

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATMANLI İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ Ti-6Al-4V ALAŞIMININ  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fırat MEMU**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nuri DURLU**

**AĞUSTOS 2019**



Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....

**Prof. Dr. Osman EROĞUL**

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....

**Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ**

Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 161511082 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Fırat MEMU**'nun ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**KATMANLI İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ Ti-6Al-4V ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**" başlıklı tezi **02.08.2019** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı:** **Prof. Dr. Nuri DURLU** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Adem KURT (Başkan)** .....  
Gazi Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Recep M. GÖRGÜLÜARSLAN** .....  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi





## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.



Fırat Memu



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### KATMANLI İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ Ti-6Al-4V ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Fırat Memu

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nuri Durlu

Tarih: Ağustos 2019

Havacılık, savunma, otomotiv ve biyomedikal sanayisinde kullanılan Ti-6Al-4V parçalar, atık malzeme miktarının en düşük seviyede olduğu toz bazlı katmanlı imalat yöntemlerinden elektron demetiyle ergitme (EDE) yöntemi ile mekanik özellik değerleri korunarak karmaşık şekilli üretilebilmektedir. Bu çalışmada, Arcam Q20 Plus EDE tezgâhı kullanılarak yatay ve dikey yönlerde, farklı ölçülerde üretilen Ti-6Al-4V alaşımlarının mekanik özellikleri incelenmiştir. EDE yöntemi ile üretilen blok, ofset ve standart boyutlarda (çap 15mm, 7.5mm, 6mm) çekme numunelerinin üretim sonrası yoğunluk ve yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş ve üretim boyutu azaldıkça yoğunluğun azaldığı, pürüzlülük değerinin arttığı gösterilmiştir. Üretilen numunelere standart ölçülerde (çap 6mm) çekme testleri yapılmıştır. Blok ölçülerde üretilen numunelerin çekme özellikleri üretim yönü ve üretim konumu fark etmeksizin ofset ve standart ölçülerdeki numunelere kıyasla daha yüksektir. Çekme testi sonrası incelenen kırık yüzeylerdeki gözenek ve gevrek kırılma bölgeleri elde edilen çekme testi sonuçlarını desteklemektedir.

Numunelere uygulanan mikrosertlik testi ile üretilen parçanın kenar bölgesinin merkezinden daha yüksek sertliğe sahip olduğu ve blok ölçülerde üretilen numunelerin merkezinin ofset ve standart ölçülerdekine göre daha düşük sertlikte olduğu belirlenmiştir. Numunelere uygulanan metalografik inceleme sonrası, Ti-6Al-4V numunelerinde üretim sonrası yavaş soğuma nedeniyle  $\alpha$  tane sınırı ile yapraksı  $\alpha + \beta$  mikroyapısı gözlenmiştir. Numunelerin sertlik değerlerini destekleyici olarak kenar bölgedeki  $\alpha$  levha kalınlığının merkez bölgesine göre daha ince olduğu ve blok numune merkezindeki en yüksek  $\alpha$  levha kalınlığının  $1.7 \mu\text{m}$  olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca EDE yönteminde kullanılan Ti-6Al-4V alaşım tozunun üretim öncesi ve sonrasında karakterizasyonu yapılmıştır. EDE ile üretim sonrasında elek altında kalan tozların ortalama boyutlarının azaldığı ve sadece bu alaşım tozlarının bir sonraki üretimde kullanılabileceği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Katmanlı imalat, Elektron demetiyle ergitme, Ti-6Al-4V, Mekanik özellikler

## **ABSTRACT**

Master of Science Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF Ti-6Al-4V ALLOY

PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Firat Memu

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Nuri Durlu

Date: August 2019

Ti-6Al-4V parts used in aerospace, defence, automotive and biomedical industries can be produced in a complex shape by maintaining the mechanical properties by electron beam melting (EBM) method which is one of the powder based additive manufacturing methods with the lowest amount of waste material. In this study, mechanical properties of Ti-6Al-4V alloys produced by using Arcam Q20 Plus EBM machine in different dimensions in horizontal and vertical directions were examined. Density and surface roughness of the samples produced by EBM method were measured and it was shown that density decreased, and the roughness value increased as the production size decreased. Manufactured samples were subjected to tensile tests in standard dimensions (diameter 6 mm). Regardless of the production direction and production position, the tensile properties of the samples produced in block sizes are higher than those of offset and standard sizes. The pore and brittle fracture zones on the fracture surfaces examined after the tensile test confirm the obtained tensile test results.

The microhardness test applied to the samples showed that the edge region of the part had higher hardness than the center, and the center of the block samples had a lower

hardness than the offset and standard dimensions. After metallographic examination applied to the samples, Ti-6Al-4V samples are dominated by the  $\alpha$  grain boundary and the lamellar  $\alpha + \beta$  microstructure due to slow cooling after production. It was observed that the thickness of the  $\alpha$  plates in the edge region was thinner than the central regions and the highest  $\alpha$  plate thickness (1.7  $\mu\text{m}$ ) was obtained in the center of block sample as a support for the hardness values of the samples.

In addition, Ti-6Al-4V alloy powder used in EBM method was characterized before and after production. After the production with EBM, it was determined that the average size of the powders remaining under the mesh decreased and only these alloy powders can be used in the next production.

**Keywords:** Additive manufacturing, Electron beam melting, Ti-6Al-4V, Mechanical properties

## TEŞEKKÜR

Değerli hocam ve tez danışmanım olan Prof. Dr. Nuri DURLU'ya bu çalışma süresince bana birçok konuda yol gösterdiği, tecrübeleri ve derin bilgi birikimi ile tavsiye ve yardımlarını esirgemediği için teşekkür ederim.

Bu yüksek lisans tez çalışmasını, “Havacılık Sektöründe Kullanılan Ti-6Al-4V Alaşımından Oluşa İş Parçalarının Katmanlı İmalat Teknikleri ile Üretimi” başlıklı SAYP Projesi kapsamında, destekleyen Savunma Sanayii Başkanlığı'na, Türk Havacılık ve Uzay Sanayii'ne ve TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmalarım sırasında yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren TUSAŞ – Türk Havacılık ve Uzay Sanayii firması Prototip Üretimi Müdürlüğü'nden sanayi tez danışmanım Yavuz GÜLEÇ'e, numunelerin üretimindeki katkılarından ötürü Burcu ARSLAN HAMAT'a ve de Kaan ÇİLOĞLU'na teşekkür ederim.

Tez kapsamında yapılan taramalı elektron mikroskobu çalışmasında Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nden Serkan YILMAZ'a, parçacık boyut ölçümlerinde yardımcı olan Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nden Dr. İbrahim ÇAM'a, optik profilometre ile yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'nden Yahya TUNÇ'a, talaşlı imalat işlemlerinde TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü teknisyeni Kamil ARSLAN'a katkılarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli arkadaşlarım Gökberk SERİN'e, Muhammed Said YILMAZ'a, Müge KAHYA'ya, Batıhan ŞENER'e, Olgun Utku GÜNGÖR'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmamı, hayatımın her evresinde bana destek olan ve hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan, sevgi ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen başta rahmetli annem Şükriye MEMU, babam Sebahattin MEMU ve kardeşim Serhat MEMU'ya adıyorum.





## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xii</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xiii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>3</b>
2.1    Titanyum.....	3
2.2    Titanyum Elementinin Fiziksel Özellikleri.....	4
2.3    Titanyum Alaşımları .....	6
2.4    Ti-6Al-4V Alaşımı.....	7
2.5    Katmanlı İmalat Teknolojileri .....	9
2.5.1    Katmanlı İmalat Teknolojilerine Giriş ve Avantajları .....	9
2.5.2    Katmanlı İmalat Teknolojisi Türleri .....	11
2.5.2.1    Birleştirmeli Yığılma Modellemesi (BYM) .....	12
2.5.2.2    Toz Yataklı Ergitme (TYE).....	13
2.5.2.3    Yönlendirilmiş Enerjili Biriktirme (YEB).....	16
2.6    Ti-6Al-4V Alaşımının Katmanlı İmalat Teknolojisi ile Üretimi.....	18
2.6.1    Katmanlı İmalat Teknolojisi ile Üretilmiş Ti-6Al-4V Alaşımının Mikroyapısı .....	18
2.6.2    Katmanlı İmalat Teknolojisi ile Üretilmiş Ti-6Al-4V Alaşımının Mekanik Özellikleri.....	24
<b>3. DENEYSEL YÖNTEM</b> .....	<b>27</b>
3.1    Ti-6Al-4V Alaşım Tozlarının Karakterizasyonu.....	27
3.2    Çekme Test Numunelerinin Hazırlanması.....	27
3.3    Yoğunluk Ölçümleri, Mekanik Testler ve Karakterizasyon.....	32
3.3.1    Yoğunluk Ölçümü .....	32
3.3.2    Yüzey Pürüzlülüğü .....	33
3.3.3    Çekme Testi .....	33
3.3.4    Sertlik Testi.....	34
3.3.5    Metalografik İnceleme .....	34
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DEĞERLENDİRME</b> .....	<b>37</b>
4.1    Toz Karakterizasyonu .....	37
4.2    Yoğunluk Ölçümleri .....	42
4.3    Yüzey Morfolojisi.....	43
4.4    Mekanik Özellikler .....	47
4.5    Mikrosertlik Ölçümleri .....	50
4.6    Mikroyapı İncelemesi .....	53

4.7 Kırık Yüzey İncelemesi .....	58
<b>5. SONUÇLAR .....</b>	<b>61</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>63</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>69</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>73</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Titanyum alaşımlarının kullanıldığı çeşitli uygulamalar; (a) jet motorlarındaki kompresör kanatçıkları [3], (b) damarlı stentler ve (c) kalça implantı [4].....	4
Şekil 2.2: Titanyum elementinin birim hücresi (a) $\alpha$ fazı, (b) $\beta$ fazı [1].....	5
Şekil 2.3: Alfa ve Beta dengeleyicilerinin faz diyagramına etkisi [1].....	6
Şekil 2.4: Ti-6Al-4V alaşımının faz diyagramı ve farklı soğutma yöntemleriyle elde edilen mikroyapılarının şematik gösterimi [10].....	8
Şekil 2.5: Birleştirmeli yığıma modellemesi yönteminin şematik olarak gösterimi [23]. .....	12
Şekil 2.6: Lazer bazlı toz yataklı ergitme yönteminin şematik gösterimi [17].	14
Şekil 2.7: Elektron demetiyle ergitme yönteminin şematik gösterimi [29].	16
Şekil 2.8: Yönlendirilmiş enerjili biriktirme yönteminin şematik gösterimi [17].	17
Şekil 2.9: (a) TM/HIP ve (b) SLS/HIP işlemleri ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımının dağlama sonrası mikroyapıları [32].	19
Şekil 2.10: SLE ile üretilmiş Ti-6Al-4V alaşımının (a) üretim sonrası, (b) gerilim giderme ısıtma işlemi sonrası ve (c) HIP işlemi sonrası mikroyapısı [33].	20
Şekil 2.11: (a) 100 mm/sn (b) 50 mm/sn tarama hızlarında ve (c) 50 $\mu$ m (d) 100 $\mu$ m tarama aralığında üretilen Ti-6Al-4V alaşımının optik mikroskop görüntüleri [35].	21
Şekil 2.12: (a) 250, (b) 550, (c) 850, (d) 1150, (e) 1450 ve (f) 1750 mm/sn tarama hızlarındaki SLM Ti-6Al-4V alaşımının optik mikroskop görüntüleri [36].	22
Şekil 2.13: EDE yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V alaşımının (a) yatay ve (b) dikey kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri [38].	22
Şekil 2.14: Farklı üretim sıcaklıklarında elde edilen Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapılarına HIP etkisi [44].	23
Şekil 2.15: EDE yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçanın (a) alttan 1 cm ve (b) üstten 1 cm mesafedeki mikroyapısının optik mikroskop görüntüsü [45].	24
Şekil 2.16: EDE yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V numunesindeki (a) düzensiz şekilli yetersiz ergime ve (b) küresel gaz boşlukları [46].	24
Şekil 2.17: Katmanlı imalat yöntemi ile üretilmiş numunelerin çekme testi sonrası kırık yüzeyleri (a) SLE ve (b) EDE [47].	25
Şekil 2.18: (a) SLE, (b) EDE ve (c) döküm yöntemiyle üretilmiş numunelerin yüzey pürüzlülükleri [48].	26
Şekil 3.1: Arcam Q20 Plus elektron demetiyle ergitme tezgâhı [58].	28
Şekil 3.2: (a) Mekanik test blok numunelerinin üretimi için hazırlanan tabla geometrisi, (b) Üretimi yapılan blok numuneler.	30
Şekil 3.3: (a) Mekanik test standart ve fazlalık verilen numunelerin üretimi için kullanılan tabla geometrisi, (b) Üretimi yapılan standart ve fazlalık verilen numuneler.	31

Şekil 3.4: EDE yöntemiyle üretilen (a) blok silindir, (b) ofsetli silindir, (c) standart silindir, (d) blok dikdörtgen, (e) standart dikdörtgen numunelerin ölçüleri.....	32
Şekil 3.5: Instron 600LX çekme cihazı.....	33
Şekil 3.6: Buehler Micromet 5114 Vickers sertlik cihazı.....	34
Şekil 4.1: Katmanlı imalat yöntemi ile üretilen numunelerde kullanılan Ti-6Al-4V alaşım tozlarının toz boyut dağılımları. (a) yeni, (b) üretim sonrası elek altı, (c) üretim sonrası elek üstü ve (d) metalizasyona uğramış.....	38
Şekil 4.2: (a) Yeni, (b) üretim sonrası elek altı ve (c) metalizasyona uğramış Ti-6Al-4V alaşım tozlarının EDX sonucu.....	39
Şekil 4.3: Ti-6Al-4V alaşım tozunun TEM görüntüleri. (a) yeni ve (b) üretim sonrası elek altı.....	40
Şekil 4.4: Üretim sonrası elek üstünde kalan Ti-6Al-4V alaşım tozunun TEM görüntüleri.....	41
Şekil 4.5: Metalizasyona uğramış Ti-6Al-4V alaşım tozlarının TEM görüntüleri. ...	41
Şekil 4.6: EDE ile üretilmiş blok, ofset ve standart ölçülerdeki Ti-6Al-4V numunelerinin yüzey işleme öncesi ve sonrası yoğunlukları.....	42
Şekil 4.7: EDE ile üretilmiş Ti-6Al-4V numunenin (a) yüzeyindeki ergimemiş bölge ve (b) merkezindeki küresel gözenekler.....	43
Şekil 4.8: EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımının (a) üretim sonrası ve (b) yüzey işleme sonrası yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri.....	44
Şekil 4.9: EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımının yüzeylerinin ısı haritaları. (a) blok (b) ofset ve (c) standart.....	45
Şekil 4.10: EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerin (a) üretim yönünde ve (b) üretim yönüne dikey doğrultuda pürüzlülük ölçüm yönleri.....	46
Şekil 4.11: (a) Mekanik test numunelerinin üretimi için kullanılan tabla geometrisi ve (b) tabla üzerindeki üretim bölgelerinin konumları.....	49
Şekil 4.12: EDE yöntemi ile üretilen kontrol numuneleri (a,b) ve silindir kesitli numunelerden alınan yatay (mavi) ve dikey (kırmızı) kesitler (c,d,e).....	51
Şekil 4.13: Vickers sertlik ölçümlerinden örnek bir çentik görüntüsü.....	51
Şekil 4.14: EDE ile üretilmiş Ti-6Al-4V kontrol numunelerinin mikrosertlik değerleri.....	52
Şekil 4.15: EDE ile üretilmiş Ti-6Al-4V silindirik numunelerin mikrosertlik değerleri.....	53
Şekil 4.16: EDE yöntemi ile üretilen 15 mm çapındaki Ti-6Al-4V numunesinin (a) yatay-merkez, (b) yatay-kenar ve (c) dikey-merkez bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri.....	54
Şekil 4.17: EDE yöntemi ile üretilen 7.5 mm çapındaki Ti-6Al-4V numunesinin (a) yatay-merkez, (b) yatay-kenar ve (c) dikey-merkez bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri.....	55
Şekil 4.18: EDE yöntemi ile üretilen 6 mm çapındaki Ti-6Al-4V numunesinin (a) yatay-merkez, (b) yatay-kenar ve (c) dikey-merkez bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri.....	56
Şekil 4.19: EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerinin kenar ve merkez bölgelerindeki mikroyapıların TEM görüntüleri.....	57
Şekil 4.20: EDE yöntemi ile farklı geometri ve çaplarda üretilen (15 mm, 7.5 mm ve 6 mm) Ti-6Al-4V numunelerinin kenar ve merkez bölgelerindeki $\alpha$ levha kalınlıkları.....	57
Şekil 4.21: EDE yöntemi ile standart ölçülerde üretilen Ti-6Al-4V numunenin kırık yüzeyi.....	58

Şekil 4.22: EDE yöntemi ile blok silindir olarak üretilen Ti-6Al-4V numunenin kırık yüzeyi.....	59
Şekil 4.23: EDE yöntemi ile standart ölçülerde üretilen dikdörtgen kesitli Ti-6Al-4V numunenin (a) üst bölgesinden ve (b) destek bölgesinden kırık yüzeyleri.....	59





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1: Oda sıcaklığındaki titanyum ve diğer metallerin bazı temel fiziksel özellikleri [1,5]. .....	4
Çizelge 2.2: Ti-6Al-4V alaşımının döküm, dövme ve katmanlı imalat yöntemleriyle üretimi sonrasında beklenen mekanik özellikler. ....	8
Çizelge 2.3: Ti-6Al-4V alaşımının döküm, dövme ve katmanlı imalat yöntemleriyle üretiminde olması gereken kimyasal bileşimi (% ağırlık).....	9
Çizelge 3.1: Ti-6Al-4V alaşım numunelerinin Arcam Q20 Plus tezgâhı için üretim parametreleri.....	29
Çizelge 3.2: EDE yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V alaşım numunelerinin talaşlı imalat parametreleri.....	32
Çizelge 3.3: Kroll dağılayıcısının içeriği. ....	35
Çizelge 4.1: Yeni, üretim sonrası elek altı ve metalizasyona uğramış Ti-6Al-4V alaşım tozlarının kimyasal bileşimi.....	39
Çizelge 4.2: EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerin üretim sonrası ve yüzey işleme sonrası yüzey pürüzlülükleri. ....	44
Çizelge 4.3: EDE yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V üretim sonrası numunelerin üretim yönünde ve üretim yönüne dikeydeki pürüzlülük değerleri.....	46
Çizelge 4.4: EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerin çekme testi sonuçları. ....	47
Çizelge 4.5: EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerin konumlarına göre çekme testi sonuçları. ....	50
Çizelge Ek.1: Farklı üretim yöntemleriyle elde edilmiş Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özelliklerinin özeti.....	71





## KISALTMALAR

<b>ABS</b>	: Akrilonitril Butadiyen Sitren
<b>Al</b>	: Alüminyum
<b>BYM</b>	: Birleştirmeli Yığma Modellemesi
<b>C</b>	: Karbon
<b>CAD</b>	: Bilgisayar Destekli Tasarım
<b>Cr</b>	: Krom
<b>EDE</b>	: Elektron Demetiyle Ergitme
<b>ED-SBÜ</b>	: Elektron Demeti Serbest Biçimli Üretimi
<b>Fe</b>	: Demir
<b>HMK</b>	: Hacim Merkezli Kübik
<b>HSP</b>	: Hegzagonal Sıkı Paket
<b>Mg</b>	: Magnezyum
<b>Mo</b>	: Molibden
<b>N</b>	: Azot
<b>Nb</b>	: Niyobyum
<b>Ni</b>	: Nikel
<b>O</b>	: Oksijen
<b>PC</b>	: Polikarbonat
<b>PLA</b>	: Polilaktik Asit
<b>Si</b>	: Silisyum
<b>SLE</b>	: Seçmeli Lazer Eritme
<b>SLS</b>	: Seçmeli Lazer Sinterleme
<b>Sn</b>	: Kalay
<b>Ti</b>	: Titanyum
<b>TYE</b>	: Toz Yataklı Ergitme
<b>V</b>	: Vanadyum
<b>YEB</b>	: Yönlendirilmiş Enerjili Biriktirme
<b>Zr</b>	: Zirkonyum



## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte verilmiştir.

### Simgeler Açıklama

$\alpha$	Hegzagonal sıkı paket kristal yapısındaki Ti-6Al-4V fazı
$\beta$	Hacim merkezli kübik kristal yapısındaki Ti-6Al-4V fazı
$\rho_p$	Parça yoğunluğu
$\rho_{fl}$	Arşimet prensibindeki sıvının yoğunluğu
$m_a$	Parçanın havadaki ağırlığı
$m_{fl}$	Parçanın sıvının içindeki ağırlığı



## 1. GİRİŞ

Ti-6Al-4V alaşımı, diğer metalik malzemelere göre sahip olduğu yüksek korozyon direnci ve üstün mukavemet / ağırlık oranı ile son zamanlarda özellikle havacılık, uzay endüstrisi, biyomedikal ve otomotiv alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu alaşım ile yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanım gösterebilen düşük ağırlıklı parçalar elde edilebilmektedir. Ti-6Al-4V alaşımının bu yeteneği ile çoğu alüminyum, çelik ve nikel alaşımlı malzemelerin yerini almaktadır. Biyomedikal endüstrisinde de Ti-6Al-4V alaşımı sahip olduğu korozyon direnci ve biyoyumluluk özellikleriyle implant olarak kullanılmaktadır.

Katmanlı imalat yöntemi, talaş kaldırma işleminden farklı olarak 3 boyutlu tasarım dosyasından genellikle katman üstüne katman gelecek şekilde iş parçalarının üretimi işlemidir. Bu yöntem ile pahalı kesici takımlara ve kalıplara ihtiyaç duymadan iç kanallar gibi karmaşık yapıların, düşük ağırlıkta net şekle yakın üretimi yapılabilmektedir. Elektron demetiyle ergitme (EDE) gibi katmanlı imalat yöntemleri sağladıkları tasarım özgürlüğü ve geleneksel yöntemlerle üretimi zor iş parçalarının imalatını yapabilmesi nedeni ile, parça ağırlığının ve dayanımının kritik olduğu sektörlerde (savunma, havacılık ve biyomedikal) önem kazanmıştır.

EDE işlemi, yüksek ergitme kapasitesi ve yüksek verimlilik için gereken enerjiyi yüksek güçlü elektron demeti ile sağlayan bir üretim teknolojisidir. EDE ile üretim ilk olarak, vakumlu ortam altında üretim plakasının ve odasının 650-700°C sıcaklığa ısıtılıp Ti-6Al-4V tozlarının serilmesi ile başlar. Elektromanyetik bobin ile odaklanan elektron demeti, toz yatağının üzerinden geçerek ergitme ve katılma işlemlerini 3 boyutlu tasarım dosyasına göre gerçekleştirir. Bir katman tamamlandıktan sonra üretim plakası katman kalınlığı kadar aşağıya hareket eder ve parça tamamlanana kadar yeni toz katmanının serilmesi ile bu süreç devam eder.

Bu yüksek lisans tezi çalışmasında, Arcam Q20 Plus EDE tezgahında üretilen Ti-6Al-4V parçaların konum, üretim yönü ve üretim boyutunun mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Bu amaçla; bir üretim tablası düzeninde, dikey ve yatay konumda üretilen blok, ofset ve standart ölçülerdeki çekme numuneleri hazırlanmıştır. Üretilen

parçaların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme ve sertlik testleri yapılmış, yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüş ve mikroyapıları ve çekme testi sonrası kırık yüzeyleri incelenmiştir. Ayrıca, üretim sürecinin kullanılan Ti-6Al-4V alaşım tozuna etkisi incelenmiştir.

Çalışma toplamda beş bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde çalışmanın konusu ile ilgili olan Ti-6Al-4V alaşımı ve katmanlı imalat hakkında literatür araştırması yer almaktadır. Üçüncü bölümde kullanılan deneysel yöntemler ve deney düzenekleri açıklanacak, dördüncü bölüm elde edilen deneysel sonuçlar ve tartışmaları kapsayacaktır. Çalışmanın son bölümü olan beşinci bölümde ise sonuçlar verilecektir.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1 Titanyum

Yeryüzünde alüminyum (Al), demir (Fe) ve magnezyumdan (Mg) sonra en çok bulunan dördüncü yapısal element olan titanyum (Ti), oksijene (O) maruz kaldığında oldukça reaktif bir metal olduğu için, doğada genellikle ilmenite ( $FeTiO_3$ ) ve rutile ( $TiO_2$ ) formunda bulunmaktadır. Ancak yüksek erime noktası ve yüksek reaktivite nedeniyle titanyumun saflaştırma ve işleme proseslerindeki zorluk, bu metali pahalı hale getirmiştir [1].

Titanyum ve alaşımlarının sahip olduğu yüksek dayanım, süneklik ve korozyon direnci nedeni ile havacılık, uzay endüstrisi, biyomedikal, otomotiv vd. sanayilerde sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda yüksek özgül mukavemeti nedeni ile titanyum ve alaşımlarının havacılık ve uzay sanayisi için vazgeçilmez bir malzeme olmasını sağlamıştır [1].

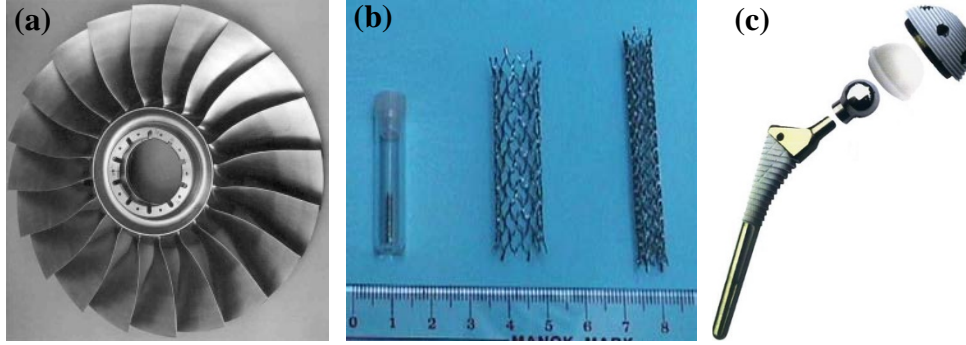
Titanyum alaşımlarının havacılık sanayisinde tercih edilmesinin başlıca nedeni çeliklere kıyasla düşük yoğunluğa sahip olması ve ağırlıktan kazanç sağlamasıdır. Alüminyum alaşımlarından ise yüksek sıcaklıklarda bile daha yüksek dayanım ve direnç göstermektedir. Titanyumun yoğunluk değeri alüminyumdan daha yüksek olmasına rağmen sağladığı avantajlar ile havacılık sanayisi için en ideal metal olmuştur. Uçak türbin diskleri, kanatçıklar, jet motorları ve uçak gövdeleri için en uygun malzemedir [2].

Titanyum alaşımlarının yaygın olarak kullanıldığı diğer bir alan biyomedikal endüstrisidir. Titanyum kemiğe yakın mekanik özelliklere, biyolojik olarak iyi uyumluluğa ve yüksek korozyon direncine sahip olduğundan, vücudun sert dokuları yapay titanyum implantlarla değiştirilebilir. Bu nedenle kalça eklemlerinde, dişlerde, diz eklemlerinde, omurga disklerinde, yapay damarlı stentlerde, vida şeklindeki kemik sabitleme cihazlarında ve benzerlerinde kullanılabilirler [1].

Otomotiv endüstrisi de özellikle bağlantı çubukları, valfler ve piston pimi gibi motor parçalarında, ısıya ve korozyona dayanıklılığı kanıtlanmış olan titanyum elementini

kullanılmaktadır. Titanyum alaşımları daha iyi performans, daha uzun ve düşük maliyetli kullanım ömrüne sahip oldukları için tercih edilmektedir [1].

Titanyum ve alaşımlarının kullanıldığı endüstrilerden örnekler Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Titanyum alaşımlarının kullanıldığı çeşitli uygulamalar; (a) jet motorlarındaki kompresör kanatçıkları [3], (b) damarlı stentler ve (c) kalça implantı [4].

## 2.2 Titanyum Elementinin Fiziksel Özellikleri

Titanyum ve havacılık sanayisinde sıklıkla kullanılan diğer metallerin (Al, Fe, Ni) fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1: Oda sıcaklığındaki titanyum ve diğer metallerin bazı temel fiziksel özellikleri [1,5].

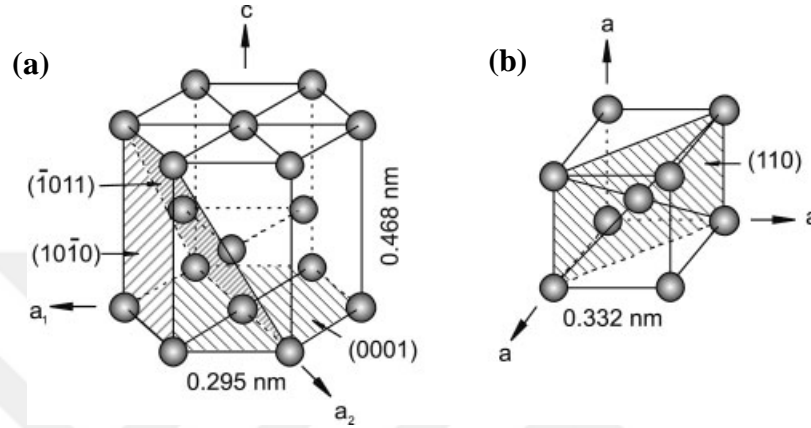
Özellik	Ti	Al	Fe	Ni
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	4.5	2.7	7.9	8.9
Erime noktası (°C)	1670	660	1538	1455
Allotropik dönüşüm sıcaklığı (°C)	882	-	912	-
Isıl iletkenliği (W/mK)	15 - 22	221 - 247	68 - 80	72 - 92
Esneklik Katsayısı (GPa)	115	72	215	200
Akma Dayanımı (MPa)	1000	500	1000	1000
Oksijen ile tepkimesi	++++	+++	+	+
Korozyon direnci	++++	+++	+	++
Ücret	++++	++	+	+++

Oksijen ile tepkimeye girmeye yatkın olan titanyumun üretim sürecinde vakumlu ortam veya reaksiyona girmeyen koruyucu bir gaz ortamının oluşturulması gerekmektedir. Yüksek oksijen reaktivitesi nedeni ile titanyum havaya maruz



kaldığında yüzeyinde ince bir oksit tabakası oluşur. Bu ince yüzey oksit tabakası, çeşitli uygulamalarda istenen mükemmel korozyon direncini sağlar [6].

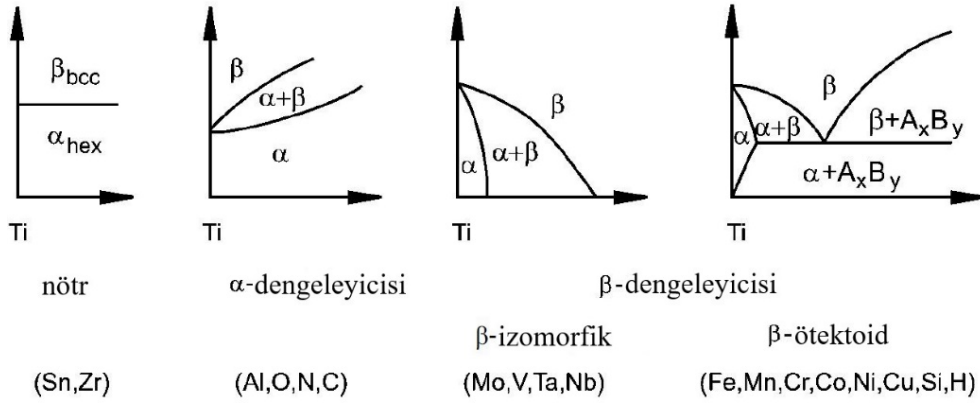
Titanyum elementinin fazlarına ait birim hücreleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Saf titanyumun birim hücresi oda sıcaklığında hegzagonal sıkı paketlenmiş (HSP)  $\alpha$ -fazıdır. 882 °C'nin üzerine çıkarıldığında ise allotropik faz dönüşümü ile hacim merkezli kübik (HMK)  $\beta$ -fazı elde edilir.



Şekil 2.2: Titanyum elementinin birim hücresi (a)  $\alpha$ - fazı, (b)  $\beta$ - fazı [1].

Asalyer ve arayer alaşım elementlerinin miktarına göre titanyumun allotropik dönüşüm sıcaklığı değişmektedir. Çeşitli elementlerin  $\alpha$  -  $\beta$  geçiş sıcaklığı üzerindeki etkisi, Şekil 2.3’de verilen şematik faz diyagramlarında gösterilmiştir. Titanyuma eklenen alaşım elementleri  $\alpha$  ve  $\beta$  dengeleyicileri olarak iki gruba ayrılır. Alfa dengeleyicisi elementler  $\alpha$  faz alanını daha yüksek sıcaklıklarda kullanma imkânı sunarken,  $\beta$ -dengeleyicisi elementler  $\beta$  faz alanını daha düşük sıcaklıklarda ulaşılmasına imkan sağlar. Alüminyum (Al) hem  $\alpha$  hem de  $\beta$  fazlarında yüksek çözünürlüğe sahip olduğu için asalyer elementleri arasında en yaygın kullanılanıdır ve  $\alpha$ - fazında 550 °C’ye kadar çalışma imkânı sunar.  $\alpha$ -dengeleyicisi olarak arayer elementleri olan azot (N), karbon (C) ve oksijen (O) kullanılmaktadır. Özellikle oksijen önemli bir  $\alpha$  faz dengeleyicisidir, ancak yapı içerisindeki oksijen önemli miktarda gevrekleşmeye neden olur ve sünekliği azaltır. Vanadyum (V), Niyobyum (Nb), Molibden (Mo), Demir (Fe), Krom (Cr) ve Silisyum (Si) elementleri en yaygın kullanılan  $\beta$ -dengeleyicisi asalyer elementleridir. Bu elementlerin miktarı alaşım içerisinde arttırıldığında malzemenin gevrekliği artar. Zirkonyum (Zr) ve Kalay (Sn), dengeleyici etkisi olmayan nötr alaşım elementleri grubudur. Bu elementler titanyum

ile alaşım oluşturduklarında faz dönüşüm sıcaklığını etkilemek yerine alaşımın sertliğini arttırlar [1,7].



şekil 2.3: Alfa ve Beta dengeleyicilerinin faz diyagramına etkisi [1]

### 2.3 Titanyum Alaşımları

Titanyum alaşımları genellikle mikroyapılarına göre, alaşımsız ticari saflıkta titanyum, alfa fazlı titanyum, yakın alfa fazlı titanyum, alfa-beta fazlı titanyum ve beta fazlı titanyum alaşımları olarak gruplandırılır. Endüstriyel uygulamalarda Ti-6Al-4V, Ti-5Al-2.5Fe, Ti-6Al-7Nb, Ti-5Al-2.5Sn, Ti-2Al-2.5Zr ve Ti-32Mo alaşımları yoğun olarak kullanılmaktadır. Ayrıca Ti-Pd ikili ve Ti-Mo-Ni çl alaşım sistemlerinde de uygulamaya yönelik alaşımlar geliştirilmiştir [1].

Alaşımsız ticari saflıkta titanyum oda sıcaklığında hegzagonal kristal yapısına (HSP) sahiptir. Saf titanyumun korozyon direnci yüksektir ve genellikle soğuk çalışma ortamlarında uygulama alanı bulur. Korozyon direncinin kritik olduğu uygulamalarda Ti-Pd alaşımları kullanılır [1].

Alfa fazlı titanyum alaşımları HSP kristal yapısına sahip alfa fazını kararlı hale getiren Al, O, C, N, Sn gibi alaşım elementlerini içerir. Bu elementler allotropik dönüşüm sıcaklığını arttırlar. Bu alaşımlar yüksek mukavemet ve yüksek süneklik değerlerine sahiptir. Ti-6Al-2.5Sn alaşımını yaygın olarak kullanılan bir alfa fazlı titanyum alaşımıdır [1].

Yakın alfa fazlı titanyum alaşımları, alfa fazını kararlı hale getiren fazla miktarda Al, O gibi alaşım elementlerinin yanısıra, kristal yapısı HMK olan beta fazını kararlı hale getiren az miktarda Mo, V, Nb, Ta ve Cr gibi alaşım elementleri içerir. Yakın alfa fazlı titanyum alaşımları, alfa fazlı titanyum alaşımlarına göre daha yüksek sıcaklıklarda

(400-520°C) iyi performans gösterirler. Ti-8Al-1Mo-1V alaşımı yaygın olarak kullanılan bir yakın fazlı titanyum alaşımıdır [1].

İki fazlı (Alfa + Beta) titanyum alaşımları, alfa fazını ve beta fazını kararlı hale getiren alaşım elementlerinden oluşur. Bu tür alaşımlar düşük yoğunlukludur ve oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere ve korozyon direncine sahiptirler. Bu nedenle, iki fazlı titanyum alaşımları en yaygın kullanılan titanyum alaşımlarıdır. Ti-6Al-4V alaşımı gerek biyomedikal gerekse de havacılık sektöründe en fazla kullanılan iki fazlı titanyum alaşımıdır [1].

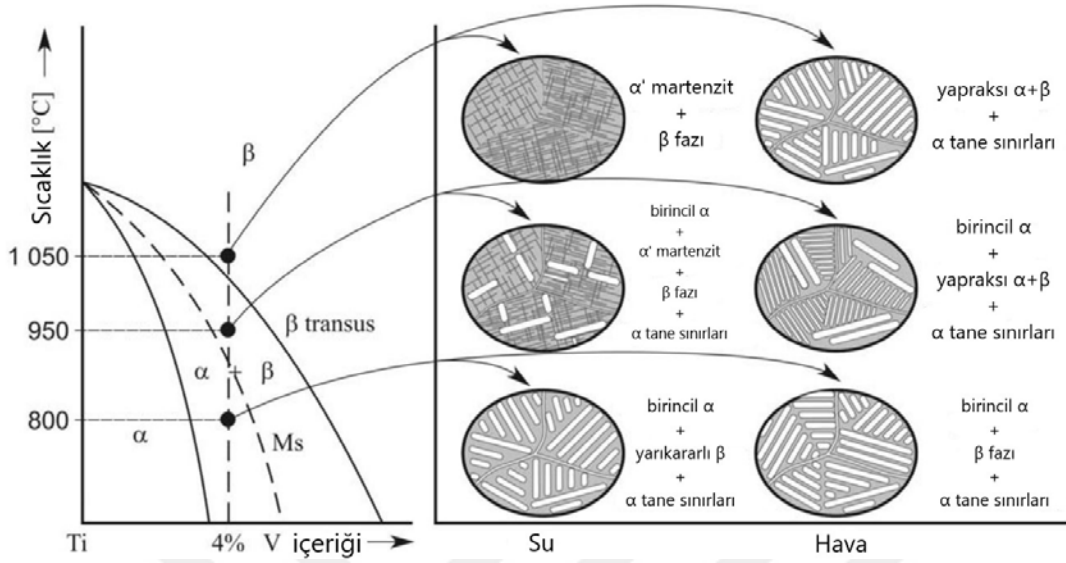
Beta fazlı titanyum alaşımları HMK kristal yapısını kararlı hale getiren V, Nb ve Mo gibi alaşım elementlerini içerir. Yüksek sertlik ve mukavemet, düşük süneklik ve korozyon direnci nedeni ile  $\alpha$  fazlı titanyum alaşımlarından farklılık gösterirler. Yüksek kırılma tokluğuna sahip bu alaşımlar  $\alpha$  fazlı alaşımlara göre oda sıcaklığında daha iyi şekillendirilebilirler. Uygulama sıcaklıkları iki fazlı titanyum alaşımlarına göre daha yüksektir [1].

#### **2.4 Ti-6Al-4V Alaşımı**

Ti-6Al-4V alaşımı, alfa fazını kararlı hale getiren alüminyum (%6 ağırlık oranı) ve beta fazını kararlı hale getiren vanadyum (%4 ağırlık oranı) içeren iki fazlı bir titanyum alaşımıdır. Yüksek sıcaklıktaki  $\beta$  faz bölgesinden oda sıcaklığına yapılan yavaş soğuma ile, mikroyapıda yaklaşık olarak %90 ağırlık oranında alfa fazı ve %10 ağırlık oranında beta fazı oluşur. Isıl işlem süreçlerine bağlı olarak alfa ve beta fazlarının miktarları ve mikroyapıları değişiklik gösterebilir. Farklı ısıl işlemler uygulanarak birincil veya küresel  $\alpha$ , tane sınırlarındaki eşözdekbicimli  $\alpha$ , martenzitik ve Widmanstatten yapıları elde edilebilir [1,8]. Ti-6Al-4V alaşımının faz diyagramı ve farklı soğutma koşullarındaki mikroyapılarının şematik gösterimi Şekil 2.4'te verilmiştir.

Havacılık sanayisinde kullanılan titanyum alaşımlarının %60'ı ve uçak gövdesinde kullanılan titanyum alaşımlarının %90'ı Ti-6Al-4V alaşımından oluşmaktadır. Havacılık ve uzay sanayisinde yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımının üretimi yoğunlukla döküm ve dövme ile yapılmaktadır. Ti-6Al-4V alaşımından parçalar ise talaşlı imalat ve sıcak işlem ile imal edilmektedir. İmal edilen nihai parçanın mekanik özellikleri, mikroyapıyı etkileyen üretim süreçlerindeki sıcaklık ve şekil verme

işlemlerine bağlıdır. Karmaşık parçaların (gözenekli kalça implantı gibi) geleneksel yöntemlerle üretimi önemli miktarda işlem süreçleri ve iş gücü gerektirmektedir [9].



Şekil 2.4: Ti-6Al-4V alaşımının faz diyagramı ve farklı soğutma yöntemleriyle elde edilen mikroyapılarının şematik gösterimi [10].

Karmaşık geometrili Ti-6Al-4V parçalarının üretilmesi günümüzün üretim teknolojileriyle daha kolay ve uygun maliyetli yapılabilmektedir. Bu teknolojilerden biri de katmanlı imalattır [11]. Katmanlı imalat yöntemiyle, geleneksel üretim yöntemlerindeki ara işlem basamakları (talaşlı işleme, şekil verme, kaynak, vb.) ve kalıp ihtiyacı ortadan kaldırılır ve üretim süresi önemli ölçüde azaltmış olur.

Ti-6Al-4V parçaların kullanımı için gerekli özellikler Amerikan Malzeme ve Test Kurumu (ASTM) tarafından standartlaştırılmıştır. Farklı imalat yöntemleriyle elde edilen Ti-6Al-4V parçalarının çekme özellikleri ve kimyasal bileşimleri Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'de verilmiştir.

Çizelge 2.2: Ti-6Al-4V alaşımının döküm, dövme ve katmanlı imalat yöntemleriyle üretimi sonrasında beklenen mekanik özellikler.

Mekanik Özellikler	ASTM F1108-14	ASTM F1472-14	ASTM F2924-14
Akma Dayanımı (MPa)	758	860	825
Çekme Dayanımı (MPa)	860	930	895
% Uzama	>8	>10	>10

Çizelge 2.3: Ti-6Al-4V alaşımının döküm, dövme ve katmanlı imalat yöntemleriyle üretiminde olması gereken kimyasal bileşimi (% ağırlık).

Element	ASTM F1108-14 (Döküm) [12]	ASTM F1472-14 (Dövme) [13]	ASTM F2924-14 (AM) [14]
Ti	Denge	Denge	Denge
Al	5.5 – 6.75	5.5 – 6.5	5.5 – 6.75
V	3.5 – 4.5	3.5 – 4.5	3.5 – 4.5
Fe	0.3	0.25	0.3
O	0.2	0.13	0.2
C	0.1	0.08	0.08
N	0.05	0.05	0.05
H	0.015	0.015	0.015

## 2.5 Katmanlı İmalat Teknolojileri

### 2.5.1 Katmanlı İmalat Teknolojilerine Giriş ve Avantajları

Katmanlı imalat teknolojileri genellikle hızlı prototipleme için kullanılan 3B yazıcı adıyla bilinmektedir. Katmanlı imalat, dijital bir 3 boyutlu tasarım dosyasından farklı formdaki malzemeleri birbirine ve üst üste ekleme yöntemi kullanılarak fiziksel bir obje yaratma teknolojisidir. Bu teknolojiyi talaşlı imalattan ayıran en temel özellik; üretim sürecinde blok bir malzemedен talaş kaldırmak yerine, çeşitli formlardaki malzemeleri katman katman birbirlerine ekleyerek üretimin tamamlanmasıdır. Bu teknolojiyi kullanan makine ile, zamandan, üretim alanından ve insan gücü gereksinimlerinden tasarruf sağlanırken karmaşık geometriye sahip iş parçaları üretilebilmektedir [15].

Üç boyutlu bir objeyi katman katman üretme fikri, katmanlı imalat teriminin ortaya çıkmasından çok öncesine dayanmaktadır. Peacock tarafından 1903 yılında alınan katmanlı at nalı patentinden sonra [16], Kojima katmanlı üretimin avantajlarını 1952 yılında göstermiştir [17]. Katmanlı imalat kavramının ticari olarak geliştirilmesi ise bilgisayarların, lazerlerin ve kontrol cihazlarının geliştirilmesi ile mümkün olmuştur. Murutani (Japonya), Andre ve arkadaşları (Fransa) ve Charles Hull (Amerika Birleşik Devletleri) gibi bazı bireysel patent başvuruları 1960 - 1980'lerde görülmektedir. İlk

ticari 3 boyutlu hızlı prototipleme cihazı ise 1987 yılında 3D Systems tarafından SLA-1 adıyla geliştirilmiştir [15,17]. Katmanlı imalat teknolojisinin başlangıcından bu zamana kadar temel prensibi, geleneksel üretim metotlarındaki takım ve kalıp tasarımı gibi karmaşık üretim planlama süreçlerine gerek duymadan sadece bilgisayar destekli tasarım (CAD) kullanarak üretimin yapılmasıdır [15].

Katmanlı imalat süreci CAD modelin ince dilimlere ayrılıp, katmanların üst üste birleştirilmesine dayanır. Nihai parçanın kalitesi katmanların kalınlığıyla ve kalitesiyle orantılıdır. Katman kalınlığının azaltılmasıyla geleneksel yöntemlerle elde edilen parçaya yakın üretim sağlanır. Katmanların kalitesi ısı kaynağı ve termal girdiler gibi işlem parametrelerinden etkilenmektedir. Katmanlı imalat teknolojisinde farklı malzemeler için farklı üretim parametreleri mevcuttur. Bu yüzden ticari haldeki katmanlı imalat cihazlarının işlem gereklilikleri üretilecek olan malzemeye göre farklılık göstermektedir [18].

Katmanlı imalat teknolojisi üretim ve ürün geliştirme zincirinde bir devrim olarak tanımlanmaktadır. Bu teknoloji gelişme aşamasındadır ve yakın gelecekte yeni bir sanayi devrimine öncülük edecektir [19]. Katmanlı imalat teknolojisinin geleneksel yöntemlere göre en önemli farkı, tasarım özgürlüğü ile karmaşıklığı yüksek parçaların tek bir üretim adımında elde edilebilmesidir [17]. Örneğin, 1000 parçadan oluşan bir roket parçası katmanlı imalat yöntemi kullanılarak 100 parçaya indirilmiştir [20].

Tasarım esnekliğinin yanısıra katmanlı imalat teknolojileri üretim süreçlerinde birçok avantaj sağlamaktadır [15,17];

- Parçanın karmaşıklığı artırılarak üretim maliyetine önemli ölçüde etki eden kalıp ve takım masrafları ortadan kaldırılabilir.
- Parça üretimi sırasında soğuma hızı, tarama hızı, uygulanan güç gibi parametreler değiştirilerek farklı mikroyapı ve makroyapılar elde edilebilir.
- Fonksiyonel bir parça üretiminde, aynı anda birden fazla parça üreterek üretim sonrası işlem süreleri azaltılabilir.
- Bazı katmanlı imalat cihazlarında, iş parçası farklı malzeme bileşimleri ile üretilebilir.

Katmanlı imalat prosesinin üretim yöntemi fark etmeksizin temel bazı işlem adımları vardır. Masaüstü boyutundaki 3 boyutlu yazıcılardan daha büyük endüstriyel katmanlı

imalat cihazlarına kadar tüm üretim CAD modeliyle başlayan birkaç adıma dayanmaktadır [15].

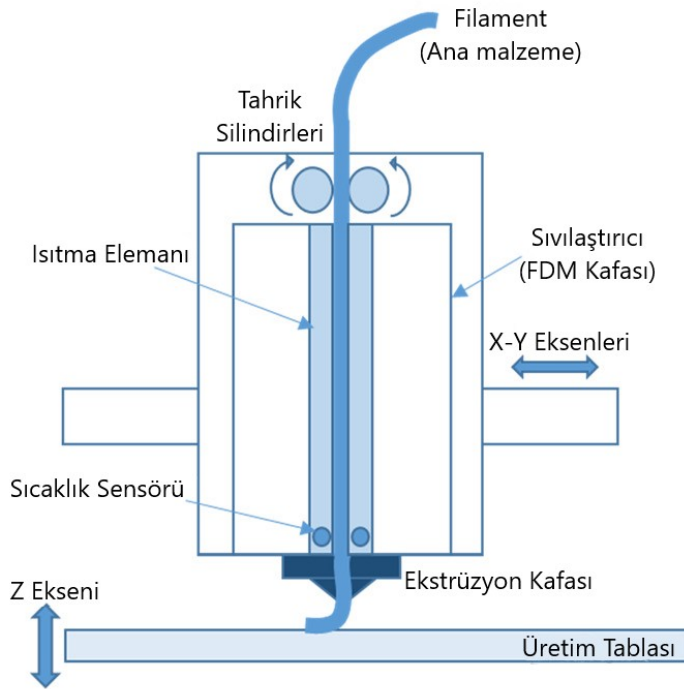
1. Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) Modeli: CAD programı yardımıyla iç ve dış sınırları belli olan 3 boyutlu geometrik modelin hazırlanması,
2. STereoLithography (STL) dosya formatına dönüştürme: Oluşturulan modelin yüzeylerinin X,Y ve Z koordinatlarından oluşan küçük üçgenler ile tanımlanması,
3. Katmanlı imalat cihazına STL dosyasının aktarımı ve işlenmesi: STL formatındaki parça, imalat işlemi sırasında sistematik olarak yeniden oluşturulan katmanlara dilimlenir. Katman kalınlığının düşürülmesi ile orijinal parçaya yakın boyutlar elde edilmesi,
4. Makine parametrelerinin ayarlanması: Üretimde kullanılacak malzeme ve istenen mekanik özelliklere göre üretim parametrelerinin belirlenmesi,
5. Parça üretimi: Girdilere göre üretim sürecinin başlaması, üretim süresinin üretilecek parçaların boyutuna ve sayısına bağlı olarak değişmesi,
6. Üretim bölgesinden malzemelerin uzaklaştırılması: Üretimin tamamlanmasından sonra parçanın üretim ortamından alınması,
7. Üretim sonrası ikincil işlemler: Orijinal parça haricindeki fazlalık olan destek yapıların çıkartılması ve hedeflenen mekanik özelliklere göre ek işlemlerin uygulanması.

### **2.5.2 Katmanlı İmalat Teknolojisi Türleri**

Katmanlı imalat teknolojisi, toz veya tel şeklinde bulunan bir malzemenin, ısı kaynağı kullanarak yapılan bir üretim yöntemidir. Başlangıç malzemesinin tel şeklinde olduğu katmanlı imalat üretiminde, baskı kafasında bulunan ısıtıcı yardımıyla tel malzemenin ergitilmesi sağlanarak üretim gerçekleştirilir. Başlangıç malzemesinin toz şeklinde olduğu üretimlerde ise, ya bir üretim tablası üzerinde belirli bir katman kalınlığına sahip toz kütlesinin ya da bir başlığın içinden akan toz karışımının lazer veya elektron demetiyle ergitilmesiyle üretim gerçekleştirilmektedir. Bu üretim yöntemleri, birleştirmeli yığma modellemesi (Fused Deposition Modeling), toz yataklı ergitme (Powder Bed Fusion) ve yönlendirilmiş enerjili biriktirme (Directed Energy Deposition) yöntemleri olarak tanımlanmıştır [17,21].

### 2.5.2.1 Birleştirmeli Yığma Modellemesi (BYM)

Birleştirmeli yığma modellemesi yönteminde, tel şeklinde bulunan ana malzeme ekstrüzyon kafasına hareket ettirilip yarı ergiyik faz durumuna ısıtılır. Akışkan durumundaki ana malzeme ekstrüzyon kafasından ince bir katman formunda aktarılır. Ekstrüzyon kafasından çıkan malzeme hava ile temas eder ve erime sıcaklığının altına inerek hızlı bir şekilde katılaşır. X ve Y eksenlerinde hareket eden ekstrüzyon kafası, yazılım ile oluşturulan takım yolunu üretim plakası üzerinde izleyerek istenen katmanı oluşturur. Bir katman tamamlandığında, üretim plakası bir katman kalınlığı kadar aşağıya hareket eder ve ekstrüzyon kafası yeni katmanı oluşurmaya devam eder. Bu işlemler parça üretimi tamamlanıncaya kadar devam eder [22]. şekil 2.5'te BYM yöntemi şematik olarak verilmiştir.



şekil 2.5: Birleştirmeli yığma modellemesi yönteminin şematik olarak gösterimi [23].

Stratasys Ltd. (İsrail/ABD) firması öncülüğünde 1989 yılında geliştirilen birleştirmeli yığma modellemesi yöntemi, günümüzde en sık kullanılan 3 boyutlu yazıcı teknolojisidir [22]. BYM yöntemiyle üretim yapan makinelerin, küçük ölçekli, minimum değişkenliğe sahip, düşük maliyetli makinelerden, daha büyük, çok yönlü,



daha karmaşık ve daha pahalı olan makinelere kadar her kullanıcıya hitap eden çeşitleri mevcuttur [15].

BYM makineleri genellikle akrilonitril butadiyen sitren (ABS) ve polilaktik asit (PLA) materyalleri ve bu malzemelerin türevlerini kullanmaktadır. Bu malzemelerin yanında ilaç ve yemek paketlerinin ve medikal ürünlerin ana malzemesi olan polikarbonat (PC) tabanlı malzemeler, uçak, denizaltı ve kara araçları için uygun olan ULTEM 9085 malzemesi kullanılmaktadır [15].

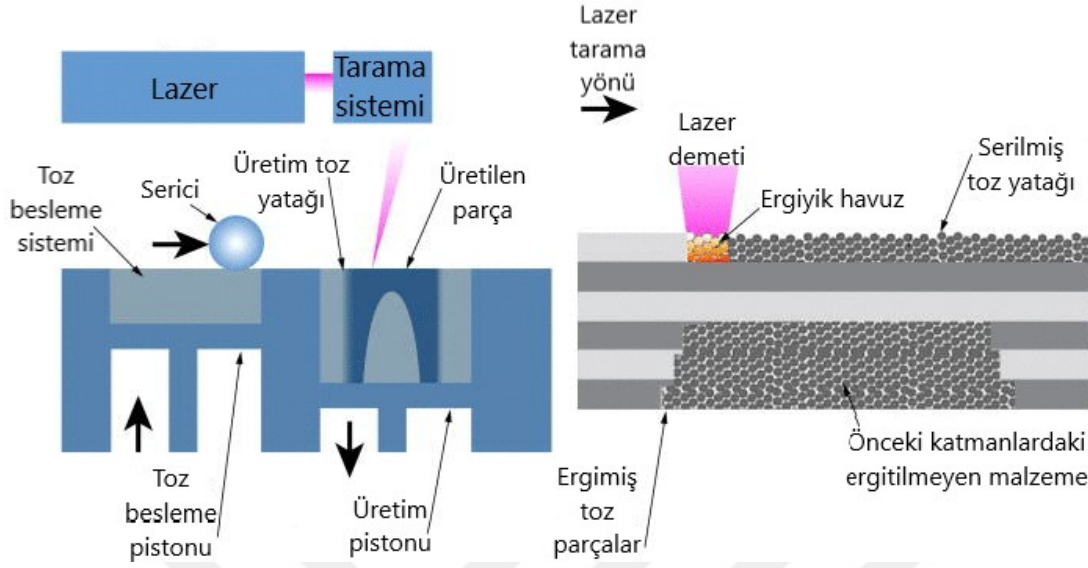
BYM işleminin kullanımını kolay ve basit olmasına rağmen bazı kısıtlamaları mevcuttur. Bunlardan en önemlisi katman kalınlığının çok fazla olmasıdır. Sadece büyük ölçekli makinelerde minimum 0.078 mm kalınlığında baskı alınabilmektedir ve bu katman kalınlığında baskı süresi çok uzundur. Kullanılan ana malzemeye bağlı olmakla birlikte, üretim hızı yavaştır. Yüksek hızlarda yapılan üretimde ise ana malzemenin BYM kafasında yeterince erimemesi ve sürtünmenin artması ile topaklanma gibi sorunlar oluşabilmektedir. Bu tür hatalar parçanın yoğunluk değerlerinde ve mekanik özelliklerinde istenmeyen sonuçlar elde edilmesine yol açar. BYM işlemi ile yapılan üretimlerde parçalardaki homojenlik ve doğruluk oranı düşüktür. Ekstrüzyon kafasında filamentin çıkış ağzı dairesel olduğu için üretilen parçalarda keskin köşe yapmak imkansızdır [15].

### **2.5.2.2 Toz Yataklı Ergitme (TYE)**

Toz yataklı ergitme yönteminde, birleştirme ısı kaynağı ve toz parçacıkları arasındaki etkileşim ile olmaktadır. Isı kaynağı genellikle bir lazer veya elektron demetidir. Toz yatağı bir ısı kaynağı ile etkileşime geçtiğinde tozlar erir veya erime noktasının hemen altında bir sıcaklığa ısıtılır. Bir sonraki aşamada, birinci toz katmanının bulunduğu üretim tablası bir katman kalınlığı kadar aşağıya hareket eder ve yeni tozlar bir silindir veya tırmık yardımıyla tablaya süpürülür. Üretim işlemi sırasında tozların oksijen ile etkileşime geçmesini engellemek amacıyla, lazer ile yapılan üretim koruyucu gaz (argon veya azot) ortamında, elektron demeti ile yapılan üretimde ise vakum ortamında yapılır [15,17,18].

Şekil 2.6'da lazer demeti ile yapılan TYE işlemi şematik olarak gösterilmiştir. Üretim işlemi sırasında yüksek güce (maks. 1.5 kW) sahip lazer, aynalar yardımı ile bir

konumdan diğer konuma hareket ettirilir. Lazer demeti bir toz katmanı ile temas ettiğinde, temas bölgesi erir ve daha sonra çok hızlı bir şekilde katılır [17].



Şekil 2.6: Lazer bazlı toz yataklı ergitme yönteminin şematik gösterimi [17].

Metal tozlarının lazer ile sinterlenerek veya ergitilerek parça üretimini yapan makineleri imal eden başlıca firmalar: Selective Laser Melting Solution (Almanya), EOS (Almanya), 3D Systems (Fransa/ABD), Renishaw (İngiltere), Realizer (Almanya) ve Concept Laser'dır (Almanya). Seçmeli lazer eritme (SLE), seçmeli lazer sinterleme (SLS) terimleri makine üreticisi firmalar tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır [15,17,18].

Polimer tozlarına göre metal tozlarının işlenmesi, yüksek ısı iletkenlik, oksitlenme eğilimi, yüksek yüzey gerilimi, kalıntı gerilmeleri ve lazer demetinin yansıtıcılığı nedeniyle daha zordur [18]. Bu sorunları aşmak amacıyla, Almanya'da Fraunhofer Enstitüsü Lazer Teknolojileri Merkezi'nde seçmeli yeniden ergitme yöntemini geliştirilmiştir. Bu yöntemde lazer ışınının emilimini arttırmak için, CO<sub>2</sub> lazerleri yerine daha iyi dalga boylarında çalışma imkânı sunan Nd-YAG lazerlerini kullanmıştır. Günümüzde, yukarıda ismi verilen firmalar tarafından geliştirilen makinelerin büyük bölümü, daha iyi ışın kalitesi ve enerji verimliliği yüksek lazerler elde etmek için fiber lazerler kullanmaktadır [24].

Lazer bazlı toz yataklı ergitme yöntemleri kullanan makine üreticileri, nihai ürünün kalitesini belirlemek için malzeme özelliklerinin makine teknolojisi kadar önemli olduğunun farkındadırlar. Bu yüzden, üretim sırasında kullanılan üretim parametreleri

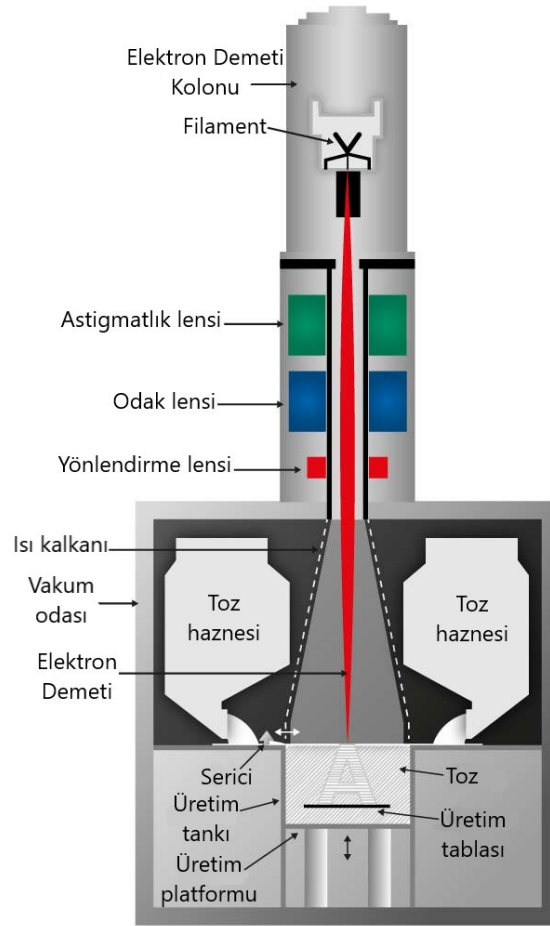
imal edilecek malzemenin türüne göre değişmektedir. Bu parametreler katman kalınlığı, lazer gücü, lazer hızı, tarama stratejisi ve diğer birçok değişkendir [25].

Elektron demetiyle ergitme (EDE) yöntemi, ilk olarak 2001 yılında Arcam AB (İsveç) firması tarafından ticarileştirilen ve ısı kaynağı olarak elektron demeti kullanan özel bir tekniktir. Lazer tabanlı sistemlere benzer şekilde, EDE işleminde, elektron demeti vakum ortamında bulunan serilmiş toz katmanıyla temas eder ve tozların tamamen erimesine ve katılaşmasına neden olur [26,27]. Şekil 2.7’de EDE ile yapılan TYE işlemi şematik olarak gösterilmiştir.

Kullandıkları enerji kaynakları nedeniyle SLE ve EDE yöntemleri arasında bazı farklılıklar vardır. SLE yönteminde tozlar lazer ışınının emilimi ile ısıtılırken, EDE yönteminde ısıtma elektronlardan tozlara kinetik enerji dönüşümü ile sağlanır. EDE yönteminde SLE yöntemine göre daha yüksek sıcaklıklara çıkılabilmektedir. Böylelikle yüksek erime sıcaklığına sahip malzemeler kısa sürede üretilebilmektedir. EDE yönteminde elde edilen yüksek sıcaklık ile soğutma hızı SLE yöntemine göre daha yavaştır. EDE ile üretimde döküm mikroyapısına benzer mikroyapılar elde edilir ve gözeneklilik düşük seviyelerdedir. SLE yöntemindeki hızlı soğutma ile daha ince mikroyapı meydana gelir ve dengesiz ısı girdileri yarı-kararlı veya kararsız faz oluşumlarına yol açabilir. Ayrıca, SLE ve EDE yöntemleriyle üretilecek malzeme türleri farklılık gösterir. EDE yönteminde kullanılacak malzemenin iletken olması gerekmektedir. Bu nedenle EDE yöntemi yalnızca metaller gibi iletken malzemeleri üretmek için kullanılır. SLE prosesinde ise lazer dalga boyunun enerjisini absorbe edebilecek herhangi bir malzeme (metaller, seramikler ve polimerler) kullanılabilir [21,28].

Lazer ve elektron demetiyle ergitme yöntemleri, karmaşık geometrili iş parçalarının üretimi ve farklı metal tozlarının kullanımı gibi avantajları nedeni ile havacılık sektörü ve biyomedikal sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Toz yataklı sistemlerin benzersiz işlem avantajlarına rağmen geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında bazı dezavantajları mevcuttur. Diğer teknolojilerin yanı sıra, metal toz yatağı işlemlerinde katılmış tozların üretim tablasına sabit tutulması için destekleyici parçalar gerekmektedir. Bu destek parçaları ayrıca katılma sırasında bükülmeyi ve çarpılmayı engellemek için de gereklidir. Ancak bu desteklerin parçanın gövdesinden ayırmak için ek işlem gereklidir. Geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında, yüzey kalitesi toz yataklı sistemlerde düşüktür. Pürüzlülük esas

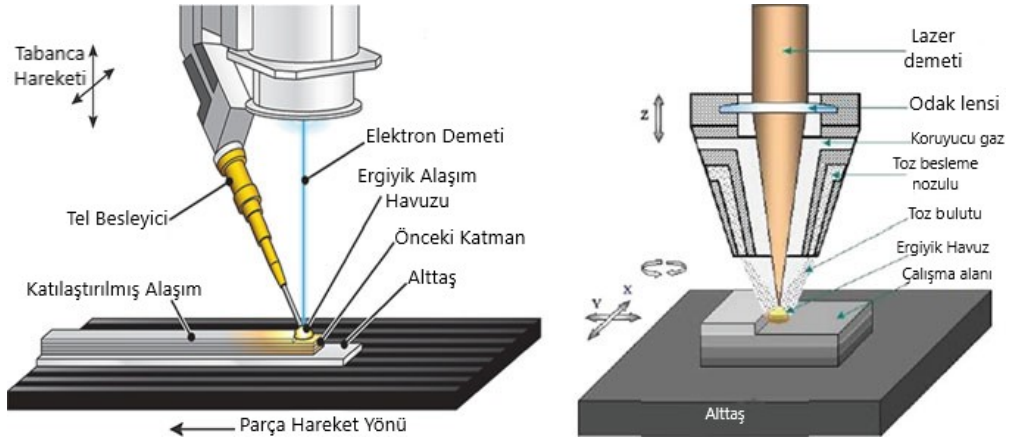
olarak tozların büyüklüğü ve tarama hızı gibi üretim parametrelerinden etkilenir. Toz boyutunun ve tarama hızının azaltılması, daha pürüzsüz bir yüzeyin üretilmesine izin verir. Toz yataklı sistemlerin geliştirildiği ilk zamanlarda kritik bir sorun olan gözeneklilik, günümüzde cihaz ve üretim parametrelerinin geliştirilmesine bağlı olarak önemli ölçüde azaltılmıştır. Toz yataklı sistemlerle üretilen parçalarda bulunan kalıntı gerilmeleri ve yarı-kararlı ve kararsız faz oluşumları için üretim sonrasında ek bir ısıl işlem gerekmektedir [15,17,30].



Şekil 2.7: Elektron demetiyle ergitme yönteminin şematik gösterimi [29].

### 2.5.2.3 Yönlendirilmiş Enerjili Biriktirme (YEB)

Yönlendirilmiş enerjili biriktirme (YEB) yöntemi, tozları üretim tablasına bırakmadan önce eritmek için lazer veya elektron demetine dayanan bir ısı kaynağını kullanır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8: Yönlendirilmiş enerjili biriktirme yönteminin şematik gösterimi [17].

Temel bir YEB sistemi, toz ağzını besleyen bir toz deposundan, etkileşime girmeyen bir gaz tüpünden ve bir ısı kaynağından oluşur. Daha önceki sistemlerde, toz besleme ünitesi tek bir yönde hareket ederken, çoğu DED sisteminde, toz besleme ve serme ünitesi x, y ve z eksenlerinde hareket edebilir [17].

Lazer bazlı YEB yöntemi ilk olarak Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Sandia Ulusal Laboratuvarları tarafından geliştirilmiştir. LENS olarak adlandırılan bu teknoloji, 1997 yılında Optomec (ABD) tarafından ticarileştirilmiştir. Bu işlem, genellikle büyük metal parçaların üretilmesi için kullanıldığından lazer metal biriktirme (LMB) olarak adlandırılır. Son zamanlarda, lazer bazlı toz yataklı sistemlerde olduğu gibi, LMB teknolojisi de ısı kaynağı olarak Nd-YAG lazerlerinin yerine fiber lazer kullanmaya başlamışlardır. Tozlar oksitlenmeyi engellemek için gaz ortamında saklanır. Optomec firması dışında bu teknolojiyi kullanan birçok şirket vardır; DM3D Technology (ABD), Aeromet Inc. (ABD), Accufusion (Kanada), Controlled Metal Buildup (Almanya), Trumpf Group (Almanya) [15,17].

Elektron demeti bazlı YEB yöntemi, elektron demeti serbest biçimli üretimi (ED-SBÜ) olarak da bilinmektedir. Bu üretim yöntemi ilk olarak NASA Langley (ABD) tarafından havacılık ve uzay parçalarının üretimi ve onarılması için kullanılmıştır. ED-SBÜ yöntemi vakumlu ortamda çok yüksek elektrik akımıyla nispeten yavaş biriktirme oranlarıyla çalışmaktadır. Ayrıca, lazer sistemlerinden farklı olarak, elektron demeti işleminde toz yerine tel besleme kullanılmaktadır. Bu alanda çalışan diğer bir firma Sciaky (ABD)'dir. Sciaky şirketinin makineleri, üretimlerini çok büyük vakumlu haznelerde 6 metreye kadar olan büyük ölçeklerde yapmaktadır. Bu şirket

özellikle havacılık endüstrisi için büyük boyutlardaki metalik parçaların üretiminde yetkinleşmiştir [15,31].

YEB yöntemi ile, tam yoğunluklu ve homojen mikroyapılı parçalar üretilebilmektedir. Toz yataklı sistemlerden farklı olarak, nihai parçanın mikroyapısı YEB yöntemindeki yönlü katılma özelliği ile kontrol edilebilmektedir. Bu yöntem özellikle iş parçalarının tamirinde ve modernizasyon uygulamalarında kullanılabilir etkin bir yöntemdir. YEB yöntemindeki biriktirme prensibi ile korozyon ve aşınma direnci yüksek kaplamalar yapılabilir. Düşük yüzey kalitesi, yavaş tarama hızı ve çok uzun imalat süreleri YEB yönteminin dezavantajlarıdır. Toz yataklı yöntemler ile karşılaştırıldığında, YEB yöntemiyle yetersiz destek yapıları nedeniyle karmaşık geometriye sahip parçalar üretilemez. Üretim işleminden sonra, kalıntı gerilmelerini gidermek için genellikle ikincil işlemler gerekmektedir [15,17,18,31].

## **2.6 Ti-6Al-4V Alaşımının Katmanlı İmalat Teknolojisi ile Üretimi**

Son yıllarda, katmanlı imalat teknolojisi özellikle biyomedikal ve havacılık sektörleri için parça üretimine odaklanmıştır. Her iki sektörde, Ti-6Al-4V alaşımının bölüm 2.1’de bahsedilen benzersiz özellikleri nedeniyle, bu alaşımdan oluşan iş parçalarının yapısal esneklik ve maliyet verimliliği sağlayan alternatif bir yöntemle üretilmesine büyük önem vermektedir. Bu nedenle, katmanlı imalat teknolojilerinin önemli bir bölümü karmaşık geometriye sahip Ti-6Al-4V parçaların üretilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Bu bölümde, Ti-6Al-4V alaşımının katmanlı imalat yöntemleriyle üretimi ile birlikte, yoğunluk, mekanik özellikler ve mikroyapı gibi çeşitli yapısal özelliklerinin ve de farklı üretim yöntemleriyle karşılaştırmalı incelemesi yapılmıştır.

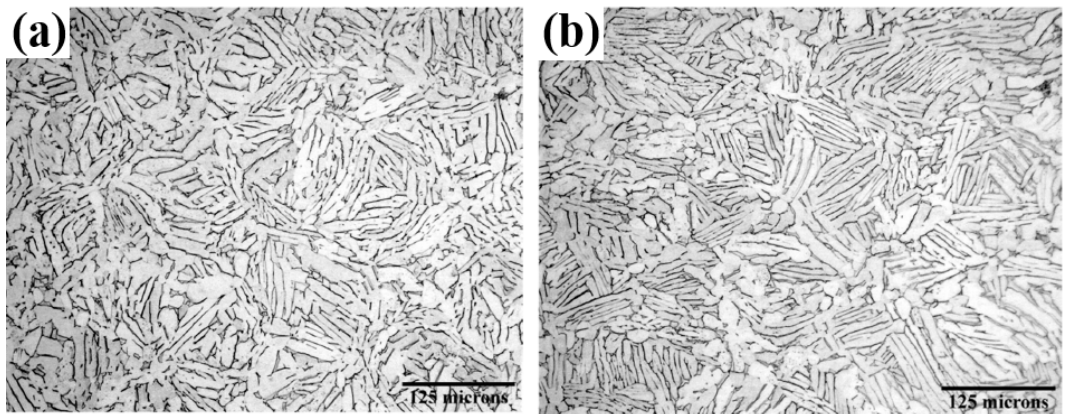
### **2.6.1 Katmanlı İmalat Teknolojisi ile Üretilmiş Ti-6Al-4V Alaşımının Mikroyapısı**

Ti-6Al-4V alaşımından oluşan bir iş parçasının katmanlı imalat teknolojisi ile üretiminde ısı kaynağı ile doğrudan temas eden toz veya tel formundaki alaşım kullanılır. Isı kaynağının temas ettiği Ti-6Al-4V alaşımının katılma hızı çok kısa sürede gerçekleşir. Bu imalat yönteminde, bir katman katılırken ikinci katman daha önceden oluşumu tamamlanmış katmanın üzerine yüksek sıcaklıklarda bırakılır. Bu iki katman arasındaki ısı iletimi mikroyapısal değişikliklere yol açar. Dolayısıyla ile,

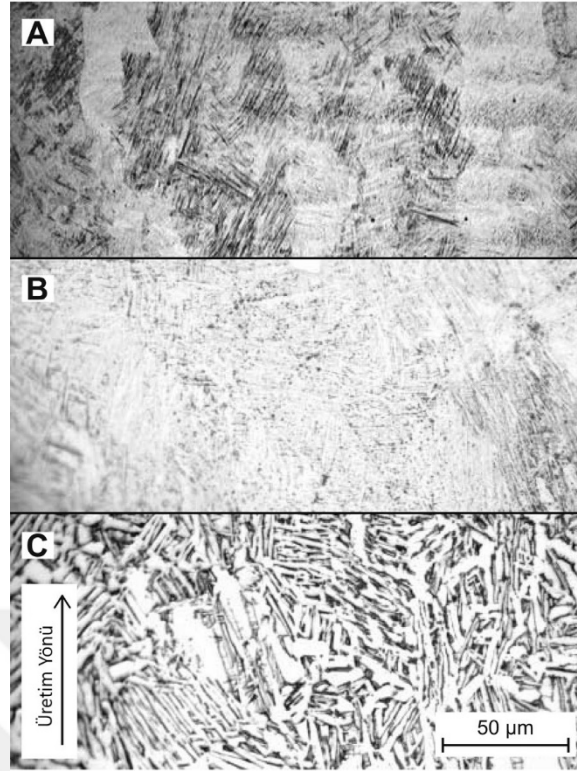
katmanlı imalat teknolojisinde toz veya tel şeklindeki ana malzemenin ön ısıtılması, üretim tablasının ısıtılması ve üretim ortamının sıcaklığı, parçanın nihai mikroyapısı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Katmanlı imalat türlerinden olan seçmeli lazer sinterleme (SLS) yöntemi ile üretilen parçalar, genellikle hem yoğunluk hem de mekanik özellikleri arttırmak için eşbasınçlı sıcak presleme (HIP) uygulandıktan sonra kullanılır. Das ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada [32], geleneksel toz metalürjisi (TM) işlemi ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımının SLS ile üretilen parçaları ile benzer teorik yoğunluğa sahip olduğunu ve dolayısıyla her iki işlemde de HIP uygulamasının %99 ve üzeri yoğunluğa ulaşmak için uygun bir ikincil işlem olduğunu göstermişlerdir. Şekil 2.9'da TM/HIP ve SLS/HIP uygulaması sonrası elde edilen mikroyapılar verilmiştir. Optik mikroskop görüntülerinde  $\alpha$  (beyaz) ve  $\beta$  (siyah) katmanlarından oluşan benzer Widmanstatten yapısı bulunmaktadır.

Soğuk toz yatağı prosesi olarak da tanımlanan seçmeli lazer eritme (SLE) işleminde üretim önceden ısıtılmamış üretim tablası üzerinde gerçekleşir. Isı kaynağının teması sonrasında soğuk üretim tablası üzerinde eriyen tozlar hızlı bir şekilde katılır ve Şekil 2.10-a'da gösterilen HSP  $\alpha$  martenzit gibi dengeli olmayan fazların oluşmasına yol açar. Wauthle ve arkadaşlarının bir çalışmasında [33], SLM ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımının tüm mikroyapısının iğnemsiz martenzit fazından oluştuğu gösterilmiştir (Şekil 2.10-a). Oluşan martenzit yapısı gerilim giderme ısıl işlemiyle  $\beta$  fazıyla birlikte ince  $\alpha$  plakalarından oluşan dönüşmüş  $\alpha$  martenzit yapısına (Şekil 2.10-b), HIP uygulaması ile de yapraksı  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarına dönüştürülmüştür (Şekil 2.10-c).



Şekil 2.9: (a) TM/HIP ve (b) SLS/HIP işlemleri ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımının dağlama sonrası mikroyapıları [32].



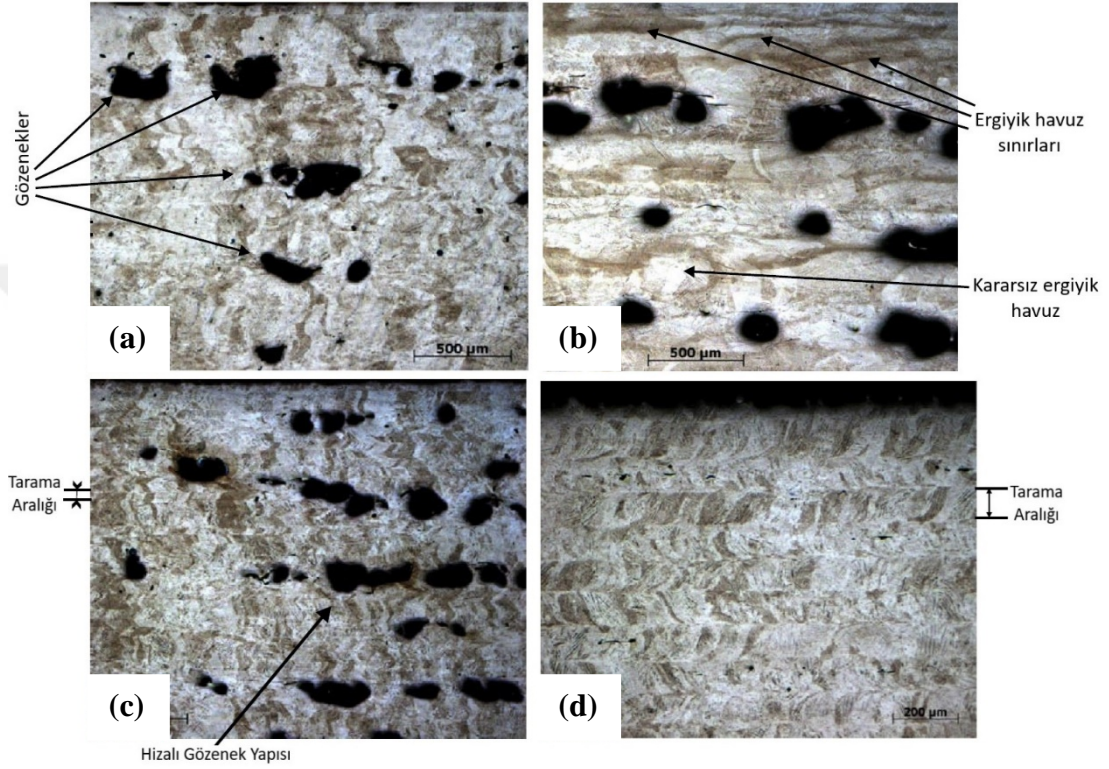
Şekil 2.10: SLE ile üretilmiş Ti-6Al-4V alaşımının (a) üretim sonrası, (b) gerilim giderme ısı işleme sonrası ve (c) HIP işleme sonrası mikroyapısı [33].

SLE yönteminde üretim parametrelerinin malzemenin katılma davranışı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Yüksek güce sahip lazer kaynağı tozlar ile temas ettiğinde, katılma sırasındaki yüksek soğuma hızı nedeniyle  $\alpha$  martenzit plakaları mikroyapı içerisinde çöker. Nihai mikroyapıyı belirleyen en önemli üretim parametreleri lazer gücü, tarama yönü, tarama hızı, lazer çapı ve iki lazer yolu arasındaki uzaklıktır [34]. Thijs ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada [35], üretim parametrelerinin SLE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapısı üzerindeki etkileri gösterilmiştir. SLE yönteminde yüksek yoğunluk elde etmek amacıyla bir katmanın tamamlanmasından sonra lazerin tarama yönü  $90^\circ$  döndürülerek üretim yapılmıştır. Bu tarama stratejisi nedeniyle birincil  $\beta$  taneleri ile martenzit plakaları arasındaki dalgalı  $\beta$  tane sınırları mikroyapıda gözlenmiştir. SLE yönteminde hızlı katılma olduğundan birincil  $\beta$  tane sınırları arasında  $\alpha$  tane sınırı bulunmamaktadır.

Thijs ve arkadaşları [35] aynı zamanda SLE yönteminin üretim parametrelerinin makroyapıya olan etkilerini de incelemiştir. Farklı tarama hızı ve tarama aralığı değerlerinde ürettikleri Ti-6Al-4V numunelerin makroyapıları Şekil 2.11'de verilmiştir. 50 mm/sn tarama hızında (Şekil 2.11-a) elde edilen makroyapıda 100



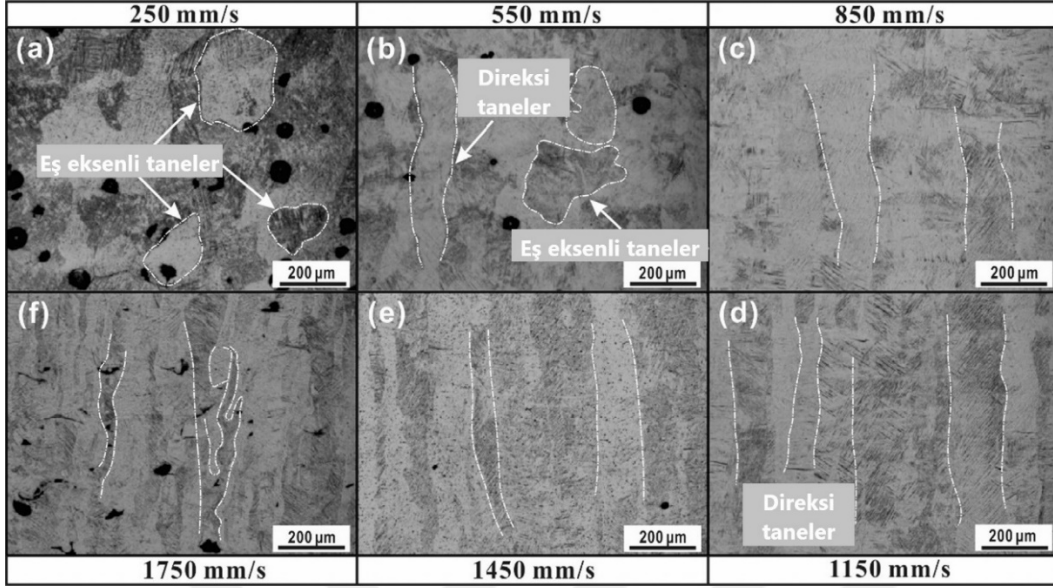
mm/sn tarama hızına (Şekil 2.11-b) göre gözenek boyutlarının daha geniş olduğu ve ergiyik havuzun daha düzensiz davranış gösterdiğini elde etmişlerdir. Tarama hızını 200 mm/sn’de sabit tutarak 50 µm tarama aralığında (Şekil 2.11-c) hizalı gözenek yapıları numune içerisinde oluşmuştur. Küçük tarama aralığı değerlerinde ergiyik havuzların üst üste gelmesi yüksek enerji birikimine neden olup gözenek oluşturduğu gösterilmiştir.



Şekil 2.11: (a) 100 mm/sn (b) 50 mm/sn tarama hızlarında ve (c) 50 µm (d) 100 µm tarama aralığında üretilen Ti-6Al-4V alaşımının optik mikroskop görüntüleri [35].

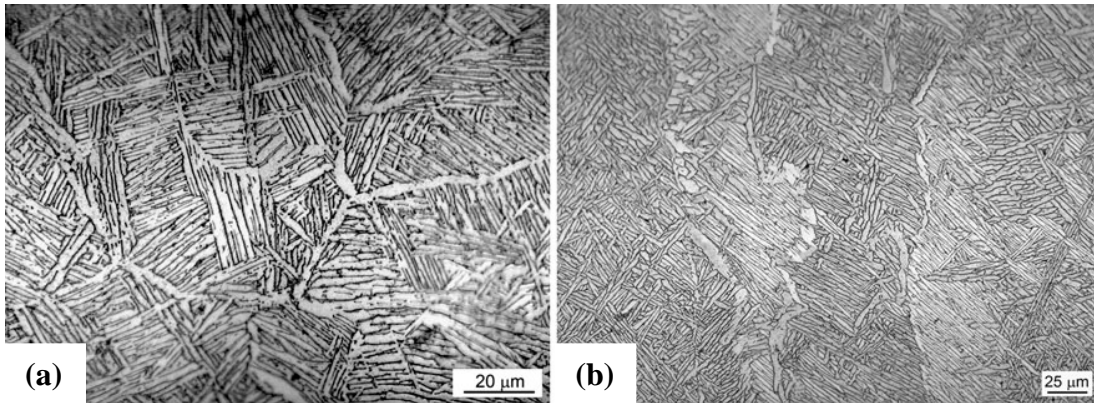
Wang ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada [36], farklı güç ve tarama hızları kullanılarak SLM yöntemiyle elde edilen Ti-6Al-4V malzemelerin yüzey kalitesi, yoğunluk ve mikroyapıları karşılaştırılmıştır. Tarama hızlarını 250 mm/sn’den 1750 mm/sn değerine yükselterek Şekil 2.12’de verilen mikroyapıları elde etmişlerdir. Düşük tarama hızında eş eksenli taneler görülürken, tarama hızı arttırıldığında direksi yapıdaki mikroyapılar belirginleşmiştir. Düşük hızlardaki iğnemsî yapılar  $\alpha$  martenzit +  $\beta$  fazından oluşurken, yüksek hızlarda ise  $\alpha$  martenzit yapıları daha yoğundur. Yüksek tarama hızlarında üretilen numunelerde, yeterli ergimeye uğramamış bölgeler nedeniyle oluşan gözenekler (Şekil 2.12-f) görülürken, düşük tarama hızlarında gaz boşlukları ve yüksek enerji birikmesi ile oluşan küresel gözenek yapıları (Şekil 2.12-

a) oluşmuştur. SLE yönteminde farklı üretim parametrelerinin etkileri Song ve arkadaşları tarafından da incelenmiştir [37].



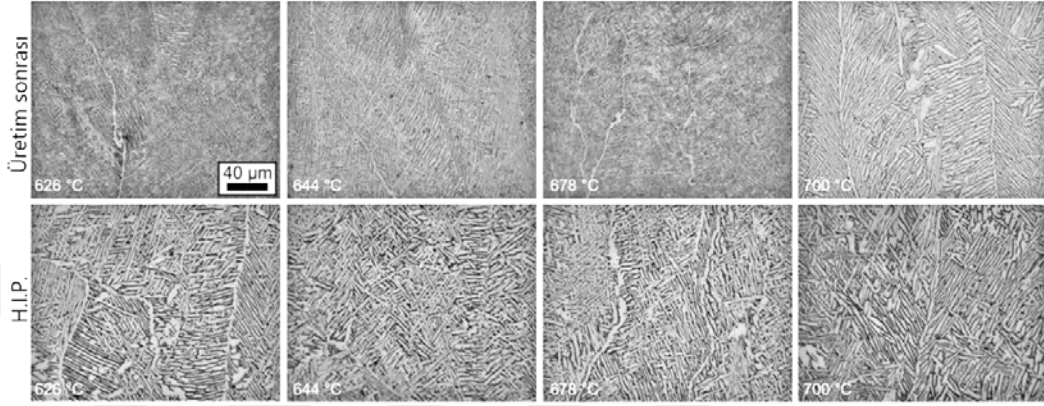
Şekil 2.12: (a) 250, (b) 550, (c) 850, (d) 1150, (e) 1450 ve (f) 1750 mm/sn tarama hızlarındaki SLM Ti-6Al-4V alaşımının optik mikroskop görüntüleri [36].

Lazer bazlı toz yataklı ergitme sistemlerinden farklı olarak, EDE yönteminde soğutma hızı hem üretim tablasının hem de üretim ortamının ön ısıtılmasıyla kontrol edilebilmektedir. Böylelikle SLE yönteminden farklı olarak, katmanlar arasında kesintisiz  $\beta$  taneleri elde edilebilmektedir. EDE ile üretim sonrası Ti-6Al-4V alaşımının üretim yönüne yatay ve dikey kesitlerindeki mikroyapıları Şekil 2.13’de gösterilmiştir. Mikroyapının geneli birincil  $\beta$  tane sınırları arasında,  $\alpha + \beta$  lamellerinden oluşan Widmanstätten morfolojisinden oluşmaktadır [38]. Bu tür direksi tane oluşumları birçok farklı araştırmacı tarafından gösterilmiştir [39-43].



Şekil 2.13: EDE yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V alaşımının (a) yatay ve (b) dikey kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri [38].

Al-Bermani ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada [44], farklı ortam sıcaklıklarında (626 °C, 644 °C, 678 °C, 700 °C) EDE yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V parçaların üretim sonrası ve ikincil işlem olarak HIP uygulaması sonrası mikroyapıları karşılaştırılmıştır (Şekil 2.14). Üretim ortamının sıcaklığının artırılması ile direksi taneler daha çok belirginleşmiş ve kabalaşmıştır. Uygulanan HIP işlemi ile mikroyapılarda  $\alpha$  fazlarının kalınlıkları önemli derecede artırılmıştır.

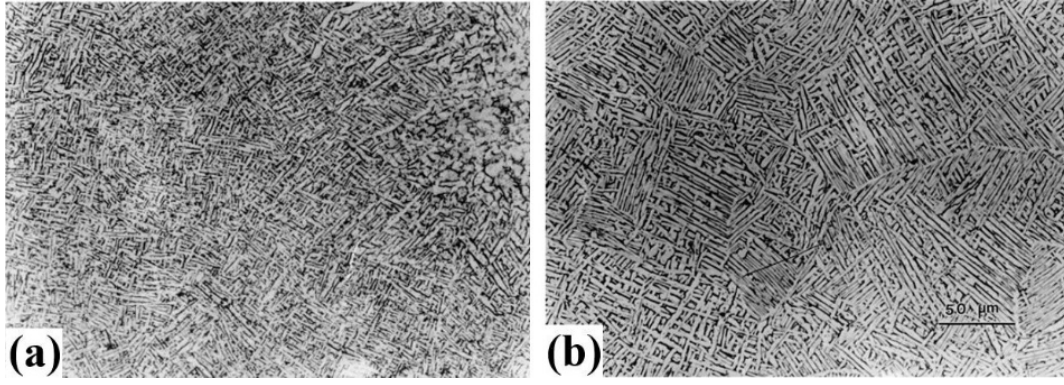


Şekil 2.14: Farklı üretim sıcaklıklarında elde edilen Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapılarına HIP etkisi [44].

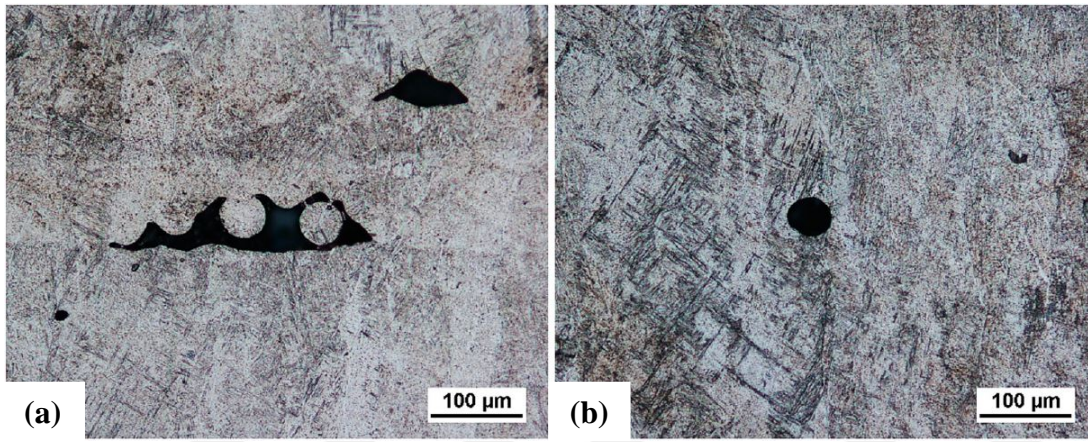
Murr ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada [45], EDE yöntemi ile iki farklı üretim parametresi kullanılarak Ti-6Al-4V alaşımından numuneler üretilmiştir. Numunelerin alt kısmından 1 cm ve üst kısmında 1 cm uzaklıktan alınan kesitlerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 2.15'te verilmiştir. Elde edilen görüntülerden  $\alpha$  fazlarının kalınlıkları karşılaştırılmıştır. Her iki üretim parametresi için de üretim tablasına yakın olan bölgeden alınan kesitte daha ince Widmanstätten yapısı gözlenmiştir. Şekil 2.15'deki numunede üretim tablasına yakın alt bölgeden alınan kesitte  $\alpha$  yapısının kalınlığı ortalama 1.6 µm iken, üst bölgeden alınan kesitte 3.2 µm olarak ölçülmüştür. Böylelikle EDE ile üretim sırasında parçanın alt ve üst bölgelerinin soğuma hızlarından kaynaklı farklı mikroyapıya sahip olabileceğini göstermişlerdir.

Galarraga ve arkadaşlarının bir çalışmasında [46], Arcam A2 EDE tezgahında farklı konum ve oryantasyonda üretilen Ti-6Al-4V alaşımlarındaki gözenek yapıları incelenmiştir. Üretim sırasında gaz sıkışmasından dolayı oluşan küresel gözenekler (Şekil 2.16-b) ve katmanlar arasında düzensiz şekle sahip sinterlenmemiş veya ergimemiş tozlardan dolayı oluşan boşluklar (Şekil 2.16-a) olmak üzere 2 farklı gözenek yapısı görülmüştür. Gözeneklilik, üretim tablasının merkezinde %0.25 iken, kenar bölgelerde %0.09 seviyelerinde olduğu ölçülmüştür.





Şekil 2.15: EDE yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçanın (a) alttan 1 cm ve (b) üstten 1 cm mesafedeki mikroyapısının optik mikroskop görüntüsü [45].



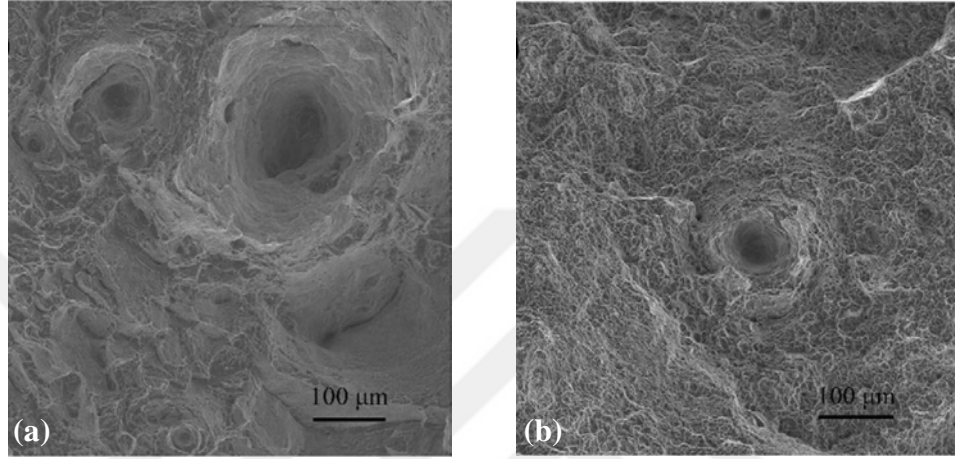
Şekil 2.16: EDE yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V numunesindeki (a) düzensiz şekilli yetersiz ergime ve (b) küresel gaz boşlukları [46].

## 2.6.2 Katmanlı İmalat Teknolojisi ile Üretilmiş Ti-6Al-4V Alaşımının Mekanik Özellikleri

Literatürde katmanlı imalat teknolojisi ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özelliklerini inceleyen birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda genellikle farklı üretim parametreleri, toz boyutları, üretim yönü ve ikincil işlemlerin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Çizelge Ek.1’de farklı katmanlı imalat yöntemleri ile üretilmiş Ti-6Al-4V alaşımlarının mekanik özellikleri özetlenmiş, döküm ve dövme üretim standartları ile de karşılaştırma yapılmıştır.

Gong ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada [47], hem optimum proses parametreleriyle hem de farklı proses parametreleri kullanılarak SLE ve EDE yöntemleriyle Ti-6Al-4V parçalar üretmişlerdir. Üretilen parçaların mikroyapı, sertlik, çekme ve yorulma özelliklerini karşılaştırılmış, farklı işlem parametrelerinin üretim

sonunda mikroyapıda değişikliğe neden olmadığı ve mikroyapının soğuma hızıyla değiştii gözlenmiştir. Çekme testi sonuçlarında SLE ile üretilen parçaların EDE yönteminden daha yüksek akma ve çekme dayanımlarına sahip olduğu, ancak süneklik, sertlik ve yoğunluk değerlerinin yakın olduğu belirlenmiştir. Çekme testleri sonunda optimum işlem parametreleri ile üretilmiş numunelerin kırık yüzeyleri karşılaştırıldığında, Şekil 2.17'deki gibi her iki yüzeyde de sünek kırılmanın olduğu gözlemlenmiştir.

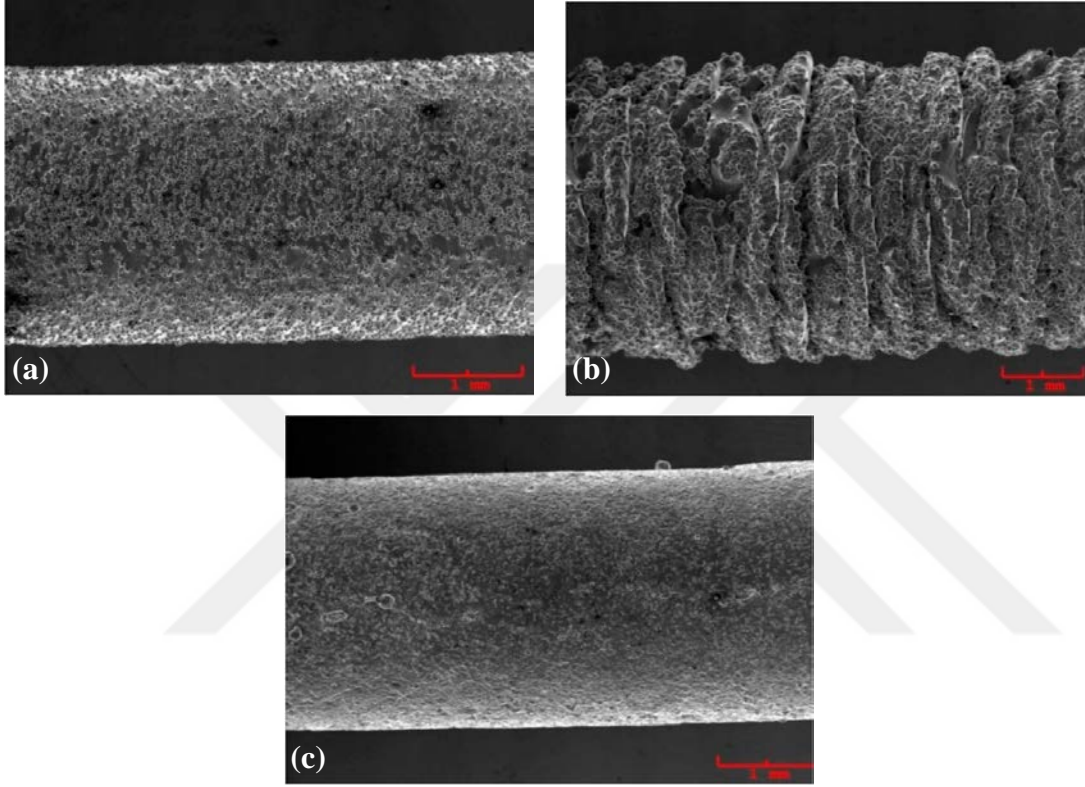


Şekil 2.17: Katmanlı imalat yöntemi ile üretilmiş numunelerin çekme testi sonrası kırık yüzeyleri (a) SLE ve (b) EDE [47].

Koike ve arkadaşları [48], farklı üretim yöntemleriyle üretilmiş Ti-6Al-4V parçaların mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Döküm ile üretilen parçayı aynı zamanda talaşlı imalat ile yüzey işleme yaparak test etmişlerdir. Çekme ve sertlik testlerinin sonuçları Çizelge Ek.1'de gösterilmiştir. Çalışmada, SLE, EDE ve döküm yöntemiyle elde edilmiş parçaların yüzey pürüzlülükleri arasında belirgin farklılıklar gözlenmiş (Şekil 2.18), özellikle EDE yöntemi ile elde edilen numunelerdeki yüzey pürüzlülüğünün mekanik özellikleri düşürdüğü belirlenmiştir. Çekme testlerinde en düşük dayanım ve süneklik değerleri ile en yüksek vickers sertlik değeri EDE yöntemi ile elde edilen parçada elde edilmiştir.

Hrabe ve Quinn [40], EDE yöntemiyle üretilen parçalarda üretim tablası üzerindeki konumun ve üretim yönünün mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Üretim tablasına dikey yönde üretilen numunelerin yatay yönde üretilenlere göre akma ve çekme noktalarında bir fark görülmemiştir, ancak süneklik değerleri %30 daha düşük elde edilmiştir. X ve Y yönlerinde üretimlerde ise mekanik özelliklerdeki fark %3'den daha düşüktür ve standart sapma değerleri arasındadır.

Ayrıca tablanın kenar ve orta bölgelerinde yapılan üretimlerin mekanik özellikleri arasında hem yatay hem de dikey üretimlerde önemli ölçüde fark görülmemiştir. Böylelikle ARCAM S12 EDE tezgahında bir tabla üzerindeki üretimin mekanik özellikleri arasında kayda değer bir farklılık olmadığı gösterilmiştir. Çalışmada, numune konumu, üretim yönü ve işlem parametrelerinin her malzeme, makine ve üretim yöntemi için ayrı bir şekilde değerlendirilmesi gerektiğini önermişlerdir.



Şekil 2.18: (a) SLE, (b) EDE ve (c) döküm yöntemiyle üretilmiş numunelerin yüzey pürüzlülükleri [48].

### **3. DENEYSEL YÖNTEM**

#### **3.1 Ti-6Al-4V Alaşım Tozlarının Karakterizasyonu**

Arcam Q20 Plus EDE tezgahında üretim için kullanılacak olan Ti-6Al-4V alaşım tozlarının boyut dağılımı, kimyasal bileşimleri ve morfolojileri incelenmiştir. Üretim süreçlerinin alaşım toz boyutu ve morfolojisine etkisini incelemek amacı ile 4 farklı toz grubundan (üretim öncesi, üretim sonrası elek altı ve elek üstü ve de metalizasyona maruz kalmış) örnekler incelenmiştir.

Arcam firmasından temin edilen Ti-6Al-4V alaşım tozlarının boyut dağılımı lazer parçacık ölçüm cihazı (Malvern Mastersizer 2000) ile gerçekleştirilmiştir. Alaşım tozlarının kimyasal bileşimleri enerji dağılımlı x-ışınları görüme gösterimi (EDX) ile incelenmiştir. Kimyasal bileşimler bakalit içerisine alınan alaşım tozlarından ölçülmüştür. Alaşım tozlarının bakalite alınma işlemi; ilk olarak 0.6 gr alaşım tozu 1 gr bakalit tozu ile karıştırılıp uygulanmıştır. Daha sonra Ti-6Al-4V alaşım tozu ile karışık ince disk şeklindeki bakalitin üzerine 14 gr bakalit tozu eklenerek tekrar bakalite alınır. Bu işlemler sonrasında, bakalite alınan tozların 9 µm elmas süspansiyon ile ince zımparalama ve 0.04 µm ile parlatma işlemleri uygulanıp alaşım tozu kaplı bakalit yüzeyi elde edilir.

Serbest haldeki Ti-6Al-4V alaşım tozlarının morfolojileri, taramalı elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak incelenmiştir.

#### **3.2 Çekme Test Numunelerinin Hazırlanması**

Çekme test numuneleri EDE yöntemi ile TUSAŞ Prototip Üretim bölümünde bulunan Arcam Q20 Plus katmanlı imalat tezgâhı kullanılarak üretilmiştir. Tezgâha ait görsel Şekil 3.1’de verilmiştir. Arcam Q20 Plus tezgahında maksimum 350 mm çapta ve 380 mm yükseklikte parçalar üretilebilmektedir. Üretim işlemi başlamadan önce oluşturulan vakumlu ortamın basıncı  $5 \times 10^{-4}$  mbar’dır. Tozların üretim sırasında oksitlenmesini engellemek amacıyla vakumlu ortamın yanında  $4 \times 10^{-3}$  mbar basınçta Helyum gazı bulunmaktadır. Bu etkileşime girmeyen gaz üretim sırasında saatte 4 litre

Üretim odasına salınırken, üretim sonrasında soğuma işlemi sırasında saatte 100 ile 150 litre arasında salınmaktadır. Tezghın üretebildiği maksimum demet gücü 3000 W'dır. Arcam Q20 Plus cihazı diğer katmanlı imalat tezgahlarındakine benzer şekilde STL arayüzünü kullanmaktadır [58].



şekil 3.1: Arcam Q20 Plus elektron demetiyle ergitme tezgâhı [58].

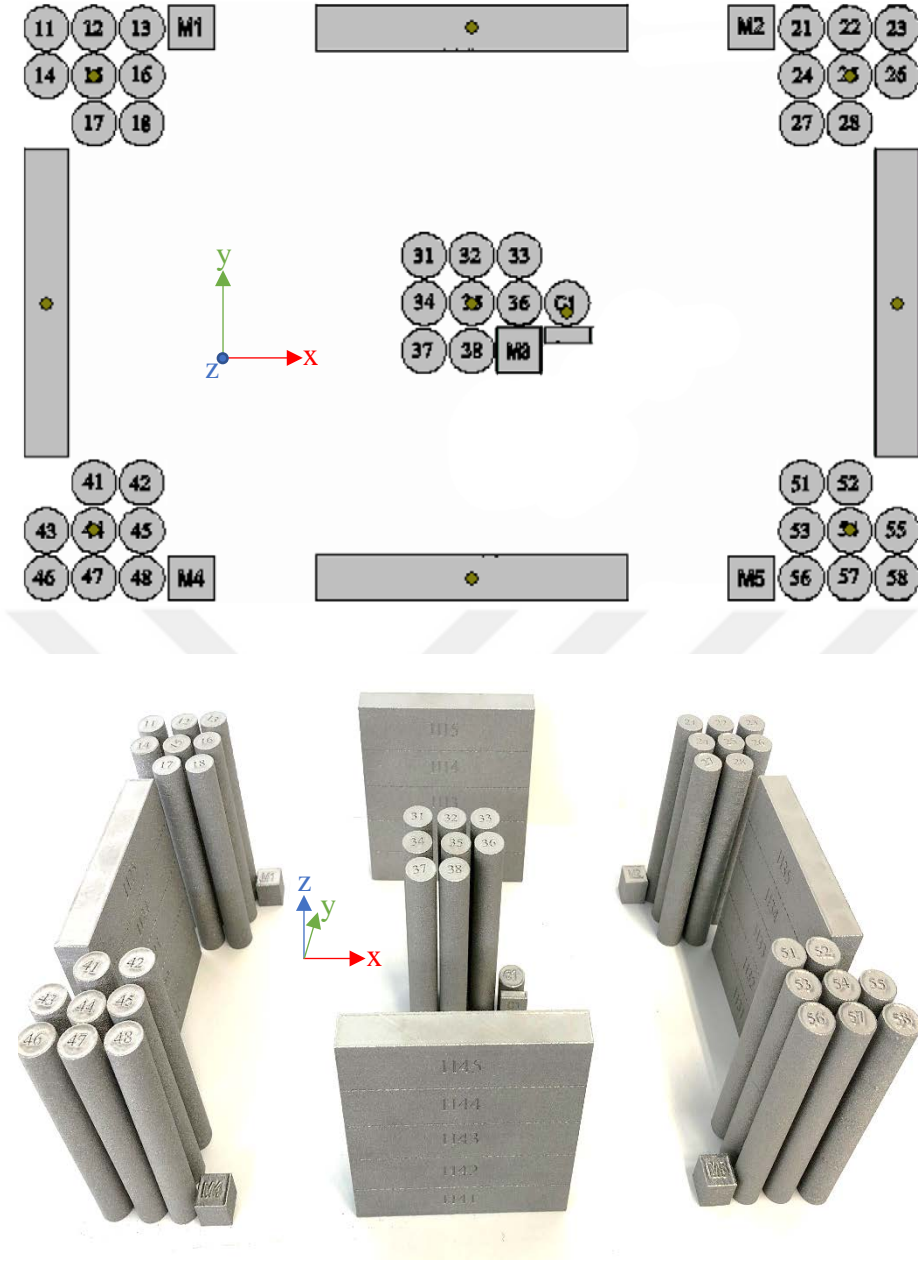
DeneySEL çalışmalarda, elektron demetiyle ergitme tekniğinde üretim yönünün ve parça konumunun mekanik özelliklere etkisini incelemek amacıyla silindir ve dikdörtgen kesitli numuneler şekil 3.2'de verildiği gibi x (kırmızı), y (yeşil) ve z (mavi) yönlerinde üretilmişlerdir. Üretim sırasında kullanılan Arcam firmasının Q20 Plus tezgâhı ve Ti-6Al-4V alaşım tozları için optimize ettiği üretim parametreleri izelge 3.1'de verilmiştir.

Tabla yerleşiminin şematik ve üretim sonrası görüntüleri şekil 3.2'de gösterilmiştir. Üretimin yapıldığı tablanın ölçüleri 300x200 mm'dir. Blok üretimlerde tabla üzerinde 5 farklı bölgeden (4 köşe ve 1 merkez) toplamda 40 adet blok silindirik numune, 4 farklı bölgeden (4 kenar) blok dikdörtgen numune üretilmiştir.



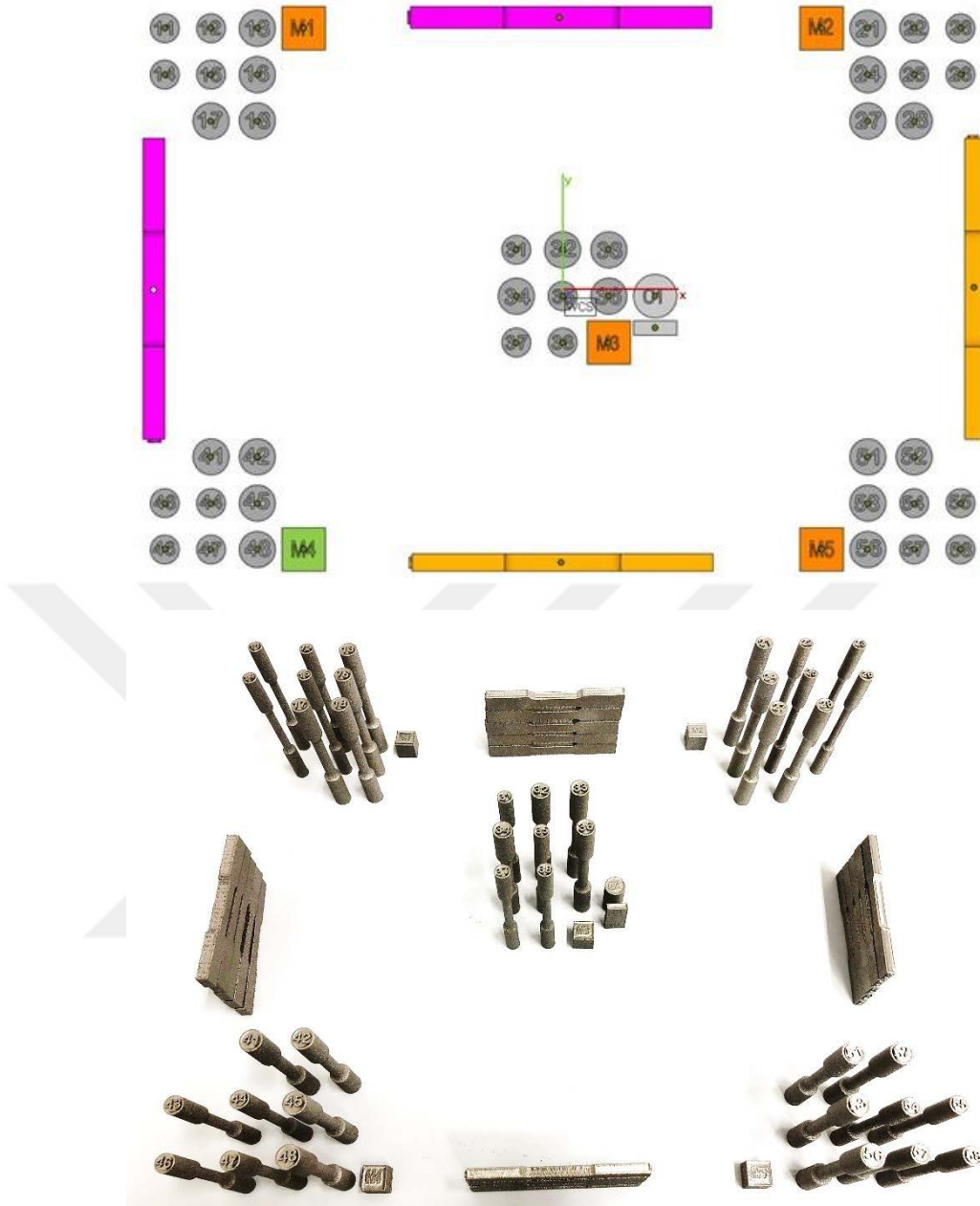
Çizelge 3.1: Ti-6Al-4V alaşım numunelerinin Arcam Q20 Plus tezgâhı için üretim parametreleri.

Ön Isıtma			Odak ofset	44 mA
			Isıtma odak ofset	100 mA
			Parçaya ofset	4 mm
			Maks. ısıtma süresi	60 s
		Ön Isıtma 1	Maks. demet akımı	36 mA
			Demet hızı	40500 mm/s
			Tekrar sayısı	3
		Ön Isıtma 2	Maks. demet akımı	45 mA
			Demet hızı	40500 mm/s
			Tekrar sayısı	3
Eritme	Kontur = 3	Dış kontur	Hız	450 mm/s
			Maks. akım	9 mA
			Odak ofset	6 mA
			Ofset	0.27
		İç kontur	Hız	450 mm/s
			Maks. akım	9 mA
	Odak ofset		6 mA	
	Ofset		0.18	
	Tarama		Maks. akım	28 mA
			Odak ofset	45 mA
			Hız fonksiyonu	32
			Çizgi ofset	0.22



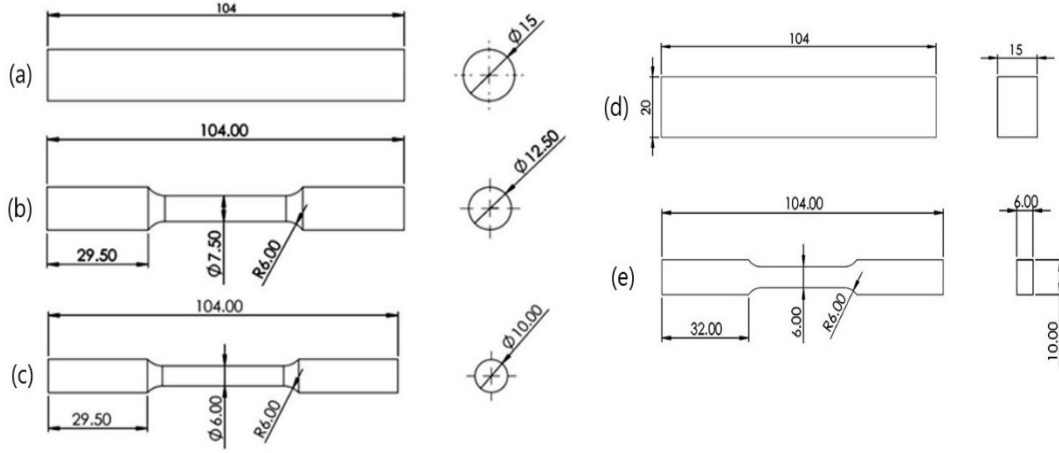
Şekil 3.2: (a) Mekanik test blok numunelerinin üretimi için hazırlanan tabla geometrisi, (b) Üretimi yapılan blok numuneler.

Tez çalışması kapsamında mekanik özelliklerin belirlenmesinde blok numunelerin yanı sıra, standart çekme testi ölçülerinde ve standart ölçülere %25 fazlalık verilerek (ofset numune) x, y ve z yönlerinde numuneler üretilmiştir. Standart ve fazlalık verilerek üretilen numunelerin şematik ve üretim sonrası tabla görselleri Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3: (a) Mekanik test standart ve fazlalık verilen numunelerin üretimi için kullanılan tabla geometrisi, (b) Üretimi yapılan standart ve fazlalık verilen numuneler.

Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de gösterilen tabla geometrilerinde üretilen blok, standart ve fazlalık verilen Ti-6Al-4V numunelerinin ölçüleri Şekil 3.4’de verilmiştir. Üretimi yapılan standart ölçülere ait numune ASTM E8 standartı [59] referans alınarak imal edilmiştir. Blok ve fazlalık verilerek üretilen numunelere çekme testlerinin uygulanabilmesi için talaşlı imalat ile standart ölçülere getirilmiştir. Yüzeyleri işlenen numunelerin, ince zımparalama ve parlatma işlemleri ile pürüzlülük değerleri düşürülmüştür.



Şekil 3.4: EDE yöntemiyle üretilen (a) blok silindir, (b) ofsetli silindir, (c) standart silindir, (d) blok dikdörtgen, (e) standart dikdörtgen numunelerin ölçüleri.

Üretimi yapılan silindirik ve dikdörtgen kesitli numunelerin talaşlı imalat işlemi Mazak tezgahında Mazatrol yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. Talaşlı imalat işlemine ait parametreler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2: EDE yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V alaşım numunelerinin talaşlı imalat parametreleri.

Numune		Devir (dk <sup>-1</sup> )	Kesme Hızı (mm/dk)	İlerleme (mm/dev)
Silindir Numuneler	Kaba Talaş	2000	400	0.2
	İnce Talaş	2000	50	0.025
Dikdörtgen Numuneler	Kaba Talaş	1250	500	0.4
	İnce Talaş	1800	500	0.277

### 3.3 Yoğunluk Ölçümleri, Mekanik Testler ve Karakterizasyon

#### 3.3.1 Yoğunluk Ölçümü

Numunelerin üretim sonrası ve yüzey işleme sonrası yoğunlukları Arşimet prensibi ile ölçülmüştür. Ölçüm, yoğunluk değeri 1.0 gr/cm<sup>3</sup> olan saf su (H<sub>2</sub>O) kullanılarak hassas terazide yapılmıştır. Yoğunluk ölçümünü başlatmadan önce kullanılacak saf suyun sıcaklığı ısı ölçer ile ölçülmüştür. Yoğunluğu ölçülecek numunenin ilk olarak havadaki ağırlığı ölçülüp, daha sonra saf su içerisine daldırılarak sudaki ağırlığı ölçülmüştür.

Elde edilen ağırlık verileri ile numunelerin yoğunlukları denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho_p = \frac{m_a}{m_a - m_{fl}} * \rho_{fl} \quad (3.1)$$

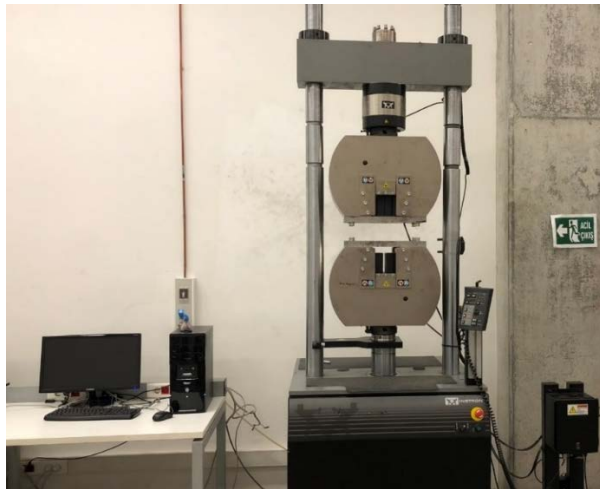
Denklemdaki  $\rho_{fl}$  (sıvının yoğunluğu) sıcaklığa bağlı olarak değişebilmektedir. Ölçümde kullanılan sıvı saf su olduğundan, saf suyun sıcaklığa bağlı değişim tablosu kullanılarak anlık yoğunluk değerlerinin ölçümü yapılmıştır.

### 3.3.2 Yüzey Pürüzlülüğü

Katmanlı imalat yöntemi ile üretilen numunelerin üretim sonrası ve yüzey işleme sonrası yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Üretim sonrası numunelerin yüzey pürüzlülükleri ( $R_a$ ) Alicona Infinite Focus G5 XL200 (Avusturya) optik profilometre ile ölçülmüştür. Blok ve ofsetli üretimler standart ölçülere yüzey işleme ile getirilip, parlatılan yüzeylerin pürüzlülükleri Mitutoyo SurfTest SJ-210 (Japonya) taşınabilir yüzey pürüzlülüğü cihazı ile ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülükleri numunelerin üç farklı rotasyonundan ve 3 farklı bölgelerden alınan değerlerin ortalamaları olarak verilmiştir.

### 3.3.3 Çekme Testi

Üretimi yapılan standart ölçülerdeki numunelere TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Malzeme Test Laboratuvarında bulunan 60 ton kapasiteli Instron 600LX cihazında (Şekil 3.5) çekme testi uygulanmıştır. Test hızı ASTM E8 standardı referans alınarak 0.003 mm/mm/dk olarak seçilmiştir.



Şekil 3.5: Instron 600LX çekme cihazı.

### 3.3.4 Sertlik Testi

Üretim tablası üzerinde 15x15x15 mm boyutlarındaki küp M1-M5 ve  $\varnothing$ 15x28 mm boyutlarındaki silindir C1 kodlu kontrol numuneleri de yer almaktadır (Şekil 3.2-a). Hem kontrol numuneleri üzerinden hem de örnek olarak seçilen silindir ve dikdörtgen kesitli numuneler üzerinden yatay ve dikey kesitler alınarak Vickers mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri Buehler Micromet 5114 cihazında (Şekil 3.6) Vickers yöntemi ile yapılmıştır. Vickers testi 1 kgf yük altında 10 saniye süreyle uygulanmıştır. Çalışmalarda, mikrosertlik için her bir numuneden 8'er ölçüm alınmış ve standart sapmaları hesaplanmıştır.



Şekil 3.6: Buehler Micromet 5114 Vickers sertlik cihazı.

### 3.3.5 Metalografik İnceleme

EDE yöntemi ile üretilen numunelerin optik ve taramalı elektron mikroskobu ile mikroyapıları incelenmiştir. Mikroyapı çalışması için, numuneler hassas testere ile kesilmiş ve daha sonra bakalite alınmıştır. Bakalite alınan Ti-6Al-4V numunelerine elmas zımparalama diskleri ile kaba zımparalama, 9  $\mu$ m elmas süspansiyon ile de ince zımparalama işlemleri uygulanıp görüntü alınacak yüzeydeki kaba hasarlar (çizikler ve testere izleri) ortadan kaldırılmıştır. Yüzeydeki mikro hasarlar ise 0.04  $\mu$ m elmas süspansiyon ile parlatma işleminde giderilmiştir. Parlatılmış numuneler Çizelge 3.3'de verilen Kroll dağlayıcısı ile dağlanmış ve dağlama işleminden sonra yüzeyler su ve alkol ile temizlenip sıcak hava ile kurutulmuştur.

Çizelge 3.3: Kroll dağılayıcısının içeriği.

Bileşen	Hacim (%)
Hidroflorik Asit (HF)	2
Nitrik Asit (HNO <sub>3</sub> )	4
Saf Su (H <sub>2</sub> O)	94

Mikroyapı incelemesi Nikon (Japonya) firmasının optik mikroskobu ve Jeol (Japonya) firmasının 6400 JSM ile FEI (Hollanda) firmasının Nova Nano 430 taralamalı elektron mikroskoplarında (TEM) yapılmıştır.







#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde, mekanik test numunelerinin üretiminde kullanılan Ti-6Al-4V tozlarının karakterizasyonu, farklı geometri ve yönlerde katmanlı imalat yöntemi ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri ve mikroyapıları incelenmiş, sonuçlar literatür ile karşılaştırılmalı olarak yorumlanıp değerlendirilmiştir.

##### 4.1 Toz Karakterizasyonu

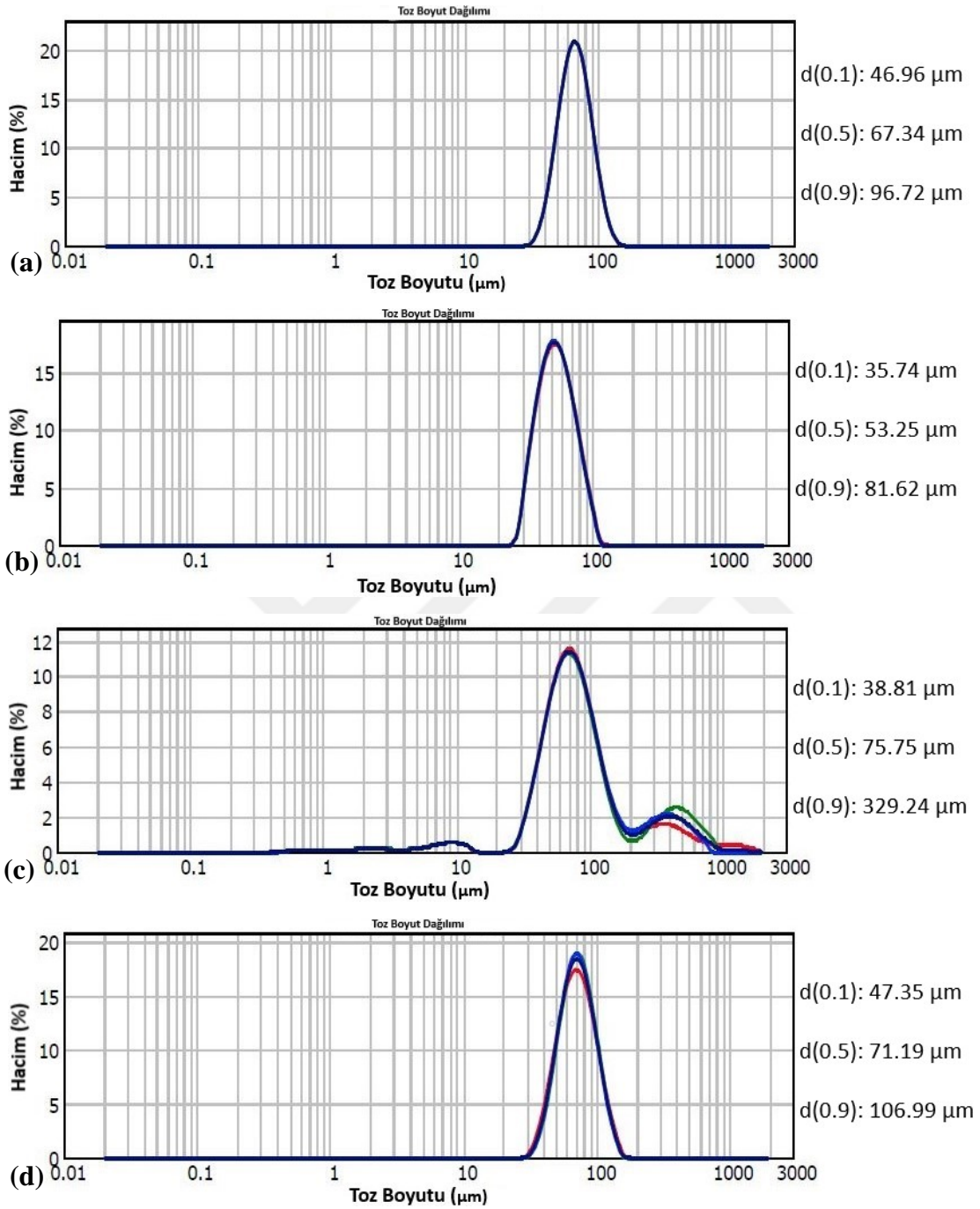
EDE yönteminde kullanılan Ti-6Al-4V alaşım tozlarının üretim öncesi, üretim sonrası elek altı ve elek üstü ve ayrıca buharlaşma ve metalizasyona uğradıktan sonraki morfolojileri incelenmiştir.

Toz boyut dağılımları dört toz türü için de incelenmiştir. Toz boyut dağılım grafikleri ve toz boyutları Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Boyut dağılımları aynı toz grubu için üç kez tekrarlanan ölçüm sonuçlarının ortalaması olarak verilmiştir.

İlk kullanılan Ti-6Al-4V tozunun boyut dağılımı 46.96 ve 96.72  $\mu\text{m}$  arasındadır ve ortalama toz boyutu 67.34  $\mu\text{m}$ 'dir (Şekil 4.1-a). Katmanlı imalat yöntemi ile iş parçası üretimi sonrasında tozlar elek yardımıyla ayrıştırılır ve bir sonraki üretimde tekrar kullanılır. Üretim sonrasında elek üstünde kalan ortalama toz boyutu 75.75  $\mu\text{m}$ , elek altında kalan tozların ortalama toz boyutu ise 53.25  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir (Şekil 4.1-b ve c). Elek üstünde kalan tozlar, üretim sonrasında küreselliğini kaybeden, mekanik olarak birbirlerine bağlanan veya yayınım ile birbirleri arasında uydulaşmaya yol açan tozlardan oluşmaktadır. Mekanik olarak birbirlerine bağlanan tozlar taşıma veya baskı altında dağılabilmektedir. Elek üstündeki tozların ortalama boyutları üretim için uygun olsa da küresellikten uzaklaştığı için elek ile ayrıştırılmıştır. Elek üstündeki tozlarda hem yayınım hem de mekanik birleşme ile yaklaşık olarak 330  $\mu\text{m}$  boyutlarında toz kümeleri de gözlenmiştir.

Üretim sırasında elektron demetinin tozlar ile teması sırasında yüksek sıcaklık nedeniyle buharlaşma meydana gelebilmektedir. Oluşan alaşım buharı üretim haznesinin duvarları ile temas edip tekrar katı toz haline gelmektedir. Bu işleme

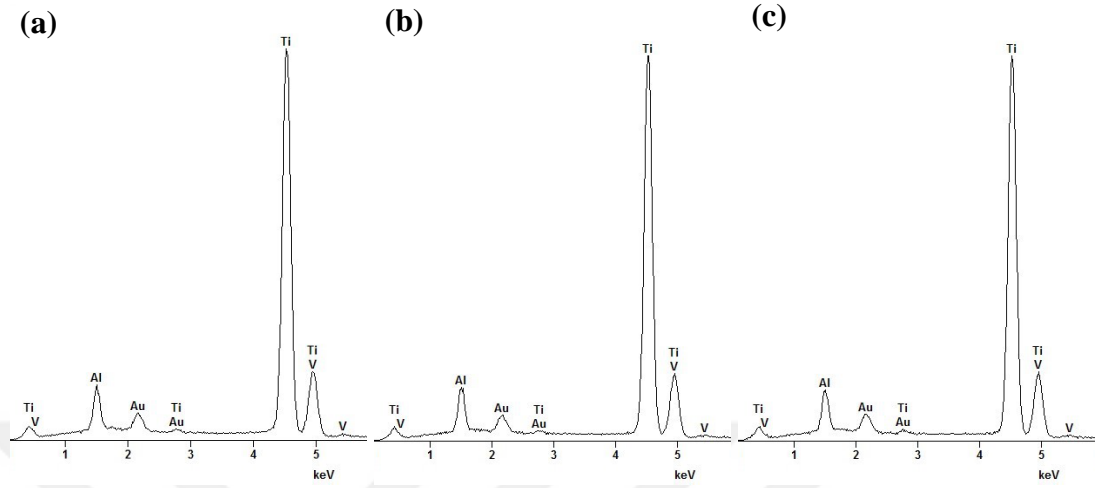
metalizasyon da denir. Metalizasyona uğramış Ti-6Al-4V tozlarının ortalama toz boyutu 71.19  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir (Şekil 4.1-d).



Şekil 4.1: Katmanlı imalat yöntemi ile üretilen numunelerde kullanılan Ti-6Al-4V alaşım tozlarının toz boyut dağılımları. (a) yeni, (b) üretim sonrası elek altı, (c) üretim sonrası elek üstü ve (d) metalizasyona uğramış.

Arcam firmasından alınan ve ilk defa kullanılacak olan, üretim sonrasında elek altında kalan ve metalizasyona uğramış Ti-6Al-4V alaşım tozlarının enerji dağılımlı x-ışınları görüme gösterimi (EDX) ile kimyasal bileşimleri incelenmiştir. Alaşım tozlarının

EDX analizi sonucunda elde edilen kimyasal bileşimlerine ait örnek bir grafik ve sayısal veriler Şekil 4.2 ve Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Çizelge 4.1’de yer alan veriler farklı tozlardan analiz yapılarak hesaplanan ortalama verilerdir.



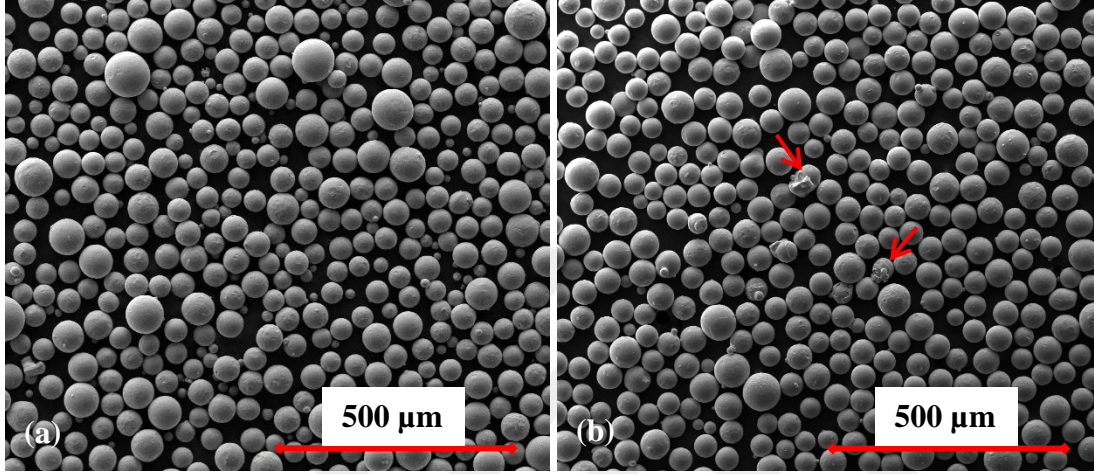
Şekil 4.2: (a) Yeni, (b) üretim sonrası elek altı ve (c) metalizasyona uğramış Ti-6Al-4V alaşım tozlarının EDX sonucu.

Çizelge 4.1: Yeni, üretim sonrası elek altı ve metalizasyona uğramış Ti-6Al-4V alaşım tozlarının kimyasal bileşimi.

Element	Ağırlık Oranı (%)		
	Yeni	Elek Altı	Metalizasyon
Ti	89.7 ± 0.1	89.2 ± 0.4	89.4 ± 0.3
Al	5.8 ± 0.1	6.4 ± 0.4	6.2 ± 0.8
V	4.6 ± 0.2	4.4 ± 0.1	4.4 ± 0.5

EDX sonucunu gösteren Şekil 4.2’de Altın (Au) elementi de görülmektedir. Bunun nedeni Ti-6Al-4V alaşım tozlarının bakalite alınması ve SEM’de iletken olmayan numunelerde görüntü alınabilmesi için bakalitin altın ile kaplanmasıdır. Çizelge 4.1’deki tozların kimyasal bileşimleri incelendiğinde, ilk defa kullanılacak alaşım tozu ile üretim sonrasında elek altında kalan alaşım tozunun kimyasal bileşimi arasında, nihai parçanın kimyasal bileşimini standartlar dışına çıkartabilecek bir farklılık gözlenmemiştir. Ancak metalizasyona uğrayan Ti-6Al-4V alaşım tozunun kimyasal bileşimindeki standart sapma diğer alaşım tozlarına göre daha yüksektir. Bu sonuç, tozlar arasındaki bileşim homojenliğinin azaldığını ve üretim sonrasında sadece elek altı tozlarının daha sonraki üretimlerde kullanımının uygun olduğunu göstermektedir.

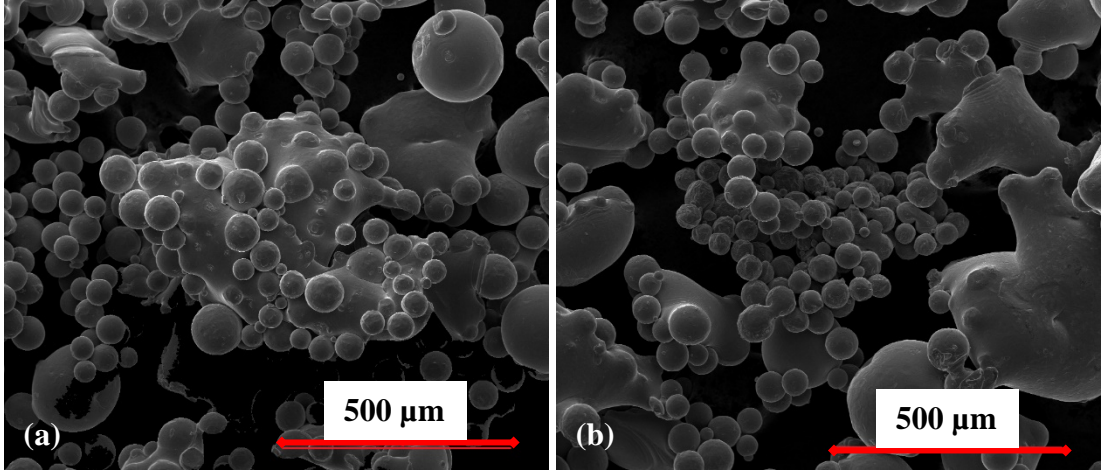
Ti-6Al-4V alaşım tozlarının morfolojilerinin belirlenmesi için serbest haldeki TEM görüntüleri de alınmıştır. Yeni ve üretim sonrası elek altında kalan tozların TEM görüntüleri Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Üretim sonrasında elek altında kalan ve bir sonraki üretimde kullanılacak olan tozlar, genel olarak yeni tozlardaki gibi küreselliklerini korumuştur. Ancak Şekil 4.3-b'de gösterildiği gibi küresellikten uzaklaşan ve elekten geçebilen küçük boyutlarda alaşım tozları da bulunmaktadır.



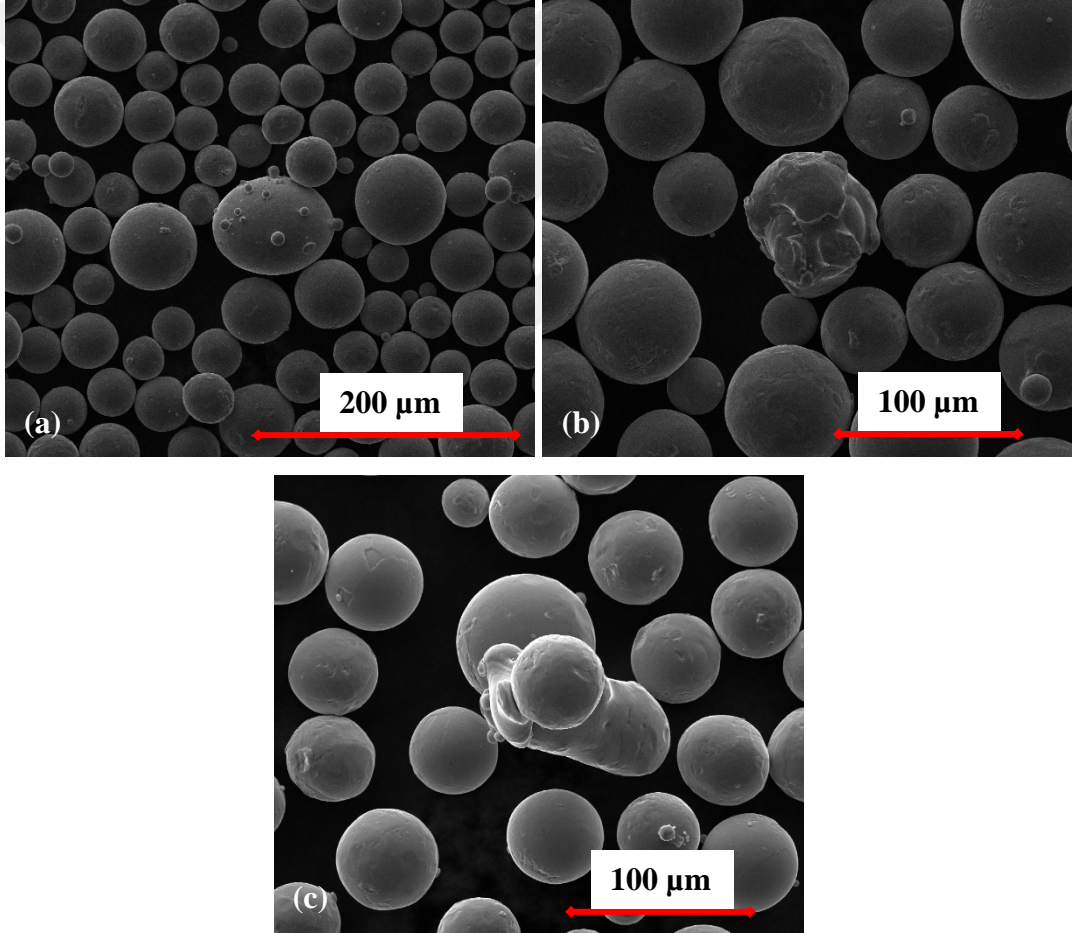
Şekil 4.3: Ti-6Al-4V alaşım tozunun TEM görüntüleri. (a) yeni ve (b) üretim sonrası elek altı.

Üretim sonrasında elek üstünde kalan tozlarda ise boyutlarda önemli ölçüde artış ve küresel olmayan geometriler görölmektedir (Şekil 4.4). Elek üstünde kalan alaşım tozları, küreselliklerini kaybettikleri ve düzensizleştikleri için hem toz serme aşamasında hem de üretim sırasında parça içerisinde istenmeyen gözeneklere neden olabilmektedir. Bu gözenekler üretilen parçalarda mekanik özelliklere negatif etki ederek dayanımını düşürmektedir. Eleme işlemi ile bu tozlar ayrıştırılmaktadır. Şekil 4.4'te gösterilen alaşım tozlarında, elektron demetine maruz kaldıkları için mekanik ve yayınım yoluyla bağ oluşumu nedeni ile düzensizleşme görölmektedir.

EDE yöntemi ile üretim sırasında serilen tozların buharlaşması ve metalizasyonu ile üretim odasının yan ve giriş duvarlarında alaşım tozları oluşmuş ve bu tozlarında morfolojileri incelenmiştir. Şekil 4.5'de gösterilen TEM görüntüleri, metalizasyona uğrayan Ti-6Al-4V tozlarına aittir. Alaşım tozlarının elektron demetinin etkisi ile saçılması ve metalizasyona uğraması Şekil bozukluklarına neden olmaktadır. Bu geometri bozukluklarının yoğunluğu bir toz kütlei içerisinde çok fazla olmamasına rağmen, Şekil 4.5'deki toz morfolojileri istenen küresel geometriden uzaktır ve üretimi olumsuz etkileyebilmektedir.



Şekil 4.4: Üretim sonrası elek üstünde kalan Ti-6Al-4V alaşım tozunun TEM görüntüleri.



Şekil 4.5: Metalizasyona uğramış Ti-6Al-4V alaşım tozlarının TEM görüntüleri.

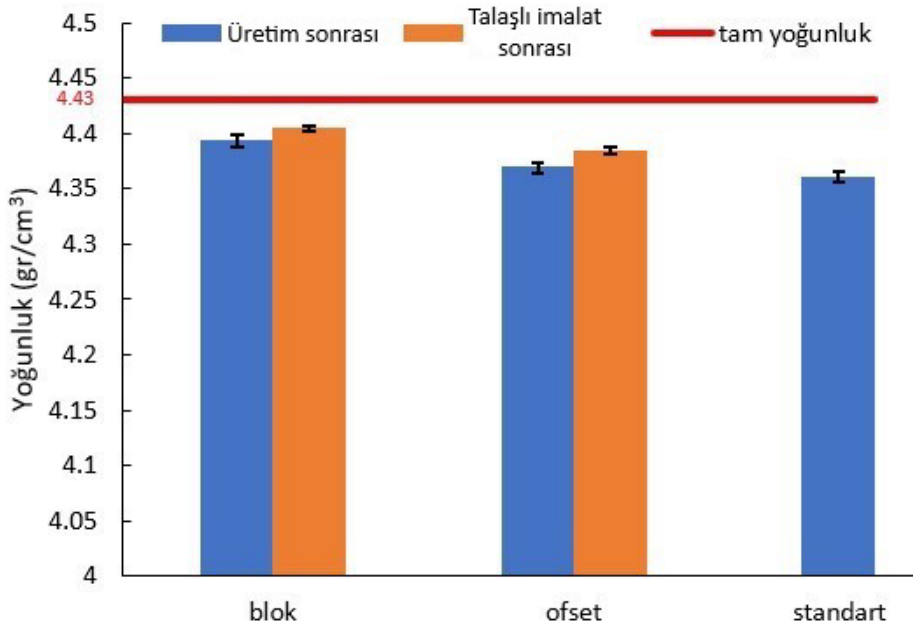


## 4.2 Yoğunluk Ölçümleri

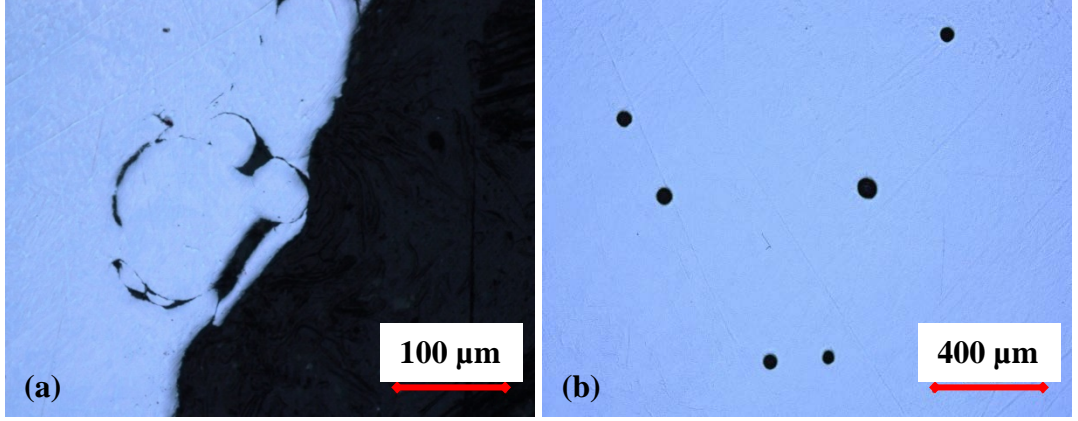
EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerinin yoğunluk değerleri, alaşımın sahip olduğu tam yoğunluk değeri olan  $4.43 \text{ gr/cm}^3$  değeri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.6'daki veriler incelendiğinde, blok olarak üretilen numunelerin yoğunluğu teorik yoğunluğun %99.4 seviyesindedir. Ancak standart ve ofset olarak üretilen numunelerin yoğunlukları teorik yoğunluğun %98.6 ve %98.8 seviyesindedir.

Gong ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada [47], Arcam S400 EDE cihazında farklı üretim parametrelerini kullanarak Ti-6Al-4V alaşımından silindir parçalar üretmişlerdir. Optimum üretim parametreleri kullanıp yüzeyi işlenen numunelerin yoğunluklarını  $4.41 \text{ gr/cm}^3$  (%99.6) olarak ölçmüşlerdir. Wysocki ve arkadaşları [51] ise Arcam S12 EDE cihazında küp şeklinde parçalar üretmiş ve yoğunluklarını %99.4 seviyelerinde ölçmüşlerdir.

Literatürde yapılan çalışmalarda EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerin yoğunlukları ile tez çalışması kapsamında üretilen blok Ti-6Al-4V numunelerin yoğunlukları benzerlik göstermektedir. Ancak ofset ve standart ölçülerde üretilen numunelerin yoğunluk değerleri literatür değerlerinin altında kalmıştır. Şekil 4.7'de gösterildiği gibi yüzeydeki kapalı gözenek yapısının oluşması ve numune içerisinde küresel gözeneklerin bulunması teorik yoğunluk değerine ulaşmasını engellemiştir.



Şekil 4.6: EDE ile üretilmiş blok, ofset ve standart ölçülerdeki Ti-6Al-4V numunelerinin yüzey işleme öncesi ve sonrası yoğunlukları.



Şekil 4.7: EDE ile üretilmiş Ti-6Al-4V numunenin (a) yüzeyindeki ergimemiş bölge ve (b) merkezindeki küresel gözenekler.

### 4.3 Yüzey Morfolojisi

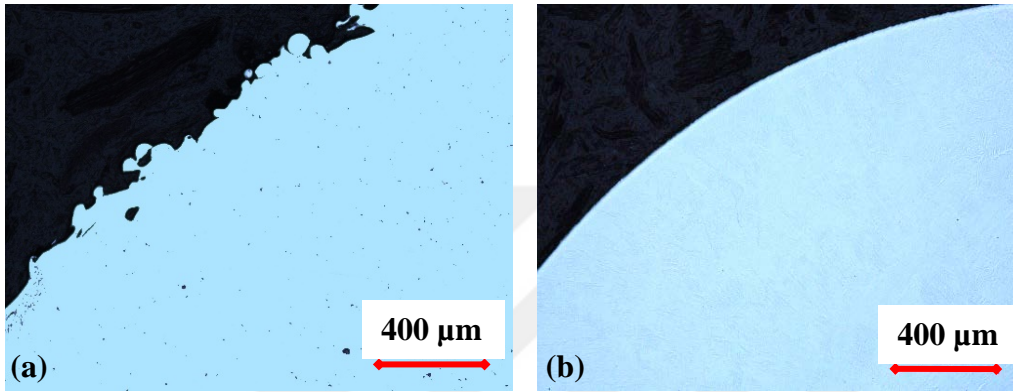
EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımının yüzey pürüzlülükleri hem üretim sonrası hem de talaşlı imalat sonrası yapılan zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra ölçülmüştür. Numunelerin çekme deneyi ölçüm boylarından alınan ortalama yüzey pürüzlülükleri Çizelge 4.2’de yer almaktadır. Ayrıca numunelerin üretim sonrası ve yüzey işleme sonrası yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

EDE ile üretim sonrası numunelerin pürüzlülükleri kısmen erimiş veya erimemiş Ti-6Al-4V tozlarının yüzeye yapışması nedeniyle çok yüksektir. Çizelge 4.2’de verilen ortalama pürüzlülük değerlerinde farklı çaplarda (15 mm, 7.5 mm, 6 mm) üretilen blok, ofset ve standart numunelerin yüzey pürüzlülükleri de birbirlerinden farklıdır. Üretim çapı azaldıkça yüzey pürüzlülük değeri artış göstermektedir. Blok ve ofset üretim sonrası numuneler standart çekme testi numune boyutlarına talaşlı imalat ile getirilip, yüzeylerine ince zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Bu yüzey işlemleri sonrasında yüzey pürüzlülükleri önemli ölçüde giderilmiştir.

Üretim boyutlarındaki değişimin pürüzlülük değerine etkisi, optik profilometre ile yüzeylerin izometrik ve üstten görünüşleri alınıp, yüzey morfolojilerinin ısı haritası çıkartılarak incelenmiştir. Şekil 4.9’da blok, ofset ve standart ölçülerdeki numunelerin merkezlerindeki yüzeylerin ısı haritaları gösterilmiştir. Isı haritalarında numune çapının azalmasıyla yüzeydeki düzensizliğin arttığı gösterilmiştir.

Çizelge 4.2: EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerin üretim sonrası ve yüzey işleme sonrası yüzey pürüzlülükleri.

Numune	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra, $\mu\text{m}$ )
Blok üretim sonrası	$29.5 \pm 7.0$
Ofset üretim sonrası	$39.1 \pm 8.2$
Standart üretim sonrası	$47.2 \pm 5.3$
Blok üretim yüzey işleme sonrası	$0.7 \pm 0.1$
Ofset üretim yüzey işleme sonrası	$0.5 \pm 0.1$



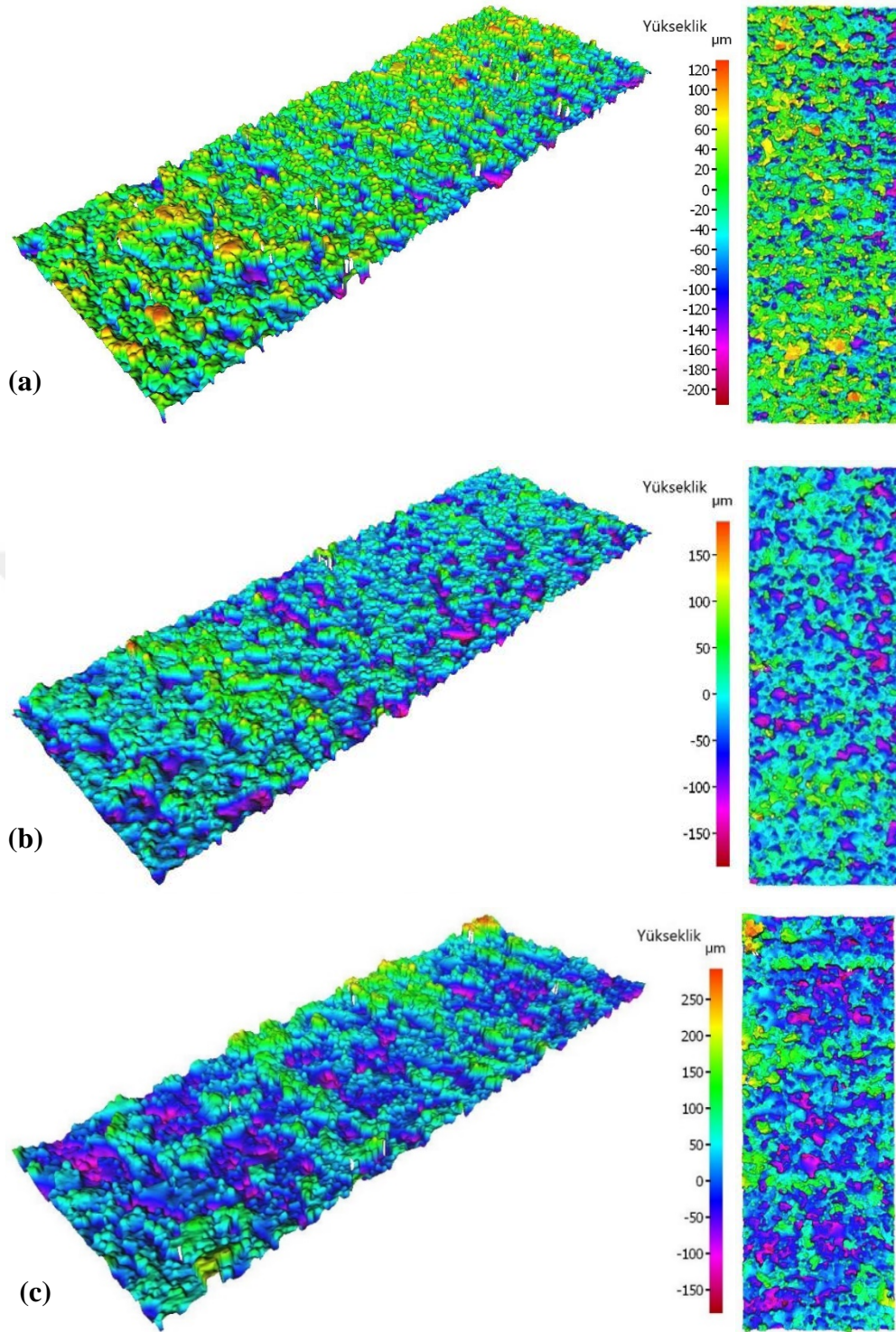
Şekil 4.8: EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımının (a) üretim sonrası ve (b) yüzey işleme sonrası yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri.

Çizelge 4.2’de gösterilen pürüzlülük değerleri numunelerin üretim yönü doğrultusunda alınmıştır. Üretim sonrası numunelerin ayrıca üretim yönüne dikey doğrultuda pürüzlülük değerleri de incelenmiştir (Şekil 4.10).

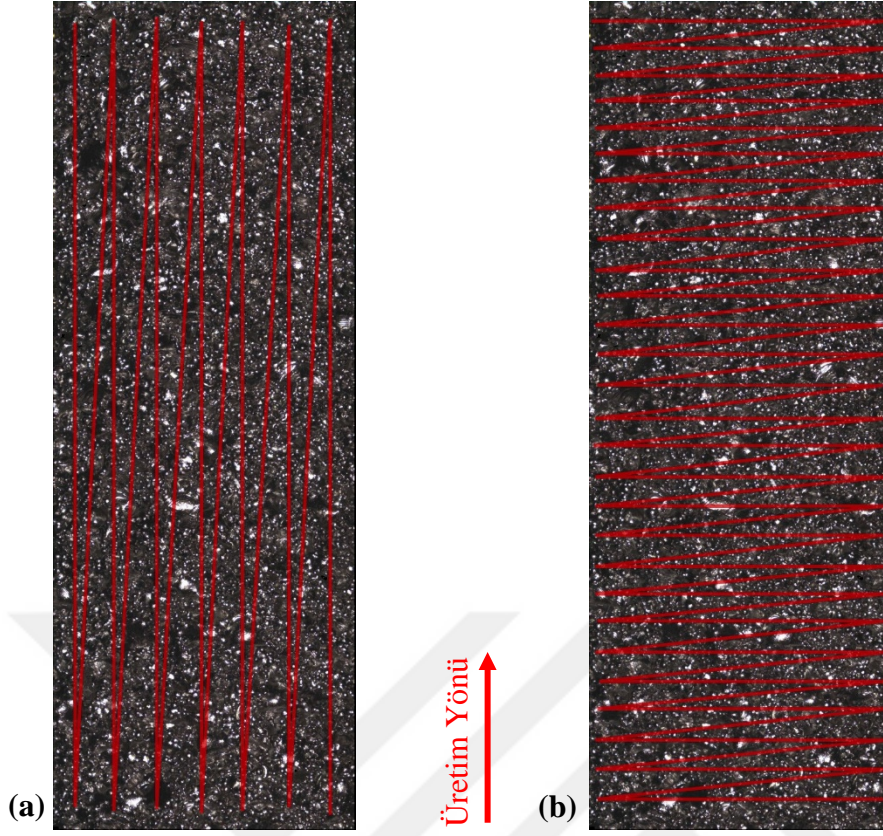
Şekil 4.10’da gösterildiği gibi her iki yönde de alınan pürüzlülük değerlerinin özeti Çizelge 4.3’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri incelendiğinde, parça boyutu fark etmeksizin pürüzlülüğün her iki yönde de birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Bu sonuç EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerinin yüzeylerinde katmanlar arasında basamak etkisi bulunmadığını göstermektedir.

Masuo ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [55] hem SLE hem de EDE yöntemi ile Ti-6Al-4V alaşımından silindir numuneler üretmiş ve yüzey pürüzlülüklerini ölçüp mekanik özelliklerini incelemişlerdir. EDE yöntemi ile üretilen numuneler 32 ile 42  $\mu\text{m}$  aralığında yüzey pürüzlülüğüne sahipken, SLE yöntemi ile üretilen numunelerin pürüzlülüğü 10 ile 13  $\mu\text{m}$  aralığındadır. Tez çalışmasında ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri (Çizelge 4.3) literatürdeki yapılan çalışmalar ile benzerlik göstermektedir.





Şekil 4.9: EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımının yüzeylerinin ısı haritaları. (a) blok (b) ofset ve (c) standart.



Şekil 4.10: EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerin (a) üretim yönünde ve (b) üretim yönüne dikey doğrultuda pürüzlülük ölçüm yönleri.

Çizelge 4.3: EDE yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V üretim sonrası numunelerin üretim yönünde ve üretim yönüne dikeydeki pürüzlülük değerleri.

Numune	Yüzey Pürüzlülüğü Üretim Yönü (Ra, $\mu\text{m}$ )	Yüzey Pürüzlülüğü Üretim Yönüne Dik (Ra, $\mu\text{m}$ )
Blok üretim sonrası	$29.5 \pm 7.0$	$29.5 \pm 7.1$
Ofset üretim sonrası	$39.1 \pm 8.2$	$39.1 \pm 8.2$
Standart üretim sonrası	$47.2 \pm 5.3$	$45.2 \pm 5.9$

Yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapan çalışmalar genellikle üretim sonrası pürüzlülük değerlerini incelemiştir. Denti ve arkadaşları [54] ise SLE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımlarına farklı yüzey işlemlerinin mekanik özelliklere olan etkisi üzerinde çalışmışlardır. Üretim sonrası, talaşlı imalat ile yüzey işleme sonrası, tamburlama ve bilyalama sonrası yüzey pürüzlülükleri ölçülen numunelerin sırasıyla 21.5, 0.23, 18.9 ve 4.83  $\mu\text{m}$  olduğu görülmüştür. Tez çalışmasındaki talaşlı imalat ile yüzeyi işlenen numunelerin (Çizelge 4.2) yüzey pürüzlülüğünün 0.23  $\mu\text{m}$ 'den yüksek çıkmasının (0.5

- 0.7  $\mu\text{m}$ ) nedeni farklı üretim yöntemlerinin kullanılması ve literatürdeki yüzey işleminin hangi parametreler ile yapıldığının belirtilmemiş olmasıdır.

#### 4.4 Mekanik Özellikler

##### Çekme Özellikleri

Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'deki tabla geometrilerinde dikey yönde üretilen blok silindir, ofset silindir ve standart silindir şeklindeki Ti-6Al-4V numunelerin çekme testi sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Blok ve ofset ölçülerde üretilen numuneler Çizelge 3.2'deki talaşlı imalat koşullarında yüzeyleri işlenerek standart çekme numunesi ölçülerine getirilmişlerdir.

Çizelge 4.4: EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerin çekme testi sonuçları.

Numune Şekli	Üretim Yönü	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Süneklik (%Uzama)
Blok Silindir	Dikey	1039 $\pm$ 24	1115 $\pm$ 12	13.8 $\pm$ 1.0
Ofset Silindir	Dikey	1046 $\pm$ 9	1074 $\pm$ 13	4.3 $\pm$ 2.0
Standart Silindir	Dikey	970 $\pm$ 16	996 $\pm$ 18	5.4 $\pm$ 1.8
Blok Dikdörtgen	Yatay	1025 $\pm$ 11	1088 $\pm$ 12	12.9 $\pm$ 0.5
Standart Dikdörtgen	Yatay	1012 $\pm$ 50	1058 $\pm$ 35	6.8 $\pm$ 1.4

Çekme testi sonuçları incelendiğinde, dikey üretimlerde blok ve ofset silindir olarak üretilip standart ölçülere işlenen numunelerin dayanım değerleri birbirlerine yakın çıkmasına rağmen, blok silindir olarak üretilen numuneler çok daha yüksek süneklik göstermiştir. Standart ölçülerde üretilen silindir numuneler en düşük dayanıma ve nihai parça standartları için yeterli olmayan süneklığe sahiptir.

Yatay olarak üretilen dikdörtgen kesitli numunelerde de blok numuneler standart numunelerden daha yüksek çekme özellikleri göstermişlerdir. Dayanım değerlerindeki farklılık yüksek olmamasına rağmen blok dikdörtgen numunelerin süneklığı standart dikdörtgenlerden yaklaşık olarak %90 daha fazladır.

EDE yöntemi ile üretilip yüzeylerinde ikincil bir işlem yapılmayan numunelerin süneklikleri önemli derecede düşüktür. Formanoir ve arkadaşlarının yaptıkları

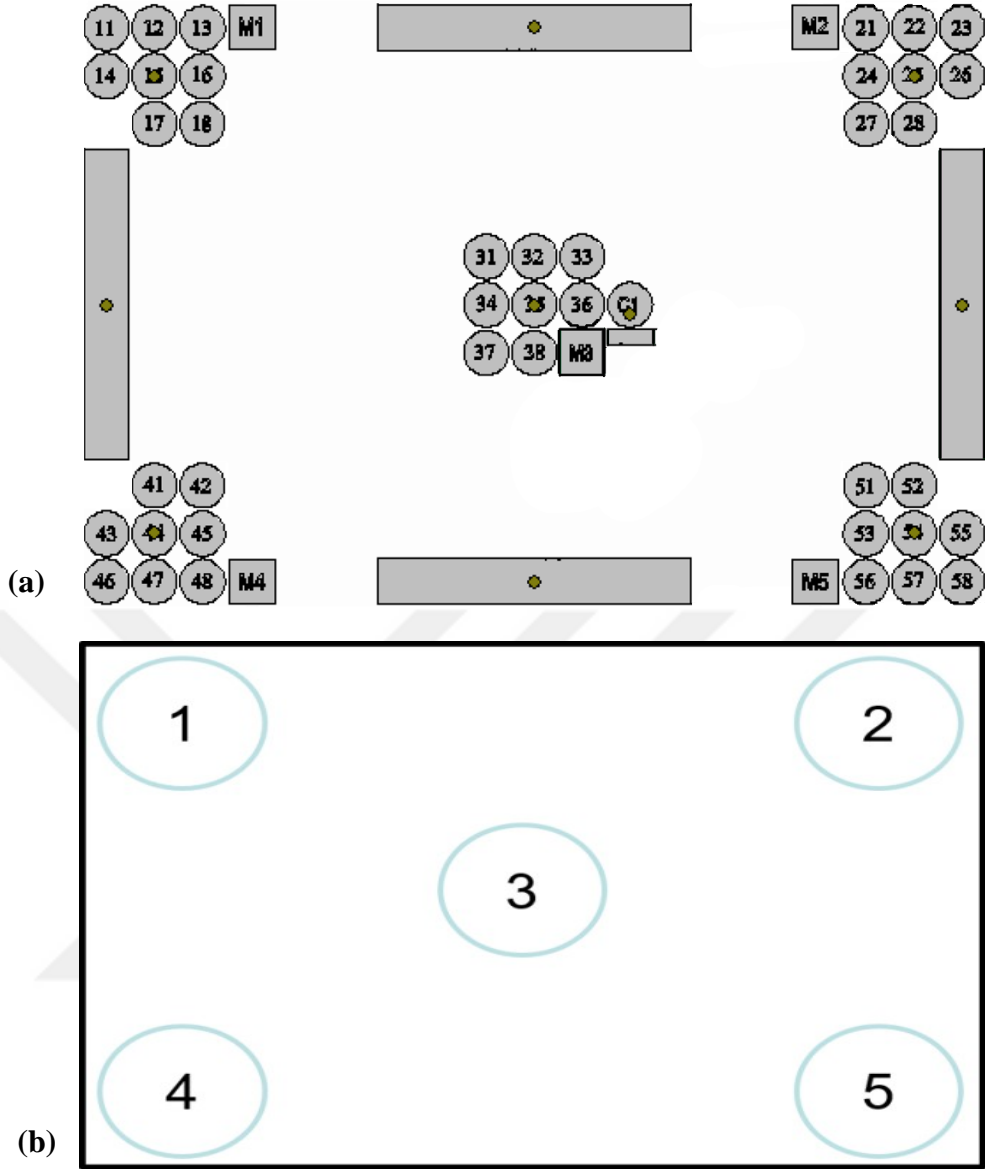
çalışmada [53], Arcam A2 cihazında EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerine hem üretim sonrası hem de yüzey işleme sonrası çekme testleri yapmışlardır. Üretim sonrası numunenin yüzde uzaması 3.6 değerinden yüzey işleme sonrası 8.8 değerine kadar artış göstermiştir. Çalışmada, ikincil işlem olarak sadece yüzey işlemenin çekme özelliklerine etkisini gösterilmiştir.

Blok olarak üretilip standart ölçülere talaşlı imalat ile işlenen numunelerde, üretim yönünün çekme özelliklerinde önemli derecede değişiklik yaratmadığı görülmektedir. Yaklaşık olarak dikey üretim ile yatay üretim arasında %1 uzama farkı bulunmaktadır ve bu değer standart sapma aralığındadır. Yatay ve dikey üretimlerin birbirlerine yakın çekme özellikleri göstermesi yüzey pürüzlülüğü değerlerinde de elde edilen katmanlar arasında merdiven etkisinin olmamasıdır. Katmanların birbirine iyi derecede nüfuz etmesi ile katmanlar arasındaki hatalı bölgeler minimuma indirilmiş ve üretim yönünün mekanik özelliklere olan etkisi ortadan kaldırılmıştır. Standart ölçülerde üretilen numunelerde ise, yatay olarak üretilen numuneler hem dayanım hem de süneklik değerinde daha yüksek ortalamaya sahiptir, ancak bu değerler yine standart sapma aralığında bulunmaktadır.

Çizelge 4.4'deki veriler üretim tablasının ortalamasıdır. Tabla üzerindeki üretim konumunun mekanik özelliklere etkisini incelemek amacıyla silindir şeklindeki numuneler 4 köşe ve 1 merkez olmak üzere 5 farklı bölgeye ayrılmıştır. Tabla geometrisi ve üretim bölgeleri Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4'de maksimum çekme özellikleri gösteren blok silindir olarak üretilen numunelerde konum etkisi incelenmiştir. Üretim konumlarının mekanik özelliklere etkisi Çizelge 4.5'de verilen çekme test sonuçlarında gösterilmektedir. Üretim tablasının merkezinde yer alan numuneler çekme testleri sonucunda köşelerdeki bölgelere göre daha sünek davranış göstermişlerdir. Ancak üretim bölgelerinin çekme testi sonuçlarına etkisi maksimum %5 seviyelerindedir. Bu sonuçlar ile üretim tablasında çekme özelliklerinde homojenlik olduğu ve üretim tablasının her bölgesinde aynı mekanik özelliklerde parça üretilebileceği gösterilmiştir.





Şekil 4.11: (a) Mekanik test numunelerinin üretimi için kullanılan tabla geometrisi ve (b) tabla üzerindeki üretim bölgelerinin konumları.

Hrabe ve Quinn yaptıkları çalışmada da [39] tabla üzerinde farklı konumlarda üretimler yaparak çekme test sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Arcam S12 EDE cihazında hız faktörünün 40 olarak ayarlandığı deneyde, üretim tablasının kenar ve merkezinde, dikey ve yatay yönlerde Ti-6Al-4V alaşımından blok üretimler yapılmıştır. Yatay yönde üretimin akma ve çekme dayanımları dikey yönde üretim ile aynı çıkmasına rağmen, yatay yönde üretilen numunelerin uzama değerleri %12.2, dikey yönde üretilen numunelerin ise %9.0 seviyelerindedir. Üretimin tablanın kenar bölgesinde yapılması termal kütle akışını etkileyen soğuma hızının tabla kenarlarında daha fazla olmasından dolayı, tablanın merkezinde yapılmasına göre malzemenin sünekliğinde yaklaşık %25 azalmaya neden olduğunu göstermişlerdir.

Çizelge 4.5: EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerin konumlarına göre çekme testi sonuçları.

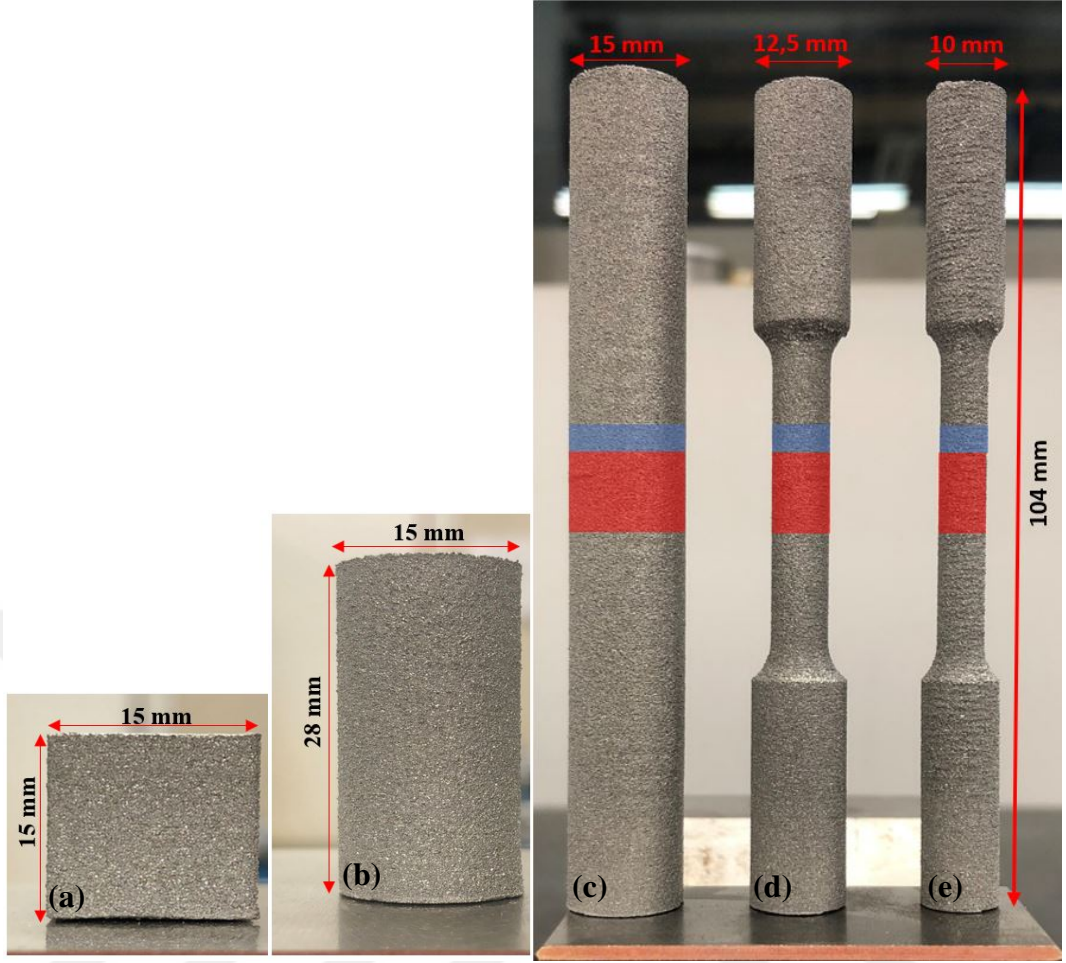
Numune Şekli	Konum	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Süneklik (%Uzama)
Blok Silindir	1. Bölge	1014 ± 1	1115 ± 1	13.8 ± 1.8
	2. Bölge	1026 ± 6	1129 ± 6	13.2 ± 0.4
	3. Bölge	1049 ± 27	1108 ± 14	14.0 ± 1.4
	4. Bölge	1036 ± 16	1109 ± 4	13.9 ± 1.6
	5. Bölge	1062 ± 10	1121 ± 10	13.6 ± 0.1

Literatürdeki benzer çalışmada elde edilen değerler göz önünde bulundurulduğunda, tez çalışmasındaki üretim yönü fark etmeksizin blok numunelerde daha yüksek süneklik değerleri elde edilmiştir. Tez çalışmasındaki üretim tablasının kenar ve merkez bölgelerinde üretilen numunelerin çekme özellikleri arasındaki fark ise literatür değerinden çok daha az seviyede gerçekleşmiştir. Bu sonuçların farklı çıkmasının en temel nedeni üretim parametrelerinin (hız faktörü) farklı olmasıdır. Demet akımı ve tarama hızının üretim sırasında hız faktörüne göre sürekli olarak değiştiği üretim işleminde, literatürdeki çalışmada hız faktörü 40 iken, tez çalışmasında 32 kullanılmıştır. Hız faktörünün 40 olarak kullanıldığı üretim işleminde, Ti-6Al-4V alaşım tozları arasında yayılım sağlanamamış ve yeterli ergimenin olmadığı kusurlar nedeni ile çekme özelliklerinde düşüşe yol açmıştır.

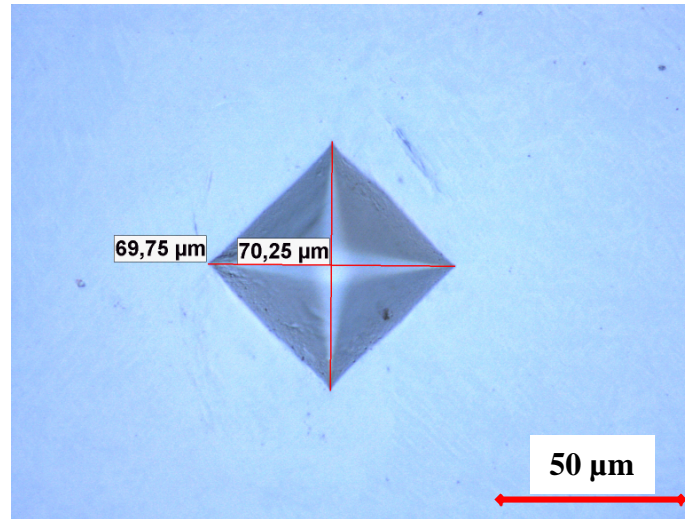
#### 4.5 Mikrosertlik Ölçümleri

EDE yöntemi ile üretilen numunelerin mekanik özelliklerini tanımlamak amacıyla çekme testlerinin yanı sıra mikrosertlik testleri de yapılmıştır. Şekil 3.2'deki tabla geometrisinde bulunan kontrol numunelerinden (Şekil 4.12-a ve b) ve örnek olarak seçilen numuneler (Şekil 4.12c, d ve e) üzerinden yatay ve dikey kesitlerden mikrosertlik testleri uygulanmıştır.

Kontrol numunelerinin yatay ve dikey kesitleri alındıktan sonra hem kenar hem de orta bölgelerinden mikrosertlikler ölçülmüştür. Üretim sırasında kenar (dış kontur) ve merkez (iç kontur) bölgeleri Çizelge 3.1'de gösterildiği gibi farklı üretim parametreleri ile üretilmektedir. Üretim parametrelerinin numune sertliği üzerine etkisi her iki bölgeden de sertlik testi uygulanarak karşılaştırılmıştır. Vickers sertlik testine ait örnek bir görsel Şekil 4.13'de gösterilmiştir.



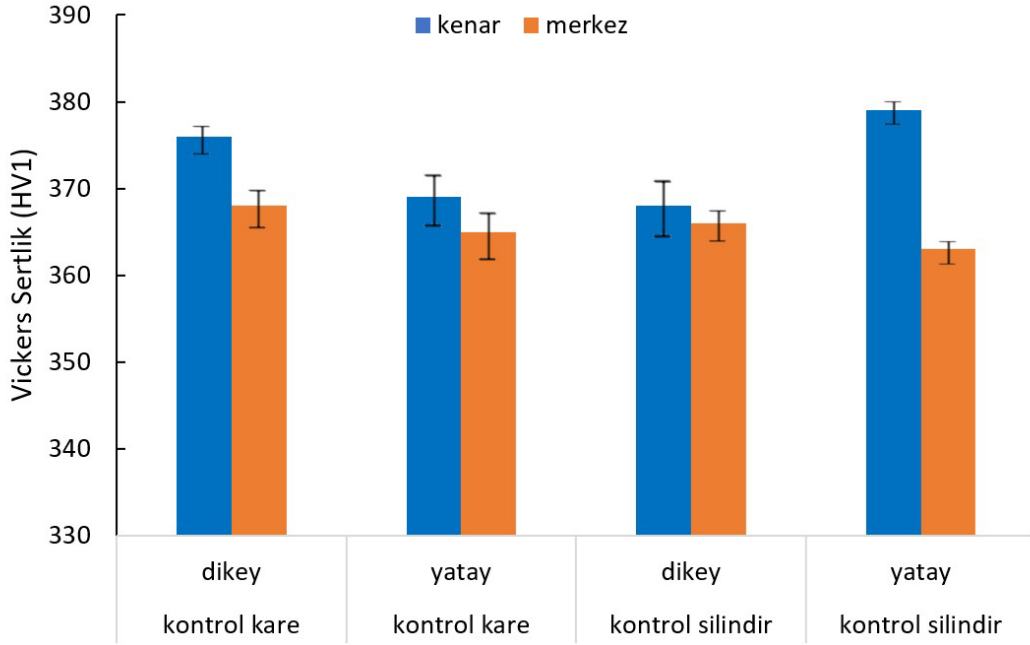
Şekil 4.12: EDE yöntemi ile üretilen kontrol numuneleri (a,b) ve silindir kesitli numunelerden alınan yatay (mavi) ve dikey (kırmızı) kesitler (c,d,e).



Şekil 4.13: Vickers sertlik ölçümlerinden örnek bir çentik görüntüsü.

Şekil 4.14'te gösterilen sertlik değerleri incelendiğinde, numunelerin kenar bölgeleri merkez bölgelerinden daha serttir. Ancak iki bölge arasındaki sertlik farkı mekanik

özellikleri olumsuz etkileyecek düzeyde değildir. Hem üretim parametrelerinin farklı olmasından hem de kenar bölgelerinin ilk soğumanın başladığı yüzey olmasından kaynaklı, kenar ve merkez bölgeleri arasında Şekil 4.14’de gösterilen farklılık oluşmuştur.

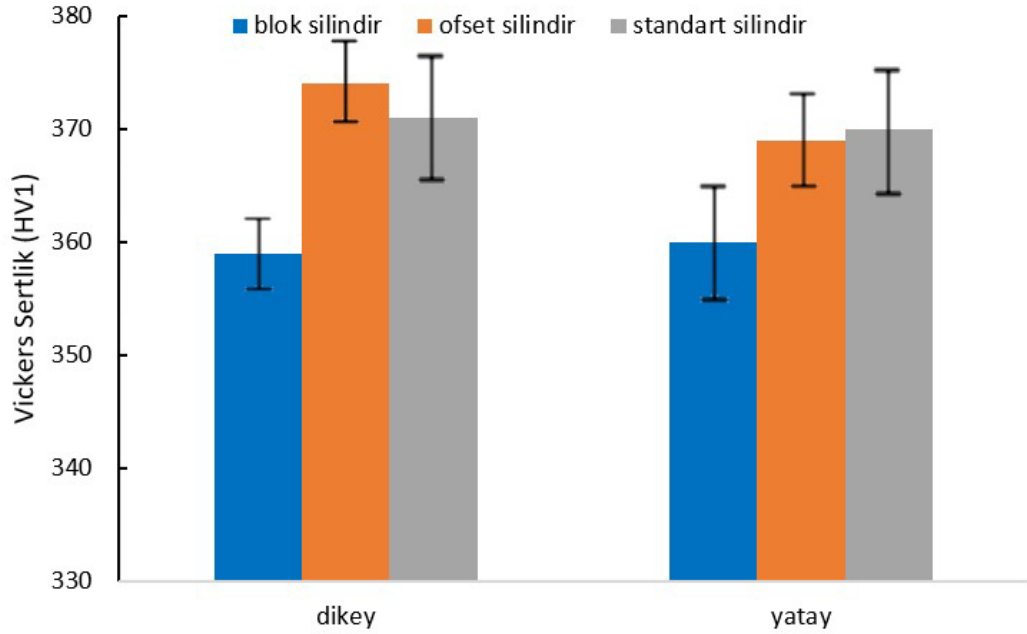


Şekil 4.14: EDE ile üretilmiş Ti-6Al-4V kontrol numunelerinin mikrosertlik değerleri.

EDE ile üretilen numunelerin kenar ve orta bölgelerinin sertlik değerleri arasındaki farklılıktan sonra, üretim çapının sertlik değerlerine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.12-c, d ve e’deki farklı çaplarda üretilen numunelerin yatay ve dikey kesitlerinden sertlik testleri yapılmış ve Şekil 4.15’de gösterilmiştir. Hem dikey hem de yatay kesitlerden alınan sertlik değerlerinde, ofset silindir ve standart silindir numunelerin sertlik değerleri, blok silindir olarak üretilen numunelerden daha yüksek sonuç vermiştir. 7.5 mm ile 6 mm çapındaki numunelerin soğuma hızları arasında sertlik değerlerini önemli ölçüde etkileyecek fark oluşmamıştır. Bu nedenle, ofset ve standart silindir numunelerin sertlik değerleri ise birbirlerine yakın ve standart sapma değerleri içerisindedir. Üretim çapının düşürülmesi ile sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir. Düşük çaptaki numunelerde, numunelerin merkezlerindeki bu sertlik artışı soğuma işleminin merkeze daha hızlı ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Numune merkezlerinde farklı soğuma hızları nedeniyle farklı mikroyapılar elde edilmektedir ve Bölüm 4.6’da incelenecektir.



Hrabe ve Quinn [39], Arcam S12 cihazıyla yaptıkları bir çalışmada, üretilen Ti-6Al-4V parçaların Vickers sertlik değerlerini tez çalışmasında elde edilenlere benzer olarak 360 ile 372 arasında bulmuşlardır.



Şekil 4.15: EDE ile üretilmiş Ti-6Al-4V silindirik numunelerin mikrosertlik değerleri.

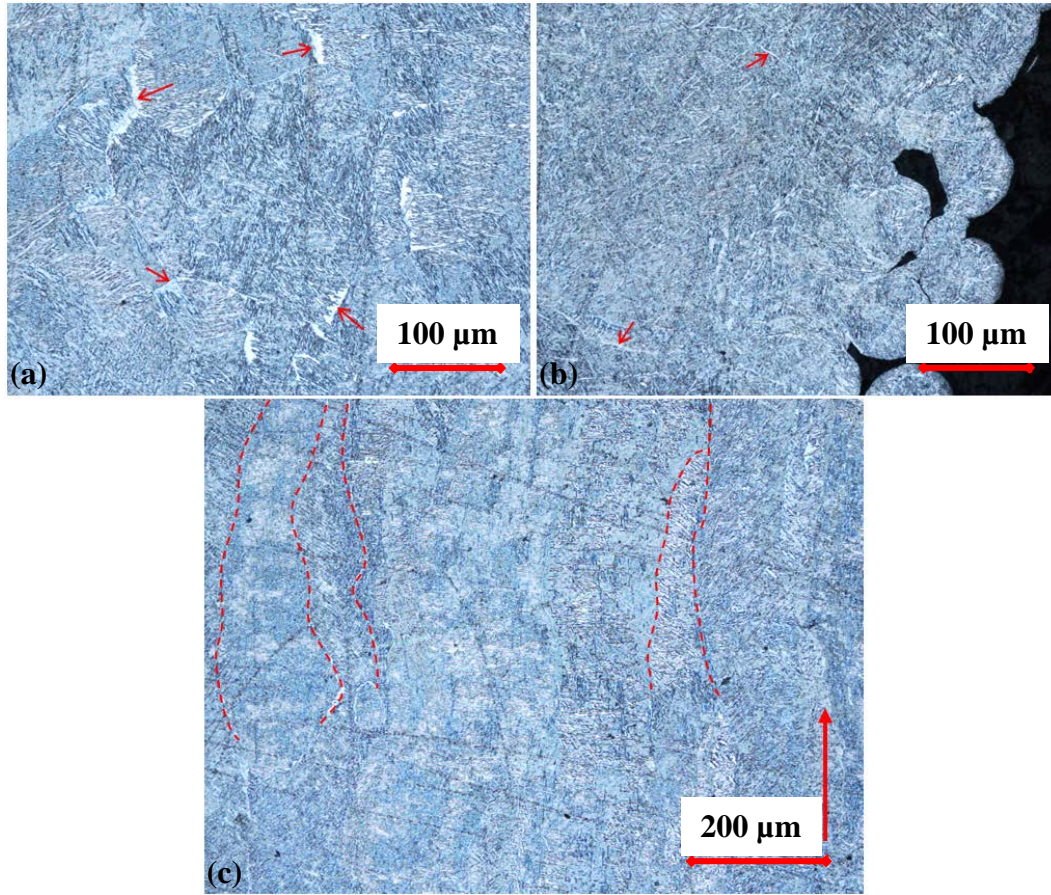
#### 4.6 Mikroyapı İncelemesi

Üç farklı geometride EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerinin mikroyapıları incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri Şekil 4.12’de gösterildiği gibi hem yatay hem de dikey kesitlerin orta bölgeleri üzerinden yapılmıştır. Yatay kesitlerin kenar bölgelerinin de mikroyapıları incelenmiştir.

15 mm çapında üretilen blok numunelerin orta bölgelerinden alınan yatay ve dikey kesitlerin mikroyapıları ile yatay kesitin kenar bölgesinin mikroyapısı Şekil 4.16’da gösterilmiştir. Optik mikroskop görüntülerinde açık renkli olan bölgeler  $\alpha$ , koyu bölgeler ise  $\beta$  fazını göstermektedir. Blok olarak üretilen Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapısı incelendiğinde,  $\alpha$  tane sınırları ile yapraksı  $\alpha + \beta$  mikroyapısından oluştuğu görülmektedir. Yatay kesitin merkez bölgesinde (Şekil 4.16-a)  $\alpha$  tane sınırları belirgin ve tane içerisine doğru genişlemiştir. Yatay kesitin merkez ve kenar bölgelerindeki  $\alpha$  tane sınırları kırmızı oklar ile gösterilmiştir. Numunenin kenar bölgesindeki (Şekil 4.16-b)  $\alpha$  tane sınırları ve  $\alpha + \beta$  yapısı merkez bölgesindeki göre

daha ince yapıdadır. Dikey kesitte (Şekil 4.16-c) üretim yönü ok ile belirtilmiştir. Dikey kesitte oluşan direksi taneler kesikli kırmızı çizgiler ile gösterilmiştir.

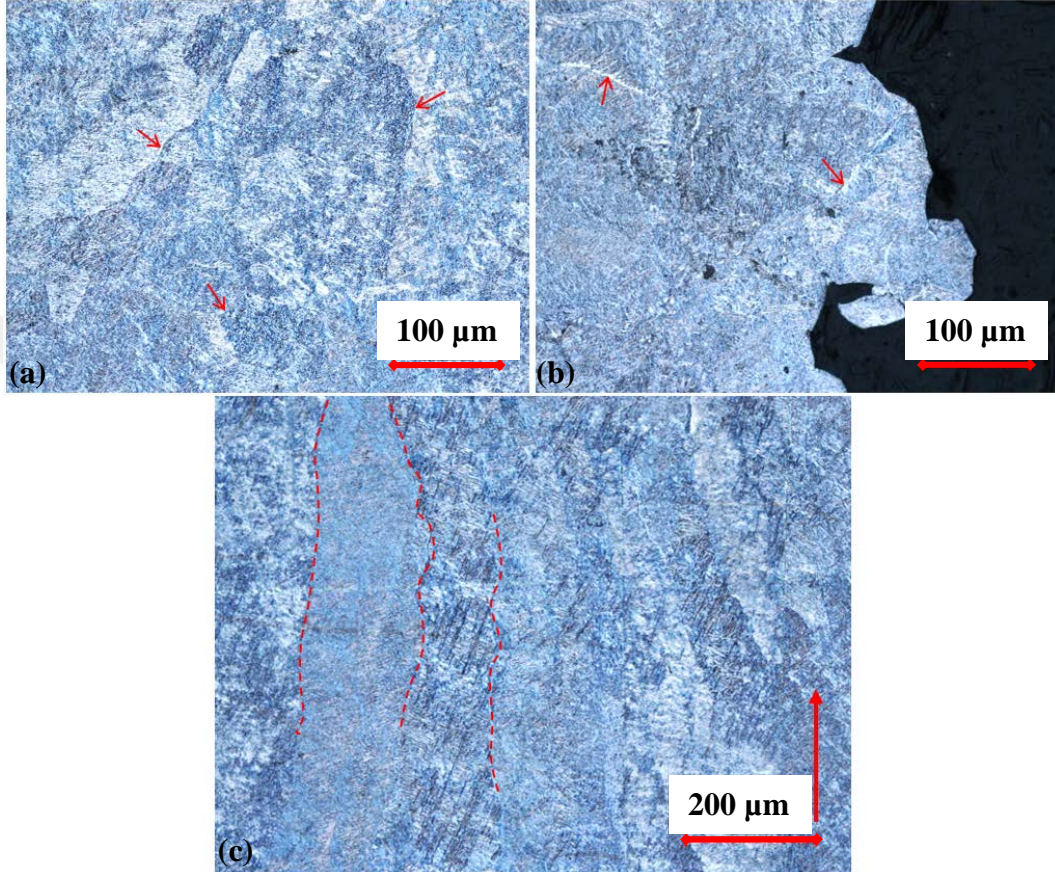
7.5 mm ve 6mm çapında üretilen ofset ve standart numunelerin de orta bölgelerinden alınan yatay ve dikey kesitlerin mikroyapıları ile yatay kesitin kenar bölgesinin mikroyapısı Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Ofset ve standart ölçülerinde üretilen Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapıları incelendiğinde, blok numunede olduğu gibi  $\alpha + \beta$  fazı hakimdir. Ancak merkez bölgelerindeki  $\alpha$  tane sınırları blok numuneye göre daha ince yapıdadır. Dikey kesitlerde (Şekil 4.17-c ve Şekil 4.18-c) üretim yönü ok ile belirtilmiştir. Dikey kesitlerdeki direksi taneler kesikli kırmızı çizgiler ile gösterilmiştir.



Şekil 4.16: EDE yöntemi ile üretilen 15 mm çapındaki Ti-6Al-4V numunesinin (a) yatay-merkez, (b) yatay-kenar ve (c) dikey-merkez bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri.

EDE yöntemiyle Ti-6Al-4V numunelerinin üretim çapının mikroyapıya olan etkisi, yatay kesitlerin merkez bölgelerindeki tane sınırlarında  $\alpha$  fazının yoğunluğundan görülebilmektedir. Blok olarak üretilen numunelerde tane sınırlarındaki  $\alpha$  bölgesi daha

belirgindir. Ofset ve standart üretilen numunelerde ise bu bölgeleri gözlemlemek daha zordur. EDE ile üretim süreci tamamlanıp soğuma işlemi başladığında, blok olarak üretilen numunelerin merkez bölgelerinin soğuması daha uzun süre almaktadır. Yavaş soğuma, Ti-6Al-4V alaşımında tane sınırlarındaki  $\alpha$  fazının kalınlaşması ve tane içerisine büyümesi için gereken süreyi sağlamaktadır.

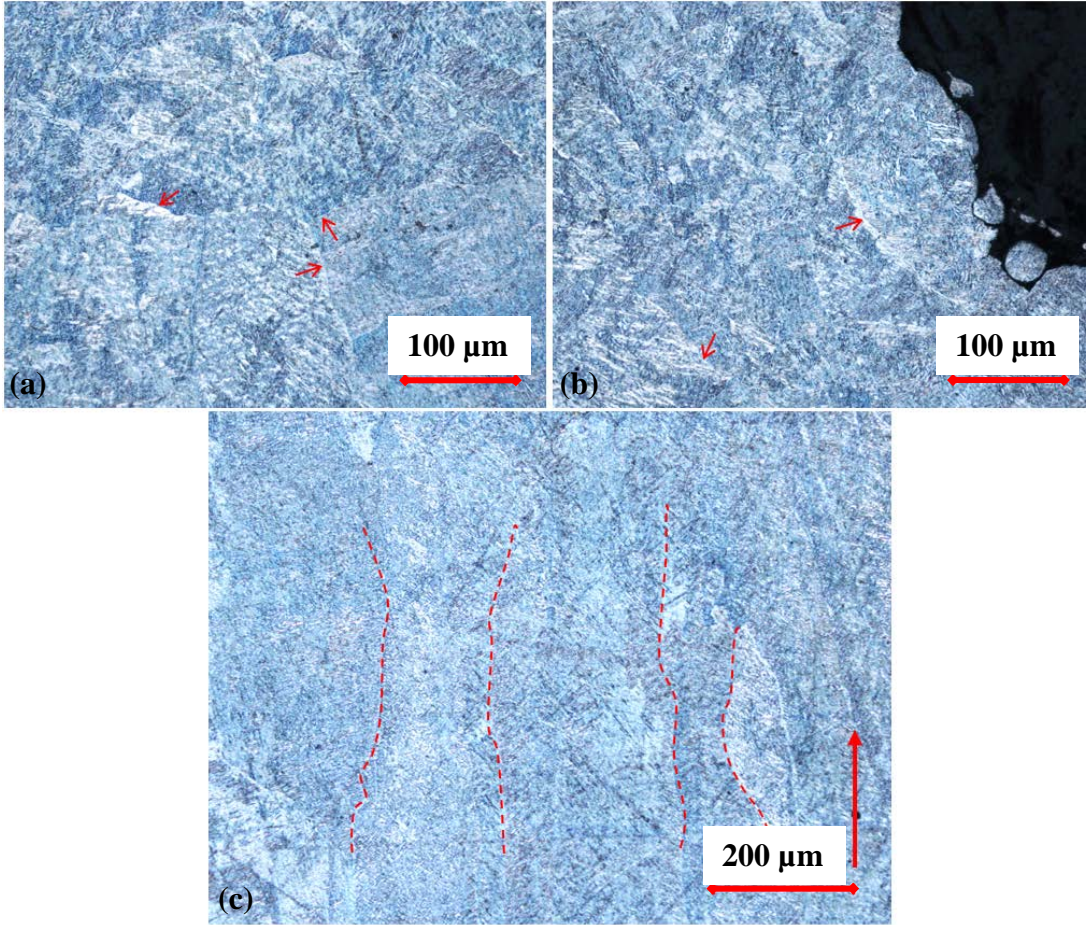


Şekil 4.17: EDE yöntemi ile üretilen 7.5 mm çapındaki Ti-6Al-4V numunesinin (a) yatay-merkez, (b) yatay-kenar ve (c) dikey-merkez bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri.

Numunelerin kenar ve merkez bölgelerindeki mikroyapı farklılığını  $\alpha$  levhalarının kalınlığından göstermek amacıyla yatay kesitlerin TEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 4.19'da gösterilen TEM görüntülerinde koyu renkte görünen  $\alpha$  fazı, açık renk ise  $\beta$  fazıdır. Görüntüler tane içerisinde yer alan  $\alpha + \beta$  fazından alınmıştır ve tane içerisindeki  $\alpha$  fazlarının kalınlıkları Şekil 4.20'de karşılaştırılmıştır. Şekil 4.20'deki değerler incelendiğinde, farklı kalınlıklarda yapılan üretimlerin kenar bölgelerinde 0.6 µm ile 0.85 µm aralığında  $\alpha$  fazı ölçülmüştür. Ancak merkez bölgelerinde, blok ölçülerde üretimin  $\alpha$  fazı ortalama genişliği (1.7 µm), ofset ve standart ölçülerdeki numunelerden (0.7 µm ve 0.75 µm) çok daha fazladır.  $\alpha$  fazının kalınlaşması, soğuma



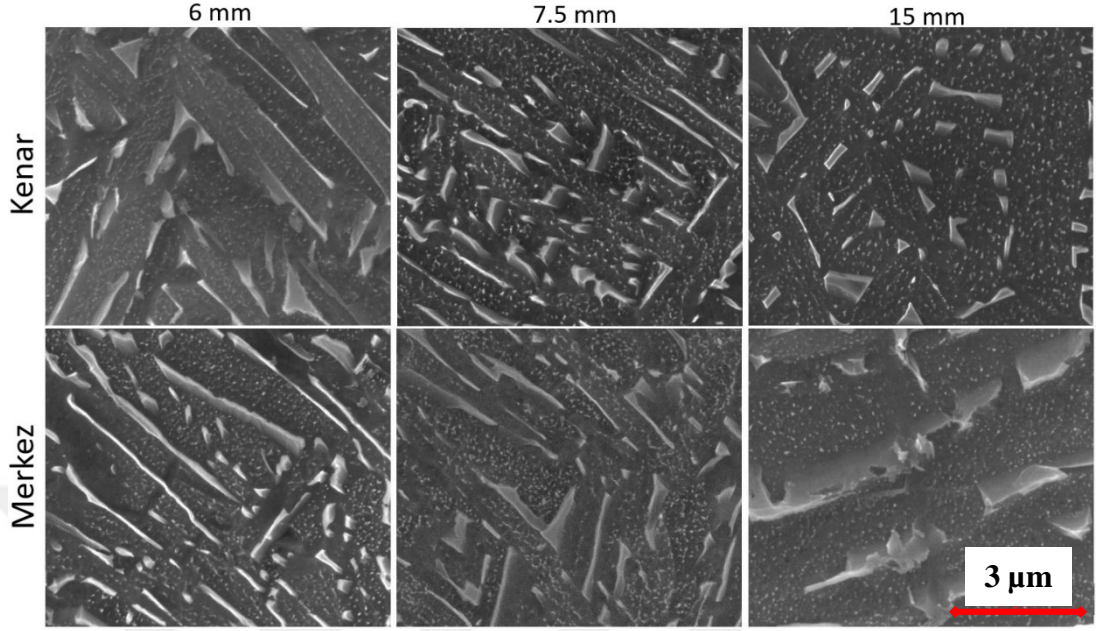
işleminin blok numunelerde daha yavaş olduğunun göstergesidir. Ayrıca Şekil 4.15’de ofset ve standart ölçülerdeki numunelerin daha yüksek sertlik göstermesi  $\alpha$  fazının daha ince olması ile desteklenmektedir.



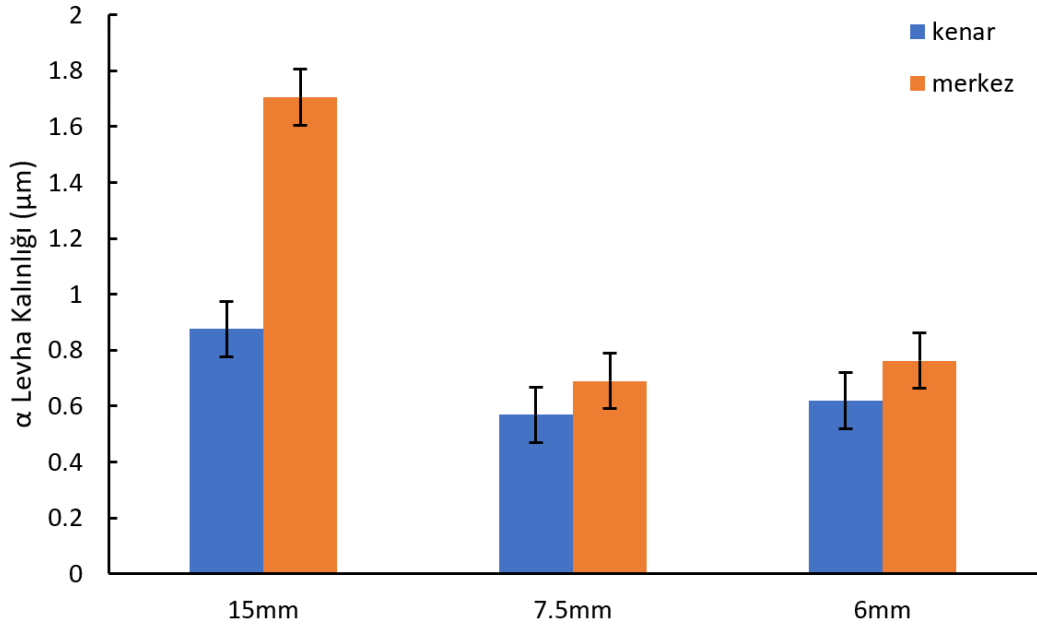
Şekil 4.18: EDE yöntemi ile üretilen 6 mm çapındaki Ti-6Al-4V numunesinin (a) yatay-merkez, (b) yatay-kenar ve (c) dikey-merkez bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri.

Hrabe ve Quinn yaptıkları çalışmada [39] Arcam S12 EDE cihazı ile 14 mm kalınlığında Ti-6Al-4V alaşımında üretim konumu ve yönünün  $\alpha$  levhalarının kalınlıklarına etkisini de incelemişlerdir. Üretim plakasının kenar ve orta bölgelerinde yatay konumda üretilen Ti-6Al-4V numunelerinin mikroyapılarında 0.91  $\mu\text{m}$  ve 0.95  $\mu\text{m}$  kalınlıklarında  $\alpha$  levhaları elde etmişlerdir. Aynı bölgelerde dikey konumda üretilen numunelerin mikroyapılarında ise her iki numunede de 0.96  $\mu\text{m}$  kalınlıklarında  $\alpha$  plakaları görülmüştür. Tez çalışmasında 15 mm çapında üretilen numunelerin kenar bölgesi ile literatür değerleri yakındır. Ancak tez çalışmasında blok numunenin merkez bölgesinde daha kaba yapıda  $\alpha$  levhaları elde edilmiştir. EDE

cihazının farklı modelde olması, soğutma işleminde farklı hızların görülmesine ve böylelikle farklı mikroyapıda numunelerin elde edilmesine neden olabilmektedir.



Şekil 4.19: EDE yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerinin kenar ve merkez bölgelerindeki mikroyapıların TEM görüntüleri.



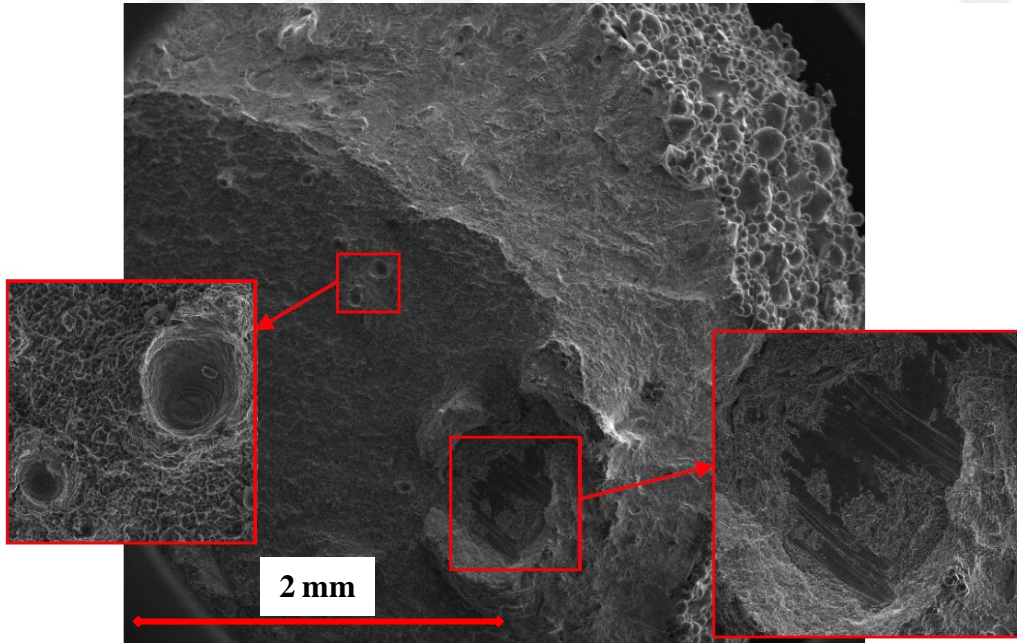
Şekil 4.20: EDE yöntemi ile farklı geometri ve çaplarda üretilen (15 mm, 7.5 mm ve 6 mm) Ti-6Al-4V numunelerinin kenar ve merkez bölgelerindeki α levha kalınlıkları.

#### 4.7 Kırık Yüzey İncelemesi

EDE yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V numunelerin çekme testi sonrasında kırık yüzeyleri de incelenmiştir. Kırık yüzeylerde oluşan geometriler malzemenin sünek veya gevrek olduğunu, üretim sırasındaki hataları ve kusurları göstermektedir.

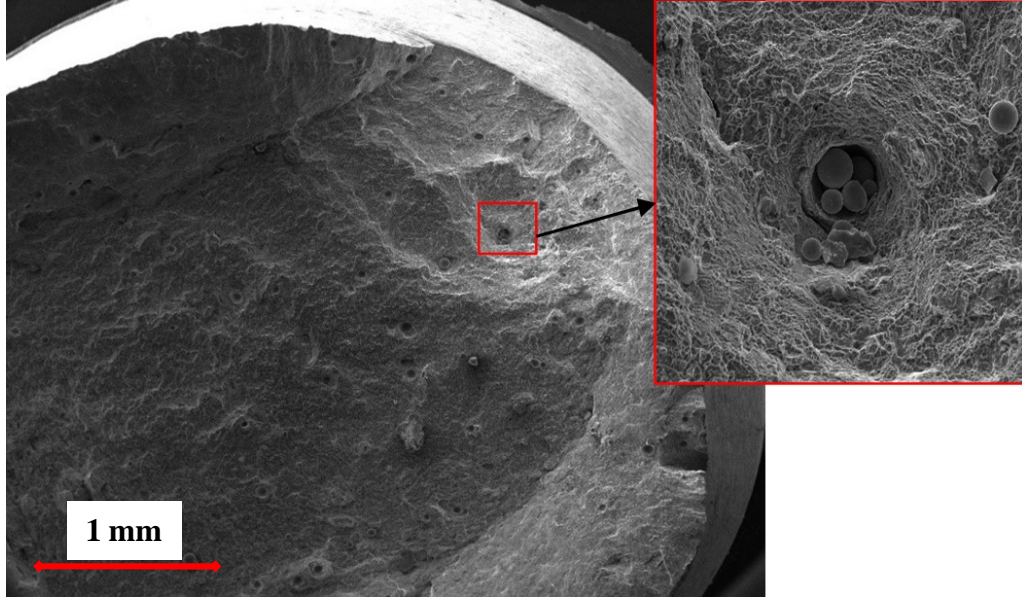
Standart boyutlarda üretilen Ti-6Al-4V alaşımının çekme testi sonrasında kırık yüzeyinin TEM görüntüsü Şekil 4.21’de gösterilmiştir. EDE yöntemi ile üretim sırasında ergimenin sağlanamadığı bölgeler ile katmanlar arasında yeterli oranda yayınının oluşmadığı yerler standart boyutlarda üretilen numunenin kırık yüzeyinde bulunmaktadır. Şekil 4.21’de gösterilen kırık yüzeydeki parlak bölge ani kırılmalara ve dayanım düşüşlerine neden olmaktadır.

Blok silindir olarak üretilip standart ölçülere işlenen numunelerin kırık yüzey örneği ise Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Bu kırık yüzeydeki yırtılmalardan kaynaklanan çukurlu kopma bölgelerinin yaygınlığı numunenin plastik deformasyon derecesini göstermektedir. Blok silindir numunesinin kırık yüzeyinde bu ince çukurlar yaygın olarak bulunmaktadır. Bunun yanında ergitme işleminin yapılamadığı toz kütlelerinin oluşturduğu gözenekler Şekil 4.22’de görülmektedir.



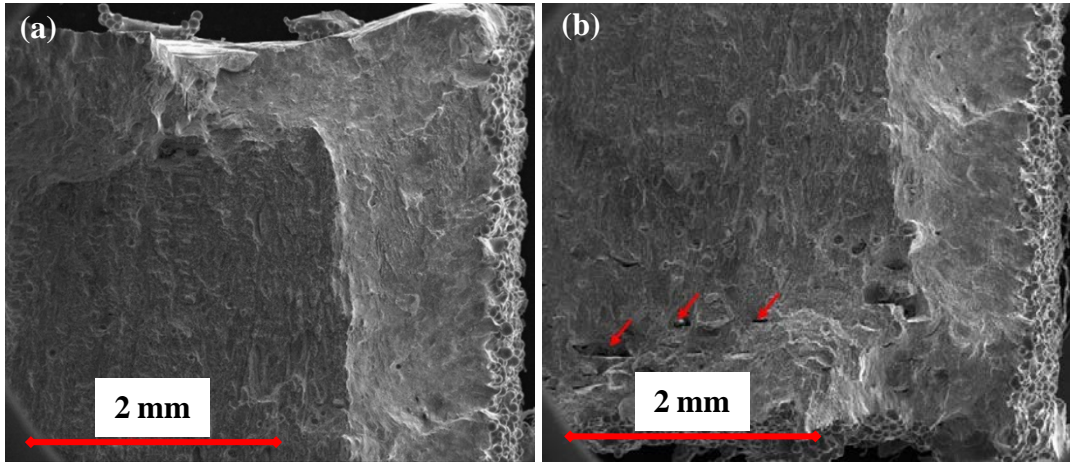
Şekil 4.21: EDE yöntemi ile standart ölçülerde üretilen Ti-6Al-4V numunenin kırık yüzeyi.





Şekil 4.22: EDE yöntemi ile blok silindir olarak üretilen Ti-6Al-4V numunenin kırık yüzeyi.

EDE yöntemiyle standart ölçülerde yatay konumda üretilen Ti-6Al-4V dikdörtgen kesitli numunenin kırık yüzeyi Şekil 4.23’de gösterilmektedir. Standart ölçülerde yatay konumda üretimin yapılabilmesi için numunelerin alt kısımlarına destek yapıları konulmuştur. Numunede bu destek yapılarının bulunduğu tarafta (Şekil 4.23-b) sık aralıklarla gözenekler görülmektedir. Bu gözenekler nedeniyle çekme testi sırasında boşlukların bulunduğu bölgelerde gerilme yığılmaları oluşmakta ve ani kırılmalar meydana gelebilmektedir.



Şekil 4.23: EDE yöntemi ile standart ölçülerde üretilen dikdörtgen kesitli Ti-6Al-4V numunenin (a) üst bölgesinden ve (b) destek bölgesinden kırık yüzeyleri.

Wang ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada [60] kırık yüzeylerdeki kusurları 3 farklı kategoride tanımlamışlardır. Bu kategorilere göre Şekil 4.21’de gösterilen küresel kusurlar tip-1 gözenek, Şekil 4.22’deki kusur ergimenin gerçekleştirilemediği toz bölgesi ve Şekil 4.23’deki kusurlar ise tip-2 gözenek olarak sınıflandırılmıştır.





## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımından elektron demetiyle ergitme yöntemi ile dikdörtgen bir üretim tablası üzerinde blok, ofset ve standart ölçülerde (çap 15 mm, 7.5 mm, 6 mm), köşeler ve merkez bölgesinde dikey, kenar bölgelerde ise yatay konumda üretilen numunelerin yoğunluk ve yüzey pürüzlülük ölçülmüş, çekme testi ve mikrosertlik testi yapılmış, mikroyapıları ve kırık yüzeyleri incelenmiştir. Ayrıca üretimde kullanılan Ti-6Al-4V alaşım tozuna üretim süreçlerinin etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

- Üretim sürecine bağlı olarak, elektron demeti ile ergitme yönteminde kullanılan Ti-6Al-4V alaşım tozlarının, üretim sonrasındaki elek altı toz boyutlarında yaklaşık olarak %20 azalma gözlenmiş ve üretim sürecinin tozların kimyasal bileşimini değiştirmedeği belirlenmiştir.
- Elektron demeti ile ergitme yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerinde en yüksek yoğunluk (%99.4) çapı 15 mm olan blok numunelerde gözlenmiş, yüzey pürüzlülüğü ise numune çapı azaldıkça yaklaşık olarak %38 oranında artmıştır. Elektron demeti ile ergitme yöntemi ile üretilen parçalardaki yüksek yüzey pürüzlülüğü, (çap 6 mm Ra = 47.2  $\mu$ m, çap 15 mm Ra = 29.5  $\mu$ m), kritik parçalarda üretim sonrası ikincil işlem olarak talaş imalat işlemlerini gerektirmektedir.
- Üretim yönü ve konumu fark etmeksizin en yüksek çekme özellikleri blok numunelerde elde edilmiştir (akma dayanımı=1039 MPa, çekme dayanımı=1115 MPa, %uzama=13.8 MPa). Üretim tablasında, soğumanın ilk başladığı bölge olan köşelerdeki numuneler merkezde bulunan numunelere göre daha düşük çekme özellikleri göstermiştir.
- Soğumanın ilk başladığı yüzey olmasından kaynaklı, üretim geometrisi fark etmeksizin numunelerin kenar bölgelerinin mikrosertlik değerleri merkez bölgelerinden yaklaşık olarak %4 daha yüksektir. Çapı 15 mm olan blok numunelerde soğuma işleminin daha uzun sürmesi nedeni ile, blok

numunelerin merkez bölgesi ofset ve standart ölçülerde üretilen numunelere göre yaklaşık olarak %3 daha düşük sertlik değerine sahiptir.

- Üretilen Ti-6Al-4V numunelerinin mikroyapılarında iki fazlı  $\alpha + \beta$  mikroyapısı (Widmanstätten) hakimdir. Soğuma hızına bağlı olarak, her çap değerinde numunelerin kenar bölgesinin mikroyapısı merkez bölgesine göre daha incedir. Ofset ve standart numunelerin  $\alpha$  plakalarının kalınlığı yaklaşık olarak  $0.7 \mu\text{m}$  iken, blok numuneler  $1.7 \mu\text{m}$  kalınlığında  $\alpha$  plakalarına sahiptir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Leyens, C., Peters M.**, (2003) “*Titanium and Titanium Alloys - Fundamentals and Applications*”, WILEY - VCH Verlag GmbH & Co. KgaA: Weinheim, Germany.
- [2] **Boyer, R.R.**, (1996) “An overview on the use of titanium in the aerospace industry”. *Material Science and Engineering A*, vol. 213, pp. 103-114.
- [3] **Peters, M., Kumpfert, J., Ward, C.H., Leyens C.**, (2003) “Titanium Alloys for Aerospace Applications”, *Advanced Engineering Materials*, vol. 5, no. 6, pp. 419-427.
- [4] **Liu, X., Chu, P.K., Ding, C.**, (2004) “Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications”, *Materials Science and Engineering R*, vol. 47, pp. 49-121.
- [5] **Veiga, C., Davim, J.P., Loureiro, A.J.R.**, (2012) “Properties and Applications of Titanium Alloys: A Brief Review”, *Review on Advanced Materials Science*, vol. 32, pp. 133-148.
- [6] **Akyol, S.**, (2007) “*Ti6Al4V Titanyum Alaşımının İşlenebilirliğinin Isıl İşlem Yardımıyla Arttırılması*”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [7] **Topçuoğlu, M.**, (2006) “*Microstructural and Electrochemical Characterization of Ti-6Al-4V ELI Alloy*”, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- [8] **Lütjering, G.**, (1998) “Influence of processing on microstructure and mechanical properties of ( $\alpha + \beta$ ) titanium alloys”, *Materials Science and Engineering A*, vol. 243, pp. 32-45.
- [9] **Sing, S.L., An, J., Yeong, W.Y., Wiria, F.E.**, (2016) “Laser and Electron-Beam Powder-Bed Additive Manufacturing of Metallic Implants: A Review on Processes, Materials and Designs”, *Journal of Orthopaedic Research*, vol. 34, pp. 369-385.
- [10] **Pinke, P., Rêger, M.**, (2005) “Heat Treatment of The Casted Ti6Al4V Titanium Alloy”, *Material Science and Technology*, vol. 5, pp. 1-6.
- [11] **Bremen, S., Meiners, W., Diatlov, A.**, (2012) “Selective Laser Melting: A Manufacturing Technology for The Future?”, *Laser Technik Journal*, vol. 9(2), pp.33-38.
- [12] **ASTM F1108-14**, *Standard Specification for Titanium-6Aluminum-4Vanadium Alloy Castings for Surgical Implants (UNS R56406)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org
- [13] **ASTM F1472-14**, *Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium Alloy for Surgical Implant Applications (UNS R56400)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org
- [14] **ASTM F2924-14**, *Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-*

- 6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org
- [15] **Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B.,** (2015) “*Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*”, New York: Springer.
- [16] **Peacock, G.J.,** (1903), *Method of Making Composition Horseshoes*, US Patent Office 746143.
- [17] **Yang, L., Hsu, K., Baughman, B., Godfrey, D., Medina, F., Menon, M., Wiener, S.,** (2017) “*Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*”, New York: Springer.
- [18] **Castillo, H.I.M., Torres, J.E.P.,** (2009) “Rapid Prototyping and Manufacturing: A Review of Current Technologies”, *Proceedings of the ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Florida, USA.
- [19] **Hopkinson, N., Hague, R.J.M., Dickens, P.M.,** (2006) “*Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*”, John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, England.
- [20] **Additive Manufacturing News,** erişim adresi: <https://www.additive-manufacturing.media/news/gkn-reduces-components-on-rocket-nozzle-with-the-help-of-am>, erişim tarihi: Temmuz 2019.
- [21] **Murr L. E., Gaytan S., Ramirez D., Martinez E., Martinez J., Hernandez J., Amato K., Shindo P., Medina F., Wicker R.** (2012) “Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies”, *Journal of Materials Science and Technology*, vol. 28(1), pp. 1-14.
- [22] **Chua, C.K., Leong, K.F.** (2017) “*3D Printing and Additive Manufacturing Principles and Applications*”, World Scientific Publishing, Singapore.
- [23] **Goh, G.D., Agarwala, S., Goh, G.L., Dikshit, V., Sing, S.L., Yeong, W.Y.** (2017) “Additive Manufacturing in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): Challenges and Potential”, *Aerospace Science and Technology*, vol. 63, pp. 140-151.
- [24] **Kruth, J.P., Levy, G., Klocke, F., Childs, T.H.C.** (2007) “Consolidation Phenomena in Laser and Powder-Bed Based Layered Manufacturing”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 56-2, pp. 730-759.
- [25] **El-Sayed, M., Ghazy, M., Yehia, Y., Essa, K.** (2018) “Optimization of SLM Process Parameters for Ti6Al4V Medical Implants”, *Rapid Prototyping Journal*, <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2018-0112>
- [26] **Sing, S.L., An, J., Yeong, W.Y., Wiria, F.E.** (2016) “Laser and Electron-Beam Powder-Bed Additive Manufacturing of Metallic Implants: A Review on Processes, Materials and Designs”, *Journal of Orthopaedic Research*, vol. 34, pp. 369-385.
- [27] **Körner, C.** (2016) “Additive Manufacturing of Metallic Components by Selective Electron Beam Melting – A Review”, *International Materials Reviews*, vol. 61-5, pp. 361-377.
- [28] **Lewandowski, J.J., Seifi, M.** (2016) “Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties”, *Annual Review of Materials Research*, vol. 46, pp.

151-186.

- [29] **EBM Hardware**, erişim adresi: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/hardware/>, erişim tarihi: Temmuz 2019.
- [30] **Bhavar, V., Kattire, P., Patil, V., Khot, S., Gujar, K., Singh, R.** (2014) "A review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing", *4th International Conference and Exhibition on Additive Manufacturing Technologies*, Bangalore, India.
- [31] **Edwards, P., O'conner, A., Ramulu, M.** (2013) "Electron Beam Additive Manufacturing of Titanium Components: Properties and Performance", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 135, pp. 1-7.
- [32] **Das, S., Wohlert, M., Beaman, J.J., Bourell, D.L.** (1999) "Processing of Titanium Net Shapes by SLS/HIP", *Materials and Design*, vol. 20, pp. 115-121.
- [33] **Wautle, R., Vrancken, B., Beynaerts, B., Jorissen, K., Schrooten, J., Kruth, J.P., Humbeeck, J.V.** (2015) "Effects of Build Orientation and Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V Lattice Structures", *Additive Manufacturing*, vol. 5, pp. 77-84.
- [34] **Murr, L.E., Quinones, S.A., Gaytan, S.M., Lopez, M.I., Rodela, A., Martinez, E.Y., Hernandez, D.H., Martinez, E., Medina, F., Wicker, R.B.** (2009) "Microstructure and Mechanical Behavior of Ti-6Al-4V Produced by Rapid-Layer Manufacturing, for Biomedical Applications", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 2, pp. 20-32.
- [35] **Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J.V., Kruth, J.P.** (2010) "A Study of the Microstructural Evolution During Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V", *Acta Materialia*, vol. 58, pp. 3303-3312.
- [36] **Wang, Z., Xiao, Z., Tse, Y., Huang, C., Zhang, W.** (2019) "Optimization of Processing Parameters and Establishment of A Relationship Between Microstructure and Mechanical Properties of SLM Titanium Alloy", *Optics and Laser Technology*, vol. 112, pp. 159-167.
- [37] **Song, B., Dong, S., Zhang, B., Liao, H., Coddet, C.** (2012) "Effects of Processing Parameters on Microstructure and Mechanical Property of Selective Laser Melted Ti6Al4V", *Materials and Design*, vol. 35, pp. 120-125.
- [38] **Rafi, H.K., Karthik, N.V., Gong, H., Starr, T.L., Stucker, B.E.** (2013) "Microstructures and Mechanical Properties of Ti6Al4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 22, pp. 3872-3883.
- [39] **Hrabe, N., Quinn, T.** (2013) "Effects of Processing on Microstructure and Mechanical Properties of A Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) Fabricated Using Electron Beam Melting (EBM), Part 1: Distance from Build Plate and Part Size", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 573, pp. 264-270.
- [40] **Hrabe, N., Quinn, T.** (2013) "Effects of Processing on Microstructure and Mechanical Properties of A Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) Fabricated Using Electron Beam Melting (EBM), Part 2: Energy Input, Orientation, and Location", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 573, pp. 271-277.
- [41] **Formanoir, C., Michotte, S., Rigo, O., Germain, L., Godet, S.** (2016) "Electron

- beam melted Ti-6Al-4V : Microstructure, texture and mechanical behaviour of the as-built and heat treated material ”, *Materials Science and Engineering A*, vol. 652, pp. 105-119.
- [42] **Safdar, A., Wei, L.Y., Snis, A., Lai, Z.** (2012) “Evaluation of Microstructural Development in Electron Beam Melted Ti-6Al-4V”, *Materials Characterization*, vol. 65, pp. 8-15.
- [43] **Galarraga, H., Warren, R.J., Lados, D.A., Dehoff, R.R., Kirka, M.M., Nandwana, P.** (2017) “Effects of Heat Treatments on Microstructure and Properties of Ti-6Al-4V ELI Alloy Fabricated by Electron Beam Melting (EBM)”, *Materials Science and Engineering A*, vol. 685, pp. 417-428.
- [44] **Al-Bermani, S.S., Blackmore, M.L., Zhang, W., Todd, I.** (2010) “The Origin of Microstructural Diversity, Texture and Mechanical Properties in Electron Beam Melted Ti-6Al-4V”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 41A, pp. 3422-3434.
- [45] **Murr, L.E., Esquivel, E.V., Quinones, S.A., Gaytan, S.M., Lopez, M.I., Martinez, E.Y., Medina, F., Hernandez, D.H., Martinez, E., Martinez, J.L., Stafford, S.W., Brown, D.K., Hoppe, T., Meyers, W., Lindhe, U., Wicker, R.B.** (2009) “Microstructures and Mechanical Properties of Electron Beam-Rapid Manufactured Ti-6Al-4V Biomedical Prototypes Compared to Wrought Ti-6Al-4V”, *Materials Characterization*, vol. 60, pp. 96-105.
- [46] **Galarraga, H., Lados, D.A., Dehoff, R.R., Kirka, M.M., Nandwana, P.**, (2016) “Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4VELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM)”, *Additive Manufacturing*, vol. 5, pp. 47-57.
- [47] **Gong, H., Rafi, K., Gu, H., Ram, G.D.J., Starr, T., Stucker, B.**, (2015) “Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4 V components produced by selective laser melting and electron beam melting”, *Materials and Design*, vol. 86, pp. 545-554.
- [48] **Koike, M., Greer, P., Owen, K., Lilly, G., Murr, L.E., Gaytan, S.M., Martinez, E., Okabe, T.** (2011) “Evaluation of Titanium Alloys Fabricated Using Rapid Prototyping Technologies - Electron Beam Melting and Laser Beam Melting”, *Materials*, vol. 4, pp. 1776-1792.
- [49] **Facchini, L., Magalini, E., Robotti, P., Molinari, A.** (2009) “Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Produced by Electron Beam Melting of Pre-Alloyed Powders”, *Rapid Prototyping Journal*, vol. 15/3, pp. 171-178.
- [50] **Mohammadhosseini, A., Fraser, D., Masood, S.H., Jahedi, M.** (2013) “Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Manufactured by Electron Beam Melting Process”, *Materials Research Innovations*, vol. 17/2, pp. 106-112.
- [51] **Wysocki, B., Maj, P., Sitek, R., Buhagiar, J., Kurzydowski, K.J., Swieszkowski, W.**, (2017) “Laser and Electron Beam Additive Manufacturing Methods of Fabricating Titanium Bone Implants”, *Applied Sciences*, vol. 7, pp. 657-677.
- [52] **Zhai, Y., Galarraga, H., Lados, D.A.**, (2015) “Microstructure Evolution, Tensile Properties, and Fatigue Damage Mechanisms in Ti-6Al-4V Alloys Fabricated

- by Two Additive Manufacturing Techniques”, *Procedia Engineering*, vol. 114, pp. 658-666.
- [53] **Formanoir, C., Michotte, S., Rigo, O., Germain, L., Godet, S.** (2016) “Electron beam melted Ti-6Al-4V : Microstructure, texture and mechanical behaviour of the as-built and heat treated material ”, *Materials Science and Engineering A*, vol. 652, pp. 105-119.
- [54] **Denti, L., Bassoli, E., Gatto, A., Santecchia, E., Mengucci, P.**, (2019) “Fatigue life and microstructure of additive manufactured Ti6Al4V after different finishing processes”, *Materials Science and Engineering A*, vol. 755, pp. 1-9.
- [55] **Masuo, H., Tanaka, Y., Morokoshi, S., Yagura, H., Uchida, T., Yamamoto, Y., Murakami, Y.**, (2018) “Influence of defects, surface roughness and HIP on the fatigue strength of Ti-6Al-4V manufactured by additive manufacturing”, *International Journal of Fatigue*, vol. 117, pp. 163-179.
- [56] **Nicoletto, G., Konecna, R., Drkan, M., Riva, E.**, (2018) “Surface roughness and directional fatigue behavior of as-built EBM and DMLS Ti6Al4V”, *International Journal of Fatigue*, vol. 116, pp. 140-148.
- [57] **Kobryn, P.A., Semiatin, S.L.**, (2001) “Mechanical properties of laser-deposited Ti-6Al-4V”, *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, pp.179-186.
- [58] Arcam EBM Brochure
- [59] **ASTM E8 / E8M-16a**, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [60] **Wang, M., Li, H.Q., Lou, D.J., Qin, C.X., Jiang, J., Fang, X.Y., Guo, Y.B.**, (2019) “Microstructure anisotropy and its implication in mechanical properties of biomedical titanium alloy processed by electron beam melting”, *Material Science and Engineering A*, vol. 743, pp. 123-137.





## EKLER

Çizelge Ek.1: Farklı üretim yöntemleriyle elde edilmiş Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özelliklerinin özeti.

Üretim Yöntemi	Numune	Üretim Yönü	Yoğunluk (%)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Süneklik (%Uzama)	Sertlik (HV)	Pürüzlülük (µm)	Ref.
EDE	Yüzey işleme	Dikey	99.4	830	915	13.1	358 ± 11	-	49
EDE	Yüzey işleme + HIP	Dikey	-	795	870	13.7	351 ± 14	-	49
EDE	Yüzey işleme (iç kısım)	Yatay	-	983	1030	12.2	372 ± 7	-	40
EDE	Yüzey işleme (dış kısım)	Yatay	-	967	1017	12.2	360 ± 8	-	40
EDE	Yüzey işleme (iç kısım)	Dikey	-	984	1033	9.0	368 ± 8	-	40
EDE	Yüzey işleme (dış kısım)	Dikey	-	961	1009	7.1	368 ± 6	-	40
EDE	Yüzey işleme	Dikey	-	882	979	10.7	358 ± 15	8.94	50
EDE	Yüzey işleme + HIP	Dikey	-	877	978	13.5	341 ± 15	8.21	50
EDE	Yüzey işleme	Yatay	-	-	-	-	372 ± 15	-	50
EDE	Yüzey işleme + HIP	Yatay	-	-	-	-	360 ± 15	-	50
EDE	Üretim sonrası	Yatay	-	783	833	2.7	-	-	48
EDE	Üretim sonrası	Dikey	-	812	851	3.6	-	-	48

Üretim Yöntemi	Numune	Üretim Yönü	Yoğunluk (%)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Süneklik (%Uzama)	Sertlik (HV)	Pürüzlülük ( $\mu\text{m}$ )	Ref.
EDE	Üretim sonrası	-	-	740	790	2.2	420	-	48
SLE	Üretim sonrası	-	-	850	920	7.0	390	-	48
Talaşlı İmalat	-	-	-	880	960	14	320	-	48
Döküm	-	-	-	750	875	4.5	330	-	48
EDE	Yüzey İşleme	Dikey	99.6	962	1012	8.8	320	-	47
SLE	Yüzey işleme	Dikey	99.6	1098	1237	8.8	332	-	47
EDE	Yüzey işleme	Yatay	99.4	846	976	15.0	315 $\pm$ 13	-	51
EDE	Yüzey işleme	Dikey	99.4	845	972	14.2	340 $\pm$ 12	-	51
SLE	Yüzey işleme	Yatay	99.2	1273	1421	3.2	370 $\pm$ 19	-	51
SLE	Yüzey işleme	Dikey	99.2	1150	1246	1.4	390 $\pm$ 24	-	51
Talaşlı imalat	-	Dikey	-	836	942	12.5	360 $\pm$ 11	-	51
Talaşlı imalat	-	Yatay	-	832	933	13.0	360 $\pm$ 11	-	51
EDE	Yüzey işleme	Yatay	-	1006	1066	15	-	-	52
EDE	Yüzey işleme	Dikey	-	1001	1073	11	-	-	52
SLE	Yüzey işleme (yüksek güç)	Yatay	-	990	1042	7	-	-	52
SLE	Yüzey işleme (düşük güç)	Yatay	-	1005	1103	4	-	-	52

Üretim Yöntemi	Numune	Üretim Yönü	Yoğunluk (%)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Süneklik (%Uzama)	Sertlik (HV)	Pürüzlülük (µm)	Ref.
SLE	Yüzey işleme + tavlama (yüksek güç)	Yatay	-	991	1044	10	-	-	52
SLE	Yüzey işleme + tavlama (düşük güç)	Yatay	-	1000	1073	9	-	-	52
EDE	Üretim sonrası	Dikey	-	832	-	3.6	-	-	53
EDE	Yüzey işleme	Dikey	-	1055	-	4.6	-	-	53
EDE	Yüzey işleme	Yatay	-	1049	-	1.5	-	-	53
EDE	Yüzey işleme	Dikey	-	997	-	8.8	-	-	53
EDE	Yüzey işleme	Yatay	-	1024	-	7.1	-	-	53
SLE	Yüzey işleme	Dikey	-	1122	1170	10.9	-	0.23	54
SLE	Üretim sonrası	Dikey	-	-	-	-	-	21.5	54
SLE	Tamburlama	Dikey	-	-	-	-	-	18.9	54
SLE	Tamburlama + bilyalama	Dikey	-	-	-	-	-	4.83	54
EDE	Üretim sonrası	Dikey	-	-	1046	20	369 ± 1.9	32 - 42	55
EDE	Üretim sonrası + HIP	Dikey	-	-	986	22	345 ± 2.6	30 - 41	55
SLE	Üretim sonrası	Dikey	-	-	1176	14	378 ± 0.8	10 - 13	55
SLE	Üretim sonrası + HIP	Dikey	-	-	980	22	340 ± 2.1	12 - 13	55
Haddeleme	Yüzey işleme	-	-	-	-	-	310 ± 6.1	-	55

Üretim Yöntemi	Numune	Üretim Yönü	Yoğunluk (%)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Süneklik (%Uzama)	Sertlik (HV)	Pürüzlülük (µm)	Ref.
Haddeleme	Yüzey işleme + HIP	-	-	-	-	-	300 ± 7.0	-	55
EDE	Üretim sonrası	Dikey	-	950	1020	14	-	20.6	56
EDE	Üretim sonrası	Yatay	-	-	-	-	-	17.1	56
SLE	Tavlama	Dikey	-	1104	1176	12.9	-	13.4	56
SLE	Tavlama	Yatay	-	-	-	-	-	13.1	56
YEB	Tavlama	Yatay	-	1066	1112	5.5	-	-	57
YEB	Tavlama	Dikey	-	832	832	0.8	-	-	57
YEB	HIP	Yatay	-	952	1007	13.0	-	-	57
YEB	HIP	Dikey	-	899	1002	11.8	-	-	57
ASTM F1108	-	-	-	758	860	>8	-	-	12
ASTM F1472	-	-	-	860	930	>10	-	-	13

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Fırat MEMU  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 01.08.1992, Samsun  
**E-posta** : fmemu55@gmail.com;  
fmemu@etu.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2019, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2016-2019	TOBB ETÜ	Eğitim Asistanı
2016	SİNTEK	Makine Mühendisi
2015	FNSS Savunma Sistemleri A.Ş.	Stajyer
2014	TürkTraktör ve Ziraat Makineleri A.Ş.	Stajyer
2013	Mitaş Madeni İnşaat İşleri A.Ş.	Stajyer

### YABANCI DİL:

- İngilizce
- Almanca (Sınırlı Çalışma Yetkinliği)

### **TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:**

- Memu, F., Durlu, N., Çiloğlu, K., Arslan Hamat, B., Güleç, Y. (2018). “Effect of Machining and Hot Isostatic Pressing on Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Manufactured by Electron Beam Melting" In Proceedings of the 1st International Conference on Advances in Mechanical and Mechatronics Engineering, Ankara, Turkey.

### **DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:**

- Memu, F., and Durlu, N. (2017). “Experimental and Numerical Study on Green Strength of Ferrous Metal Powders" In Proceedings of the 3rd International Porous and Powder Materials Symposium and Exhibition, Kusadasi, Izmir, Turkey.