklemeli imalat (EBAM), LENS ile aynı prensibe dayanan, elektron ışını kullanılarak vakum ortamında tozlar veya teller kullanılarak katman katman üretim süreci olarak karakterize edilir. Eklemeli İmalat Araştırma Grubuna (2017) göre, LENS yöntemi özgün tasarımlar üretmede daha verimlidir.

### 3.2.7 Levha / Sac Laminasyon Metodu

Bu imalat yöntemi, levhaları ısıtarak birbirine yapışmasını sağlamaktadır. Şekil 3.13'te gösterildiği gibi parçanın dış hatlarının her bir katmanını kesmek için bir lazer elemanı içermektedir. Bu parçalar, yapışkan kaplı metal plakaların istiflenmesi, birleştirilmesi ve kesilmesiyle yapılır. Her kırpma işleminin sonunda, arka planın seviyesi, katmanın kalınlığına indirilir ve daha önce yapılan katmanın üzerine yeni bir katman eklenir. Daha sonra platform hafifçe yükseltilir ve ısıtılmış silindiri yeni katmanla birleştirmek için laminasyona basınç uygulanır, ürünün şekli elde edilene kadar işlem tekrarlanmaktadır. İstenmeyen lazer kesim atık plakaları atık toplama



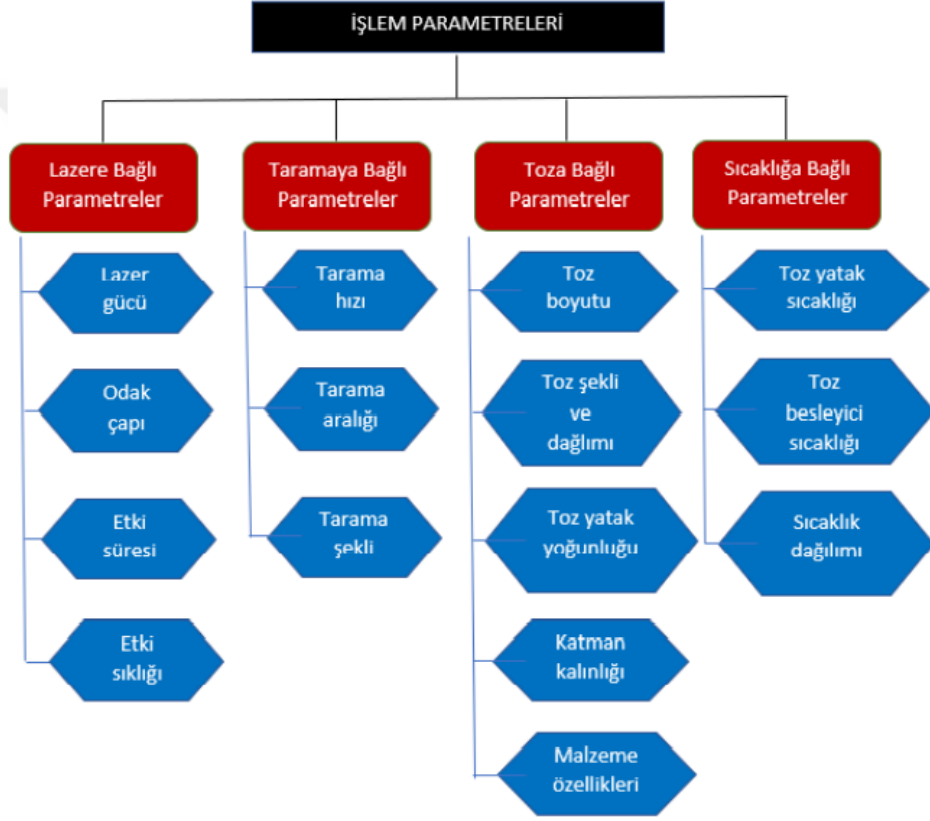
silindiri Custom (2017) ile toplanır. Krar ve Gill (2003) oluşturdukları araştırmada bunun pratik ve ucuz bir metot olduğunu ancak ürünün dayanıklılığının ve bütünlüğünün uygulanan malzemedeki yapıştırıcı ile ilişkilendirildiğini belirtmektedir (Additive Manufacturing Research Group 2017).



Şekil 3.13: a) Tabakalı obje üretim metodu şematik gösterimi (Custom 2017), b) üretilen parçalar (Ouden 2017).

### 3.3 Toz yataklı / Beslemeli Eklemeli İmalat Yöntemlerinde İşlem Parametreleri

Toz yataklı / beslemeli Eİ yöntemlerinden birisi olan DMLS 'nin işlem parametrelerini göstermektedir. Proses parametreleri Şekil 3.14'te görüldüğü gibi genellikle her biri dört alt bölümde tanımlanmaktadır. Lazerle ilgili parametreler, taramayla ilgili parametreler, tozla ilgili parametreler ve sıcaklığa bağlı parametrelerdir (Aboulkhair ve diğ. 2014). Lazerle ilgili parametreler lazer gücü, odak çapı, etki süresi ve etki frekansıdır. Taramayla ilgili parametreler tarama hızı, tarama aralığı ve tarama modelidir. Tozla ilişkili parametrelerin incelenmesi, kullanılan tozun boyutunu, tozun şeklini ve dağılımını, toz katmanının yoğunluğunu, katmanın kalınlığını ve malzemenin özelliklerini vurgular. Son olarak sıcaklığa bağlı parametreler şunlardır: toz yatak sıcaklığı, toz besleyici sıcaklığı ve sıcaklık dağılımıdır (Ergene 2020).



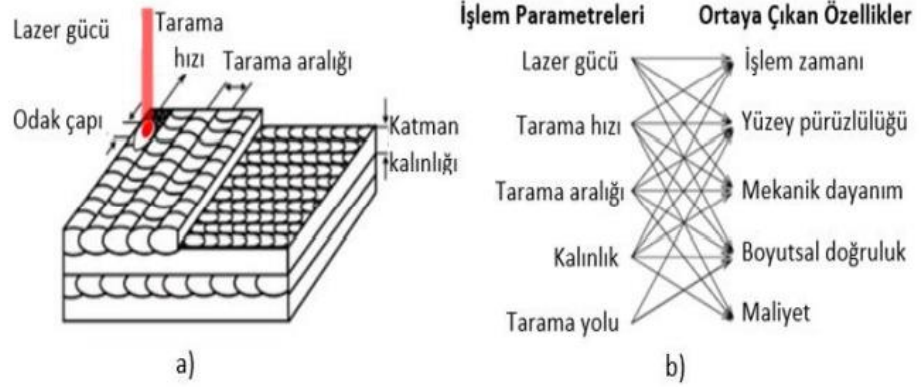
Şekil 3.14: DMLS işlem parametreleri (Aboulkhair ve diğ. 2014).

Mani ve diğ. (2015) ise süreç parametrelerini ve ürün kalitesinin etkisini Şekil 3.15 'de göstererek, süreç parametrelerini kontrol edilebilir ve önceden tanımlanmış iki formata böler.

İmalat Parametre Alanı	İmalat Sırasındaki Alan	Ürün Kalite Alanı
<b>Kontrol edilebilir</b> 1. Lazer tarama hızı 2. Lazer gücü 3. Lazer ışın çapı 4. Lazer tarama yolu 5. Tabaka kalınlığı değişimi 6. İnert gaz akışı  <b>Önceden tanımlanmış</b> 7. Toz büyüklük dağılımı 8. Toz paketleme yoğunluğu 9. Tabaka kalınlığı 10. Emicilik 11. Yansıtma 12. İmalat platformu özellikleri	<b>Eriyik havuzu</b> 13. Sıcaklık (maksimum sıcaklık, sıcaklık gradyeni) 14. Geometri (genişlik, uzunluk, derinlik, alan) 15. Kabarcık (plume) özellikleri  <b>Rota</b> 16. Geometrik düzensizlik 17. Erimemiş partiküller 18. Büzülme 19. Kalıntı gerilme 20. Mikroyapı (kristal fazı) 21. Boşluklar  <b>Katman</b> 22. Geometrik düzensizlik 23. Erimemiş partiküller 24. Büzülme 25. Kalıntı gerilme 26. Mikroyapı (kristal fazı) 27. Boşluklar 28. Kusurlar	<b>Geometrik</b> 29. Boyut boyutsal sapma 30. Şekil boyutsal sapma  <b>Mekanik</b> 31. Dayanım 32. Sertlik 33. Tokluk 34. Yorulma direnci  <b>Fiziksel</b> 35. Kalıntı gerilme 36. Yüzey tokluğu 37. Porözite 38. Kusurlar

Şekil 3.15: İmalat parametreleri, imalat sırasındaki oluşumlar ve ürün kalitesi hiyerarşisi (Mani ve diğ. 2015).

Şekil 3.16a’da ise işlem parametreleri gösterilmiş olup, Şekil 3.16b’de de işlem parametrelerinin değiştirilmesi ile ortaya çıkan sonuçlar verilmiştir.



Şekil 3.16: a) İşlem parametreleri, b) işlem parametreleri ile ortaya çıkan özellikler (Mani ve diğ. 2015).

### 3.3.1 Lazere Bağlı Parametreler

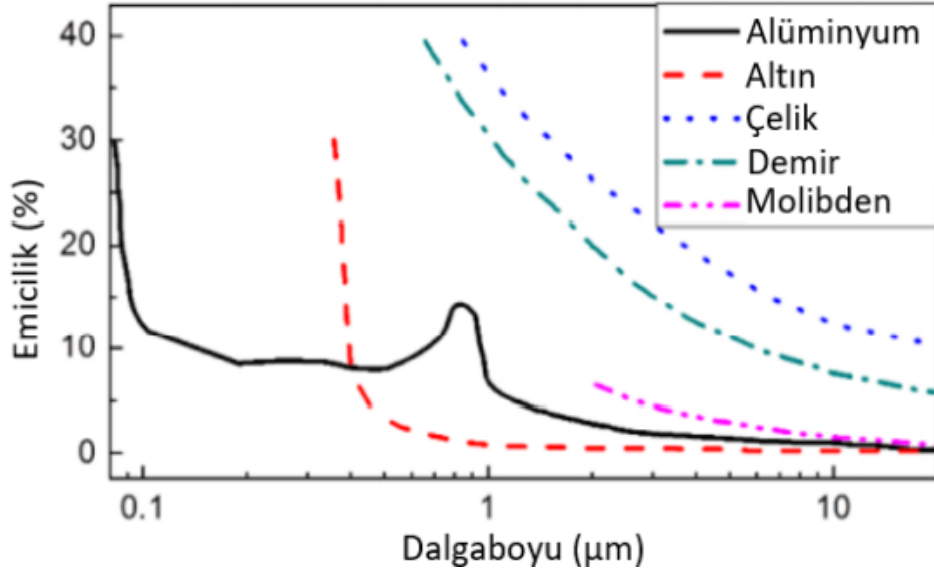
ASTM F42 standardına göre SLA fotopolimerizasyon edilmiş bir süreç olarak sınıflandırılır, LENS yöntemi bir doğrudan enerji depolama süreci olarak sınıflandırılır ve SLS, SLE ve DMLS, toz / formülasyon sınıfının bir alt toplamı olarak sınıflandırılmıştır. Bu eklemeli imalat yöntemleri, farklı lazer türleri kullanılmış ve katmanlar halinde üretilmiştir (Monzon ve diğ. 2015; Lee ve diğ. 2017). Tablo 3.2’de çeşitli eklemeli imalat cihazlarında kullanılan lazerler ve özellikleri gösterilmiştir.

**Tablo 3.2:** Eklemeli imalatta kullanılan şirketler ve özellikleri (Monzon ve diğ. 2015; Lee ve diğ. 2017).

Şirket	Sistem	İmalat İşlemi	Güç	Lazer Türü
Fotopolimer Reçineler				
3B System	ProX series	SLA	1.45 W'a kadar	ND: YVO <sub>4</sub> lazer
CTC	Riverbase 500	SLA	300-500 mW	ND: YVO <sub>4</sub> lazer
Polimer Tozlar				
3B System	sPro series	SLA	30-230 W	CO <sub>2</sub> lazer
EOS	EOSINT P series	SLA	50 W	CO <sub>2</sub> lazer
Metal Tozlar				
3B System	ProX DMP series	DMP/SLE	500-1000 W	Yb-fiber lazer
SLE Solutions	SLE HL series	SLE	400-1000 W	Yb-fiber lazer
Optomec	LENS series	LENS/DMD	400-1000 W	Yb-fiber lazer
EOS	EOS M series	DMLS	200-400 W	Yb-fiber lazer
Matsuura	LUMEX Avance series	DLMS/Milling	400-1000 W	Yb-fiber lazer
Concept Lazer	Lazer CUSING Series	SLE	100-1000 W	Yb-fiber lazer
Metal Tel				
Irepa Lazer	EasyCLAD MAGIC LF6000	LC	750-4000 W	Yb-fiber lazer
Huffman	h series	LC	400 W	Yb-fiber lazer

Lazer bazlı Eİ düşünüldüğünde, SLA yönteminin düşük güçlü bir (Nd: Neodymium doped) Nd:YVO<sub>4</sub> lazer kullandığı ve SLS yönteminin, istenen termal enerji artışını karşılamak için genellikle CO<sub>2</sub> olmak üzere yüksek güçlü bir lazer sinterlenmiş toz kullandığı söylenir. Malzemenin cinsine göre Ybfiber lazerler kullanılmaktadır. Ayrıca toz partikülleri arasında sinterleme için sıcaklığın metalin erime noktasını ve polimerin yumuşama noktasını aşması gerektiği belirtilmektedir (Partanen 1996; Liu ve diğ. 2012; Lee ve diğ. 2013; Eshraghi ve diğ. 2013). Polimer malzemelerin aksine metal malzemelerin kullanıldığı sinterleme işlemine ise direkt metal lazer sinterleme (DMLS) adı verilmekte olup, bu yöntemde ise metal tozlarının daha yüksek oranda ışını absorbe ettiği 1064 nm boyutunda dalga boyutunda lazer ışınlarının üretildiği Nd:YAG lazerler ya da Yb-fiber lazerler kullanılmaktadır

(Khaing 2001). Şekil 3.17’de çeşitli malzemeler için dalga boyu ile emicilik (absorbe etme) arasındaki ilişki gösterilmiştir (Lazov ve Angelov 2010; Ion 2005).



Şekil 3.17: Çeşitli malzemelerin dalgaboyuna karşılık gelen % emicilik oranları (Lazov ve Angelov, 2010; Ion 2005).

### 3.3.2 Taramaya Bağlı Parametreler

Schleifenbaum ve ark. (2011) Eklemeli üretim hızının eksikliğini anlamak için toplam üretim süresini ikiye bölün. Bunlara ana işlem süresi ve yardımcı işlem süresi denir. Parçanın her bir bölümünü eritmek/sinterlenmesi gereksiniminin karşılanmasıyla oluşan sürede ana işlem süresi meydana gelir. Tabaka azaltma ve toz bir araya getirme gibi işlemler yardımcı işlem süresi olarak kabul edilir. Fakat temel işlem süresi yapılan hesaba göre üretim süresinin %80’ini oluşturmaktadır. Parametrede katman kalınlığını etkileyen işlem sürelerinde tarama hızı ve tarama satır aralığı en vurgulanması gereken yerlerdir (Schleifenbaum vd., 2011). Tablo 3.3’te, bilimsel araştırmalarda belirlenen, ifade edilen bazı imalat değişkenlerinin teorik imalat hızına ilişkisi gösterilmiştir.

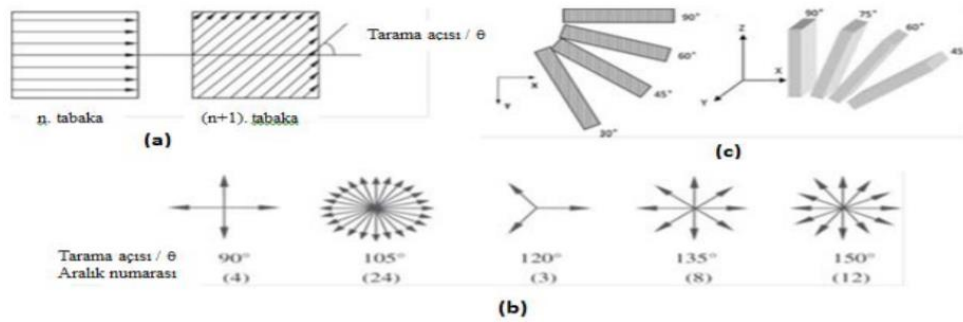
**Tablo 3.3:** Metalik tozlarda eklemeli imalat parametrelerinin üretim hızına etkisi.

Kaynak	Malzeme	Lazer Kaynağı	Lazer Gücü (W)	Işın çapı (mm)	Tarama Hızı (mm/s)	Tabaka Kalınlığı (mm)	Teorik İmalat Hızı (mm <sup>3</sup> /s)
Meinners	Paslanmaz Çelik (X2CrNiMo17 12 3, X2 CrNi24 12) takım çeliği (1.2343), Nikel)	Nd(Neodymium doped): YAG (cw)	105 W	0.2 (0.14)	<200	<0.1	<2.8
Over, 2003	Takım çeliğ (X38CrMoV 5-1) Titanyum (Ti6Al4V)	Nd: YAG (cw)	120 W	0.2	<250	<0.1	<3.5
Zhang, 2004	Alüminyum (AlSi25, Alsi10Mg. Vb.)	Nd: YAG (cw)	330 W	<0.4	<250	<0.1	<7
Wagner, 2003	Paslanmaz çelik (1.4404), Sıcak iş takım çeliği (1.2714), Nikel bazlı alaşım (IN718)	CO <sub>2</sub>	200 W	0.1	50	0.05-0.1	0.5
Petersheim, 1997	Paslanmaz çelik (X38CeMoV 5-1 ve X40CrMoV 5-1)	Bilgi yok	Bilgi yok	0.4	Bilgi yok	0.4	-
Kobym ve semiatin, 2001	Titanyum (Ti6Al4V)	Bilgi yok	Bilgi yok	<0.5	Bilgi yok	0.13-0.38	-
Su W.N. vd., 2003	Takım çeliği	Nd: YAG (Darbeli)	550(150)	0.9 (0.6)	<10	0.4	<2.4
Wang vd., 2002	Volfram karbür kobalt	Nd: YAG (cw)	60	0.8	30	0.2	2,5
Kruth vd., 2005	Cu, Ni, Fe <sub>3</sub> P	CO <sub>2</sub>	60	0.3(0.2)	<100	0.2	<4
Schuh vd., 2007	Paslanmaz ve Takım çeliği (1.4404 ve 1.2343)	Nd: YAG (cw)	250	0.2(0.15)	160	0.05	1,2

Meiners'in(1999) ve Minas'ın(1999) bakış açılarıyla bakıldığında, tarama hızı

ve katman boyutu, var olan lazer gücünün ilişkisi ile ilgilidir ve tarama çizgisi uzaklığı, ışının bir noktada sabitleme çapıyla ilişkilidir. Yani genellikle tarama çapı ışın çapının yaklaşık 0,7 katıdır. Gibson ve Rosen (2010), en yüksek üst tabaka ve boyutsal doğruluğa, en iyi üretim hızına ve işlevsel özelliklere, ham toz doyma sıcaklığına, lazer çıktısına, lazer tarama hızına, lazer ışını boyutuna, katman kalınlığına, tarama mesafesine sahip olduğunu bildirmiştir. Optimize edilmiş tarama ile elde edilir. Başka bir çalışmada ise katkı maddelerinden yapılan parçaların mekanik ve metalurjik özellikleri proses parametrelerine bağlıdır Gu ve Shen (2009) ve bu özellikler üzerinde lazer tarama gücü ve hızının etkisi çok önemlidir (Hanzl ve diğ. 2015).

Başka bir çalışma Gibson ve Shi (1997), seçici lazerle üretilmiş parçaların özelliklerinin toz haline getirilmiş malzemenin özelliklerine, işlem parametrelerine, parça yönelimine ve işleme bağlı olduğunu göstermektedir. Şekil 3.18'de çok katmanlı dökümün tarama yönleri hakkında bilgi sağlamıştır Guan ve diğ. (2013) ve lazer tarama açısı  $105^\circ$  olduğunda SLE ürünlerinde daha kaliteli neticeler elde edilir (Hanzl ve diğ. 2015).



**Şekil 3.18:** a) Lazer tarama açısı, b) farklı lazer tarama açılarıyla tarama, c) yapım yönü (Guan ve diğ. 2013).

Şekil 3.18'de görüldüğü gibi x eksenine ile lazer işleme yönü arasındaki açıya lazer tarama açısı denir. Örnek Şekil 3.18b'de  $90^\circ$  lazer işlem açısı girilmiştir. Bir tarama çizgisini temsil eder Kruth ve diğ. (2010) ise, Öte yandan, zikzak desen, yüksek yoğunluklu parçaların üretiminde daha verimli olacaktır. Daha ileri çalışmalar, lazer tarama yönleri arasındaki açının mekanik dayanım üzerindeki etkisini desteklemektedir (Hanzl ve diğ. 2015; Guan ve diğ. 2013).

Turhan ve Özsoy (2016)' da, lazer üretim özelliklerinden yoğunluklarını değiştirip birbirinden farklı enerjilerle Ti6Al4V parçacıklarını sinterlemişlerdir. Yapılan deney sonucunda 1,36 J/mm<sup>3</sup> lazer enerji yoğunluğu ile parça yoğunluğunu 4,41 g/cm<sup>3</sup>, 3 J/mm<sup>3</sup> lazer enerji yoğunluğu ile de parça yoğunluğunu 4,44 g/cm<sup>3</sup> sonucu bulunmuştur. Bulunan sonuçta yoğunluk artışından dolayı, DMLS Ti6Al4V malzemesinin mikro sertliğini %27 derecede yükseldiği belirtilmektedir (Turhan ve Özsoy 2016).

### 3.3.3 Toza Bağlı Parametreler

Toz üretim teknolojileri dört gruba ayrılabilir: Mekanik, Kimyasal, Elektrolitik ve Atomizasyondur. Bir çalışma, elektroliz ve atomizasyonun fiziksel yöntemler olarak kabul edildiğini görülmüştür (Upadhyaya 1996). Partikül esaslı parçaların üretiminde kullanılan toz malzeme tercihi, toz biçimi, yapısı, akışkan özellikleri gibi özelliklere göre toz üretim yönteminin seçilmesi, üretilen üründen beklenen özellikler dikkate alınarak üretim yöntemi seçimi (konvansiyonel MT yöntemi ve eklemeli imalat) takip edilmektedir. Tablo 3.4'te eklemeli imalatta kullanılan bazı tozlar için üretim yöntemleri sunulmaktadır.

**Tablo 3.4:** Eklemeli imalatta kullanılan bazı tozların üretim yöntemleri (Kurt, 2010).

Malzeme	Yöntem
Takım çelikleri	Su atomizasyonu, gaz atomizasyonu, santrifüj yöntemi
Alüminyum	Vakum atomizasyonu
WC-Co	Mekanik öğütme
Kompozitler	Mekanik alaşımlama, plazma atomizasyon
Bakır	Elektrolitik, su atomizasyonu, gaz atomizasyonu, kimyasal yöntemler
Bakır, Pirinç ve Nikel alaşımları	Su atomizasyonu, gaz atomizasyonu
Altın	Elektrolitik, su atomizasyonu, kimyasal yöntemler
Çelik	Su atomizasyonu, gaz atomizasyonu, santrifüj yöntemi
Gümüş	Elektrolitik, su atomizasyonu, kimyasal yöntemler
Titanyum	Kimyasal yöntemler, gaz atomizasyonu, santrifüj yöntemi
Süper alaşımlar	Mekanik alaşımlama, gaz atomizasyonu, santrifüj yöntemi

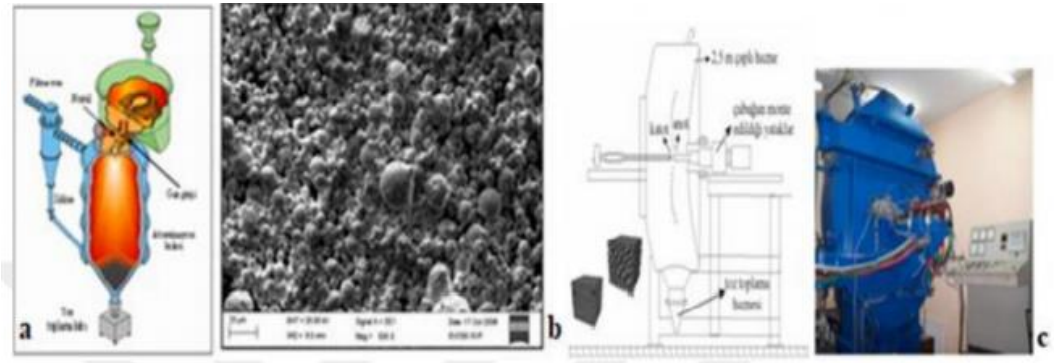


Bu yöntem, gaz püskürtmeyle yüksek oranda akışkanlaştırılmış küresel tozlar üretebildiğinden, laminat kalıplamada kullanım için tozlar elde etmek için uygundur. Bununla birlikte, partikül boyutunun düzgün dağılımı nedeniyle iyi bir toz yoğunluğuna sahip gaz püskürtme ile çeşitli alaşımların tozları üretilebilir ve ilgili tozların yeniden kullanılabilir olduğu gösterilmiştir (Toz metalurjisi 2018; Sadowski ve diğ. 2016; Herzog ve diğ. 2016; Helmer ve diğ. 2016; Dawes ve Bowerman 2015). Ayrıca su püskürtülerek elde edilen tozun lamine modelleme için de kullanıldığına dikkat edilmelidir. Bununla birlikte, su püskürtülerek elde edilen tozun şekli genellikle düzensiz olduğundan, tozun akışkanlığı, düşük iç yoğunluğu nedeniyle gaz tarafından püskürtülen küresel tozdan daha düşüktür. Eİ yönteminin benzersiz çalışma prensibi nedeniyle seçilen toz parçacıklarının dağılımında ve boyutunda farklılık olduğu söylenmektedir. Örnek olarak, EIE için toz boyut dağılımının 45 µm ile 105 µm arasında olması gerektiği ifade edilirken SLE' de 15 µm ile 63 µm arasında toz boyutu önerilmektedir (Sadowski ve diğ. 2016; Herzog ve diğ. 2016; Helmer ve diğ. 2016). Eİ'de istenilen toz seçimi için, farklı imalat yöntemleri ile üretilen tozların özellikleriyle avantaj ve dezavantajları tablo 3.5'te gösterilmektedir.

**Tablo 3.5:** Eklemeli imalatta kullanılan bazı tozların özellikleri (Dawes ve Bowerman 2015).

<b>Toz İmalat İşlemi Tablosu</b>			
<b>İmalat işlemi</b>	<b>Partikül boyut aralığı</b>	<b>Avantajları</b>	<b>Dezavantajları</b>
Su atomizasyon	0-500 µm	Yüksek üretim oranı, büyük partikül boyut aralığı, ingot şeklinde hammadde	Suyun taşınımı için ön işlemler, düzensiz partikül şekli, geniş partikül boyutu dağılımı
Gaz atomizasyon	0-500 µm	İngot şeklinde hammadde, geniş aralıkta alaşımlar elde edilebilir, yüksek verim, büyük partikül boyut aralığı, küresel partiküller	Dağılımda geniş parçacık boyutu
Plazma atomizasyon	0-200 µm	Çok küresel partiküller	Hammadde tel veya toz halinde olmalıdır, yüksek fiyat
Plazma döner elektrot işlemi	0-100 µm	Yüksek saflıkta tozlar, çok küresel partiküller	Düşük üretilebilirlik, yüksek fiyat
Santrifüj atomizasyon	0-600 µm	Büyük partikül boyutu aralığı, dar parçacık boyutu	Son derece ince toz yapmada zorluk
Hibrit-dehibrit işlemi	45-500 µm	Düşük fiyat	Düzensiz partikül şekli, kırılabilir bir hidrür oluşturan metallerle sınırlı

Kimyasal gaz püskürtme yönteminde, Şekil 3.19a'da gösterildiği gibi, nitrojen veya argon gibi bir soy gaz uygun bir jet ile belirli bir basınç ve hızda püskürtülürken, kaptaki erimiş metal bir şerit halinde nozuldan akmaktadır. Parçacıklar atomize edilir ve katılaştırılır. Erimiş metal, soğutulan ve polimerize edilen çok küçük damlacıklara dönüştürülmektedir (Yamanoğlu, 2017)



Şekil 3.19: a) Gaz atomizasyonun şematik gösterimi (Rahmi, 2017), b) gaz atomizasyonu uygulanmış tozun FESEM görüntüsü (Eklemeli, 2018), c) döner plazma elektrot toz üretim ünitesi (Yamanoğlu, 2017).

Bu yöntemde özel metaller olarak çelik alüminyum alaşımları gibi lamine damgalanmasına uygun olarak ince küresel metal tozlarının üretimi için en yaygın kullanılan yöntemdir. Yaygın olarak tercih edilebilmektedir. Yapılan çalışmada toz özelliklerini etkileyen parametreler gaz türü, basıncı, sıvı metal akışkan hızı ve nozul geometrisi gibi olduğunu belirtmişlerdir. Akışkan metali atomize etmek amacıyla hava, Azot, argon ve helyum gibi gazların basınç altında kullanılabilir (Uslan ve Küçükarslan 2010).

Plazma elektrotunun döndürülmesi (santrifüj enjeksiyon) işleminde, istenen toz malzemenin çubuk (erimiş) elektrotunun şekli ile tozu elde etmek için kaynaşmamış tungsten elektrot arasında bir ark oluşturulur. Erimiş elektrot sabit bir hızda döndürülerek elektrik arkı altında oluşan damlacıklar merkezkaç etkisiyle dağılır, katılaştır ve sistemin toz toplayıcısını doldurur. Toz toplayıcı, oksidasyonu önlemek için sabit vakum altında helyum veya argon gibi inert bir gazla korunmuştur Evcin (2007) ve bu yöntemle kobalt, krom ve titanyum tozları ürettiği görülebilmektedir. Döner plazma elektrot toz üretim ünitesi Şekil 3.20'de gösterilmektedir. Eklemeli imalatla üretilen metallerin özellikleri arasında birkaç araştırmacı, Simchi'nin Mikroyapı Araştırması Simchi (2004) ve Spierings ve diğ.

(2011) tarafından analiz edilmiştir. Statik dinamik deneyleri üzerine yaptığı çalışmaları gözden geçirerek ve üretim yönünün anizotropi ve statik mekanik özellikleri geleneksel dövme parçalarla aynı aralıkta kısmen etkilediğini ileri sürmektedir. Eİ için bir toz üretildiğinde, tozun morfolojik yapısı, mikro yapısı, kimyasal bileşimi özelliği anlaşılmaktadır ve tozun özelliklerine ilişkin bilgiler şekil 3.20'te belirtilmektedir.



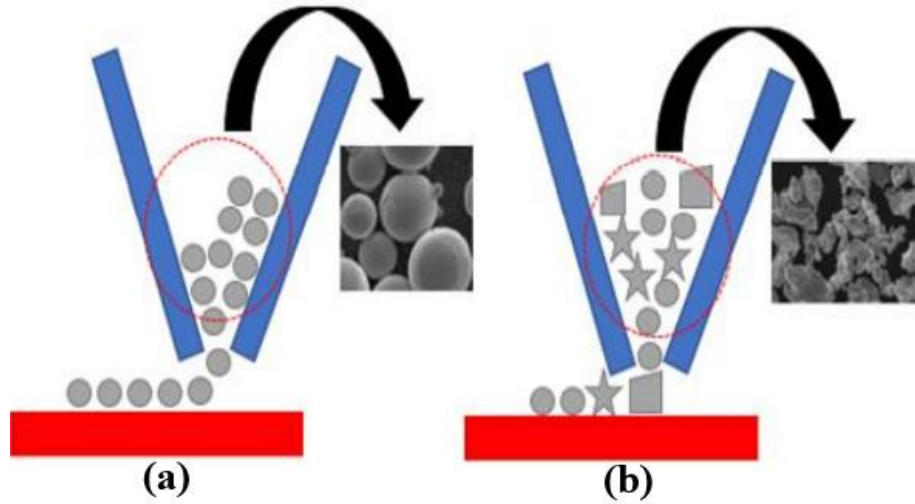
Şekil 3.20: Toz özelliklerinin sınıflandırılması (Austin ve diğ. 2016).

Başta tozun morfolojik yapısı; parçacık boyutu, şekli ve parçacıkların yüzey kalitesiyle belirlenmektedir. Kararlar doğrultusunda, çok katmanlı yapılarda minimum bileşen ara mesafe kalınlığı ve hedef yoğunluğu meydana getirmek için önemlidir. Partikül akışı ve paketleme özelliklerinin belirlenmesinde önemli parametrelerdir. Yapılan bir çalışmada Simchi (2004) toz katmanlama sırasında kaide üzerine toz biriktiğinde, ilgili parametrelerin tozun yoğunluğunu etkilediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, haddelenmiş ürünlerin hedef boyutunu ve yüzey kalitesini sağlamak için tozun özelliklerini inceleme ve kontrol etme ihtiyacını vurgulanmaktadır.

Hawkins (1993), toz parçacıklarının morfolojik karakterizasyonu için birçok yöntemi kapsamlı bir şekilde gözden geçirmiş ve ortaya çıkan toz boyutunun tek düzenekliğinin, yukarı doğru toz difüzyonu üzerine tabakanın tek tip kalınlığına katkıda bulunduğunu savunmuştur. Ayrıca partiküllerin temas alanı düzensiz olduğu için partikül ve diğer tozların oluşumu sırasında çeşitli toz formları (düzensiz, köşeli, küresel, gözenekli, çubuk şeklinde vb.) oluşabildiğini ifade etmiştir. Parçacıklarla

temas yüzeyi çok küçük olduğunu, sadece küresel parçacıklar, maksimum hareketlilik sunabildiğini belirtmişti. Bu nedenle, küresel tozun döşenmesi sırasında partiküller arasındaki sürtünmenin azaltılabileceği, böylece iyi toz akış özellikleri elde edilebileceği vurgulanması gerektiğini ve tozun her bir eklemeli imalat yönteminin gereksinimlerini karşılayan özelliklere sahip olduğunu belirlemek için tozun parçacık boyutunun belirlenmesi gerektiği de söylemektedir (Hawkins 1993).

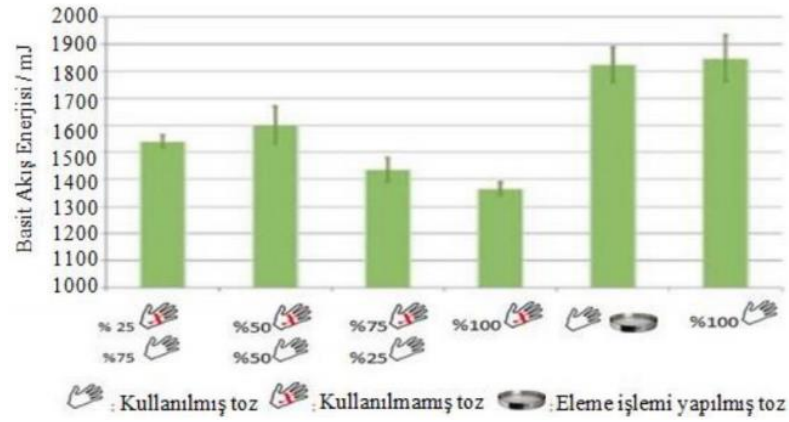
Ayrıca, Şekil 3.21’de küresel ve düzensiz tozların üretim tablosundaki düzenli morfolojik düzenini göstermektedir (Kurzynowski vd. 2012). Daha küresel bir toz tercih edilirse daha az pürüzlü bir yüzey elde edilebileceği de ifade edilmektedir (Kurzynowski ve diğ. 2009; Chlebus ve Kurzynowski 2010).



Şekil 3.21: Toz morfolojilerinin imalat tablası üzerine diziliş şekilleri,

a) küresel tozlar, b) düzensiz tozlar

Freeman’nın (2007), oluşturduğu çalışmada, tozların akış özelliğine göre kullanılmış tozların akış karakteristiği kullanılmamış tozlara göre daha düşük olduğunu vurgulamıştır. Tozların akış enerjileri Şekil 3.22’de gösterilmektedir.

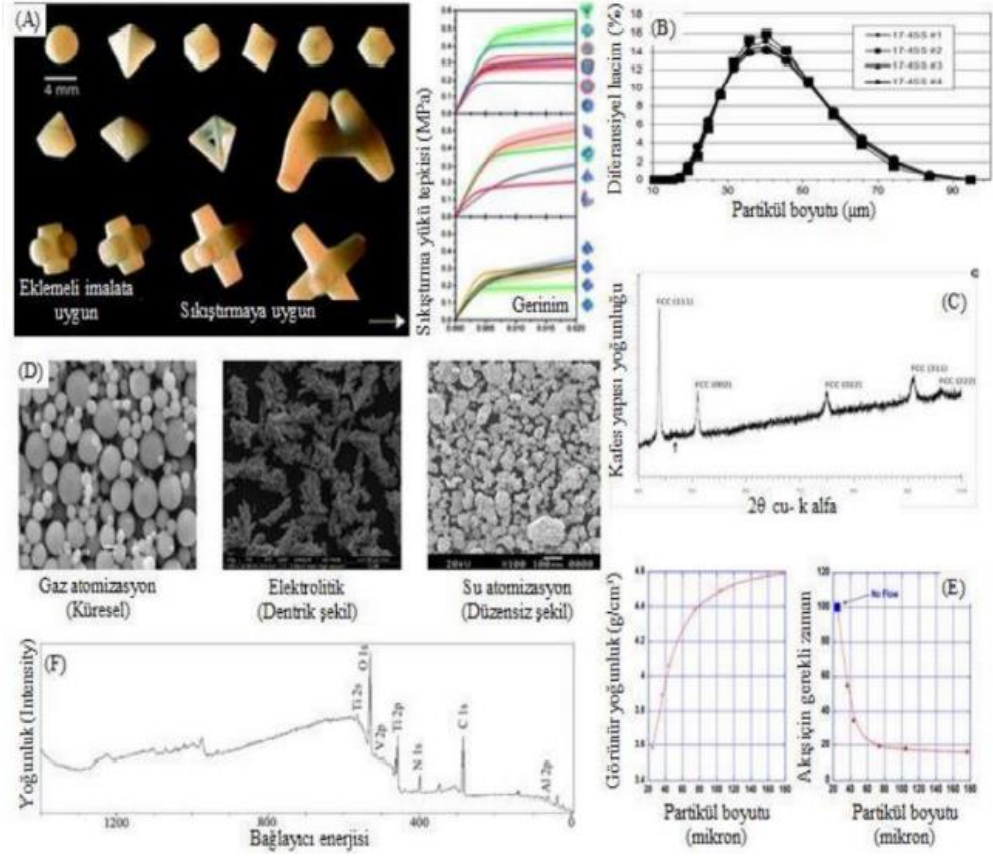


Şekil 3.22: Tozların akış karakteri (Clayton 2014).

Bu durumda Lyckfeldt (2013); Eİ tercih edilen tozların kullanılabilirliğini daha iyi belirlemek için çalışmalar yürütmüştür. Çalışması, toz parçacıklarının bir parçacık boyutu dağılımına sahip olduğunu ancak parçacık boyutu dağılımındaki değişikliklerin farklı toz akışlarına neden olabileceğini ve tozun özelliklerini etkileyebileceğini bildirdi. Bu bağlamda, metal tozlarını karakterize etmek için Hall akış yöntemi genellikle uygulanmaktadır ve çevresel şartların sonuçları değiştirdiği vurgulanmıştır.

Tang vd. (2015) de, Eİ 'ta kullanılan aynı tozların dördüncü kez üretime alındığında ürünlerin oksijen içeriğinde artışa sebep olmaktadır. Ürünlerde oksijen artışı tespit edildiğinden dolayı tozların dörtten fazla kullanılmayacağı ileri sürülmektedir.

Daha da önemlisi, partiküllerin gözenekliliği, toz partiküllerinin mikro yapısını ve yoğunluğunu değiştirdiğinden, gözeneklilik nedeniyle düşük yoğunluğun zararlı olduğu gösterilmiştir. Maskery ve diğ. (2016), EIE tarafından üretilen AlSi10Mg alaşımının gözenek oluşumunu incelemek ve ısıtma koşullarının mikro yapıyı ve sertlik değerlerini farklılaştırdığını, fakat gözeneklerin biçimi, sayısı, boyutu üzerinde ölçülebilir sorunlarının olmadığını, yapılabılır deneyde göstermek için büyük boşlukların disk şeklinde olduğunu ve diskin yapının yönüne dik bir yönde büyüdüğünü ortaya çıkarmışlardır. Şekil 3.23 'te toz özellikleri üzerine bazı analitik çalışmaları göstermektedir (Heim ve diğ. 2016; Athanassiadis ve diğ. 2014; Slotwinski ve diğ. 2014; Gkn 2018; Karlsson ve diğ. 2013).



Şekil 3.23: Ekllemeli imalata uygunluk araştırması.

Şekil 3.23'te resimler a,b,c,d,e,f olarak verilen ifadelerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

a) Eİ ile klasik preslemeyle oldukça yoğunluğuluğu fazla olan TM (Toz metalurjisi ) parça üretimine elverişli tozlar

b) Lazer difraksiyonu ile partikül boyut dağılımının tayini

c) XRD ile partikül kafes parametresinin araştırılması

d) Partikülün meydana gelişinin FESEM ve imalat metoduyla incelenmesi

e) Akışkan özelliği ve Hall akış çözümlenmesinin belirtilmesi

f) Toz partikülünde spektral analiz (Heim ve diğ. 2016; Athanassiadis ve diğ. 2014; Slotwinski ve diğ. 2014; Gkn 2018; Karlsson ve diğ. 2013).

### 3.3.4 Sıcaklığa Bağlı Parametreler

Toz yatak eritmeli / beslemeli eklemeli imalat yöntemleri karmaşık şekillere sahip parçalar için bile işleme kullanımını en aza indirir (Gibson ve diğ. 2010). Eklemeli imalat sırasında mimari elemanlar hızlı bir ısıtma ve soğutma döngüsüne tabi tutulur ve yapım yönünde yüksek sıcaklıklara maruz kalır. Bu, yüksek kalıntı gerilime Moat ve diğ. (2011), bozulmaya ve düşük boyutsal doğruluğa yol açmaktadır (Kim ve diğ. 2014).

Eklemeli imalatla üretilen parçalarda, karmaşık ışın-madde etkileşimi Leung ve diğ. (2019), toz oksidasyonu ve eriyik akış davranışından Leung ve diğ. (2018) dolayı porozite Williams ve diğ. (2015), hızlı katılma sebebiyle anizotropik mikroyapı oluşumu Kok ve diğ. (2018) ve yüksek yüzey pürüzlülüğü Frazier (2014); Smith ve diğ. (2016) meydana gelebilmektedir. Ayrıca, literatürde yapılan bazı çalışmalar göstermektedir ki, ön ısıtma işleminin uygulanması sinterlenmiş tozun elektriksel ve kimyasal iletkenliğinin Körner 2016; Smith ve diğ. (2017) yanı sıra efektif mekanik dayanımını da Weiwei ve diğ. (2011); Gong ve Chou (2013) geliştirebilmektedir. Ek olarak, ön ısıtma sayesinde, ışın-madde etkileşim verimi gelişmekte ve böylece daha sonraki ışın taramalarında daha düşük bir ışın akımı kullanılabilir (Gusarov ve diğ. 2003).

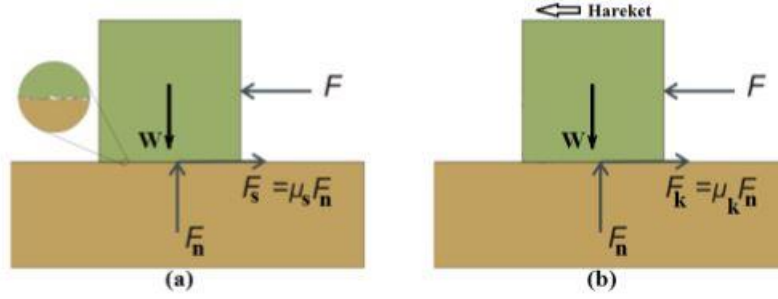
Ergime sırasında meydana gelen termal gradyen oluşumları da minimize edilmiş olduğundan, bozulma, çarpılma ve kalıntı gerilmelerde de bir azalma söz konusu olacaktır (Körner 2016; Cornier vd., 2004; Rodriguez ve diğ. 2012).

## 4. SÜRTÜNME VE AŞINMA

Bu bölümde genel olarak sürtünme ve aşınma hakkında bilgiler sunulmaktadır.

### 4.1 Sürtünme

Temas halinde olan iki cismin birbirleri üzerinde kaymaları sonucu malzeme kaybetmesi ile oluşan dirence sürtünme denilmektedir (Larsen, 1992). Şekil 4.1 de sürtünme mekanizması gösterilmektedir.



**Şekil 4.1:** (a) Statik sürtünme (b) Dinamik sürtünme sırasında cisme etki eden kuvvetler.

Sürtünme kuvveti ( $F_s$ ), uygulayan normal kuvvet ( $F_n$ ), sürtünme katsayısı ( $\mu_s$ ) ile

$$F_s = \mu_s \times F_n \quad (4.1)$$

olarak tanımlanmıştır. Cisme etki edildiğinde yani kaydırılırken, sürtünme kuvvetinde düşme meydana gelir. Kayma kuvveti ( $F_k$ ), uygulayan normal kuvvet ( $F_n$ ), kayma katsayısı ( $\mu_k$ ) ile

$$F_k = \mu_k \times F_n \quad (4.2)$$

denklemini oluşturulabilmektedir.  $\mu_k$  ( $<\mu_s$ ) sembolünün anlamı kinetik sürtünme katsayısı olarak ifade edilmiştir.

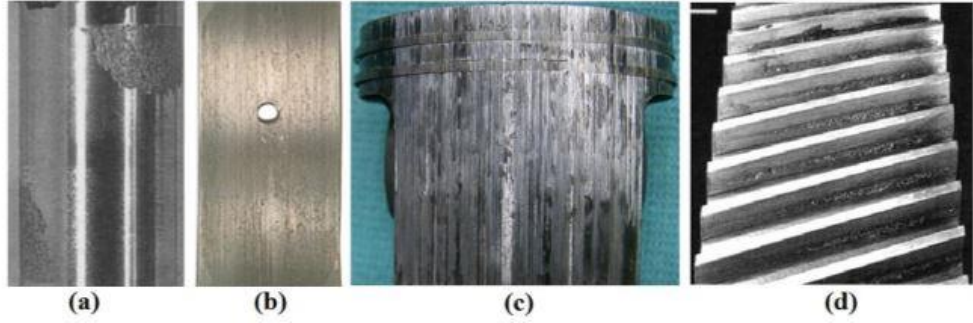
Kayma hareketinin sürdürülebilmesi için sürtünme nedeniyle oluşan enerji kaybına eşdeğer bir enerjinin sisteme aktarılması gerekmektedir. Bu sistemde sürtünmeden dolayı oluşan enerji kaybı ısıya dönüşmektedir. Bu durum ise mekanizmanın çalışmasını kısıtlayabilir ve bu nedenle bir soğutma sistemine ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu enerjinin bir kısmı da kaymalı yüzeylerin aşınmasında olduğu gibi farklı deformasyon süreçlerinde yok olabilmektedir. Birbiri üzerinde kayan yüzeylerde aşınmaya neden olan sürtünme büyük önem arz edebilmektedir (Stachowiak ve Batchelor, 1993).

## 4.2 Aşınma

Aşınma, temas halindeki yüzeylerden küçük partiküllerin kopması ve malzemede biçiminin bozulması olarak tanımlanabilir. Temas yüzeyinde sürtünme gerçekleşirken birçok olumsuz etken oluşur. Bunlar; mekanik parçaların işlevlerinde azalma, aşınma sebebiyle çalışma kapasitesinin azalması ve sürtünme direncinin



yitirilmesidir. Aşınma durumuna çoğunlukla; hareket iletim ögesinden biri olan millerde, fren balatalarında, motor pistonu ile silindirlerde, kaymalı ile rulmanlı yataklarda, dişlilerde ve türbin kanatlarında rastlanılmaktadır (Şekil 4.2). Çeşitli teknik malzemelerin ve makine parçalarının üretim ömrü üzerinde önemli bir etkiye sahip olan aşınma, aşınma ortamı, mekanizması, ürün tipi, yük, aşınma oranı ve benzeri gibi pek çok etmene bağlı olmaktadır. Aşınma durumu fiziksel özellikleriyle ele almak yerine tüm olayı sistemsel olarak değerlendirilebilmektedir. Bu sisteme tribolojik sistem denilmektedir. Bu sistemde birbirleriyle temas eden yerler hız, termal şartlar ve yükün bir araya gelmesiyle aşınma durumu oluşur (Kalite Metalürji 2013).



Şekil 4.2: Aşınma görüntüleri; (a) mil, (b) yatak, (c) piston, (d) dişli çark.

Temas halindeki malzemenin yüzeyi, yağlayıcılar, yüzey sertleştirilmesi ve oksit tabakası oluşumu gibi önleyici tedbirler ile korunsa bile, ısı etkisiyle oksitlenme iki yüzeyin birbirleriyle doğrudan temasa geçmesi sonucu aşınma oluşacaktır. Doğru ürün çifti seçimi, etkili yağlama (Şekil 4.3a), doğru tasarım, kendinden yağlamalı yatakların kullanımı (Şekil 4.3b) ve filtreler gibi faktörler aşınma hasarını en aza indirebilmekte fakat engelleyememektedir (Kalite Metalürji 2013).



Şekil 4.3: Makine ögeleri ve yağlayıcılar.

Aşınmayla ilişkili olan dört temel grup halinde gösterilebilir.

1-Temel Malzemeyle ilişkili etmenler (kristal yapı, sertlik, elastisite modülü, deformasyon davranışı, yüzey pürüzlülüğü ve boyutu)

2- Birbirine Temas Eden Malzemeyle ilişkili etmenler ve Aşındırma tesiri

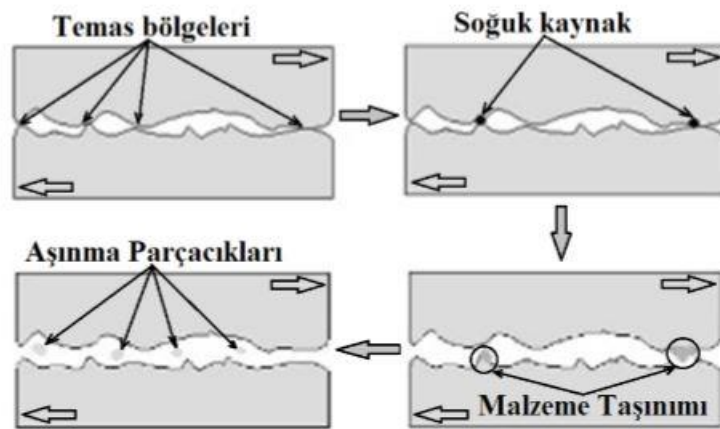
3- Koşullar (Sıcaklık, Nem, Atmosfer)

4- Durum koşulları (Basınç, hız ve kayma yolu) (Kalite Metalürji 2013).

#### 4.2.1 Aşınma Çeşitleri

##### 4.2.1.1 Adhesiv Aşınma

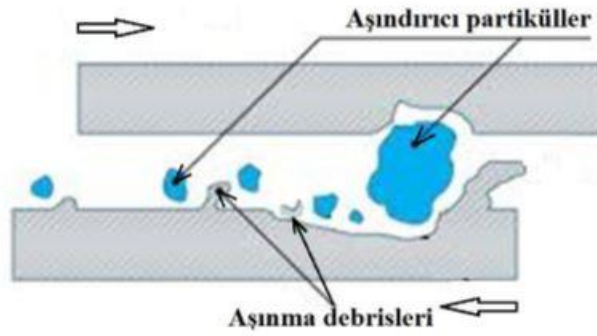
Adhesiv aşınma, soğuk kaynak veya bir yüzeye lokal bağlanma nedeniyle malzemenin bir yüzeyden diğerine hareketi olarak meydana gelir ve bu da kayma hareketinden dolayı malzeme kaybına neden olur (Şekil 4.4). Temas yüzeyinin pürüzlü yüzeyindeki basınç, lokal plastik deformasyona neden olacak kadar yüksekse, pürüzlülüğü düşük olan piklere fazla yüksek basınç uygulanacaktır. Bu durumlardaki gerilim, Emery'nin akma dayanımını, plastik deformasyonunu, kazıma ve sıvama işlemlerini aştığında kaynak işlemi oluşur. Temas eden yüzeylerde hareket sırasında noktalar kırılır ve yüzeylerde malzeme kaybı olur. Adhesiv aşınma, yüzeyler arasındaki malzeme kaybından dolayı oluşmaktadır. Adhesiv aşınmayı önlemek amacıyla yüzey sertleştirme işlemleri ve yağlayıcı sıvıların kullanılması tavsiye edilmektedir (Varol 2016).



Şekil 4.4: Adhesiv Aşınma (Varol 2016).

#### 4.2.1.2 Abrasiv Aşınma

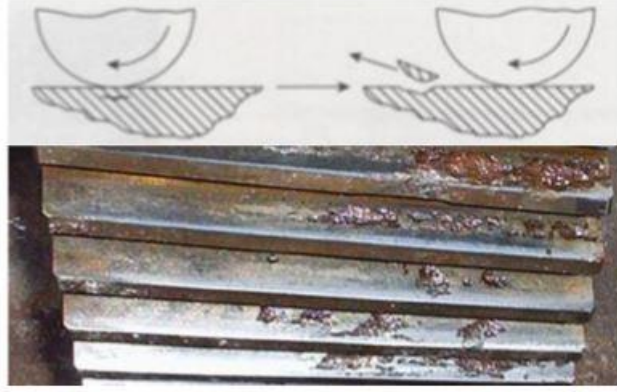
Çizik veya yırtılma aşınması olarak da bilinen abraziv aşınma, birlikte çalışan bir çift malzemeye hızlı ve ciddi zararlar verebilen çok dikkat edilmesi gereken aşınma çeşididir. Malzeme yüzeyinin basınç altındaki parçacıklardan daha sert olan parçacıklarla etkileşimi ile sert parçacıkların malzeme yüzeyinden uzaklaştırılması bu aşınma çeşidi için tanımlanabilmektedir (Şekil 4.5). Bu tür aşınmaya bir örnek, kötü çalışma şartları sebebiyle yatak malzemesine giren toz parçacıklarının neden olduğu aşınmadır. Üç cisimli aşınma olayı, iki cisim aşınmasının aksine malzeme çiftleri arasındaki sertlik farkından kaynaklanıyorsa, ilave aşındırıcı parçacıklar da aşınmaya tesir etmesi ile meydana gelmektedir (Varol 2016).



Şekil 4.5: Abrasiv Aşınma (Varol 2016).

#### 4.2.1.3 Yorulma Aşınması

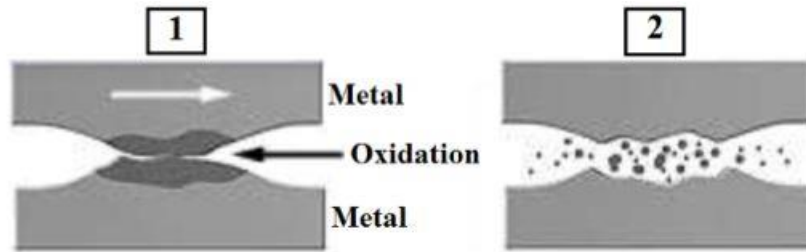
Sık görülen aşınma çeşidi olan yorulma (pitting) aşınması birbiriyle etkileşim içindeki yüzeylerde meydana gelir. Bu yüzeylere dişli çarklar, rulmanlı yataklar ve kam mekanizmaları gibi benzeri örnekler verilebilmektedir (Şekil 4.6). Bu mekanik elemanların temas alanı o kadar küçüktür ki temas alanında bir Hertz basıncı olmaktadır. Hertz basıncının etkisiyle, yüzeyin altında kalan kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Plastik deformasyon, kayma gerilmesinin en üst seviyesinde meydana gelir. Bu gerilme uzun süre yüzeye doğru hareket ederek yüzeyde küçük boşluklar oluşmasına neden olmaktadır (Kato ve Adachi 2001).



Şekil 4.6: Yorulma Aşınması (Kato ve Adachi 2001).

#### 4.2.1.4 Korozi Aşınma

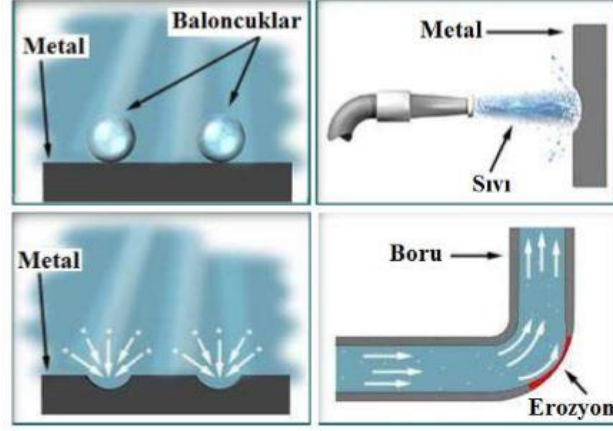
Aşınmış yüzeyler, aynı anda aşındırıcı etkiye uğradığında korozyon meydana gelir (Şekil 4.7). Tek veya başka aşınma çeşitleriyle beraber kimyasal korozyon oluşabilir. Birbirine etki eden yüzeylerde bulunan yüzey filminin neden olduğu kimyasal reaksiyon, yüzeyin aşınmasını engeller. Ancak meydana gelen yüzeydeki film kırılabilir durumdaysa ve ara yüzeydeki bağ zayıfsa film sürtünme sırasında çatlayacak ve çatlayan film parçalanarak aşınma oranını artıracaktır (Kato ve Adachi 2001).



Şekil 4.7: Korozi Aşınma (Kato ve Adachi 2001).

#### 4.2.1.5 Erozyon Aşınması

Yüksek hızla hareket eden sıvı parçacıkları ve gaz kabarcıkları tarafından meydana gelen aşınma çeşidine erozyon aşınma denir. (Şekil 4.8). Akışta sıvı ve gaz temas yüzeyi ile çarpışır, parçacıkları yüzeyden ayırır ve girdap etkisi nedeniyle dalgalı bir yüzey oluşturur. Bu aşınmayı hızlandıracaktır. Bu genellikle borularda ve pompalarda, çarklarda, fanlarda, nozullarda ve tüplerin dirsek kısımlarında görülmektedir (Kato ve Adachi 2001; Yıldız ve Gür 2006 ).



Şekil 4.8: Erozyon aşınması türleri(Kato ve Adachi 2001; Yıldız ve Gür 2006).

## 5. MATERYAL VE METOT

### 5.1 Deney Numunelerinin Üretimi

Bu çalışmada  $\varnothing 10 \times 25$  mm ölçülerinde Ti6Al4V deney numuneleri DMLS eklemeli imalat yöntemiyle Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezinde EOSINT marka M280 model 3B metal yazıcı ile farklı üretim parametreleri kullanılarak (lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığı) numunelerin üretimleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin üretiminde kullanılan Ti6Al4V tozu düşük özgül ağırlık ve biyouyumluluk ile birlikte mükemmel mekanik özellikler ve korozyon direnci ile karakterize edilen iyi bilinen bir hafif alaşımdır. Bu materyal birçok yüksek performanslı uygulama için idealdir (EOS Material Ti64 Flexline 2022).

Numunelerin üretiminde kullanılan 3B metal yazıcı Şekil 5.1 de ve kullanılan üretim parametreleri Tablo 5.1 de verilmiştir.

**Tablo 5.1:** DLMS üretim işlem parametreleri.

Numune No	Tarama Türü	Lazer Gücü (w)	Tarama Hızı (mm/sn)	Tarama aralığı (mm)	Katman Kalınlığı (mm)
1	Izgara Tarama	120	1000	0,1	0,03
2		150	1000		
3		180	1000		
4		120	1250		
5		150	1250		
6		180	1250		
7		120	1500		
8		150	1500		
9		180	1500		

DMLS yöntemi ile üretilen olan Ti6Al4V malzemesinin kimyasal bileşimi, yoğunluğu tanecik boyutu dağılımı değerleri Tablo 5.2’de verilmektedir.

**Tablo 5.2:** Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi.

	Ti	Al (%)	V (%)	O	N	C	H	Fe
Kimyasal Bileşimi	Ana element	5.5-6.75	3.5-4.5	< 2000 ppm	< 500 ppm	<800 ppm	<150 ppm	< 3000 ppm
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )								4,42
Tanecik Boyutu Dağılımı (µm)								20-50

Üretim sürecinde toz malzeme yüksek lazer enerjisi ile sinterlendiğinde, hızlı ısıtma ve soğutma nedeniyle parçada iç gerilim oluşmaktadır. İç gerilimler parçanın mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir.

Eklemeli imalat ile üretilen 9 adet numuneye kısmı argon gazı ortamında 1 saatte 650 °C ‘ye çıkarılıp 3 saat boyunca 650 °C ‘de gerilim giderme tavlama yapılmıştır. 4 saat sonunda ısıtma işlemi bitince 500 °C ‘ye kadar kapak kapalı olup daha sonrasında argon gazı kapatılıp fırının kapağı açılıp soğumaya bırakılmıştır.

Bu tez çalışmasında, DMLS ekipmanında test numunelerinin yapılma aşamasında yukarıda açıklanan ifadeleri göz önünde bulundurarak ve literatür çalışmaları incelenerek (Turhan 2016), üretim süreci parametreleri; lazer gücü (120,

150, 180W), tarama hızı (1000, 1250, 1500mm/s), tarama mesafesi (0,1mm) belirlenmiştir. Lazer üretim parametrelerinin lazer gücü, tarama hızı ve tarama mesafesi değerleri üç faktörde ve üç aşamada belirlenmiştir. Tüm bu proses parametreleri kontrol edilerek toplam 9 adet deney numunesi elde edilmiştir.

Geleneksel üretim yöntemi olarak ise endüstride Ti çubuk üretiminde en çok tercih edilen yöntemlerinden biri olan haddelme tercih edilmiştir. El yöntemiyle karşılaştırmak için haddelenmiş Ti6Al4V çubuklar TİMET metal firmasından temin edilmiştir.

## 5.2 Numunelerin Üretildiği DLMS Makinesi ve Üretilen Numuneler

Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezinde EOSINT marka M280 model 3B metal yazıcı ile Ti6Al4V toz parçacıklarından Ø10 x 25 mm ölçülerinde 9 adet DLMS numunesi üretilmiştir. Bu üretimde kullanılan EOSINT M280 DMLS cihazını Şekil 5.1 de verilmiştir.

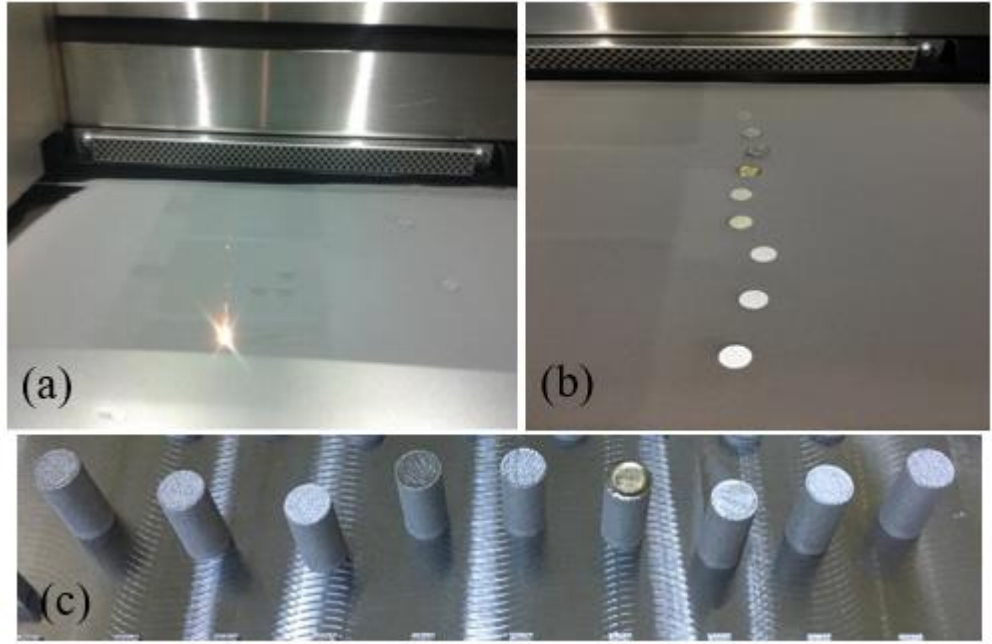


Şekil 5.1: EOSINT M280 DMLS cihazı

Üretimde kullanılan metal tozlarını, doğru toz birikimi sayesinde düzenli toz serilmeleri gerçekleştirilmiştir. Toz malzemesinin yapısına bakılarak, yüksek hız çeliği veya seramik bıçak kullanılarak toz serme gerçekleştirilmiştir. Toz malzemeyi sermek için kullanılan bıçakların hızı 40 ve 500 mm/s arasındadır.

İç gerilmeler azaltılması ve ilk katmanın tablaya iyi bir biçimde kaynaması

için tablaya ön ısıtma yapmak gerekmektedir. Kullanılan malzemenin özelliğine bakılarak 40-100 °C arasında ön ısıtma yapılabilir. Kullanılan Ti tozunun oksitlenme riski göz önüne alınarak azot ve argon gazları ortamında üretim gerçekleştirilmiştir. EOSINT M280 DMLS cihazı ile üretilen 9 adet numunenin üretim aşamaları aşağıdaki gibidir;



**Şekil 5.2:** DMLS yöntemiyle numune üretim aşamaları (a) DMLS cihazının ilk toz katman tabakasını lazer enerjisi ile oluşturmaya, (b) DLMS yöntemi ile Ti6Al4V numunelerin üretim aşaması, (c) DLMS yöntemi ile Ti6Al4V toz malzemesinden üretilen numuneler.

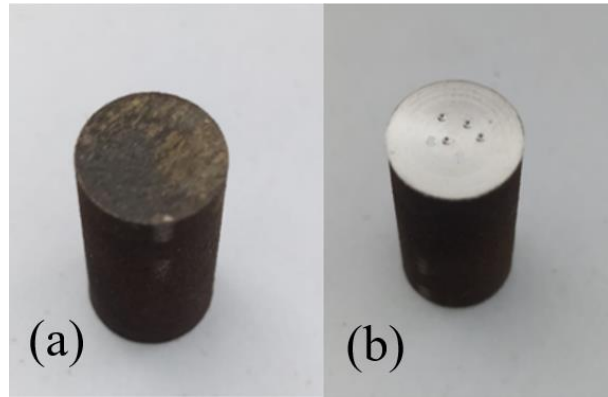
### 5.3 Sertlik Ölçümleri

DLMS yöntemi ile ve geleneksel imalat soğuk haddeleme yöntemiyle üretilen Ti6Al4V numunelerin sertlik ölçümünden önce Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine ve İmalat Mühendisliği Atölyesinde alın tornalama işlemi yapılmıştır. Numunelerin sertlik ölçümleri Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında yer alan Matsuzawa marka cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.3'te verilen Matsuzawa marka sertlik ölçme cihazı verilmiştir. Rockwell C sertlik ölçümleri 300 gr yük 15 sn bekleme süresinde dört ölçüm alınarak ve bu ölçüm değerlerinin ortalaması alınarak kullanılmıştır. Sertlik ölçümü yapılan numune Şekil 5.4'te verilmiştir.





Şekil 5.3: Matsuzawa sertlik ölçüm cihazı.



Şekil 5.4: (a) Sertliği ölçülmeden önceki Ti6Al4V numunesi (b) Sertliği ölçülen Ti6Al4V numunesi.

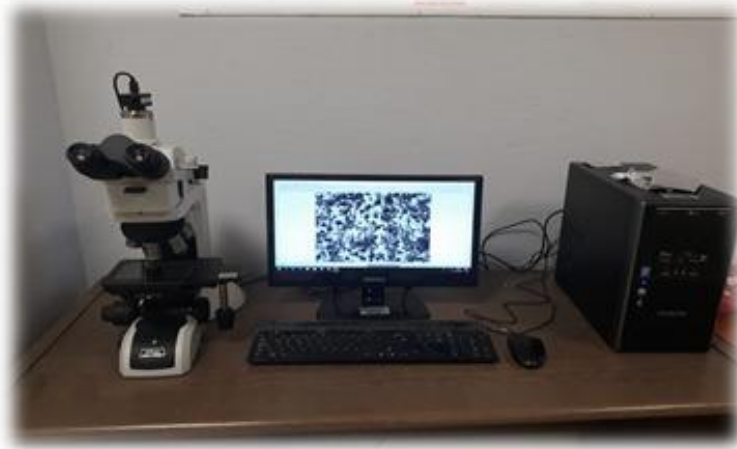
#### 5.4 Metalografik İncelemeler

Eklemeli imalat ile farklı parametrelerde üretilen Ti6Al4V alaşımı numunelerin mikroyapı incelemesi için zımparalama ve parlatma işlemleri Şekil 5.5'te uygulanmıştır. Zımparalama ve Parlatma işlemleri Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında yer alan çift hazneli Hardway marka zımparalama cihazda gerçekleştirilmiştir. Zımparalama işlemlerinde sırasıyla 180, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 zımpara numaraları kullanılmıştır. Ardından 6  $\mu\text{m}$  ve 3  $\mu\text{m}$  elmas solüsyonlar ile parlatılmıştır.



Şekil 5.5: Hardway zımparalama makinesi.

Zımparalama ve parlatma işlemi sonrası numuneler alkol ile temizlenip kurutulmuştur. Dağlama işlemleri Kroll solüsyonu (5 ml HNO<sub>3</sub> + 10 ml HF ve 85 ml saf su) ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler Kroll solüsyonu içerisinde 30 sn dağlanıp alkol ile temizlenmiştir. Mikroyapı analizleri Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında optik mikroskop cihazında gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numunelerin mikroskop görüntüleri Şekil 5.6'da verilen optik mikroskopta 100x ve 200x büyütme oranlarında alınmıştır.

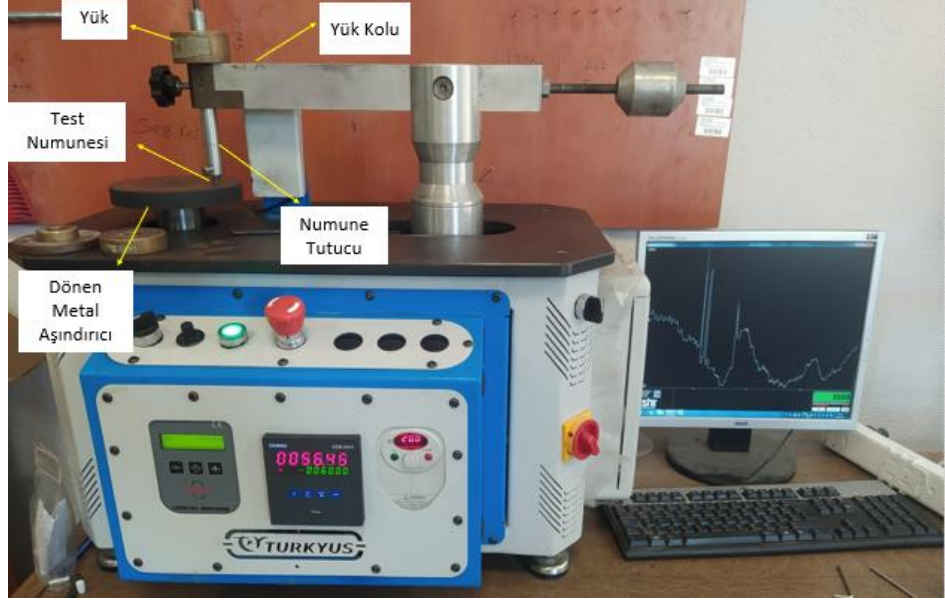


Şekil 5.6: Optik Mikroskop.

## 5.5 Pin-on-disk Aşınma Testi

Aşınma testleri Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine ve İmalat Mühendisliği Atölyesinde ASTM G99 standartına uygun olarak pin-on-disk aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Ø10 x 25 mm ölçülerindeki DLMS yöntemi ile

üretilmiş Ti6Al4V alaşımlı numuneler pim, 60 HRC sertliğindeki AISI 52100 aşındırıcı disk olarak kullanılmıştır. Aşınma testlerinde kullanılan test cihazının resmi Şekil 5.7’de Turkyus marka aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.7: Aşınma cihazının fotoğraf ile gösterimi.

Numuneler dönen bir metal yüzeye dik şekilde temas ettirilmiştir. Aşınma deneyleri 1 m/s kayma hızında 10 N, 15 N ve 20 N yük altında 60 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ağırlık kayıpları  $\pm 0.001$  g ölçme hassasiyetine sahip Şekil 5.8’de verilen RADWAG model NAS 220/C/2 marka hassas elektronik tartıda belirlenmiştir.



Şekil 5.8: Hassas Elektronik Tartı.

Hacim kaybı, Aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerlerini hesaplamak için aşağıda verilen denklemler kullanılmıştır. Aşınma deneyleri sonunda ölçülen ağırlık kayıpları denklem (5.1)'de verilen eşitlikle hacim kaybına çevrilmiştir. Ti6AL4V yoğunluğu  $4.42 \text{ g/cm}^3$  olarak alınmıştır.

$$\text{mm}^3 = (\text{g} / (\text{g/cm}^3)) \times 1000 \quad (5.1)$$

Denklem 5.1 de bulunan Hacim kayıpları denklem 5.2'deki eşitlik kullanılarak aşınma oranına çevrilmiştir. (Hacim kaybı ( $\text{mm}^3$ ), Ağırlık kaybı (g), Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ ), Spesifik Aşınma Oranı ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ), Hacim Kaybı ( $\text{mm}^3$ ), Uygulanan Kuvvet (N), Kayma Mesafesi (m))

$$\text{mm}^3/\text{Nm} = \text{mm}^3 / (\text{N} * \text{m} * 100000) \quad (5.2)$$

Sürtünme ( $\mu_s$ ) katsayısı ; Denklem 5.3 kullanılarak Sürtünme kuvvetinin ( $F_s$ ), uygulayan normal kuvvete( $F_n$ ) bölümden elde edilmiştir. Denklem 5.3'te verilmiştir.

$$\mu_s = F_s / F_n \quad (5.3)$$

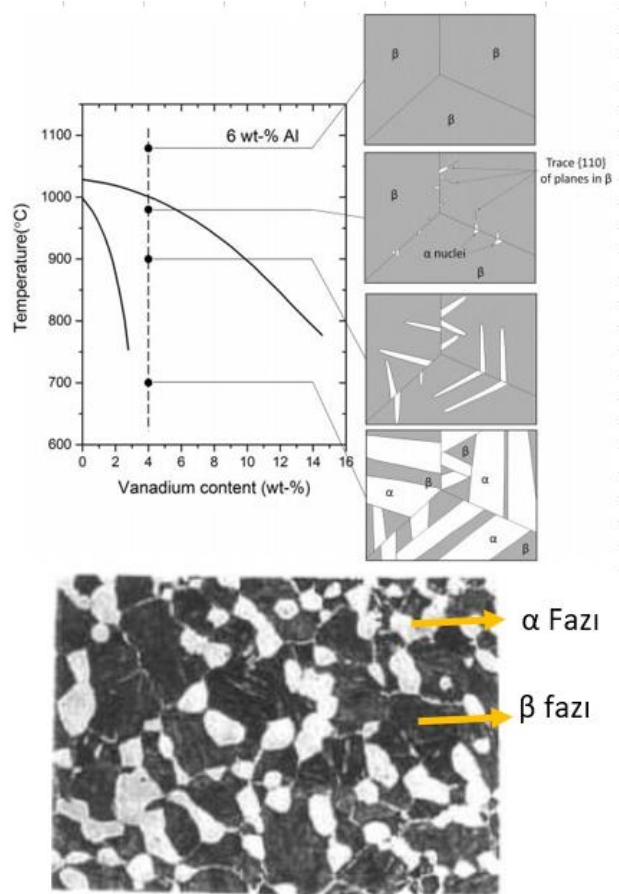
Aşınma testi sonrasında yüzeyde oluşan hasarları incelemek için Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ve Enerji Dağıtıcı X-Işını (EDX) analizleri yapılmıştır. Analizler Pamukkale Üniversitesi İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiştir.

## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Eklemeli imalat ve geleneksel imalat yöntemi ile üretilen Ti6Al4V numunelerin mikroyapı, sertlik, hacim kaybı, aşınma oranı, sürtünme katsayısı ve aşınmış yüzey FESEM görüntülerinin karşılaştırılması bu bölümde verilmiştir.

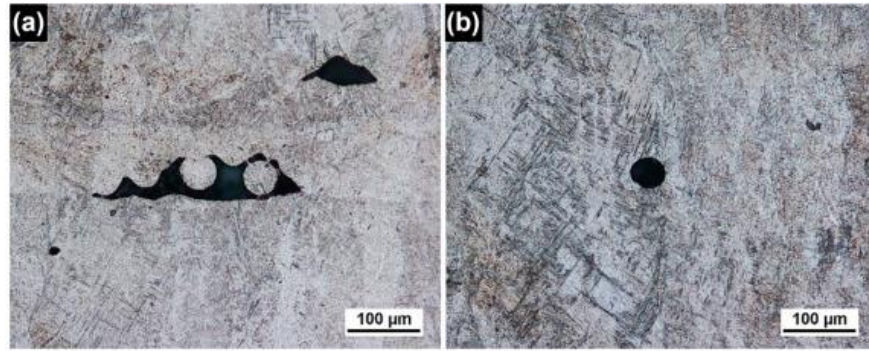
### 6.1 Mikroskop Görüntülerinin İncelenmesi

Şekil 6.1’de verilen mikroyapı görüntüsünde, açık renkler  $\alpha$  fazını ve koyu renkler  $\beta$  fazını temsil etmektedir. DMSL'nin üretim sürecinde, erime sonrası hızlı soğuma nedeniyle mikro yapıda martensitik bir yapı ( $\alpha$  Faz) gözlenmektedir. Titanyum alaşımlarında, SPH- $\alpha$  fazı, HMK- $\beta$  faz dönüşümünün soğuma hızına bağlı olarak martensit olarak gelişebilir (dönüşüm sıcaklığı  $\beta$ ). Hızlı soğutma ile  $\beta$  dönüşüm sıcaklığı meydana gelirse,  $\beta$  fazı martensit olarak  $\alpha$  'fazına geçebilir (Attar ve diğ. 2014).



Şekil 6.1: Ti6AL4V alaşımasının mikroyapısı (Attar ve diğ. 2014).

Eİ ile üretilen ürünlerde iki tip gözenek hakimdir: gaz gözenekleri ve füzyon eksikliği gözenekler (Li ve diğ. 2015). Şekil 6.2’de bu iki gözeneklerin morfolojisini göstermektedir. Gaz gözenekleri genellikle yaklaşık 1-100 µm çapında küresel veya eliptik bir şekil sergiler ve malzeme içinde rastgele dağılır (Şekil 6.2(b)). Bu gözeneklerin yuvarlak şekli, eriyik havuzunda tutulan gazın zamanla kaçmadığı ve bu nedenle katılaştıkça sıkıştığı şekilde gaz tutulması nedeniyle oluştuğunu gösterir (Galarraga ve diğ. 2016, Yang ve Man 2000). Bu nedenle, yoğun metal tozları, Eİ proseslerinde hammadde malzemesi olarak sünger tipi tozlara tercih edilir, çünkü sünger tozlarındaki içi boş yapı, gaz gözeneklerini kolayca ortaya çıkarır (Bauereiß ve diğ. 2014, Ng ve diğ. 2009). Genellikle tarama hızını yavaşlatmak ve lazer gücünü artırmak, oluşumu hafifletecektir. Gaz gözeneklerini bir dereceye kadar azaltır, ancak onları tamamen yok edemez (Yang ve Man 2000, Choi ve Chang 2005).

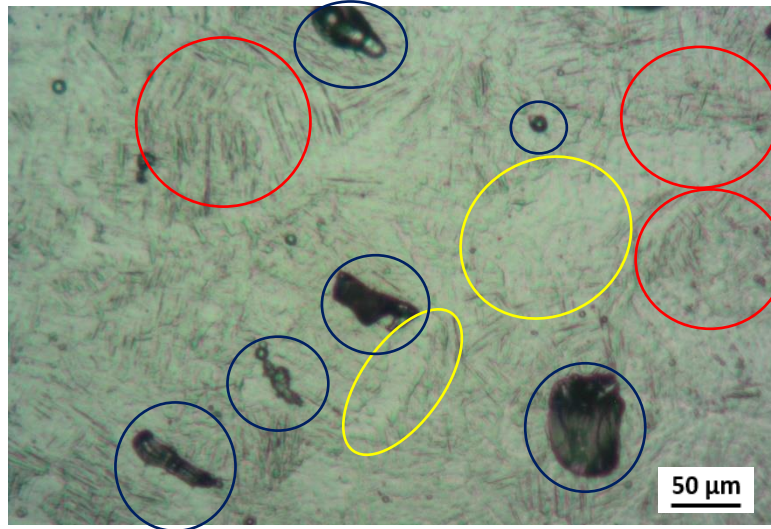


Şekil 6.2: Ti6Al4V'nin elektron ışını erimesindeki gözeneklilik: (a) füzyon eksikliği (b) gaz gözenek (Galarraga ve diğ. 2016).

Gaz gözeneklerinden farklı olarak, füzyon eksikliği gözenekleri daha büyük olma eğilimindedir ve düzensiz kama şekli veya iki ucunda keskin uçları olan bant şekli gösterir (Şekil 6.2(a)). Bu gözenekler genellikle iki bitişik tabakanın sınır bölgesinde dağılır ve ince ara yüzey yassı çatlaklar bırakır. Literatürde açıklandığı gibi Tammasve diğ. (2015), Vilaro ve diğ. (2011), Formanoir ve diğ. (2016), Gaytan ve diğ. (2009) füzyon eksikliği gözenekleri esas olarak, aşırı miktarda tozu eritmeye çalışan yetersiz lazer enerjisi gibi, yetersiz erime ile sonuçlanan optimum erime koşullarından sapma nedeniyle üretilir. Füzyon eksikliği gözeneklerinin kısa ekseni tipik olarak dikey yönünde hizalanır. Yükleme maruz kaldığında, özellikle dikey yönüne paralel tek eksenli çekme yükü altında, bu gözeneklerin keskin uçları yoğun yerel gerilmelere eğilimlidir ve bu da üst olgunlaşma başarısızlığına yol açar (Vilaro

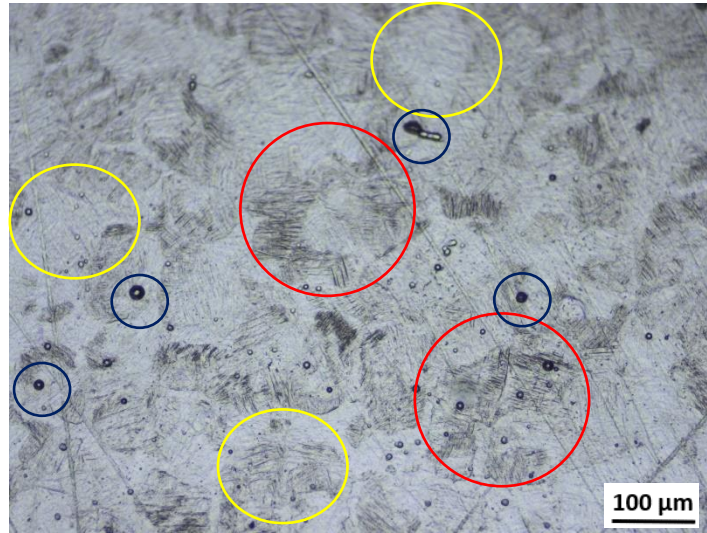
ve diğ. 2011, Li ve diğ. 2015). Gaz gözenekleriyle karşılaştırıldığında, füzyon eksikliği gözenekleri Eİ ile üretilen ürünlerin performansını daha ölümcül şekilde etkiler, ancak önlenebilir olarak kabul edilir (Hrabe ve diğ. 2017). Füzyon eksikliği gözeneklerini azaltmanın etkili bir yolu, giriş enerji yoğunluğunu arttırmaktır.

Şekil 6.3'te verilen Ti6Al4V numunenin üretimi 120 W lazer gücünde, 1000 mm/sn tarama hızında ve 40 J/mm<sup>3</sup> yoğunluğunda gerçekleşmiştir. Şekil 6.3'te mikroyapı görüntüsü incelendiğinde yüzeyde gaz boşluklarının (Mor Renkli) olduğu gözlenmiştir. Gaz boşluklarının oluşmasının sebebi, eriyik havuzunda tutulan gazın zamanla kaçmadığı ve bu nedenle katılaşmış boncukta sıkıştığı şekilde gaz tutulması nedeniyle oluştuklarını gösterir (Galarraga ve diğ. 2016, Yang ve Man 2000). Bu nedenle, yoğun metal tozları, Eİ proseslerinde hammadde malzemesi olarak sünger tipi tozlara tercih edilir, çünkü sünger tozlarındaki içi boş yapı, gaz gözeneklerini kolayca ortaya çıkarır (Bauereiß ve diğ. 2014, Ng ve diğ. 2009). Şekil 6.3'te mikroskop görüntüsünde tanecikler belirginleşme başlangıcı olarak küreselleşen mikro yapılar görünmüştür. Mikroyapı görüntüsünde, açık (Sarı renkli) tanecikler  $\alpha$  fazını ve koyu (Kırmızı renkli) tanecikler  $\beta$  fazını temsil etmektedir (Attar ve diğ. 2014).



Şekil 6.3: Numune-1 Optik Mikroskop Görüntüsü (200x Büyütme).

150 W lazer gücünde, 1000 mm/sn tarama hızında ve  $50 \text{ J/mm}^3$  yoğunluğunda üretimi gerçekleştirilen Ti6Al4V numunenin mikroyapı görüntüleri Şekil 6.4'te verilmiştir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde yüzeydeki küçük siyahlıkların üretim sürecinde oluşan gaz boşlukları (mor renkli) olduğu görülmüştür. Gaz gözenekleri genellikle yaklaşık 1-100  $\mu\text{m}$  çapında küresel veya eliptik bir şekil sergiler ve malzeme içinde rastgele dağılır (Galarraga ve diğ. 2016, Yang ve Man 2000). Yüzeyde görünen çiziklerin ise zımparalamadan dolayı gerçekleştiği görülmüştür. Uygun üretim parametreleri sağladığında, ideal en yüksek enerji yoğunluğundan dolayı lazer tarama çizgileri birbirine daha iyi kaynamıştır. Dolayısıyla düşük gözenek yoğunluğu ve yüksek mikrosertlik sonuçları elde edilmiştir. Mikroyapıda  $\alpha$  fazının (sarı renkli)  $\beta$  fazından (kırmızı renkli) fazla olması mikrosertliğin artmasını sağlar.  $\alpha$  fazının mikrosertliği  $\beta$  fazının mikrosertliğinden fazladır (Song ve diğ. 2012). Şekil 6.4'te incelenen mikro yapılarda eş eksenli küreselleşen tanecik yapıları ve belirginleşen tane sınırları görülmüştür. Mikroyapı görüntüsünde, açık (sarı renkli) tanecikler  $\alpha$  fazını ve koyu (kırmızı renkli) tanecikler  $\beta$  fazını temsil etmektedir (Attar ve diğ. 2014).



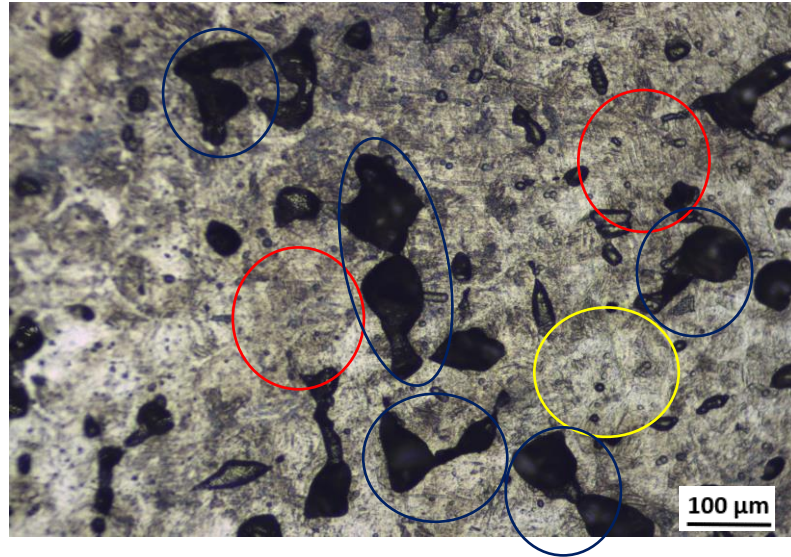
**Şekil 6.4:** Numune-2 Optik Mikroskop Görüntüsü (100x Büyütme).

180 W lazer gücünde, 1000 mm/sn tarama hızında ve  $60 \text{ J/mm}^3$  yoğunluğunda üretimi ile elde edilen numuneler Şekil 6.5'te yer almaktadır. Gaz boşluklarının oluşmasının sebebi, eriyik havuzunda tutulan gazın zamanla kaçmadığı ve bu nedenle katılaşmış boncukta sıkıştığı şekilde gaz tutulması nedeniyle oluştuklarını gösterir (Galarraga ve diğ. 2016, Yang ve Man 2000). Bu nedenle, yoğun metal tozları, Eİ



proseslerinde hammadde malzemesi olarak sünger tipi tozlara tercih edilir, çünkü sünger tozlarındaki içi boş yapı, gaz gözeneklerini (Mor renkli) kolayca ortaya çıkarır (Bauereiß ve diğ. 2014, Ng ve diğ. 2009). Enerji yoğunluğunun artmasıyla gözenek miktarı artmıştır. Ayrıca en yüksek enerji yoğunluğu ve en düşük sertlikte bu numune de elde edilmiştir. Belli bir noktadan alınan element analizinin sonucunda %91,6 Al, %11,7 C, %7,2 O, %1,2 Mg ve %0,8 Ti olarak görünmüştür (Şekil 6.32.). Sertliğinin düşük gelmesinin sebebi Al oranının yüksek ve Ti oranının düşük olmasından olabilir. Alüminyum oranının yüksek çıkmasının sebebi; Yüksek lazer gücü ve yüksek enerji yoğunluğundan dolayı Ti6Al4V alaşımın içerisinde bulunan en düşük yoğunluğa sahip element Alüminyum olduğu için eriyerek yüzeye nüfus etmiştir. Böylelikle element analizinde Alüminyum değeri yüksek çıkmış ve sertlik ölçüm sonucu düşük çıkmıştır.

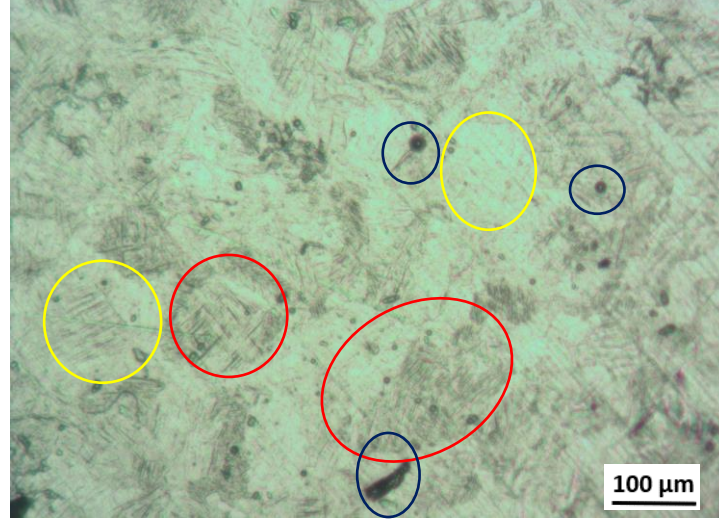
Şekil 6.32’de Element analizinde C çıkmasının sebebinin aşındırıcı diskten numune yüzeyine C nüfus etmiş olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 6.5: Numune-3 Optik Mikroskop Görüntüleri (100x Büyütme).

Şekil 6.6’da verilen numune 120 W lazer gücünde, 1250 mm/sn işlem hızında ve 32 J/mm<sup>3</sup> yoğunluğunda üretimi gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde yüzeydeki gaz boşluklarının (Mor renkli) çok az miktarda küçük küçük dağınık olduğu gözlemlenmiştir. Yüzeyi en temiz ve en az gaz boşlukları bu numunede görülmüştür. Uygun üretim parametreleri sağladığında, ideal en yüksek enerji yoğunluğundan dolayı lazer tarama çizgileri birbirine daha iyi kaynamıştır.

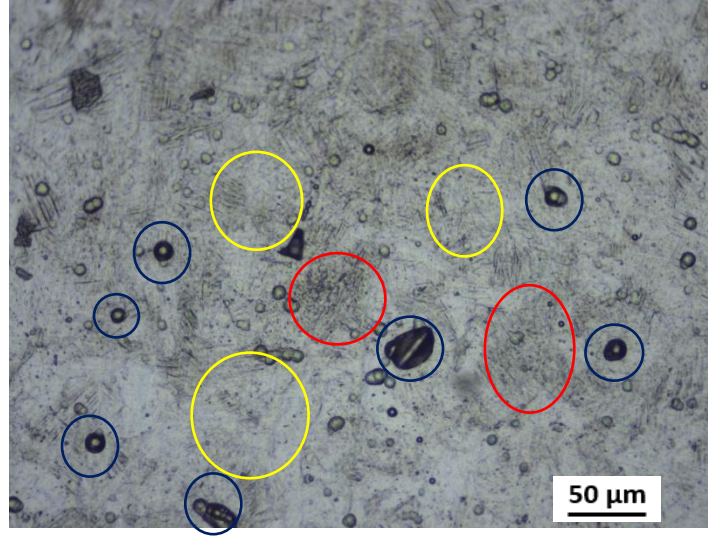
Dolayısıyla düşük gözenek yoğunluğu ve yüksek mikro sertlik sonuçları elde edilmiştir. Şekil 6.6’da mikroskop görüntüsünde eş eksenli küreselleşen mikro yapılar görülmüştür. Mikroyapı görüntüsünde, açık tanecikler (Sarı renkli)  $\alpha$  fazını ve koyu tanecikler (Kırmızı renkli)  $\beta$  fazını temsil etmektedir (Attar ve diğ. 2014).



Şekil 6.6: Numune-4 Optik Mikroskop Görüntüleri (100x Büyütme).

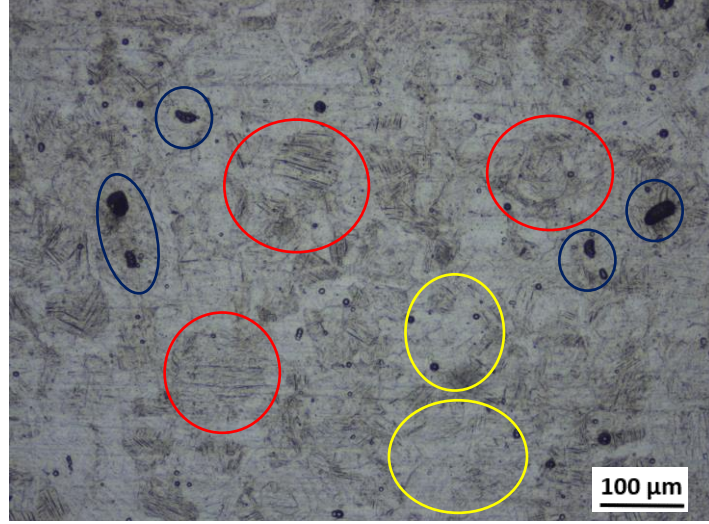
150 W lazer gücünde, 1250 mm/sn tarama hızında ve  $40 \text{ J/mm}^3$  yoğunluğunda üretimi gerçekleşmiştir. Şekil 6.7’de mikro yapı görüntüleri incelendiğinde yüzeydeki gaz boşluklarının (Mor renkli) belirgin ve dağınık olduğu gözlenmiştir. Gaz boşluklarının oluşmasının sebebi, eriyik havuzunda tutulan gazın zamanla kaçmadığı ve bu nedenle katılmış boncukta sıkıştığı şekilde gaz tutulması nedeniyle oluştuklarını gösterir (Galarraga ve diğ. 2016, Yang ve Man 2000). Bu nedenle, yoğun metal tozları, Eİ proseslerinde hammadde malzemesi olarak sünger tipi tozlara tercih edilir, çünkü sünger tozlarındaki içi boş yapı, gaz gözeneklerini kolayca ortaya çıkarır (Bauereiß ve diğ. 2014, Ng ve diğ. 2009). Uygun üretim parametreleri sağladığında, ideal en yüksek enerji yoğunluğundan dolayı lazer tarama çizgileri birbirine daha iyi kaynamıştır. Dolayısıyla düşük gözenek yoğunluğu ve yüksek mikro sertlik sonuçları elde edilmiştir. Hacim kaybı ve Aşınma oranı düşük olan numunelerden biridir. Şekil 6.7’de incelenen mikro yapılarda çok belirgin olmayan küreselleşmemiş tanecik yapıları görülmüştür. Mikroyapı görüntüsünde, açık tanecikler (Sarı renkli)  $\alpha$  fazını ve koyu tanecikler (Kırmızı renkli)  $\beta$  fazını temsil etmektedir (Attar ve diğ. 2014). Tİ6Al4V alaşımı için EOS firmasının önermiş olduğu parametrelere (x-işlem stratejisi,

160 W lazer gücü, 1250 mm/s işlem hızı ve 0.1mm tarama mesafesinde ve 42,67 J/mm<sup>3</sup> enerji yoğunluğu) yakın olan numunelerden biridir.



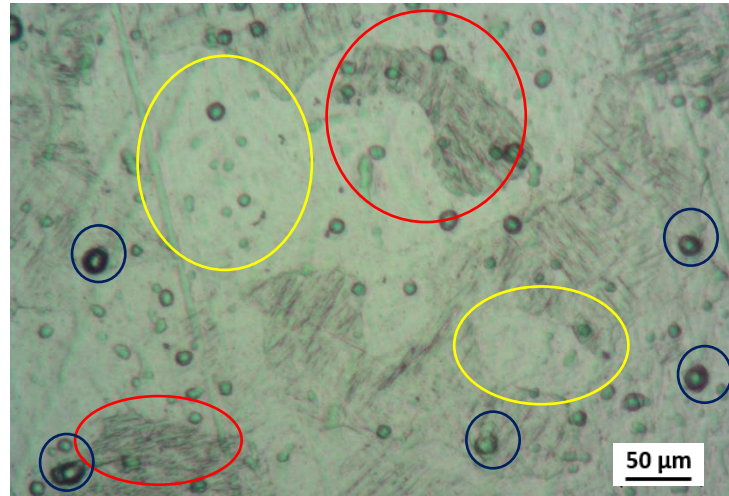
Şekil 6.7: Numune-5 Optik Mikroskop Görüntüleri (200x Büyütme).

180 W lazer gücünde, 1250 mm/sn işlem hızında ve 48 J/mm<sup>3</sup> yoğunluğunda üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.8’de mikro yapı görüntüleri incelendiğinde yüzeydeki gaz boşluklarının (Mor renkli) çok az miktarda küçük küçük dağılık olduğu gözlenmiştir. Gaz gözenekleri genellikle yaklaşık 1-100 μm çapında küresel veya eliptik bir şekil sergiler ve malzeme içinde rastgele dağılır (Galarraga ve diğ. 2016, Yang ve Man 2000). Yüzey zımparalamadan dolayı mikro yapıda çizikler görünmüştür. Uygun üretim parametreleri sağladığında, ideal en yüksek enerji yoğunluğundan dolayı lazer tarama çizgileri birbirine daha iyi kaynamıştır. Dolayısıyla düşük gözenek yoğunluğu ve yüksek mikro sertlik sonuçları elde edilmiştir. Hacim kaybı ve Aşınma oranı düşük olan numunelerden biridir. Şekil 6.8’de incelenen mikro yapılarda eş eksenli küreselleşen tanecik yapıları görünmüştür. Mikroyapı görüntüsünde, açık tanecikler (Sarı renkli) α fazını ve koyu tanecikler (Kırmızı renkli) β fazını temsil etmektedir (Attar ve diğ. 2014). Ti6Al4V alaşımı için EOS firmasının önermiş olduğu parametrelere (x-işlem stratejisi, 160 W lazer gücü, 1250 mm/s işlem hızı ve 0.1mm tarama mesafesinde ve 42,67 J/mm<sup>3</sup> enerji yoğunluğu) yakın olan numunelerden biridir.



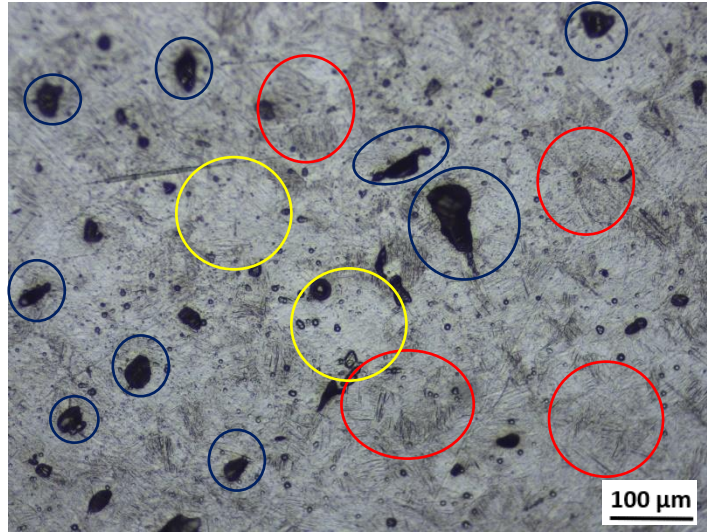
Şekil 6.8: Numune-6 Optik Mikroskop Görüntüleri (100x Büyütme).

120 W lazer gücünde, 1500 mm/sn tarama hızında ve  $26,67 \text{ J/mm}^3$  yoğunluğunda üretimi gerçekleşmiştir. Şekil 6.9'da mikro yapı görüntüleri incelendiğinde yüzeyindeki gaz boşluklarının (Mor renkli) küçük küçük konumlandığı gözlenmiştir. Gaz gözenekleri genellikle yaklaşık 1-100  $\mu\text{m}$  çapında küresel veya eliptik bir şekil sergiler ve malzeme içinde rastgele dağılır (Galarraga ve diğ. 2016, Yang ve Man 2000). Gaz boşluklarının homojen şekilde dağıldığı gözlenmiştir. Yapılan dağlama sonucunda mikro yapıda küreselleşen tanecikler görülmüştür. En düşük yoğunluğa sahip numunedir. Mikroyapı görüntüsünde, açık tanecikler (Sarı renkli)  $\alpha$  fazını ve koyu tanecikler (Kırmızı renkli)  $\beta$  fazını temsil etmektedir (Attar ve diğ. 2014).



Şekil 6.9: Numune-7 Optik Mikroskop Görüntüleri (200x Büyütme).

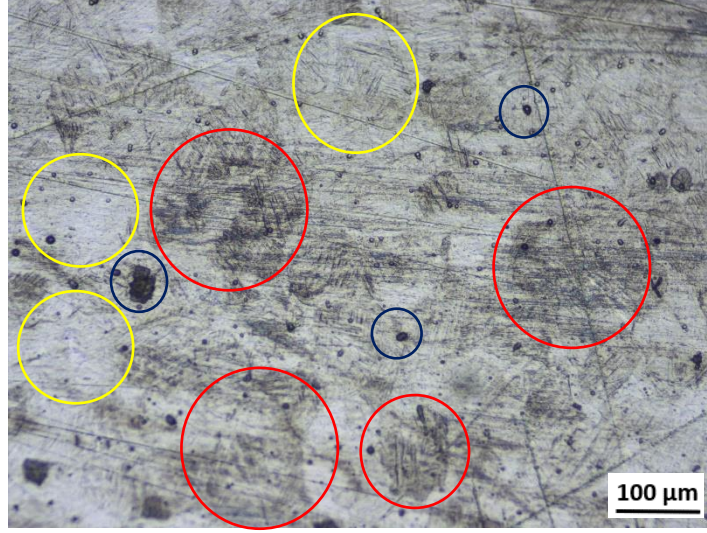
150 W lazer gücünde, 1500 mm/sn tarama hızında ve  $33,33 \text{ J/mm}^3$  yoğunluğunda üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.10'da mikro yapı görüntüleri incelendiğinde görünün gaz boşlukları (Mor renkli) eriyik havuzunda tutulan gazın zamanla kaçmadığı ve bu nedenle katılaştıkça sıkıştığı şekilde gaz tutulması nedeniyle oluştuğunu gösterir (Galarraga ve diğ. 2016, Yang ve Man 2000). Bu nedenle, yoğun metal tozları, Eİ proseslerinde hammadde malzemesi olarak sünger tipi tozlara tercih edilir, çünkü sünger tozlarındaki içi boş yapı, gaz gözeneklerini kolayca ortaya çıkarır (Bauereiß ve diğ. 2014, Ng ve diğ. 2009). Küçük küçük gaz boşluklarının düzensiz şekilde dağıldığı gözlenmiştir. Şekil 6.10 mikroskop görüntüsünde tanecikler belirginleşme başlangıcı olarak küreselleşen mikro yapılar görünmüştür. Mikroyapı görüntüsünde, açık tanecikler (Sarı renkli)  $\alpha$  fazını ve koyu tanecikler (Kırmızı renkli)  $\beta$  fazını temsil etmektedir (Attar ve diğ. 2014).



Şekil 6.10: Numune-8 Optik Mikroskop Görüntüleri (100x Büyütme).

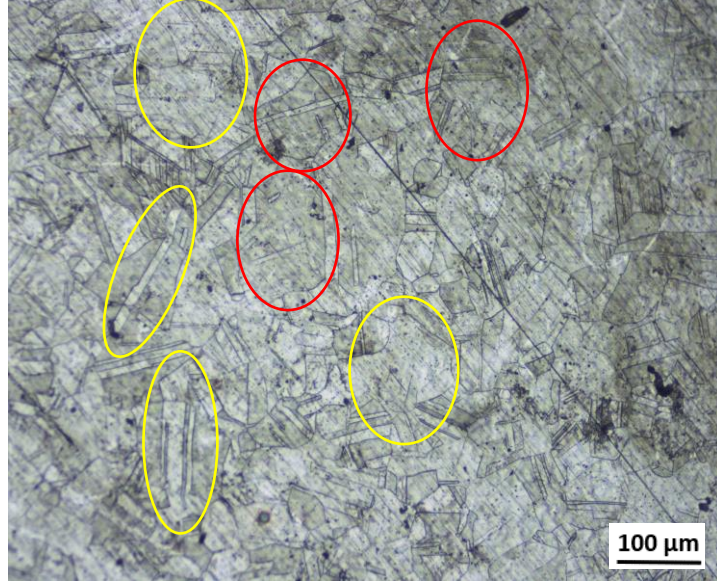
180 W lazer gücünde, 1500 mm/sn tarama hızında ve  $40 \text{ J/mm}^3$  yoğunluğunda üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.11'de mikro yapı görüntüleri incelendiğinde yüzeydeki gaz boşluklarının (Mor renkli) az miktarda küçük küçük dağınık olduğu gözlenmiştir. Gaz gözenekleri genellikle yaklaşık 1-100  $\mu\text{m}$  çapında küresel veya eliptik bir şekil sergiler ve malzeme içinde rastgele dağılır (Galarraga ve diğ. 2016, Yang ve Man 2000). Yapılan dağlama sonucunda mikro yapıda belirginleşen küresel tanecikler gözlenmiştir. Aşınma deneyinden ve yüzeyde yapılan zımparalamadan dolayı mikro yapıda çizikler görünmüştür. Mikroyapı görüntüsünde, açık tanecikler

(Sarı renkli)  $\alpha$  fazını ve koyu tanecikler (Kırmızı renkli)  $\beta$  fazını temsil etmektedir (Attar ve diğ. 2014).



Şekil 6.11: Numune-9 Optik Mikroskop Görüntüleri (100x Büyütme).

Ti6Al4V silindir çubuk geleneksel (haddeme) imalat yöntemiyle üretilip sırasıyla 180, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 numaralı zımparalardan geçerek yüzey temizleme işlemi uygulanmıştır. Zımparalanan yüzeye keçe yardımıyla 6 ve 3 mikron elmas solisyon kullanarak yüzey parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Mikro yapı görüntülerini alabilmek için 10 ml HNO<sub>3</sub>, 20 ml HF ve 85 ml saf su ile asit karışımı oluşturularak 30 sn dağlama işlemi uygulanmıştır. Dağlama sonucunda eklemeli imalat ile üretilen numunelerde görülen mikro yapılara göre daha belirgin lamel yapılı tanecikler ve tanecik sınırları gözlenmiştir. Soğuk haddeme ile üretilen numune de gaz boşlukları görülmemiştir. Mikroyapı görüntüsünde, açık tanecikler (Sarı renkli)  $\alpha$  fazını ve koyu tanecikler (Kırmızı renkli)  $\beta$  fazını temsil etmektedir (Attar ve diğ. 2014).



Şekil 6.12: Ti6Al4V Optik Mikroskop Görüntüleri (100x Büyütme).

## 6.2 Sertlik Deney Sonuçları

DMSL yöntemiyle farklı parametrelerde üretilen ve geleneksel yöntemle üretilen Ti6Al4V numunelerin sertlik değerleri Tablo 6.1 ve Şekil 6.13'te verilmiştir. Tablo ve grafikte verilen 10 numaralı numune standart Ti6Al4V numunedir. Ayrıca üretim parametreleri ile Eşitlik 6.1 de verilen formül ile enerji yoğunluğu değerleri de hesaplanmıştır.

Enerji yoğunluğu Eşitlik 6.1'de verilen denklem ile hesaplanmıştır (Kruth ve Kumar 2005; Liu ve Shin 2019).

$$E = P / (v.s.t) \quad (6.1)$$

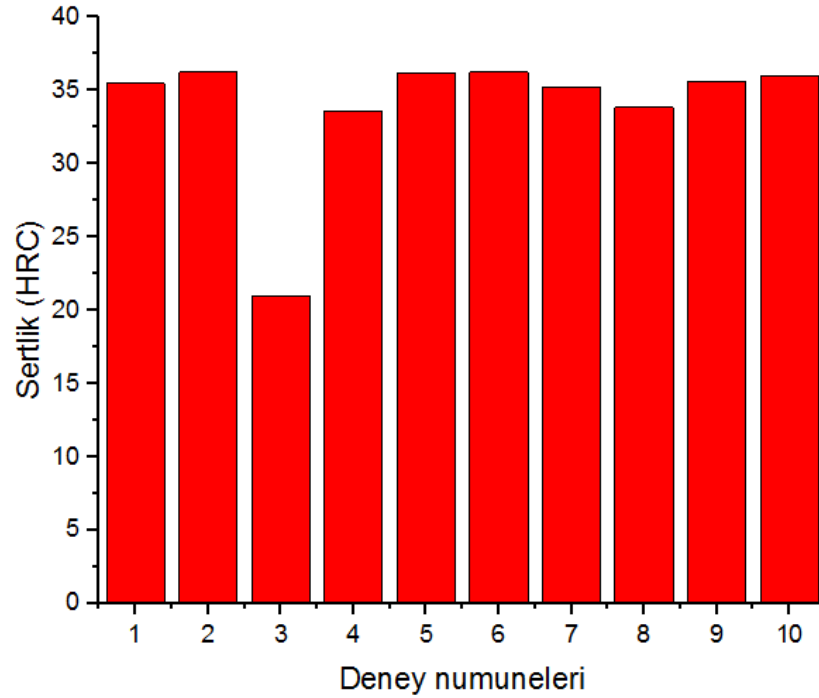
Eşitlik 6.1 'de verilen denklemde P lazer gücü (W), v tarama hızı (mm/s), s tarama aralığı (mm) ve t ise katman kalınlığı (mm)'dir.

Elde edilen sertlik verileri karşılaştırıldığında 3 numaralı numune (180W lazer gücü, 1000 mm/sn tarama hızı) hariç diğer numunelerin sertliklerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca en düşük sertlik değerinin elde edildiği 3 numaralı numune en yüksek enerji yoğunluğunun gerçekleştiği (60 J/mm<sup>3</sup>) numunedir. Yukarıda verilen mikroyapı analizleri incelendiğinde de 3 numaralı numunede çok fazla porozite oluştuğu görülmüştür. İlk 3 numunede Tarama hızı, tarama aralığının ve katman kalınlığının sabit olması sertlikteki düşüşün sebebinin yüksek lazer gücü olduğunu

göstermiştir. Diğer üretim parametreleri kıyaslandığında sertlik açısından nispeten kayda değer bir değişiklik olmadığı görülmüştür. En düşük enerji yoğunluğu incelendiğinde sırasıyla 26,7 J/mm<sup>3</sup> ve 32 J/mm<sup>3</sup> enerji yoğunluklarıdır. 7 ve 4 numaralı numunelerin sertlik değerleri nispeten diğer numunelerin sertliklerinden biraz düşüktür. Bu sonuçlar ışığında, seçilen deney parametreleri arasında Ti6Al4V numune üretmek için enerji yoğunluğunun 40 – 50 J/mm<sup>3</sup> arasında tutulması sertlik değerlerinin standart Ti6Al4V numuneyle aynı seviyede olmasını sağladığı sonucu çıkarılmıştır.

**Tablo 6.1:** Eklemeli imalat üretim parametreleri için enerji yoğunluğu ve sertlik değerleri.

Numune numarası	Lazer Gücü (w)	Tarama Hızı (mm/sn)	Tarama aralığı (mm)	Katman kalınlığı (mm)	Enerji yoğunluğu (J/mm <sup>3</sup> )	Ortalama Sertlik (HRC)
1	120	1000	0,1	0,03	40	35,475
2	150	1000			50	36,25
3	180	1000			60	20,95
4	120	1250			32	33,625
5	150	1250			40	36,2
6	180	1250			48	36,25
7	120	1500			26,7	33,2
8	150	1500			33,3	35,825
9	180	1500			40	35,575

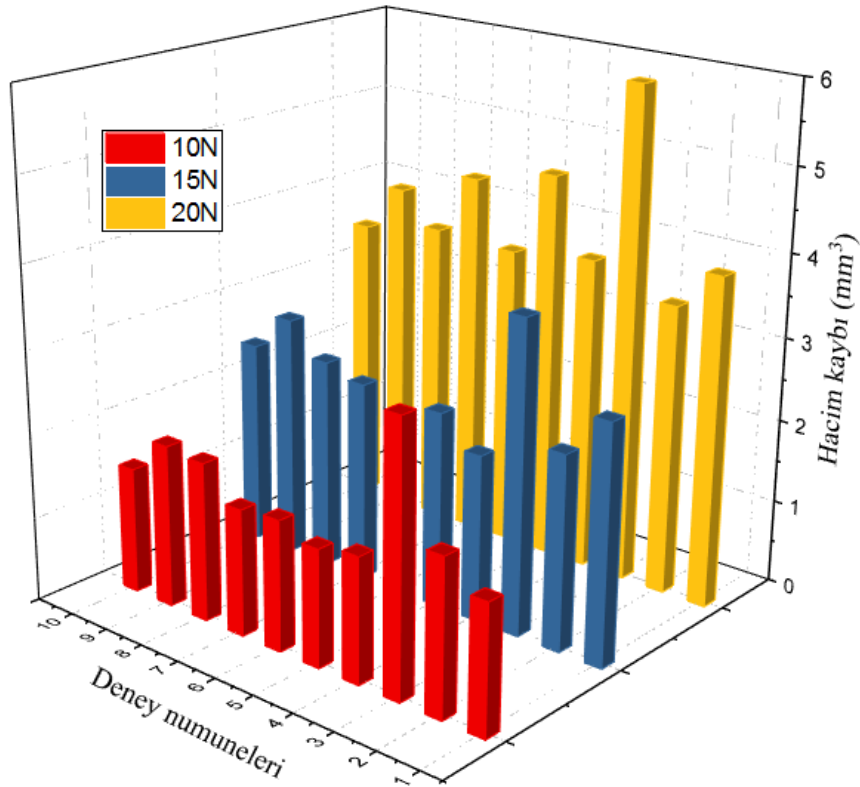


**Şekil 6.13:** Sertlik Ölçüm Sonuçları.



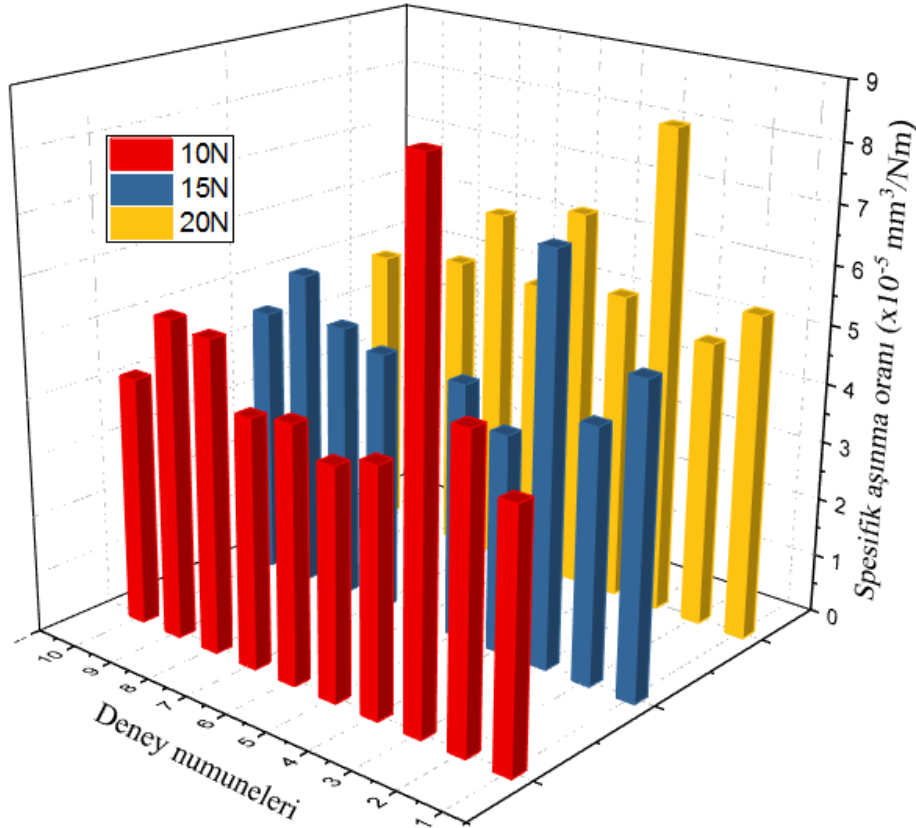
### 6.3 Aşınma Deney Sonuçları

Farklı DMLS parametreleri kullanılarak üretilen Ti6Al4V numunelerin aşınma test sonuçları Şekil 6.14 ve 6.15'te verilmiştir. Şekil 6.14'te üç farklı yük altındaki aşınma deneylerinden elde edilen hacim kaybı verileri grafik halinde sunulmuştur. Grafik incelendiğinde uygulanan yükün artmasıyla hacim kaybındaki artış açık bir şekilde görülmüştür. Deney parametreleri içerisinde en düşük hacim kaybı değerleri 10N yük altında, en yüksek hacim kaybı değerleri ise 20N yük altındaki aşınma deneyleri sonrası elde edilmiştir. Ayrıca 10N, 15N ve 20N yük altında en yüksek hacim kaybı dolayısıyla en düşük aşınma direnci 3 numaralı numunede gerçekleşmiştir. Yukarıda verilen sertlik sonuçları incelendiğinde 3 numaralı numunenin en düşük sertliğe sahip olduğu görülmüştür. Sertlik aşınma direncini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Bununla birlikte 10 numaralı standart numune, eklemeli imalat ile üretilen Ti6Al4V numunelerin aşınma performansı karşılaştırıldığında kayda değer bir farklılık gözlenmemiştir.



Şekil 6.14: Üç farklı yük altında hacim kaybı grafiği.

Şekil 6.15'te üç farklı yük altındaki aşınma deneylerinden elde edilen spesifik aşınma oranı verileri grafik olarak verilmiştir. Aşınma oranı, uygulanan yükten bağımsız olarak birim mesafe başına hacim kaybını gösterirken, spesifik aşınma oranı kütle, yoğunluk, yük ve kayma mesafesine bağlıdır. Spesifik aşınma oranı, özellikle metaller, alaşımlar ve kompozitlerin aşınma özelliklerinin doğru bir şekilde tanımlamak için kullanılmaktadır (Turhan ve Özsoy 2016). Farklı yükler, farklı hızlar ve farklı kayma mesafeleri altında malzemelerin aşınma özelliklerinin kesin bir göstergesi olarak tercih edilmiştir. Spesifik aşınma oranı sonuçları incelendiğinde 10N, 15N ve 20N yük altında en yüksek spesifik aşınma oranı dolayısıyla en düşük aşınma direnci 3 numaralı numunede gerçekleşmiştir. Elde edilen spesifik aşınma oranı sonuçları hacim kaybı sonuçlarına paralel olmasına rağmen hacim kaybı değerlerindeki gibi uygulanan yükün artmasıyla kayda değer bir artış görülmemiştir. Bu sonuçlar ışığında DMSL yöntemi ve geleneksel yöntemle üretilen Ti6Al4V alaşımının aşınma oranı artan yük oranına paralel olarak artmış denilebilir.



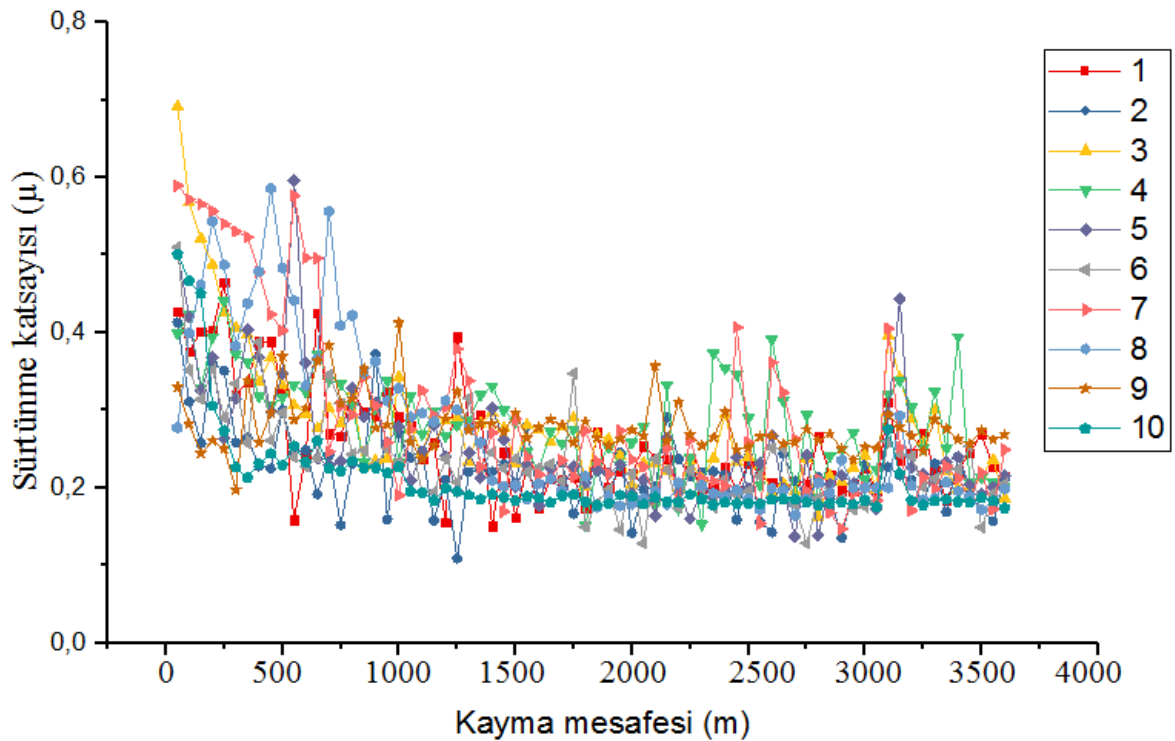
Şekil 6.15: Üç farklı yük altında spesifik aşınma oranı grafiği.

Tablo 6.2'de üç farklı yük altındaki aşınma deneylerinden elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değerleri verilmiştir. 10 numaralı numune standart Ti6Al4V'dur.

Gerçekleştirilen pin-on-disk aşınma deneyleri sonucunda en düşük sürtünme katsayısı değerlerinin üç farklı yük altında da 10 numaralı standart numunede gerçekleştiği belirlenmiştir. Farklı eklemeli imalat parametreleriyle üretilen diğer dokuz numune de ise sürtünme katsayısı değerleri arasında kayda değer bir farklılık yoktur. Eklemeli imalat ile üretilen Ti6Al4V numunelerin sürtünme katsayısının standart Ti6Al4V numuneye göre yüksek olmasının sebebinin üretim farklılığı olduğu düşünülmektedir. Eklemeli imalat ile üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüğünün yüksek olduğu bilinmektedir (Turhan ve Özsoy 2016). Yüzey pürüzlülüğü aşınma esnasında sürtünmeyi etkileyen önemli faktörlerden biridir. Yüksek yüzey pürüzlülüğü yüksek sürtünme katsayısına sebep olmuş olabilir.

**Tablo 6.2:** 10 N, 15 N ve 20 N yük altında ortalama sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) değerleri.

Numune numarası										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10 N	0,1935	0,1965	0,2136	0,2140	0,2208	0,2420	0,2418	0,2589	0,2703	0,1766
15 N	0,2424	0,2075	0,2422	0,2577	0,2262	0,2221	0,2501	0,2686	0,2723	0,1937
20 N	0,2132	0,1980	0,2054	0,2258	0,2130	0,2168	0,2745	0,2787	0,2506	0,1889



**Şekil 6.16:** Numunelerin aşınma testi boyunca sürtünme katsayısı grafiği (15 N yük altında).

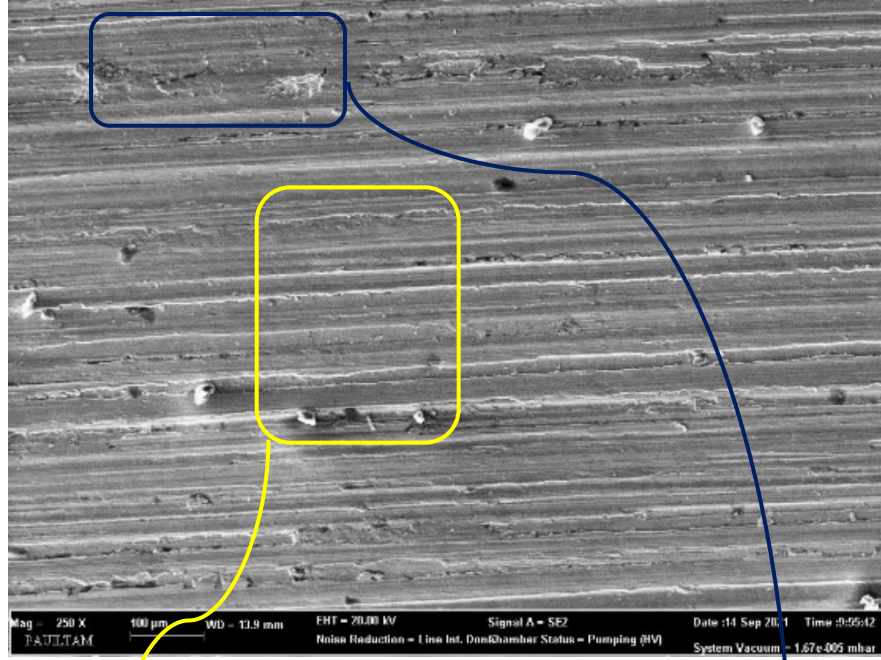
Sürtünme katsayısı Şekil 5.7’de ve Şekil 5.8’de gösterilen aşınma cihazında aşınma işlemi sırasında sürtünme katsayıları kayıt altına alınmıştır. Her numunenin sürtünme katsayılarının ortalaması alınarak sürtünme katsayısı bulunmuştur. Sürtünme katsayısı arttıkça numunelerin aşınma kaybı, hacim kaybı ve aşınma oranları artacaktır. Aşınma devir hızı arttıkça sürtünme kuvveti azalır fakat yapılan aşınma testinde 20 dev/dk. ve test süreleri 60 dk. olarak aşınma testleri uygulanmıştır. Sürtünme katsayısı başlangıçta yüksek değerde başladığı görülmüştür. Bunu etkileyen en önemli faktör yüzey pürüzlülüğü olmuştur.

#### **6.4 FESEM ve EDS Analizleri**

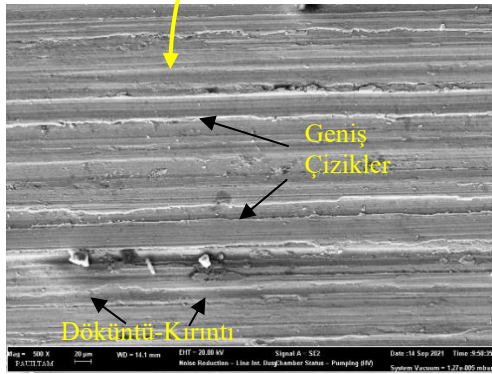
Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM), katı numunelerin yüzeyinde farklı sinyaller üretmek için yüksek enerjiye odaklanmış elektron ışınları kullanır. Elektron-numune etkileşiminin sinyalleri, numuneyi oluşturan dış morfolojisi (yapısı), kimyasal bileşimi, kristal yapısı ve oryantasyonu dahil olmak üzere numune hakkında bilgi sağlamaktadır.

EDX analizi, herhangi bir numunenin veya numunenin element bileşimini belirlemek amacıyla oluşturulan bir metottür. Taramalı elektron mikroskobu için uygulanan bir yöntemdir. Analiz, numuneyi taramak için bir elektron demeti göndererek gerçekleştirilir. Numune yüzeyine çarpan yüksek enerjili elektronlar, numuneden elektron çıkarır. Fırlatılan elektronlar iç orbitallerden ayrılırsa, dış orbitallerden gelen elektronlar atomik kararlılığı sağlamak için bu boşluklara atlayacaktır. Yüksek enerjili dış yörüngedeki elektronlar, radyasyon yoluyla fazla enerjiyi kaybeder. Bu kayıp enerji, X-ışınları şeklinde ortaya çıkar. Yayılan X-ışınlarının özellikleri, elementi içeren atomun yapısı ve hangi enerji kabuğundan yayıldığı hakkında bilgi verir. Serbest bırakılan X-ışınları bir elektronik alıcı tarafından algılanır. Ulaşılan veriler bilgisayar monitöründe tepe noktaları meydana getirilir ve element analizini tamamlar. Elementlerin oluşturduğu tepe, altındaki alanla orantılıdır (Ay, 2017).

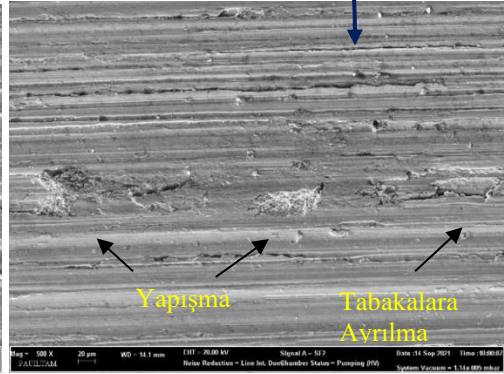
1. Numunenin yüzeysel FESEM görüntüleri Şekil 6.17, Şekil 6.18 Şekil 6.19, Şekil 6.20, Şekil 6.21 de ve EDS görüntüsü Şekil 6.22 de görünmektedir.



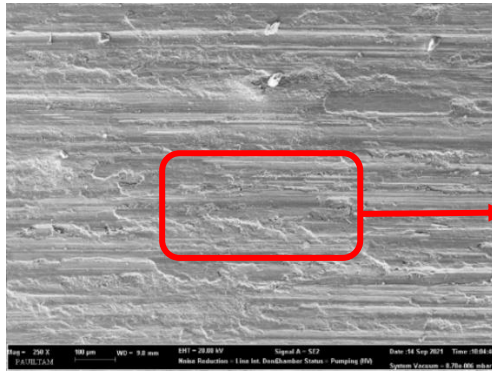
Şekil 6.17: 100 µm FESEM görüntüsü.



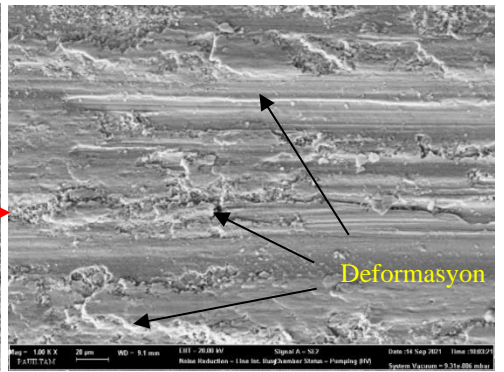
Şekil 6.18: 20 µm FESEM görüntüsü.



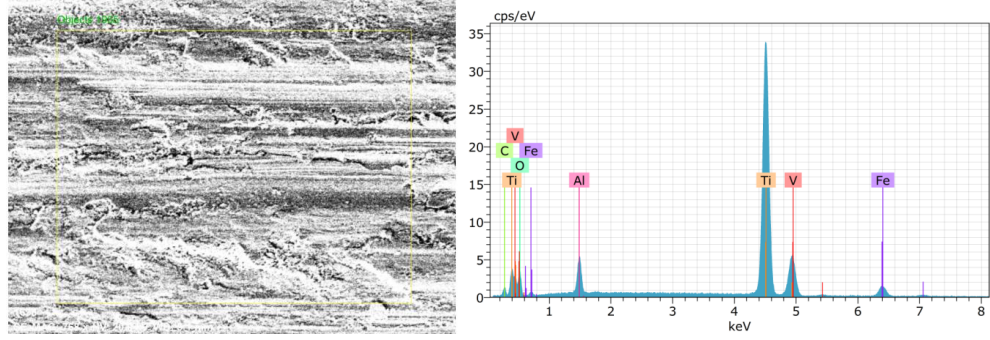
Şekil 6.19: 20 µm FESEM görüntüsü.



Şekil 6.20: 100 µm FESEM görüntüsü.



Şekil 6.21: 20 µm FESEM görüntüsü.



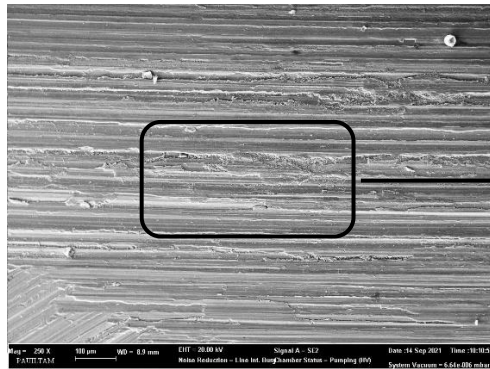
Spectrum: Objects 1955						
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Ti	22	K-series	65.73	64.76	41.70	1.85
O	8	K-series	20.66	20.35	39.22	3.14
Fe	26	K-series	5.17	5.09	2.81	0.18
C	6	K-series	4.30	4.24	10.88	0.81
Al	13	K-series	3.83	3.77	4.31	0.21
V	23	K-series	1.82	1.79	1.08	0.08
Total:			101.50	100.00	100.00	

Şekil 6.22: EDS analiz görüntüleri.

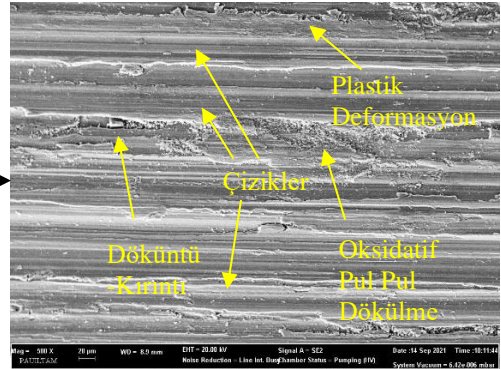
1. Numune 120 W lazer gücünde, 1000 mm/sn tarama hızında ve  $40 \text{ J/mm}^3$  yoğunluğunda üretimi gerçekleştirilmiştir. Ortalama olarak 35,5 HRC sertlik değeri bulunmuştur. Numune dönen bir metal yüzeye dik şekilde temas ettirilmiştir. Adheziv aşınma testinde 10N, 15 N ve 20 N yük uygulanmış olup kayma hızı 20 dev/dk. ve test süreleri 60 dk. olarak aşınma testinden geçmiştir. Aşınan yüzeylerden 20 N kuvvet uygulanan yüzeyin FESEM görüntüleri alınmıştır. Yüzeyin iki farklı noktasından 100  $\mu\text{m}$  ve 20  $\mu\text{m}$  olarak iki FESEM görüntüsü alınmıştır. Aşınma sonrası yüzeyde oluşan hasarlar FESEM görüntülerinde görünmüştür. Şekil 6.17’de 100  $\mu\text{m}$  FESEM görüntüsünden Şekil 6.18 ve Şekil 6.19’de görünen iki farklı 20  $\mu\text{m}$  FESEM görüntüsü alınmıştır. Adhesiv aşınma sonucunda İki yüzey arasında soğuk kaynaklar oluşmuştur. Dolayısıyla yüzeyde yapışmalar oluşmaktadır. Şekil 6.18’de yüzeyde görünen hasarlar, Geniş çizikler ve Döküntü-Kırıntı kalıntılarıdır. Şekil 6.19’da yüzeyde gözlemlenen hasarlar Tabakalara ayrılma ve yapışma hasarlarıdır. Şekil 6.20’de 100  $\mu\text{m}$  FESEM görüntüsünden Şekil 6.21 20  $\mu\text{m}$  FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.21’de yüzeyde görünen hasarlar, deformasyon hasarlarıdır. Aynı yüzey üzerinden alınan EDX analiz görüntüsü Şekil 6.22’de verilmektedir. Şekil 6.22’de yüzeyden alınan EDX analizinde yüzeyde bulunan elementlerin tabloda (%) yüzdesel oranları

ve grafiksel oranları verilmiştir. Işın gönderilen yüzeyde görünüm element analizi sırasıyla %65,7 Ti, % 20,6 O, % 5 Fe, % 4 C, % 3,8 Al ve % 1,8 V' dur. Element analizinde Fe ve C çıkmasının sebebi Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşenlerinde (Tablo 5.2) C < 800 ppm ve Fe < 3000 ppm oranında bulunuyor. Ekstra aşındırıcı diskten numune yüzeyine C ve Fe nüfus etmiş olabileceği düşünülmektedir.

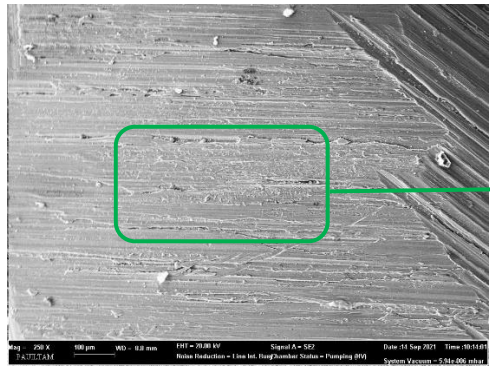
2. Numunenin yüzeysel FESEM görüntüleri Şekil 6.23, Şekil 6.24, Şekil 6.25, Şekil 6.26 ve EDS görüntüsü Şekil 6.27 de görünmektedir.



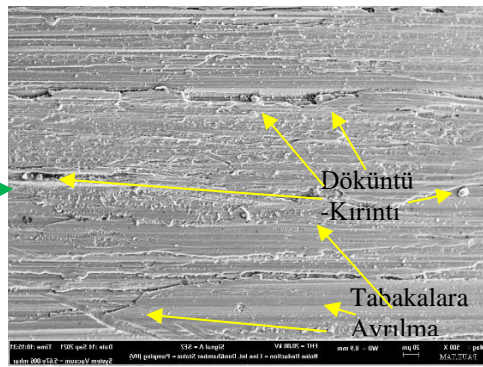
Şekil 6.23: 100 µm FESEM görüntüsü.



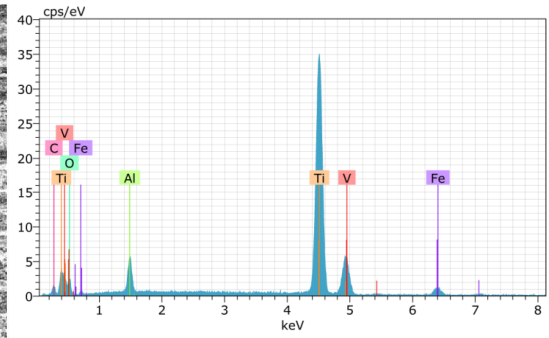
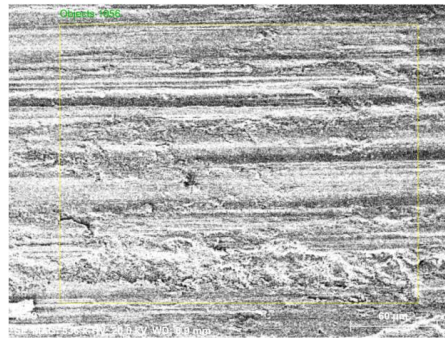
Şekil 6.24: 20 µm FESEM görüntüsü.



Şekil 6.25: 100 µm FESEM görüntüsü.



Şekil 6.26: 20 µm FESEM görüntüsü.



Spectrum: Objects 1956						
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Ti	22	K-series	70.06	70.07	47.69	1.98
O	8	K-series	14.70	14.71	29.95	2.91
C	6	K-series	5.06	5.06	13.73	1.13
Al	13	K-series	4.14	4.14	5.00	0.24
Fe	26	K-series	4.02	4.02	2.35	0.16
V	23	K-series	2.00	2.00	1.28	0.10
Total:			99.98	100.00	100.00	

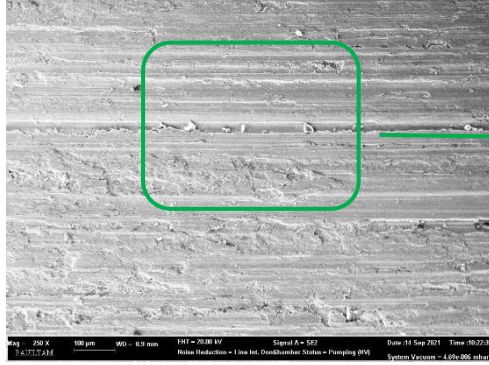
Şekil 6.27: EDS analiz görüntüleri.

2. Numune 150 W lazer gücünde, 1000 mm/sn tarama hızında ve 50 J/mm<sup>3</sup> yoğunluğunda üretimi gerçekleşmiştir. Ortalama olarak 36,25 HRC sertlik değeri bulunmuştur. Aşınma sonrası yüzeyde oluşan hasarlar FESEM görüntülerinde gözlenmiştir. Adhesiv aşınma sonucunda İki yüzey arasında soğuk kaynaklar oluşmuştur. Dolayısıyla sert malzeme kaybının bir sonucu olarak yüzeyde Oksidatif pul pul dökülmeler oluşmaktadır. Şekil 6.23'te 100 µm FESEM görüntüsünden Şekil 6.24 20 µm FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.24'te yüzeyde görünen hasarlar, Plastik deformasyon, Çizikler, Oksidatif pul pul dökülme ve Döküntü-Kırıntı kalıntılarıdır. Şekil 6.25'te 100 µm FESEM görüntüsünden Şekil 6.26 20 µm FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.26'te yüzeyde görünen hasarlar, Döküntü-Kırıntı kalıntıları ve deformasyon hasarlarıdır. Sıcaklığın etkisiyle kırıntı miktarı artmış ve çizikler derinleşmeye başlamıştır. Aynı yüzey üzerinden alınan EDX analiz görüntüsü Şekil 6.27'da verilmiştir. Şekil 6.27'da yüzeyden alınan EDX analizinde yüzeyde bulunan elementlerin tabloda (%) yüzdesel oranları ve grafiksel oranları verilmiştir. Işın gönderilen yüzeyde görünün element analizi sırasıyla % 70 Ti, % 14,7 O, % 5 C, % 4 Al, % 4 Fe ve % 2 V' dur.

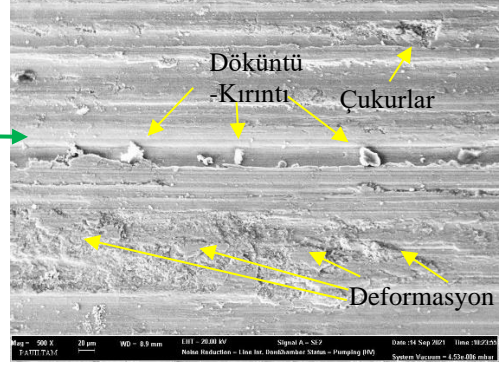
Element analizinde Fe ve C çıkmasının sebebi, Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşenlerinde (Tablo 5.2) C < 800 ppm ve Fe < 3000 ppm oranında bulunuyor. Ekstra aşındırıcı diskten numune yüzeyine C ve Fe nüfus etmiş olabileceği düşünülmektedir.



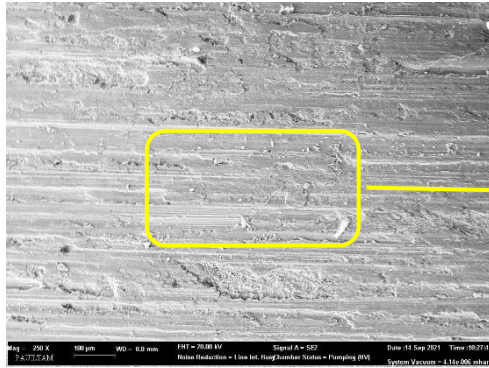
3. Numunenin yüzeyel FESEM görüntüleri Şekil 6.28, Şekil 6.29, Şekil 6.30, Şekil 6.31 ve EDS görüntüsü Şekil 6.32 de görünmektedir.



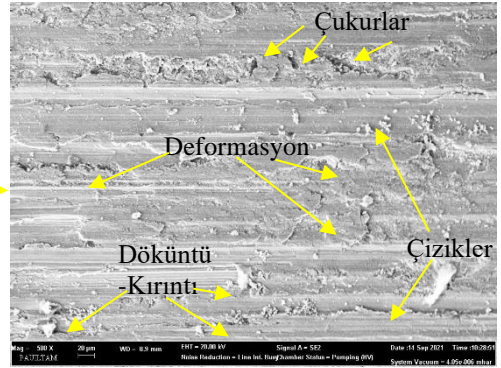
Şekil 6.28: 100 μm FESEM görüntüsü.



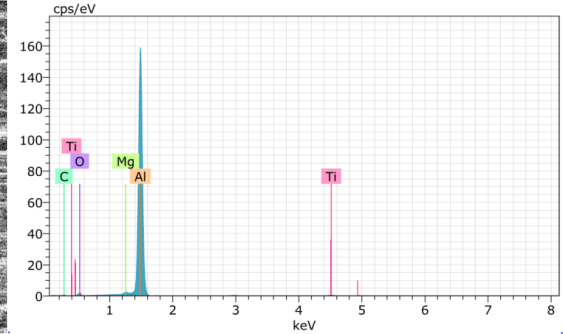
Şekil 6.29: 20 μm FESEM görüntüsü.



Şekil 6.30: 100 μm FESEM görüntüsü.



Şekil 6.31: 20 μm FESEM görüntüsü.



Spectrum: Objects 1957						
El	AN	Series	unn. C norm. C Atom. C Error (1 Sigma)			
			[wt. %]	[wt. %]		
Al	13	K-series	91.65	81.35	69.42	4.40
C	6	K-series	11.71	10.39	19.93	2.03
O	8	K-series	7.26	6.44	9.27	1.07
Mg	12	K-series	1.22	1.08	1.03	0.09
Ti	22	K-series	0.82	0.73	0.35	0.05
Total:			112.66	100.00	100.00	

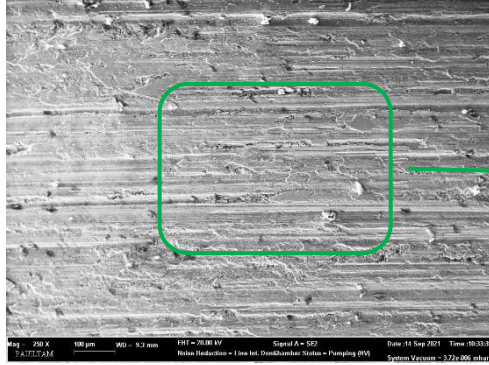
Şekil 6.32: EDS analiz görüntüleri.

3. Numune 180 W lazer gücünde, 1000 mm/sn tarama hızında ve  $60 \text{ J/mm}^3$  yoğunluğunda üretimi gerçekleştirilmiştir. Ortalama olarak 20,95 HRC sertlik değeri bulunmuştur. Sertliği en düşük ve aşınma oranı en yüksek numunedir. Aşınma sonrası yüzeyde oluşan hasarlar FESEM görüntülerinde gözlenmiştir. Adhesiv aşınma sonucunda İki yüzey arasında ısı artmaktadır. Dolayısıyla yüzeyler arasında yapışmalar meydana gelmektedir. Yapışmalar sonucunda geride döküntü-kırıntılar oluşmaktadır. Sıcaklığın etkisiyle döküntü-kırıntı miktarı artmış ve çizikler derinleşmeye başlamıştır. Üretim aşamasında toz parçacıkların birbirine yeterli şekilde kaynamamasından dolayı iç yapıda çukurluklar oluşmuştur. Şekil 6.28'de  $100 \mu\text{m}$  FESEM görüntüsünden Şekil 6.29  $20 \mu\text{m}$  FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.29'de yüzeyde görünen hasarlar, deformasyon, Çukurlar ve Döküntü-Kırıntı kalıntılarıdır. Şekil 6.30'da  $100 \mu\text{m}$  FESEM görüntüsünden Şekil 6.31  $20 \mu\text{m}$  FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.31'de yüzeyde görünen hasarlar, Çukurlar, Çizikler, Döküntü-Kırıntı kalıntıları ve deformasyon hasarlarıdır. Aynı yüzey üzerinden alınan EDX analiz görüntüsü Şekil 6.32'de verilmiştir. Şekil 6.32'de yüzeyden alınan EDX analizinde yüzeyde bulunan elementlerin tabloda (%) yüzdesel oranları ve grafiksel oranları verilmiştir. Işın gönderilen yüzeyde görünün element analizi sırasıyla % 91,6 Al, % 11,7 C, % 7,2 O, % 1,2 Mg ve % 0,8 Ti' dur.

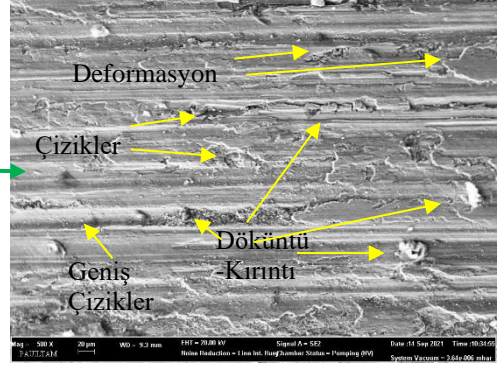
Element analizinde C çıkmasının sebebi Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşenlerinde (Tablo 5.2)  $C < 800 \text{ ppm}$  oranında bulunuyor. Ekstra aşındırıcı diskten numune yüzeyine C nüfus etmiş olabileceği düşünülmektedir.

Alüminyum oranının yüksek çıkmasının sebebi; Yüksek lazer gücü ve yüksek enerji yoğunluğundan dolayı Ti6Al4V alaşımının içerisinde bulunan en düşük yoğunluğa sahip element Alüminyum olduğu için eriyerek yüzeye nüfus etmiştir. Böylelikle element analizinde Alüminyum değeri yüksek çıkmıştır. Yüzeyde Alüminyumun fazla olması ise aşınma deneyi sonucunda yüzeyde yapışmalar olarak ağırlık kaybının, hacim kaybının ve aşınma oranının artmasına sebep olmuştur.

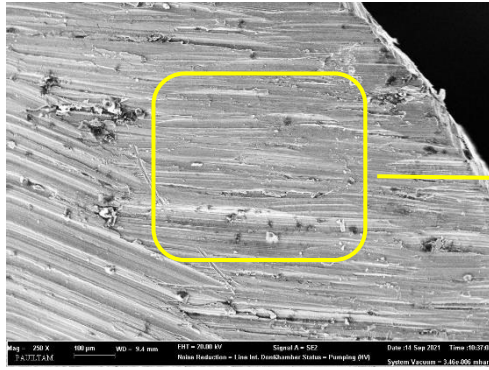
4. Numunenin yüzeyel FESEM görüntüleri Şekil 6.33, Şekil 6.34, Şekil 6.35, Şekil 6.36 ve EDS görüntüsü Şekil 6.37 de görünmektedir.



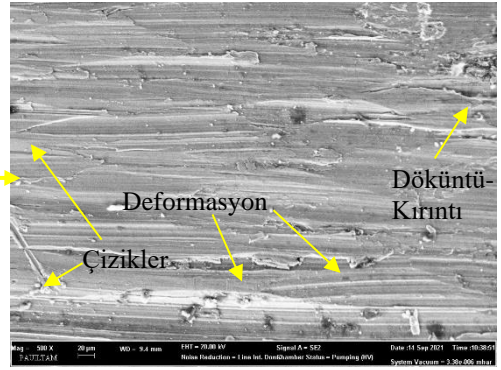
Şekil 6.33: 100 μm FESEM görüntüsü.



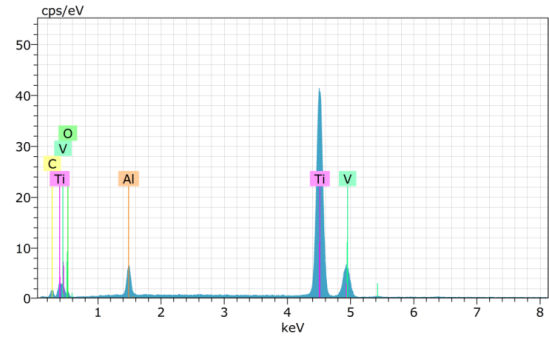
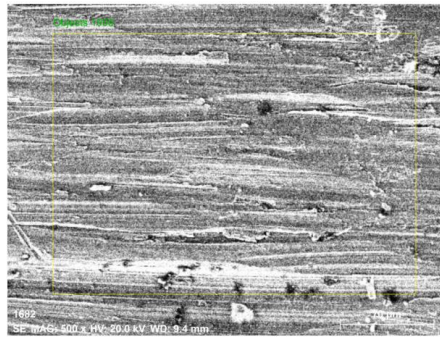
Şekil 6.34: 20 μm FESEM görüntüsü.



Şekil 6.35: 100 μm FESEM görüntüsü.



Şekil 6.36: 20 μm FESEM görüntüsü.

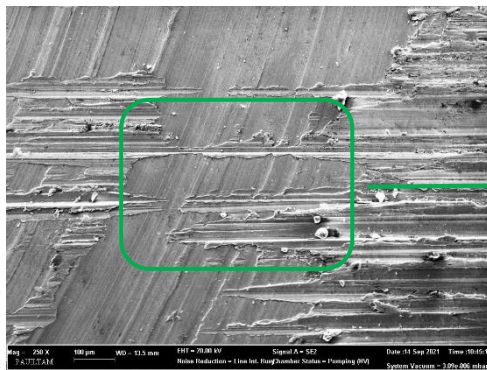


Spectrum: Objects 1959						
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Ti	22	K-series	84.82	83.87	65.44	2.38
C	6	K-series	6.50	6.42	19.98	1.19
Al	13	K-series	5.09	5.03	6.96	0.28
O	8	K-series	2.64	2.61	6.10	0.78
V	23	K-series	2.09	2.07	1.52	0.09
Total:			101.13	100.00	100.00	

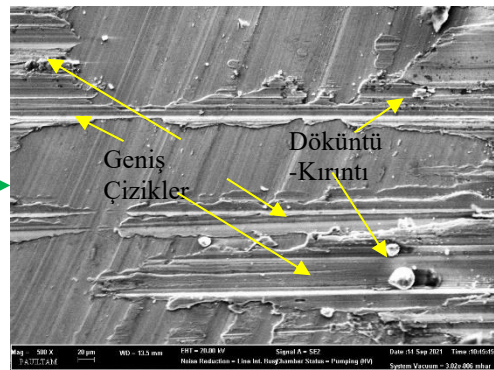
Şekil 6.37: EDS analiz görüntüleri

4. Numune 120 W lazer gücünde, 1250 mm/sn işlem hızında ve  $32 \text{ J/mm}^3$  yoğunluğunda üretimi gerçekleştirilmiştir. Ortalama olarak 33,6 HRC sertlik değeri bulunmuştur. Aşınma sonrası yüzeyde oluşan hasarlar FESEM görüntülerinde gözlemlenmiştir. Adhesiv aşınma sonucunda İki yüzey arasında ısı artmıştır. Dolayısıyla yüzeyler arasında yapışmalar meydana gelmiştir. Yapışmalar sonucunda geride döküntü-kırıntılar olmuştur. Sıcaklığın etkisiyle deformasyon miktarı artmış ve çizikler genişlemeye başlamıştır. Şekil 6.33'te  $100 \mu\text{m}$  FESEM görüntüsünden Şekil 6.34  $20 \mu\text{m}$  FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.34'te yüzeyde görünen hasarlar, deformasyon, Döküntü-Kırıntı kalıntıları, çizikler ve geniş çizik hasarları görülmüştür. Şekil 6.35'te  $100 \mu\text{m}$  FESEM görüntüsünden Şekil 6.36  $20 \mu\text{m}$  FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.36'te yüzeyde görünen hasarlar, Çizikler, Döküntü-Kırıntı kalıntıları ve deformasyon hasarlarıdır. Aynı yüzey üzerinden alınan EDX analiz görüntüsü Şekil 6.37'da verilmiştir. Şekil 6.37'da yüzeyden alınan EDX analizinde yüzeyde bulunan elementlerin tabloda (%) yüzdesel oranları ve grafiksel oranları verilmiştir. Işın gönderilen yüzeyde görünüm element analizi sırasıyla %84,8 Ti, % 6,5 C, % 5 Al, % 2,6 O ve % 2 V' dur.

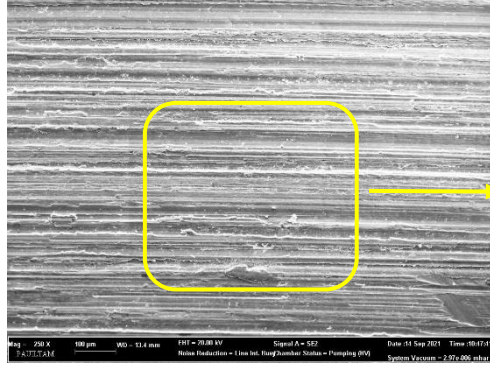
5. Numunenin yüzeysel FESEM görüntüleri Şekil 6.38, Şekil 6.39, Şekil 6.40, Şekil 6.41 de görünmektedir.



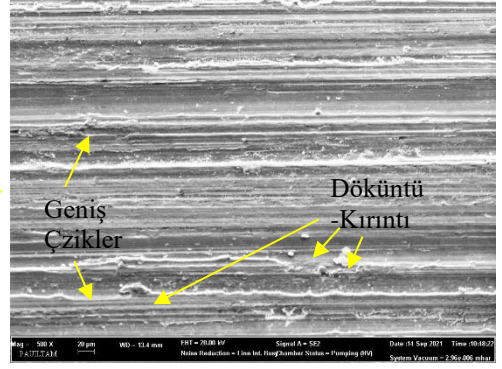
Şekil 6.38:  $100 \mu\text{m}$  FESEM görüntüsü.



Şekil 6.39:  $20 \mu\text{m}$  FESEM görüntüsü.



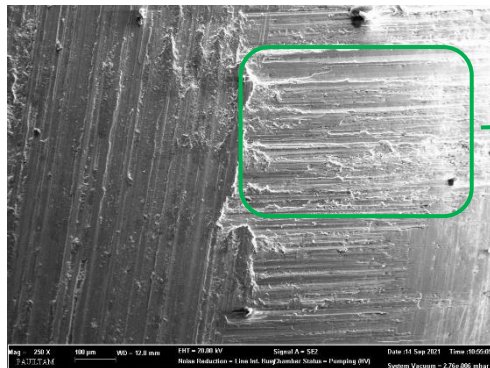
Şekil 6.40: 100 μm FESEM görüntüsü.



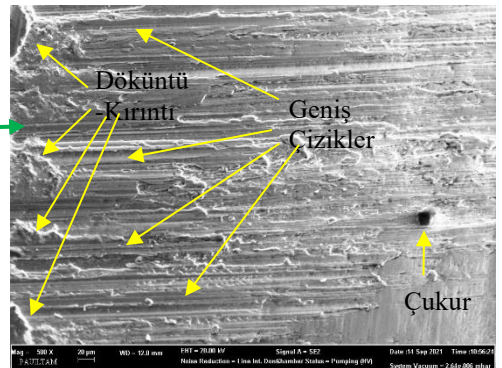
Şekil 6.41: 20 μm FESEM görüntüsü.

5. Numune 150 W lazer gücünde, 1250 mm/sn işlem hızında ve  $40 \text{ J/mm}^3$  yoğunluğunda üretimi gerçekleştirilmiştir. Ortalama olarak 36,2 HRC sertlik değeri bulunmuştur. Aşınma sonrası yüzeyde oluşan hasarlar FESEM görüntülerinde gözlenmiştir. Adhesiv aşınma sonucunda iki yüzey arasında ısı artmıştır. Dolayısıyla yüzeyler arasında yapışmalar meydana gelmiştir. Yapışmalar sonucunda geride döküntü-kırıntılar oluşmuştur. Şekil 6.37’de 100 μm FESEM görüntüsünden Şekil 6.39 20 μm FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.39’da yüzeyde görünen hasarlar, Döküntü-Kırıntı kalıntıları ve geniş çizik hasarları olmuştur. Şekil 6.40’ta 100 μm FESEM görüntüsünden Şekil 6.41 20 μm FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.41’de yüzeyde görünen hasarlar, Döküntü-Kırıntı kalıntıları ve geniş çizik hasarlarıdır.

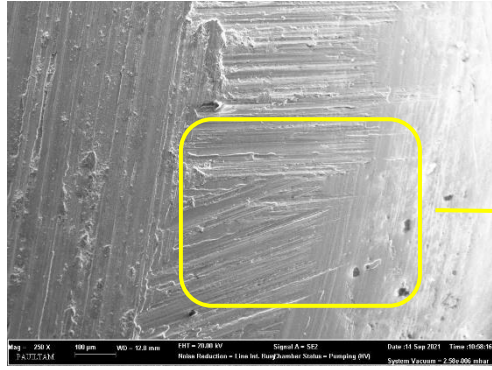
6. Numunenin yüzeysel FESEM görüntüleri Şekil 6.42, Şekil 6.43, Şekil 6.44, Şekil 6.45 ve EDS görüntüsü Şekil 6.46 da görünmektedir.



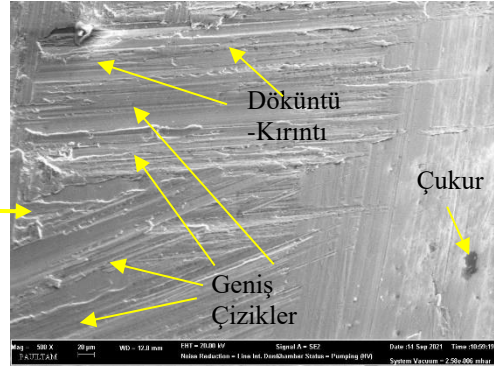
Şekil 6.42: 100 μm FESEM görüntüsü.



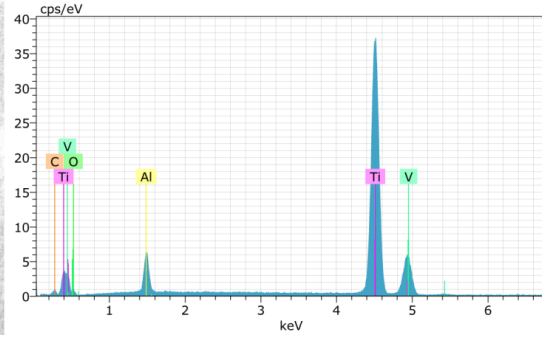
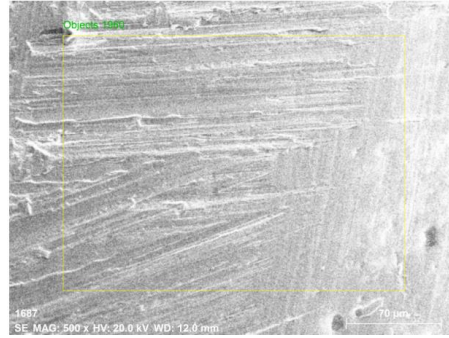
Şekil 6.43: 20 μm FESEM görüntüsü.



Şekil 6.44: 100 μm FESEM görüntüsü.



Şekil 6.45: 20 μm FESEM görüntüsü.



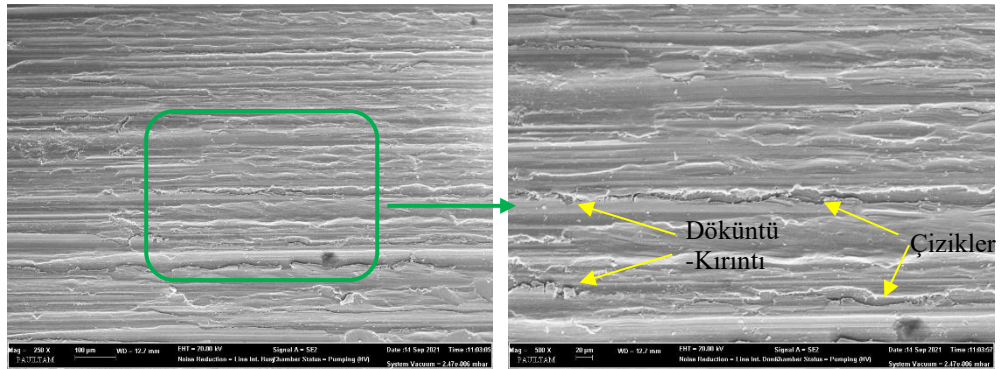
Spectrum: Objects 1960						
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Ti	22	K-series	84.54	88.49	77.10	2.37
Al	13	K-series	5.68	5.95	9.19	0.30
C	6	K-series	3.29	3.45	11.97	0.73
V	23	K-series	2.02	2.11	1.73	0.09
O	8	K-series	0.00	0.00	0.00	0.00
Total:			95.53	100.00	100.00	

Şekil 6.46: EDS analiz görüntüleri.

6. Numune 180 W lazer gücünde, 1250 mm/sn işlem hızında ve 48 J/mm<sup>3</sup> yoğunluğunda üretimi gerçekleştirmiştir. Ortalama olarak 36,25 HRC sertlik değeri bulunmuştur. Aşınma sonrası yüzeyde oluşan hasarlar FESEM görüntülerinde gözlenmiştir. Adhesiv aşınma sonucunda İki yüzey arasında ısı artmıştır. Dolayısıyla yüzeyler arasında yapışmalar meydana gelmiştir. Yapışmalar sonucunda geride döküntü-kırıntılar oluşmuştur. Sıcaklığın etkisiyle döküntü-kırıntı artmış ve çizikler genişlemeye başlamıştır. Üretim aşamasında toz parçacıkların birbirine yeterli şekilde kaynamamasından dolayı iç yapıda çukurluklar oluşmuştur. Şekil 6.42'de 100 μm FESEM görüntüsünden Şekil 6.43 20 μm FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.43'te yüzeyde görünen hasarlar, Çukur, Döküntü-Kırıntı kalıntıları ve geniş çizik hasarları

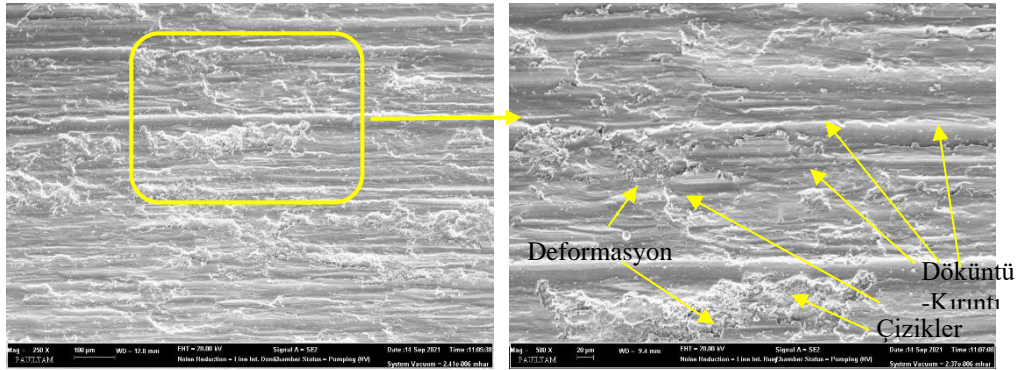
oluşturmuştur. Şekil 6.44'te 100 µm FESEM görüntüsünden Şekil 6.45 20 µm FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.45'te yüzeyde görünen hasarlar, Çukur, Döküntü-Kırıntı kalıntıları ve geniş çizik hasarlarıdır. Aynı yüzey üzerinden alınan EDX analiz görüntüsü Şekil 6.46'da verilmiştir. Şekil 6.46'da yüzeyden alınan EDX analizinde yüzeyde bulunan elementlerin tabloda (%) yüzdesel oranları ve grafiksel oranları verilmiştir. Işın gönderilen yüzeyde görünüm element analizi sırasıyla %84,5 Ti, % 5,6 Al, % 3,2 C, % 2 V ve % 0 O' dir.

7. Numunenin yüzeySEL FESEM görüntüleri Şekil 6.47, Şekil 6.48, Şekil 6.49, Şekil 6.50 ve EDS görüntüsü Şekil 6.51 de görünmektedir.



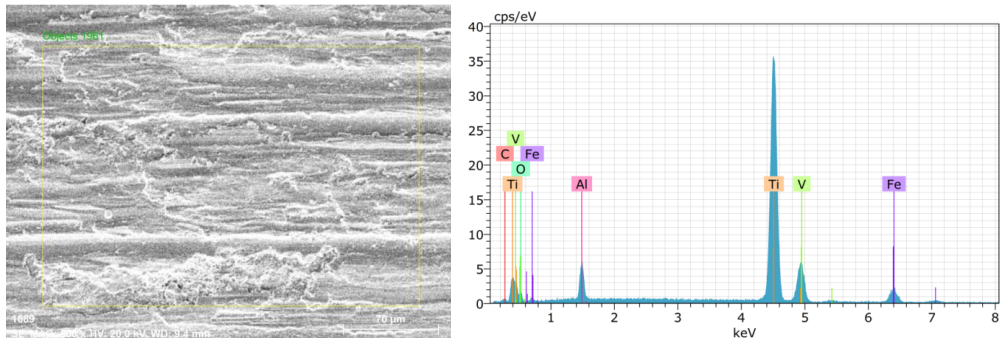
Şekil 6.47: 100 µm FESEM görüntüsü.

Şekil 6.48: 20 µm FESEM görüntüsü.



Şekil 6.49: 100 µm FESEM görüntüsü.

Şekil 6.50: 20 µm FESEM görüntüsü.



Spectrum: Objects 1961						
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Ti	22	K-series	72.93	75.48	60.61	2.05
O	8	K-series	7.44	7.69	18.49	1.68
Fe	26	K-series	7.39	7.65	5.27	0.25
Al	13	K-series	4.60	4.76	6.78	0.26
C	6	K-series	2.17	2.25	7.21	0.61
V	23	K-series	2.09	2.17	1.64	0.10
Total:			96.63	100.00	100.00	

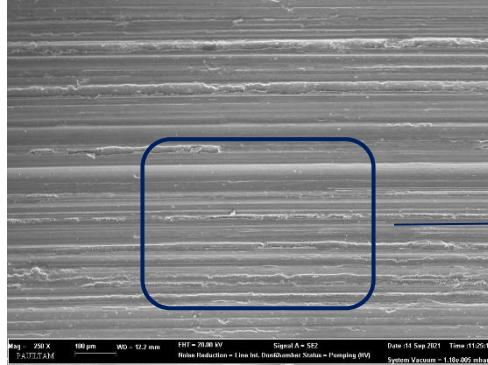
**Şekil 6.51:** EDS analiz görüntüleri.

7. Numune 120 W lazer gücünde, 1500 mm/sn tarama hızında ve 26,67 J/mm<sup>3</sup> yoğunluğunda üretimi gerçekleştirilmiştir. Ortalama olarak 35,2 HRC sertlik değeri bulunmuştur. Aşınma sonrası yüzeyde oluşan hasarlar FESEM görüntülerinde gözlemlenmiştir. Adhesiv aşınma sonucunda İki yüzey arasında ısı artmıştır. Dolayısıyla yüzeyler arasında yapışmalar meydana gelmiştir. Yapışmalar sonucunda geride döküntü-kırıntılar oluşmuştur. Şekil 6.47’de 100 µm FESEM görüntüsünden Şekil 6.48 20 µm FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.49’da yüzeyde görünen hasarlar, Döküntü-Kırıntı kalıntıları ve çizik hasarları olmuştur. Şekil 6.50’de 100 µm FESEM görüntüsünden Şekil 6.50 20 µm FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.51’de yüzeyde görünen hasarlar, Döküntü-Kırıntı kalıntıları, deformasyon ve çizik hasarlarıdır. Aynı yüzey üzerinden alınan EDX analiz görüntüsü Şekil 6.51’de verilmiştir. Şekil 6.51’de yüzeyden alınan EDX analizinde yüzeyde bulunan elementlerin tabloda (%) yüzdesel oranları ve grafiksel oranları verilmiştir. Işın gönderilen yüzeyde görünün element analizi sırasıyla %72,9 Ti, % 7,4 O, % 7,4 Fe, % 4,6 Al, % 2 C ve % 2 V’ dur.

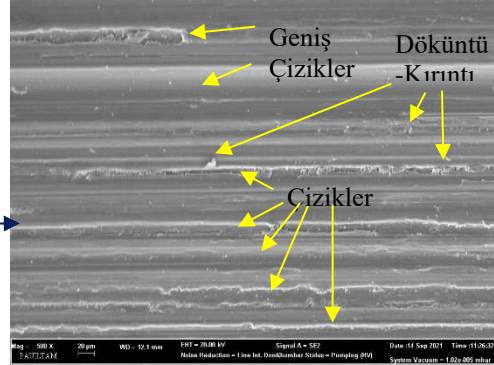
Element analizinde Fe ve C çıkmasının sebebi, Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşenlerinde (Tablo 5.2) C < 800 ppm ve Fe < 3000 ppm oranında bulunuyor. Ekstra aşındırıcı diskten numune yüzeyine C ve Fe nüfus olabileceği düşünülmektedir.



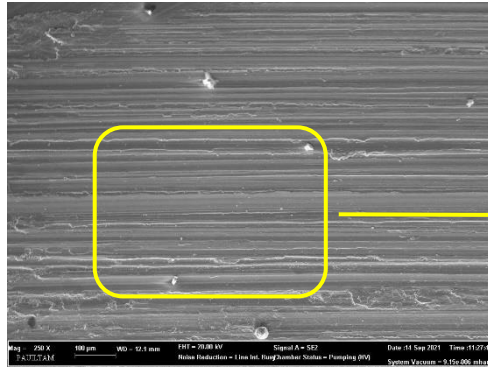
8. Numunenin yüzeysel FESEM görüntüleri Şekil 6.52, Şekil 6.53, Şekil 6.54, Şekil 6.55 ve EDS görüntüsü Şekil 6.56 da görünmektedir.



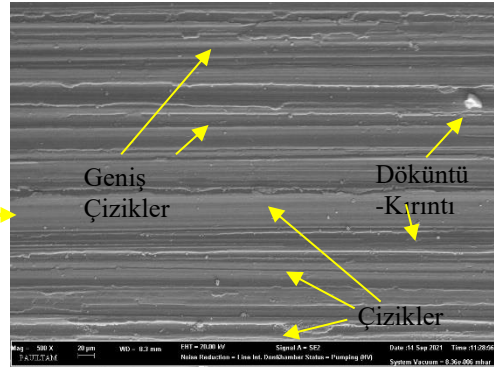
Şekil 6.52: 100 µm FESEM görüntüsü.



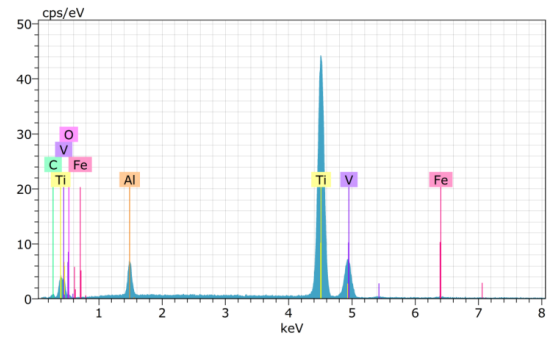
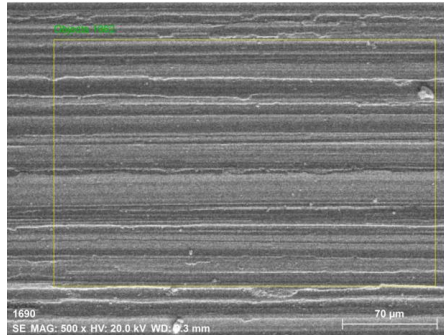
Şekil 6.53: 20 µm FESEM görüntüsü.



Şekil 6.54: 100 µm FESEM görüntüsü.



Şekil 6.55: 20 µm FESEM görüntüsü.



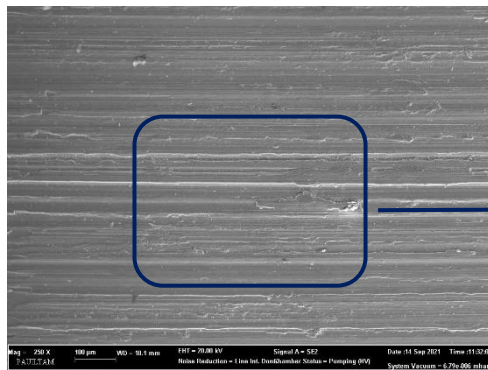
Spectrum: Objects 1962						
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Ti	22	K-series	86.29	88.75	78.98	2.42
Al	13	K-series	5.32	5.47	8.64	0.29
C	6	K-series	2.72	2.80	9.93	0.66
V	23	K-series	2.39	2.46	2.06	0.10
Fe	26	K-series	0.51	0.52	0.40	0.05
O	8	K-series	0.00	0.00	0.00	0.00
Total:			97.22	100.00	100.00	

Şekil 6.56: EDS analiz görüntüleri.

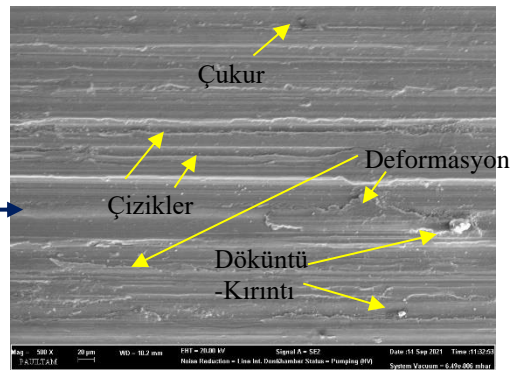
8. Numune 150 W lazer gücünde, 1500 mm/sn tarama hızında ve  $33,33 \text{ J/mm}^3$  yoğunluğunda üretimi gerçekleştirilmiştir. Ortalama olarak 33,8 HRC sertlik değeri bulunmuştur. Aşınma sonrası yüzeyde oluşan hasarlar FESEM görüntülerinde gözlemlenmiştir. Adhesiv aşınma sonucunda İki yüzey arasında ısı artmıştır. Dolayısıyla yüzeyler arasında yapışmalar meydana gelmiştir. Yapışmalar sonucunda geride döküntü-kırıntılar oluşmuştur. Sıcaklığın etkisiyle çizikler miktarı artmış ve çizikler genişlemeye başlamıştır. Şekil 6.52’de 100  $\mu\text{m}$  FESEM görüntüsünden Şekil 6.53 20  $\mu\text{m}$  FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.53’te yüzeyde görünen hasarlar, Döküntü-Kırıntı kalıntıları, çizik ve geniş çizik hasarları olmuştur. Şekil 6.54’te 100  $\mu\text{m}$  FESEM görüntüsünden Şekil 6.55 20  $\mu\text{m}$  FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.55’te yüzeyde görünen hasarlar, Döküntü-Kırıntı kalıntıları, çizik ve geniş çizik hasarlarıdır. Aynı yüzey üzerinden alınan EDX analiz görüntüsü Şekil 6.56’da verilmiştir. Şekil 6.56’da yüzeyden alınan EDX analizinde yüzeyde bulunan elementlerin tabloda (%) yüzdesel oranları ve grafiksel oranları verilmiştir. Işın gönderilen yüzeyde görünüm element analizi sırasıyla %86,2 Ti, % 5,3 Al, % 2,7 C, % 2,4 V, % 0,5 Fe ve % 0 O’ dir.

Element analizinde Fe ve C çıkmasının sebebi, Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşenlerinde (Tablo 5.2)  $C < 800 \text{ ppm}$  ve  $Fe < 3000 \text{ ppm}$  oranında bulunuyor. Ekstra aşındırıcı diskten numune yüzeyine C ve Fe nüfus etmiş olabileceği düşünülmektedir.

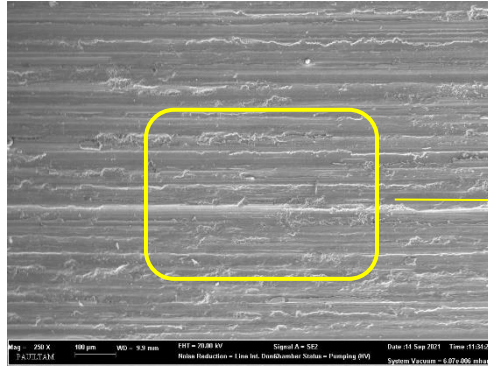
9. Numunenin yüzeysel FESEM görüntüleri Şekil 6.57, Şekil 6.58, Şekil 6.59, Şekil 6.60 ve EDS görüntüsü Şekil 6.61 de görünmektedir.



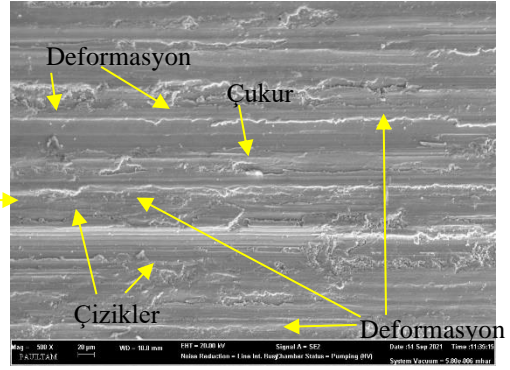
Şekil 6.57: 100  $\mu\text{m}$  FESEM görüntüsü.



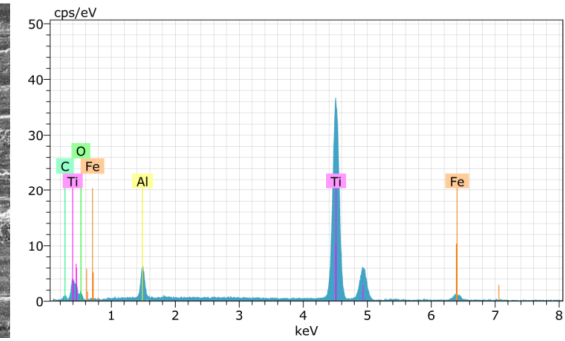
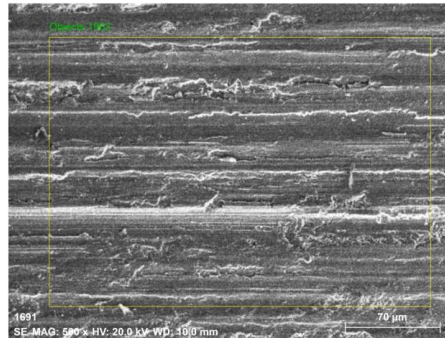
Şekil 6.58: 20  $\mu\text{m}$  FESEM görüntüsü.



Şekil 6.59: 100 μm FESEM görüntüsü.



Şekil 6.60: 20 μm FESEM görüntüsü.



Spectrum: Objects 1963						
El	AN	Series	unn. C norm.	C Atom.	C Error (1 Sigma)	
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Ti	22	K-series	73.86	75.67	55.13	2.08
O	8	K-series	11.20	11.48	25.03	2.29
Al	13	K-series	4.64	4.75	6.14	0.26
Fe	26	K-series	4.20	4.31	2.69	0.16
C	6	K-series	3.70	3.79	11.00	0.87
Total:			97.60	100.00	100.00	

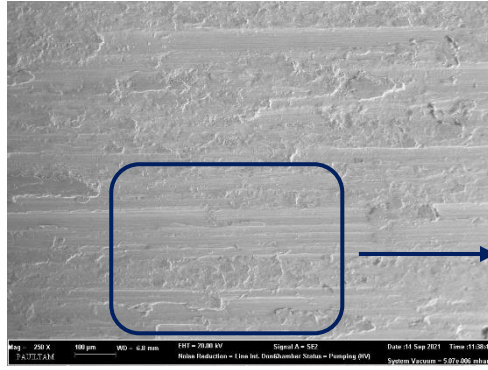
Şekil 6.61: EDS analiz görüntüleri.

9. Numune 180 W lazer gücünde, 1500 mm/sn tarama hızında ve 40 J/mm<sup>3</sup> yoğunluğunda üretimi gerçekleştirmiştir. Ortalama olarak 35,575 HRC sertlik değeri bulunmuştur. Aşınma sonrası yüzeyde oluşan hasarlar FESEM görüntülerinde gözlenmiştir. Adhesiv aşınma sonucunda İki yüzey arasında ısı artmıştır. Dolayısıyla yüzeyler arasında yapışmalar meydana gelmiştir. Yapışmalar sonucunda geride döküntü-kırıntılar oluşmuştur. Üretim aşamasında toz parçacıkların birbirine yeterli şekilde kaynamamasından dolayı iç yapıda çukurluklar oluşmuştur. Şekil 6.57’de 100 μm FESEM görüntüsünden Şekil 6.58 20 μm FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.58’de yüzeyde görünen hasarlar, Döküntü-Kırıntı kalıntıları, çizik, çukur ve Deformasyon hasarları olmuştur. Şekil 6.59’da 100 μm FESEM görüntüsünden Şekil

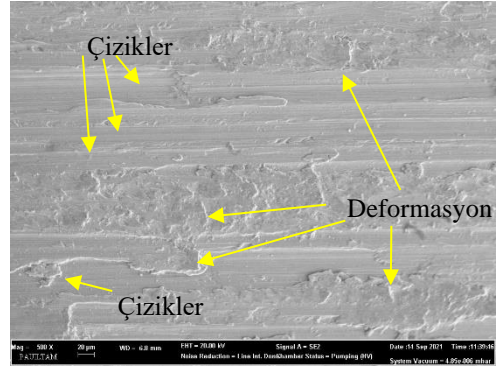
6.60 20 µm FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.60'ta yüzeyde görünen hasarlar, çizik, çukur ve Deformasyon hasarlarıdır. Aynı yüzey üzerinden alınan EDX analiz görüntüsü Şekil 6.61'de verilmiştir. Şekil 6.61'de yüzeyden alınan EDX analizinde yüzeyde bulunan elementlerin tabloda (%) yüzdesel oranları ve grafiksel oranları verilmiştir. Işın gönderilen yüzeyde görünüm element analizi sırasıyla %73,8 Ti, % 11,8 O, % 4,6 Al, % 4,2 Fe ve % 3,7 C' dur.

Element analizinde Fe ve C çıkmasının sebebi, Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşenlerinde (Tablo 5.2) C < 800 ppm ve Fe < 3000 ppm oranında bulunuyor. Ekstra aşındırıcı diskten numune yüzeyine C ve Fe nüfus etmiş olabileceği düşünülmektedir.

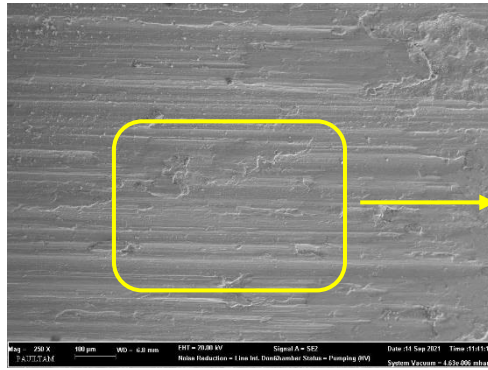
10. Numunenin yüzeyel FESEM görüntüleri Şekil 6.62, Şekil 6.63, Şekil 6.64, Şekil 6.65 ve EDS görüntüsü Şekil 6.66 da görünmektedir.



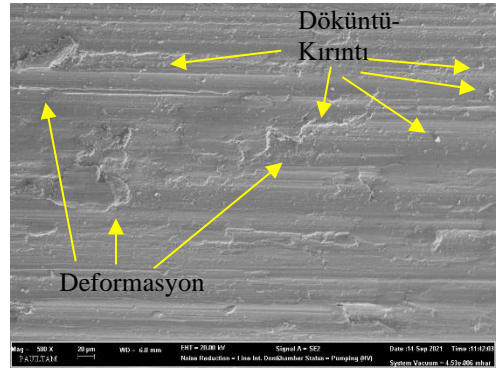
Şekil 6.62: 100 µm FESEM görüntüsü.



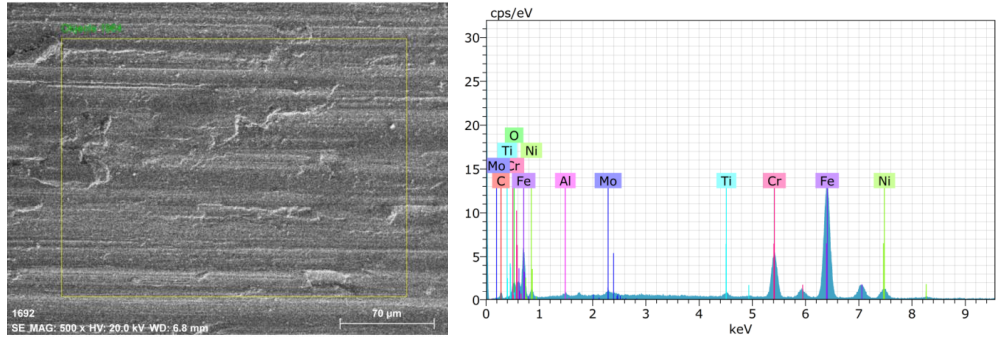
Şekil 6.63: 20 µm FESEM görüntüsü.



Şekil 6.64: 100 µm FESEM görüntüsü.



Şekil 6.65: 20 µm FESEM görüntüsü.



Spectrum: Objects 1964						
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Fe	26	K-series	61.59	66.15	53.85	1.67
Cr	24	K-series	14.06	15.10	13.21	0.41
Ni	28	K-series	8.64	9.28	7.19	0.28
C	6	K-series	3.87	4.15	15.72	0.87
O	8	K-series	2.57	2.76	7.85	0.50
Mo	42	L-series	1.20	1.29	0.61	0.08
Ti	22	K-series	0.71	0.76	0.72	0.05
Al	13	K-series	0.47	0.50	0.85	0.06
Total:			93.11	100.00	100.00	

Şekil 6.66: EDS analiz görüntüleri.

10. Numune Ti6Al4V alaşımlı Eİ ile üretilmeyen numunedir. Ti6Al4V numunesi dönen bir metal yüzeye dik şekilde temas ettirilmiştir. Adheziv aşınma testinde 10 N, 15 N ve 20 N yük uygulanmış olup kayma hızı 20 dev/dk. ve test süreleri 60 dk. olarak aşınma testinden geçmiştir. Aşınan yüzeylerden 20 N kuvvet uygulanan yüzeyin FESEM görüntüleri alınmıştır. Yüzeyin iki farklı noktasından 100 µm ve 20 µm olarak iki FESEM görüntüsü alınmıştır. Adheziv aşınma sonucunda İki yüzey arasında ısı artmıştır. Dolayısıyla yüzeyler arasında yapışmalar meydana gelmektedir. Yapışmalar sonucunda geride döküntü-kırıntılar oluşmuştur. Aşınma sonrası yüzeyde oluşan hasarlar FESEM görüntülerinde görünmüştür. Şekil 6.62’de 100 µm FESEM görüntüsünden Şekil 6.63 20 µm FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.63’te yüzeyde görünen hasarlar, çizik ve Deformasyon hasarları olmuştur. Şekil 6.64’te 100 µm FESEM görüntüsünden Şekil 6.65 20 µm FESEM görüntüsü alınmıştır. Şekil 6.65’te yüzeyde görünen hasarlar, Döküntü-Kırıntı kalıntıları ve Deformasyon hasarlarıdır. Aynı yüzey üzerinden alınan EDX analiz görüntüsü Şekil 6.66’da verilmiştir. Şekil 6.66’da yüzeyden alınan EDX analizinde yüzeyde bulunan elementlerin tabloda (%) yüzdesel oranları ve grafiksel oranları verilmiştir. Işın gönderilen yüzeyde görünün element analizi sırasıyla %61,6 Fe, %14 Cr, % 8,6 Ni, % 3,8 C, % 2,5 O, % 1,2 Mo,

%0,7 Ti ve %0,5 Al' dur.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında; son yıllarda eklemeli imalat üzerine yapılan çalışmaların arttığını ve ürün seri imalatında kullanılabilir genel bir imalat yöntemine hızla geliştiğini göstermektedir. DMLS (Direkt Metal Lazer Sinterleme) üretim yöntemi ile ilgili yapılan çalışmalar mevcut bilimsel literatür bilgisine katkı sağlamak amacıyla bu çalışmada, geleneksel ve eklemeli imalat yöntemi ile farklı parametrelerle üretilen numunelerin sertlik, mikroyapı ve tribolojik özelliklerinin karşılaştırarak eklemeli imalat ile üretilen parçaların endüstride kullanılabilirliğinin incelenmektedir. Eklemeli imalat sürecinde farklı lazer gücü (w), katman kalınlığı (mm), işlem hızı (mm/sn), Enerji yoğunluğu ( $j/mm^3$ ) parametreleri kullanılarak Ti6Al4V alaşımının mikroyapı, sertlik, hacim kaybı (mm), aşınma katsayısı ( $mm^3/Nm$ ) ve aşınmış yüzey FESEM görüntüleri inceleyerek literatüre katkı sağlanmıştır.

DLMS yönteminde toz malzemeler lazer enerji yoğunluğuna göre kademe kademe sinterlenmektedir. Toz parçacıklarını bağlamak için kullanılan lazer enerji yoğunluğu ve onu tesir eden özellikler tozun sinterleme kalitesi belirlemektedir. Her katmanı oluşturduktan sonra, bir sonraki katman daha önce oluşturulan katmana yapıştırılmaktadır. Düşük enerji yoğunluğu değerlerinde sinterlenmiş kısımdaki gözenek yoğunluğu daha fazladır. Gözenek yoğunluğu yüksek olan parçalar düşük yoğunluk değerlerine sahiptir. Gözenek yoğunluğu düşük olan parçalar yüksek yoğunluk değerlerine sahiptir. Daha düşük bir enerji yoğunluğu değerinde sinterleme yapıldığında, toz parçacıkları birbiriyle verimli bir şekilde kaynaşmayacak ve sinterleme kalitesi düşecektir. Çok yüksek enerji yoğunluğu değerlerinde parçada belirli noktalarda yanma meydana getirecektir ve bu durumda sinterleme kalitesi düşürecektir (Turhan 2016).

Yaptığımız deneyler ve incelemeler sonucunda aşınma direnci ve sertlik değeri yüksek numune üretilmek için 40-50  $J/mm^3$  değerleri arasında üretim yapılmalıdır.

DLMS üretim yönteminde lazer gücü ve işlem hızı enerji yoğunluğunu

saptayan iki önemli unsurdur. Lazer gücü arttıkça ve lazer işlem hızı azaldıkça enerji yoğunluğu değeri de artmaktadır. Lazer gücü azaldıkça ve lazer işleme hızı arttıkça enerji yoğunluğu değeri azalmaktadır. Sinterleme kalitesini iyileştirmek için üretim parametrelerinin seçiminde bu önemli faktörler (lazer gücü, tarama hızı, yoğunluk, tabaka kalınlığı) dikkate alınmıştır (Turhan 2016).

Eİ ile oluşturulan parçalarda, sonraki katmanların mikrosertliği başlangıç katmanından sonra azalır ve bitiş katmanına kadar artar. Sebebi ise, ara katmanlarda soğuma hızının başlangıç ve bitiş katmanlarına göre çok daha yavaş olmasıdır. Aynı zamanda ara katman, ön ve arka katmanlarda ısıtma/soğutma ile sürekli ısı alışverişine maruz bırakılır. Bu nedenle, soğuma hızı yüksek olan üst ile alt katmanların mikrosertliği ara katmanlardan daha yüksektir (Yu ve diğ. 2011). İç gerilmelerin, taneciklerin ve mikrosertliğin homojen bir şekilde dağılması için eklemeli imalattan sonra numunelere ısı işlem yapılmıştır.

Üretim sürecinde, toz malzeme yüksek lazer enerjisi ile sinterlendiğinde, hızlı ısıtma ve soğutma nedeniyle parçalarda iç gerilmeler meydana gelmektedir. Bu iç gerilmeler, parçaların fiziksel ve mekanik niteliklerini negatif doğrultuda tesir etmektedir. Bu iç gerilmeleri önlemek için ısı işlem uygulanmıştır. Eklemeli imalat ile üretilen tüm numuneler kısmi argon gazı ortamında 1 saatte 650 °C dereceye çıkarılıp 3 saat boyunca 650 °C derecede gerilim giderme tavlama yapılmıştır. 4 saat sonunda ısı işlem bitince 500 °C dereceye kadar kapak kapalı olup daha sonrasında argon gazı kapatılıp fırının kapağı açılıp soğumaya bırakılmıştır. Bu gerilim giderme işlemi ile tanecik yapısının ve mikrosertliğinin homojen şekilde dağılmasını ve numunelerin içerisindeki gaz boşluklarının minimuma indirilmesi sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, DMLS cihazında test numunelerinin üretimine ilişkin literatür araştırılması incelenmiş (Turhan 2016) ve lazer gücünü (120, 150, 180 W), işlem hızını (1000, 1250, 1500 mm/s), işlem mesafesi (0,1 mm) belirlenmiştir. Lazer işleme parametrelerinin lazer gücü, işlem hızı ve işlem mesafesi değerleri üç etken ve üç seviyede incelenmiştir. Tüm bu proses parametreleri test edilerek toplam 9 adet test numunesi üretilmiş ve farklı parametreler altında tribolojik özellikleri incelenmiştir. İncelemeler sonucunda kuvvet arttıkça aşınma oranı düşen numuneler 4.numune, 5.numune, 6.numunelerdir. Yani aşınma direnci yüksek olan numunelerdir. Üretim

işlem parametrelerinde tarama aralığı 0.1 mm ve katman kalınlığı 0.03 mm de sabittir. Aşınma oranını etkileyen parametreler uygulanan yük, lazer gücü ve lazer tarama hızı olmuştur.

Araştırmalar sonucunda DMLS makinesinde ve Ti6Al4V alaşımı için EOS firması standart (x-işlem stratejisi, 160 W lazer gücü, 1250 mm/s işlem hızı ve 0.1mm tarama mesafesinde ve 42,67 J/mm<sup>3</sup> enerji yoğunluğu) üretim işlem parametrelerini önerilmektedir (Turhan 2016). Deneysel işlemler sonucunda hacim kaybı ve aşınma oranı iyi olan numuneler 5.numune (150 W lazer gücü, 1250 mm/s tarama hızı ve 40 J/mm<sup>3</sup> enerji yoğunluğu) ve 6. Numune (x-tarama stratejisi, 180 W lazer gücü, 1250 mm/s işlem hızı ve 48 J/mm<sup>3</sup> enerji yoğunluğu) olarak gözlenmiştir. Deneysel sonuçlara göre EOS firmasının tavsiye ettiği üretim parametrelerini ispatlanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda Geleneksel imalat ve Eklemeli imalat ile üretilen numuneler incelendiğinde eklemeli imalat ile üretilen numune geleneksel imalat ile üretilen numune yerine kullanılabilirliği sonucuna varmıştır.

Numunelerin mikroyapısı optik mikroskop ve FESEM cihazı ile incelenmiştir. Mikroskop görüntülerinde tane sınırları çok net belirgin olmasa da  $\alpha$  fazı ve  $\beta$  fazı gözlenmiştir. Araştırmalar sonucunda tanecik sınırlarının net olarak gözlenmemesinin sebebi ışıllı işlem derecesinin yeterli olmamasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Olması gereken ışıllı işlem sıcaklığı 700-750 °C olması gerekirken bu çalışmada yapılan ışıllı işlem sıcaklığı 650 °C olmuştur (Appavuravther 2020).

Mikroskop görüntülerinde gaz boşlukları ve çukurluklar (kaynamamış yapılar) gözlenmektedir. Gaz boşluklarının oluşmasının sebebi, eriyik havuzunda tutulan gazın zamanla kaçmadığı ve bu nedenle katılaşmış boncukta sıkıştığı şekilde gaz tutulması nedeniyle oluşuklarını gösterir (Galarraga ve diğ. 2016, Yang ve Man 2000). FESEM görüntülerinde gözlemlenen yüzeysel hatalar, Döküntü-Kırıntılar, geniş çizikler, deformasyonlar, yapışmalar, tabakalara ayrılmalar, Oksidatif pul pul dökülme, çukurluklar ve çizikler aşınma deneyinde oluşan hasarlar olarak gözlenmiştir.

DMLS üretim metoduyla imal edilen Ti6Al4V alaşımının EDX analizinde % 5.44 alüminyum, % 3.21 vanadyum ve %91.35 titanyum elementleri bulunmaktadır. Bu değerler EOS firmasından tedarik edilen Ti6Al4V toz alaşımı için sağlanan temel



yüzde değerleridir. Bu çalışmada yapılan 9 numunenin farklı yüzey noktalarından alınan EDX analizlerinde bu değerlere yakın (%) yüzdesel değerler incelenmiştir.

## 8. KAYNAKLAR

Aboulkhair, N.T., Everitt, N.M., Ashcroft, I. & Tuck, C., “Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting” Additive Manufacturing, 1-4, 77- 86. Doi: 10.1016/j.addma.2014.08.001, (2014).

Additive Manufacturing Research Group, “About Additive Manufacturing” <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditive-manufacturing/> (Son erişim tarihi:30.09.2020), (2017).

Appavuravther, E., “SLE (Seçici Lazer Ergitme) Yöntemi İle Üretilen Ti-6AL-4V Alaşımının Isıl İşlemi ve Karakterizasyonu” Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, (2020).

Athanassiadis, A.G., Miskin, M.Z., Paul, K., Rodenberg, N., Lee, S.H., Merritt, J., Brown, E., Amend, J., Lipson, H. & Jaeger, H.M., “Particle shape effects on the stress response of granular packings” Soft Matter, 10, 48-59. Doi: 10.1039/c3sm52047a, (2014).

Attar, H., Calin, M., Zhang, L.C., Scudino, S., Eckert, J., “Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium”, Materials Science & Engineering A, 593, (2014), 170–177.

Austin, T. S., Caitlin, S. K., Ming, C. L., Joseph, W.N., “Powders For Additive Manufacturing Processes Characterization Techniques And Effects On Part Properties” Solid Freeform Fabrication, Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference Reviewed Paper, 1004-1030, (2016).

Ay, O., “ Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) – EDS Analizi ” KBT Metroloji ve Kalite Mühendisliği Çalışma Grubu, 2017

Ayhan, H., “Biyomalzemeler”, Bilim ve Teknik, Temmuz, 2-11, (2002).

Bandyopadhyay, A., Heer, B. “Additive manufacturing of multi-material structures” Materials Science & Engineering R, 129: 1–16, (2018).

Bilgin, M. S., Erdem, A., Dilber, E., Ersoy, İ. “Comparison of fracture resistance between cast, Cad/Cam milling and direct metal laser sintering metal post systems” Journal of Prosthodontic Research 60 (1):23–28, (2016).

Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Iuliano, L., Fino, P., “Influence of Process Parameters On Surface Roughness Of Aluminum Parts Produced By DMLS” Manufacturing Technology, 67, 2743-2751, (2013).

Chlebus, E. & Kurzynowski, T., “Optymalizacja procesu selektywnej mikrometalurgii laserowej” *Górnictwo odkrywkowe* 4/2010 s. 151 – 156, ISSN 0043- 2075, (2010).

Choi, J., Chang, Y., Characteristics of laser aided direct metal/material deposition process for tool steel, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 45 (4–5) (2005) 597–607.

Chua, C.K., Leong, K.F. and Lim, C.S., “Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3rd edition” World Scientific. Singapore, (2010).

Chunxiang, C., BaoMin, H., Lichen, Z., Shuangjin, L., “Titanium alloy production technology, market prospects and industry development”, *Materials and Design*, 32, 1684–1691, (2011).

Clayton, J., “Optimising metal powders for additive manufacturing” *Metal Powder Report*, 69(5), 14-17. doi:10.1016/S0026-0657(14)70223-1, (2014).

Custom, “Custom Market Research Service” “New Market Research Report on 3-D Printing”. <http://www.3Bers.org/articles/20131111-3B-printing-marketworth-billion-by-2020.html> , (Son erişim tarihi: 28.06. 2020), (2017).

Dahotre, N.B., Harimkar, S.P., *Laser Fabrication and Machining of Materials*. Springer Science Business Media. New York. 382p, (2008).

Danforth, S. C. ve Safari, A., “Solid freeform fabrication: novel manufacturing opportunities for electronic ceramics” *Applications of Ferroelectrics, ISAF'96.*, Proceedings of the Tenth IEEE International Symposium, 1, 183-188. doi:10.1109/isaf.1996.602732, (1996, August), (1996).

Dawes, B.J. & Bowerman, R., “Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain” *Johnson Matthey Technology Rev*, 59, 243–256. doi:10.1595/205651315X688686, (2015).

Dong, H. and Bell, T., “Enhanced wear resistance of titanium surfaces by a new thermal oxidation treatment”, *Wear*, 238, 131-137, (2000).

Doyle, M., Agarwal, K., Sealy, W., Schull, K. “Effect of layer thickness and orientation on mechanical behavior of binder jet stainless steel 420+bronze parts” *Procedia Manufacturing*, 1 : 251–262, (2015).

Dreams, Material extrusion. <http://seb199.me.vt.edu/dreams/material-extrusion/> (Son erişim tarihi: 24.09.2020), (2017).

EOS Material Ti64 Flexline, <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/dmls-metal-materials/titanium-ti64-ticp>, (2022).

Ergene, B., “Eklemeli İmalat ile Titanyum ve Polimer Esaslı Malzemelerden

Üretilen Hücresel Yapıların Mekanik Davranışlarının Deneysel Olarak Araştırılması” Doktora Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, (2020).

Eshraghi, S., Karevan, M., Kalaitzidou, K., & Das, S., “Processing and Properties of Electrically Conductive Nanocomposites Based on Polyamide-12 Filled with Exfoliated Graphite Nanoplatelets Prepared by Selective Laser Sintering” International Journal of Precision Engineering Manufacturing, 14(11), 1947-1951, (2013)

Evcin, A. (2007). Afyon Kocatepe Üniversitesi; Toz Üretim Teknikleri Ders Notları, <http://www.kimmuh.com/evcin/toz/toz1a.pdf>. (Son erişim tarihi: 19.12.2019).

Exone,“ Binder Jetting ”  
<http://www.exone.com/Resources/technologyOverview/>

Formanoir, C., Michotte, S., Rigo, O., Germain, L., Godet S., Electron beam melted Ti-6Al-4V: microstructure, texture and mechanical behavior of the as-built and heat-treated material, Mater. Sci. Eng. A 652 (2016) 105–119.

Frazier, W.E., “Metal additive manufacturing: a review” Journal of Materials Engineering and Performance, 23, 1917–1928. Doi:10.1007/s11665-014-0958-z, (2014).

Freeman, R., “Measuring the flow properties of consolidated, conditioned and aerated powders – A comparative study using a powder rheometer and a rotational shear cell” Powder Technology, 174, 25–33, (2007).

Galarraga, H., Lados, D.A., Dehoff, R.R., Kirka, M.M., Nandwana, P., Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM), Addit. Manuf. 10 (2016) 47–57.

Gaytan, S.M., Murr, L.E., Medina F., Martinez, E., Lopez, M.I., Wicker, R.B., Advanced metal powder based manufacturing of complex components by electron beam melting, Mater. Technol. 24 (3) (2009) 180–190.

Gebhardt, A., “Understanding Additive Manufacturing” 4p. Germany, (2011).

Gibson, I. & Shi, D., “Material Properties and Fabrication Parameters in Selective Laser Sintering Process” Rapid Prototyping Journal, 3(4), 129-136, (1997).

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., “Vat Photopolymerization Processes. Additive Manufacturing Technologies” 63-106, Springer, New York, (2015).

Gibson, I., Rosen, D.W., “Additive Manufacturing Technologies” Springer

New York Heidelberg Dordrecht, 4p. London, (2010).

Gibson, I., Rosen, W.D., Stucker, B., “Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, 1. Edition, Springer Publishers, United Kingdom” (2010).

GKN. Powder Metallurgy, (2018).  
[http://www.gkngroup.com/hoeganaes/media/Tech%20Library/SchadeAtomized%20Powders%20for%20Additive%20Manufacturing%20\(1\).pdf](http://www.gkngroup.com/hoeganaes/media/Tech%20Library/SchadeAtomized%20Powders%20for%20Additive%20Manufacturing%20(1).pdf)

Gong, X. & Chou, K., “Characterization of sintered Ti-6Al-4V powders in Electron beam additive manufacturing” in: Proc. ASME 2013 Int. Manuf. Sci. Eng. Conf., American Society of Mechanical Engineers, (2013).

Gonzalez, M., Maskos, K., Hargrave, R. and Kuberry, J., “Titanium alloy tubing for HP/HT applications”, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, ABD, Denver, Society of Petroleum Engineers, (2008).

Guan, K., Wang, Z., Gao, M., Li, X. & Zeng, X., “Effects of Processing Parameters on Tensile Properties of Selective Laser Melted 304 Stainless Steel” *Materials and Design*, 50, 581–586, (2013).

Gusarov, A.V., Laoui, T., Froyen, L.& Titov, V.I., “Contact thermal conductivity of a powder bed in selective laser sintering” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 1103–1109. doi:10.1016/S0017-9310(02)00370-8, (2003).

Hanzl, P., Zetek, M., Bakša, T. & Kroupa, T., “The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of SLM Parts” *Procedia Engineering*, 100,1405 – 1413, (2015).

Hawkins, A.E., “The Shape of Powder-Particle Outlines” *Research Studies Press Ltd., England*, (1993).

Heim, K., Bernier, F., Pelletier, R. & Lefebvre, L.P., “High resolution pore size analysis in metallic powders by Xray tomography” *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 6, 45–52. Doi: 10.1016/j.csnst.2016.09.002, (2016).

Helmer, H., Bauerei, A., Singer, R.F.& Körner C., “Grain structure evolution in Inconel 718 during selective electron beam melting” *Material Science Engineering A*, 668, 180-187, (2016).

Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. & Emmelmann, C., “Additive manufacturing of metals. *Acta Materilia*” 117, 371–392, (2016).

Hrabe, N., Gnäupel-Herold, T., Quinn, T., Fatigue properties of a titanium alloy

(Ti– 6Al–4V) fabricated via electron beam melting (EBM): effects of internal defects and residual stress, *Int. J. Fatigue* 94 (2017) 202–210.

Ion, J., “Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application” Butterworth-Heinemann, (2005).

Jacobs, P. F., “Fundamentals of stereolithography” 1992 International Solid Freeform Fabrication Symposium, (1992).

Kalite Metalürji, “ Kaliteli Hizmet ve Güvenilirlik”, son güncelleme 2013, <http://kalitemetalurji.com.tr/urunlerimiz/islah-celikleri/4140-islah-celigi/>

Kato, K., Adachi, K., “Wear Mechanism”, *Modern Tribology Handbook*, 2001.

Kearns, M., “Titanium: alive, well, and booming!” *Adv. Mater. Process*, 163, 63-64, (2005).

Khaing, M., Fuh, J., & Lu, L., “Direct Metal Laser Sintering for Rapid Tooling: Processing and Characterisation of EOS Parts” *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1), 269-272, (2001).

Kim, T.B., Yue, S., Zhang, Z., Jones, E., Jones, J.R. & Lee, P.D., “Additive manufactured porous titanium structures: through-process quantification of pore and strut networks” *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2706–2715. doi:10.1016/j. jmatprotec.2014.05.006, (2014).

Kok, Y., Tan, X.P., Wang, P., Nai, M.L.S, Loh, N.H., Liu, E., Tor, S.B., “Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: a critical review” *Material Design*, 139, 565–586. Doi:10.1016/J. MATDES.2017.11.021, (2018).

Körner, C., “Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review” *International Materials Reviews*, 61, 361–377. doi:10. 1080/09506608.2016.1176289, (2016).

Krar, S.F.& Gill, R.A., “Exploring Advanced Manufacturing Technologies. 1. Edition. New York, (2003).

Kruth, J.P. & Kumar, S., “Statistical Analysis of Experimental Parameters in Selective Laser Sintering” *Journal of Advanced Engineering Materials*, 7(8), 750–755, (2005).

Kruth, J.P., Badrossamay, M., Yasa, E., Deckers, J., Thijs, L. & Humbeeck, J.V., “Part and Material Properties in Selective Laser Melting of Metals” 16th International Symposium Electro Machining, Shanghai, China, (2010).

Kurt, A.O. (2010). [www.aokurt.sakarya.edu.tr/dersler/dersler.htm](http://www.aokurt.sakarya.edu.tr/dersler/dersler.htm). (Son erişim

tarihi: 25.04.2020), (1996).

Kurzynowski, T., Chlebus, E., Kuznicka, B. Dybala, B., “SLM processing of metal powders” Conference Proceedings ICMR09, The University of Warwick UK, (2009).

Lazov, L. & Angelov, N., “Physical Model about Laser Impact on Metals and Alloys” *Contemporary Materials*, 1(2), (2010).

Lee, H., Lim, C.H.J., Low, M.J., Tham, N., Murukeshan, V.M. & Kim, Y.J., “Lasers in Additive Manufacturing: A Review” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 4(3), 307-322. Doi: 10.1007/s40684-017-0037-7, (2017).

Lee, P.-H., Chang, E., Yu, S., Lee, S. W., Kim, I. W., “Modification and Characteristics of Biodegradable Polymer Suitable for Selective Laser Sintering” *International Journal of Precision Engineering Manufacturing*, 14(6), 1079-1086, (2013).

Leung, C.L.A, Marussi, S., Atwood, R.C., Towrie, M., Withers, P.J., Lee, P.D., “In situ X-ray imaging of defect and molten pool dynamics in laser additive manufacturing” *Nature Communications*, 9, 1355. doi:10.1038/s41467-018-03734-7, (2018).

Leung, C.L.A, Marussi, S., Towrie, M., Garcia, J.V., Atwood, R.C., Bodey, A.J., Jones, J.R., Withers, P.J.& Lee, P.D., “Laser-Matter Interactions in Additive Manufacturing of Stainless Steel SS316L and 13–93 Bioactive Glass Revealed by In Situ X-Ray Imaging. *Additive Manufacturing*” 24, 647-657. Doi: 10.1016/j.addma.2018.08.025, (2019).

Leyens, C., Peters, M., “Titanium and titanium alloys”, Wiley-VCH, (2003).

Li P.-H., Guo W.-G., Huang W.-D., Su Y., Lin X., Yuan K.-B., Thermomechanical response of 3D laser-deposited Ti–6Al–4V alloy over a wide range of strain rates and temperatures, *Mater. Sci. Eng. A* 647 (2015) 34–42.

Liu, F.-H., Shen, Y.-K., and Lee, J.-L., “Selective Laser Sintering of a Hydroxyapatite-Silica Scaffold on Cultured MG63 Osteoblasts in Vitro” *International Journal of Precision Engineering Manufacturing*, 13(3), 439-444, (2012).

Liu, S., & Shin, Y. C., “Center for Laser-based Manufacturing, School of Mechanical Engineering” Purdue University, West Lafayette, IN 47906, USA, 164 (2019) 107552.

Long, M. and Rack, H. J., “Titanium alloys in total joint replacement-a materials science perspective”, *Biomaterials*, 19, 1621-1639, (1998).

Lyckfeldt, O.& Euro, P.M., “Kongresi ve Sergisi Bildirileri Kitabı” 2, 225-230, Avrupa Toz Metalürjisi Derneği, Shrewsbury-İngiltere, (2013).

Mani, M., Lane, B., Donmez, A., Feng, S., Moylan, S., & Fesperman, R., “Measurement Science Needs for Real-time Control of Additive Manufacturing Powder Bed Fusion Processes” National Institute of Standards and Technology, (2015).

Marhellabs, “Fused deposition modeling” <https://www.marhellabs.com/en/3Bmanufacturing-processes/fused-deposition-modeling-fdm/> (Son erişim tarihi:23.09.2020), (2017).

Maskery, I., Aboulkhair, N.T., Corfield, M.R., Tuck, C., Clare, A.T., Leach, R.K., Wildman, R.D., Ashcroft, I.A & Hague, R.J.M., “Quantification and characterisation of porosity in selectively lasermelted Al-Si10-Mg using Xray computed tomography” *Material Characterization*, 111, 193- 204, (2016).

Meiners, W., “Direktes Selektives Lasersintern Einkomponentiger Metallischer Werkstoffe” Dissertation, Aachen. Germany, (1999).

Milan, T., Biljana, G., Dimitri, B., Tara, D., Peter, P., Bojan, R., “Surface modifications of a titanium implant by a picosecond Nd:YAG laser operating at 1064 and 532nm” *Applied Surface Science*, 253, 2551–2556, (2006).

Moat, R.J., Pinkerton, A.J., Li, L., Withers, P.J. & Preuss, M., “Residual stresses in laser direct metal deposited Waspaloy” *Material Science Engineering A*, 528, 2288–2298. Doi:10.1016/j.msea.2010.12.010, (2011).

Molinari, A., Straffelini, G., Tesi, B. and Bacci, T., “Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy”, *Wear*, 208, 105-112, (1997).

Monzon, M. D., Ortega, Z., Martínez, A., & Ortega, F., “Standardization in Additive Manufacturing: Activities Carried Out by International Organizations and Projects” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(5-8), 1111-1121, (2015).

Ning, Y., “Process Parameter Optimization for Direct Metal Laser Sintering (DMLS)”, Doctor Thesis, National University of Singapore, Department of Mechanical Engineering, 1, Singapur (2005).

Ouden, A.D., “Rapid prototyping for 3B prototypes and visual models” <http://www.alexdenouden.nl/08/rapprod5.htm> (Son erişim tarihi:23.04.2020), (2017).

Özsoy, K., Duman, B., “Eklemeli imalat (3 boyutlu baskı) teknolojilerinin eğitimde kullanılabilirliği” *International journal of 3B printing technologies and digital industry* 1:1, 36-48, (2017).



Pal, S., Tiyyagura, H.R., Drstvenšek I, Kumar, C.S. “The effect of post-processing and machining process parameters on properties of stainless steel PH1 product produced by Direct Metal Laser Sintering” *Procedia Engineering*, 149: 359 – 365, (2016).

Partanen, J., “Solid State Lasers for Stereolithography” *Procedia of the 7th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium*, 369-376, (1996).

Rahmi, (2017). [http://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder\\_product.html](http://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder_product.html). (Son erişim tarihi: 28.07.2020).

Redwood, B., “Additive manufacturing technologies overview. <https://www.3Bhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overvie> (Son erişim tarihi:25.09.2020), (2017).

Rodriguez, E., Medina, E., Espalin, D., Terrazas, C., Muse, D., Henry, C., MacDonald, E. & Wicker, R., “Integration of a thermal imaging feedback control system in electron beam melting” *Proc. Solid free*, (2012).

Röttger, A., Geenen, K., Windmann, M., Binner, F., “Theisen, W. Comparison of microstructure and mechanical properties of 316L austenitic steel processed by selective laser melting with hot-isostatic pressed and cast material” *Materials Science and Engineering A*, 678: 365–376, (2016).

Sadowski, M, Ladani, L, Brindley, W, & Romano, J., “Optimizing quality of additively manufactured Inconel 718 using powder bed laser melting process” *Additive Manufacturing*, 11, 60–70, (2016).

Schleifenbaum, H., Diatlov, A., Hinke, C., Bultmann, J. & Voswinckel, H., “Direct Photonic Production: Towards High Speed Additive Manufacturing of Individualized Goods” *Journal of Production Engineering Res. Devel.*, 5(4), 359–371. Doi: 10.1007/s11740-011-0331-0, (2011).

Shi, X., Ma, S., Liua, C., Wua, Q., Lua, J., Liub, Y., Shib, W. “Selective laser melting-wire arc additive manufacturing hybrid fabrication of Ti-6Al-4V alloy: Microstructure and mechanical properties” *Materials Science & Engineering A*, 684: 196–204, (2017).

Simchi, A., “The role of particle size on the laser sintering of iron powder” *Metallurgical and Materials Transactions B*, 35, 937-948. Doi:10.1007/s11663-004- 0088-3, (2004).

Simchi, A., “Direct Laser Sintering of Metal Powders: Mechanism, Kinetics and Microstructural Features” *Journal of Materials Science and Engineering A*, 428, 148-158. Doi:10.1016/j.msea.2006.04.117, (2006).

Simchi, A., Petzoldt, F., Pohl, H. “On The Development Of Direct Metal Laser

Sintering For Rapid Tooling.” *Journal Of Materials Processing Technology*, 141, 319-328, (2003).

Slotwinski, J.A., Garboczi, E.J., Stutzman, P.E., Ferraris, C.F., Watson, S.S. & Peltz, M.A., “Characterization of Metal Powders Used for Additive Manufacturing” *J Res Natl Inst Stand Technol.*, 119, 460–493. Doi: 10.6028/jres.119.018, (2014)

Smith, C.J., Derguti, F., Hernandez Nava, E., Thomas, M., Tammas-Williams, S., Gulizia, S., Fraser, D.& Todd, I., “Dimensional accuracy of Electron Beam Melting (EBM) additive manufacture with regard to weight optimized truss structures” *Journal of Materials Processing Technology*, 229, 128–138. Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.08.028, (2016).

Smith, C.J., Tammas-Williams, S., Hernandez-Nava, E. & Todd, I., “Tailoring the thermal conductivity of the powder bed in Electron Beam Melting (EBM) additive manufacturing” *Scientific Reports*, 7, 10514. Doi:10.1038/s41598-017-11243-8, (2017).

Song, B., Dong, S., Liao, H., Coddet, C., “Process Parameters Selection for Selective Laser Melting of Ti6Al4V Based On Temperature Distribution Simulation and Experimental Sintering” *Int J Manuf Technol.*, 61, 967-974, (2012).

Spierings, A.B., Herres, N. & Levy, G., “Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts” *Rapid Prototyping Journal*, (17)3, 195–202, (2011).

Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, “The 7 categories of Additive Manufacturing” <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditive-manufacturing/> (29.09.2017), (2012).

Subaşı, M. and Karataş, Ç., “Titanyum ve Titanyum Alaşımlarından Yapılan İmplantlar Üzerinde İnceleme”, *Politeknik Dergisi*, 15, (2 s.), 87-103, (2012).

Sürmen, H. K., “Eklemeli imalat (3b baskı): teknolojiler ve uygulamalar” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 24, Sayı 2, (2019).

Tammas-Williams, S., Zhao, H., Léonard, F., Derguti, F., Todd, I., Prangnell, P.B., XCT analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti–6Al–4V components manufactured by selective electron beam melting, *Mater. Charact.* 102 (2015) 47–61.

Tang, H.P., Qian, M., Liu N., Zhang, X.Z., Yang, G.Y., & Wang, J., “Effect of Powder Reuse Times on Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V by Selective

Electron Beam Melting” The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 67, 555– 563. doi:10.1007/s11837-015-1300-4, (2015).

Tay, F. E.H., Haider, E.A. “Laser sintered rapid tools with improved surface finish and strength using plating technology” Journal of Materials Processing Technology, 121: 318–322, (2002).

Threeding, “Binder jetting 3-B printing technology” <https://www.threeding.com/blog/%E2%80%8Bbinder-jetting-3B-printing-technology> (Son erişim tarihi:24.09.2020), (2017).

Toz Metalurjisi, (2018): Toz Üretim Teknikleri Ders Notları. [http://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder\\_product.html](http://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder_product.html). Son erişim tarihi: 04.02 2020).

Turhan, S., “DMLS ile üretilen Ti6Al4V parçalarında lazer parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi” Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, (2016).

Turhan, S. & Özsoy, A., “DMLS Yöntemiyle İmal Edilen Ti-6Al-4V Alaşım Özelliklerine İşlem Parametrelerinin Etkisi” SDU Uluslararası Teknolojik Araştırmalar Dergisi, 8(2), 15-27, (2016).

Upadhyaya, G.S. “Powder Metallurgy Technology” Cambridge International Science Publishing, (1996).

Uslan, İ. & Küçükarslan, S., “Kalay Tozu Üretimine Gaz Atomizasyonu Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi” Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25(1), 1-8, (2010).

Varol, T., “Aşınma Deneyi” Karadeniz Teknik Üniversitesi, Labarotuar Föyü, Karadeniz, (Eylül 2016 ).

Vilaro, T., Colin, C., Bartout, J.D., As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting, Metall. Mater. Trans. A 42 (10) (2011) 3190–3199.

Wang, R., Wang, L., Zhao, L., Liu, Z. “İnfluence of process parameters on part shrinkage in SLS” İnt J Adv Manuf Technol., 33, 498-504, (2007).

Weiwei, H., Wenpeng, J., Haiyan, L., Huiping, T., Xinting, K., & Yu, H., “Research on preheating of titanium alloy powder in electron beam melting technology” Rare Metal Materials and Engineering, 40, 2072–2075. Doi:10.1016/S1875-5372(12) 60014-9, (2011).

[What-is-Binder-Jetting](#). (Son erişim tarihi:20.07.2020), (2017).

Williams, H. Zhao, F. Léonard, F. Derguti, I. Todd & P.B. Prangnell., “XCT

analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti-6Al-4V components manufactured by selective electron beam melting” *Material Characterization*, 102, 47–61. Doi:10.1016/j.matchar.2015.02.008, (2015).

Wohlers, T. ve Gornet, T., “History of additive manufacturing” *Wohlers report*, 24, 118, (2014).

Xometry, “Binder jetting. <https://www.xometry.com/blog/3B-printing-processes> (Son erişim tarihi:21.09.2020), (2017).

Yamanoğlu, (2017). Yamanoğlu R., Kocaeli Üniversitesi, Toz Üretim Yöntemleri Ders Notları, <http://docplayer.biz.tr/32188483-Toz-uretimyontemleri-yrd-doc-drridvan-yamanoglu.html>. (Son erişim tarihi: 04.05.2020).

Yan, M. Ve YU, M. “An Overview Of Densification, Microstructure and Mechanical Property Of Additively Manufactured Ti6Al4V Comparison Among Selective Laser Melting, Electron Beam Melting” *Laser Metal Deposition And Selective Laser Sintering And With Conventional Power Metallurgy*. Chapter 5. Licensee In Tech. 83s, (2015).

Yang, Y., Man, H.C., Microstructure evolution of laser clad layers of W–C–Co alloy powders. This paper is sponsored by The Natural Science Foundation of Guangdong Province, China, *Surf. Coat. Technol.* 132 (2) (2000) 130–136.

Yıldız, T., Gür, A. K., “Aşınma Sistemleri”, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 86-91, 2006.

Yu, J., Lin, X., Ma, L., Wang, J., Fu, X., Chen, J., “Influence of laser deposition patterns on part distortion, interior quality and mechanical properties by laser solid forming (LSF)”, *Material Science and Engineering A*, 528, 2011, 1094-1104.

Yu, N., “Process Parameters Optimization for Direct Metal Laser Sintering (DMLS)” A Dissertation Submitted for the Degree of Doctor Philosophy, Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, (2005).

Zhu, Y., J. Zou, X. Chen, and H. Yang. “Tribology of selective laser melting processed parts: stainless steel 316 l under lubricated conditions” *Wear*, 350–351:46– 55, (2016).