



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ELEKTRON DEMETİ İLE ERGİTME
EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE
ÜRETİLEN FARKLI GEOMETRİLERDEKİ
Ti-6Al-4V ALAŞIM MALZEMELERİNE
UYGULANAN İKİNCİL İŞLEMLERİN
MALZEMENİN YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

TOLGA BERKAY ŞİRİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği

Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2021



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ELEKTRON DEMETİ İLE ERGİTME
EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE
ÜRETİLEN FARKLI GEOMETRİLERDEKİ
Ti-6Al-4V ALAŞIM MALZEMELERİNE
UYGULANAN İKİNCİL İŞLEMLERİN
MALZEMENİN YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

TOLGA BERKAY ŞİRİN

(523218001)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği

Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2021

ÖNSÖZ

Yaklaşık üç yıldır birlikte çalışma imkânı bulduğum, İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarında TÜBİTAK ve BAPKO projelerinde bana çalışma imkânı veren ve en önemlisi bu süre içerisinde engin tecrübelerinden yararlandığım tez danışmanım Prof. Dr. Yusuf KAYNAK’a çok teşekkür ederim.

Lisansüstü tez çalışmam süresince İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarında birlikte çalıştığım, her konuda yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Emre Taşcıoğlu, Yusuf Karabulut, Emrah Güneşsu, Mert Kaya ve Nedim Sunay’a çok teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim süresince desteklerini her zaman hissettiğim, üç yıldır beni bu yolda her daim motive eden aileme de sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının yürütülmesi için sağladığı destekleri için ASELSAN firmasına teşekkür ederim. Ayrıca, Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi’ne (BAPKO) FEN-C-YLP-130319-0064 proje numarası ile tez çalışmamı desteklediği için teşekkür ederim.

Temmuz, 2021

Tolga Berkay ŞİRİN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
SEMBOLLER	vi
KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Araştırma Amacı ve Hedefler	4
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	7
2.1. Eklemeli İmalat Terminolojisi, Avantajları ve Dezavantajları	7
2.2. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Sınıflandırılması	10
2.2.1. Elektron Demeti ile Ergitme Yöntemi (EBM) ve Ti-6Al-4V Alaşımı	12
2.2.2. Eklemeli İmalatta Kusurlar ve Tespit Yöntemleri	21
2.2.3. Eklemeli İmalat Yöntemlerinde Kullanılan İkincil İşlemler	23
2.2.3.1. Mekanik İkincil İşlemler	25
2.2.3.2. Termal İkincil İşlemler	29
3. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DÜZENEKLER	35
3.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan İş Parçaları ve Malzeme Cinsi	35
3.2. Elektron Demeti ile Ergitme Eklemeli İmalat Yöntemi Kullanılarak Parça Üretimi	35
3.3. Uygulanan İkincil İşlemlerde Tercih Edilen Cihazlar ve Ekipmanlar	38
3.3.1. CNC İşleme Merkezi ve Frezeleme Operasyonu	38
3.3.2. Kumlama Operasyonu	39
3.3.3. Vibrasyonlu Yüzey İşlem Operasyonu	40
3.3.4. Isıl İşlem Cihazı	41
3.4. Charpy-Impact/Çentik-Darbe Testi	43
3.5. İşlenmiş Numunelerin Yüzey Bütünlüğü Analizi İçin Kullanılan Ekipmanlar	44
3.6. Aşınma Analizi	48
3.7. Hassas Ölçüm	48
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	51
4.1. Yüzey Topoğrafyası	51
4.1.1. İşlem Görmemiş Parçaların Yüzey Topoğrafyaları	51

4.1.2.	İkincil İşlem Uygulanan Parçaların Yüzey Topoğrafyaları	58
4.1.2.1.	Frezeleme Operasyonları Sonucu Meydana Gelen Yüzey Topoğrafyaları	58
4.1.2.2.	Vibrasyonlu Yüzey İşlem Sonucu Meydana Gelen Yüzey Topoğrafyaları	61
4.1.2.3.	Kumlama Operasyonları Sonucu Meydana Gelen Yüzey Topoğrafyaları 66	
4.2.	Yüzey Pürüzlülüğü	68
4.2.1.	İşlem Görmemiş Parçaların Yüzey Pürüzlülüğü.....	69
4.2.2.	İkincil İşlem Uygulanmış Parçaların Yüzey Pürüzlülüğü	72
4.3.	Mikroyapı Analizi.....	80
4.4.	Mikrosertlik Analizi.....	85
4.5.	Çentik-Darbe Testi Analizi	90
4.6.	Aşınma Analizi	94
4.6.1.	Vibrasyonlu Yüzey İşlem ile Meydana Gelen Aşınma	98
5.	SONUÇLAR	103

ÖZET

ELEKTRON DEMETİ İLE ERGİTME EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN FARKLI GEOMETRİLERDEKİ Ti-6Al-4V ALAŞIM MALZEMELERİNE UYGULANAN İKİNCİL İŞLEMLERİN MALZEMENİN YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Bu tez çalışmasında, bir Eklemeli İmalat (Eİ) yöntemi olan Elektron Demeti ile Ergitme (EDE) yöntemi kullanılarak birbirlerinden farklı geometriler ile Ti-6Al-4V alaşım malzemesinden üretilen parçalara uygulanan farklı ikincil işlemlerin yüzey bütünlüğüne etkisi araştırılmıştır.

Geleneksel üretim yöntemlerinde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan talaşlı imalatın yanı sıra, kütsel yüzey bitirme proseslerinden vibrasyonlu yüzey işlem ve yüzey temizleme işlemlerinden kumlama prosesinden yararlanılmıştır. Mekanik ikincil işlemler grubunda yer alan bu yöntemler kullanılarak parçaların yüzey kalitelerinin ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Literatürde bu ikincil işlemlerin, EDE yöntemi ve Ti-6Al-4V alaşımı ile üretilen parçalara uygulaması sınırlı kalmıştır. Bundan dolayı, bu ikincil işlemlerde farklı parametreler de tercih edilmiş, bunun sonucunda bu koşulların da yüzey kalitesine etkisi detaylıca incelenmiştir. İkincil işlemlerin yüzey kalitesine etkisinin incelenmesinin yanı sıra, ısıl işlemler ile birlikte mikroyapıya, mikrosertliğe, tokluğa ve aşınma dayanımına etkisi de araştırılmıştır.

Uygulanan ikincil işlemler sonucu talaşlı imalatın diğer mekanik ikincil işlemlerle karşılaştırıldığında parçanın yüzey kalitesi ve mekanik özellikler üstündeki iyileştirmede daha etkin olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte vibrasyonlu yüzey işlemin ise diğer ikincil işlemlere nazaran parça geometrisi ve toleransları dâhilinde daha kontrollü bir biçimde yüzey iyileştirme yeteneğine sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, Elektron demeti ile ergitme, Ti-6Al-4V, İkincil işlemler, Yüzey bütünlüğü

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF POST-PROCESSING OPERATIONS ON SURFACE INTEGRITY OF Ti-6Al-4V ALLOY WITH VARIOUS GEOMETRIES PRODUCED BY ELECTRON BEAM MELTING ADDITIVE MANUFACTURING

In this thesis, the effect of different post-processes on the surface integrity of parts produced from Ti-6Al-4V alloy with different geometries by using Electron Beam Melting (EBM), which is an additive manufacturing (AM) method, was investigated.

In addition to machining, which is one of the most widely used traditional manufacturing method, vibratory surface finish, which is one of the mass finishing methods, and sandblasting method, which is one of the surface cleaning processes, was used. It is aimed to improve the surface quality and mechanical properties of the parts by using these methods, which are in the group of mechanical post-process. Besides, the application of these post-processing techniques to electron beam melted Ti-6Al-4V alloy has been limited in the literature. However, these post-processes were also applied to heat treated parts using different process parameters. As a result, the effect of these preferred conditions on the surface quality also has been examined in detail.

As a result of the application of the post-processings, it has been observed that the improvement in the surface quality and mechanical properties of the part is more effective compared to other mechanical post-processes. On the other hand, it has been also observed that vibratory surface finish improves in a more controlled manner within the part geometry and tolerances compared to other mechanical post-processes.

Keywords: Additive manufacturing, Electron Beam Melting, Ti-6Al-4V, Post-processes, Surface integrity

SEMBOLLER

α	: Alfa
β	: Beta
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat Derece
nm	: Nanometre
K	: Kelvin
W	: Watt
J	: Joule
Kg	: Kilogram
%	: Yüzde
GPa	: Gigapascal
MPa	: Megapascal
g	: Gram
μ	: Mikron
s	: Saniye
mm	: Milimetre
E	: Enerji Yoğunluğu (J/mm^3)
Ra	: Aritmetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (μm)
Sa	: Alansal Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (μm)
μm	: Mikrometre
N	: Newton
~	: Yaklaşık
keV	: Kilo Elektronvolt
kW	: Kilo Watt
$^{\circ}$	: Derece
mA	: Miliamper
ms	: Milisaniye
lt	: Litre
P	: Lazer Gücü (W)
V	: Lazer Tarama Hızı (mm/s)
h	: Tarama Aralığı (μm)
t	: Katman Kalınlığı (μm)
U	: Hızlanan Voltaj (V)

I	: Katot Akımı (mA)
V	: Elektron Tarama Hızı (mm/s)
l_o	: Tarama Aralığı (μm)
l_t	: Katman Kalınlığı (μm)
V	: Volt
A	: Amper
mg	: Miligram
z	: Diş Sayısı
f_z	: Diş Başına İlerleme (mm/diş)
a_e	: Radyal Talaş Derinliği (mm)
V_c	: Kesme Hızı (m/dak)
gf	: Gram Kuvvet
Ue	: Hızlama Voltajı (V)
Ib	: Katot Akımı (mA)
V_{sc}	: Elektron Tarama Hızı (mm/s)
E_A	: Birim Alan Başına Enerji (J/mm^2)
L_0	: Çizgi Ofseti (μm)

KISALTMALAR

AR-GE:	Araştırma ve Geliştirme
ASTM:	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CMM	: Koordinat Ölçüm Makinesi
CSAM:	Soğuk Püskürtmeli Eklemeli İmalat
CT	: Bilgisayarlı Tomografi
DED	: Doğrudan Enerji Biriktirme
DMLS:	Doğrudan Lazerli Metal Sinterleme
EB-PBF:	Elektron Işınlı Toz Yatağında Ergitme
EBM	: Elektron Demeti ile Ergitme
ECT	: Girdap Akımı Testi
EI	: Uzama (%)
Eİ	: Eklemeli İmalat
ELI	: Extra Low Interstitials
EMF	: Elektromanyetik Frekans
FDM	: Eriyik Yığarak Modelleme
HIP	: Sıcak İzostatik Presleme
HV	: Vickers Sertlik Değeri
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı
L-PBF:	Lazerli Toz Yatağında Ergitme
LOF	: Füzyon Eksikliği
MJF	: Multi Jet Ergitme
NDT	: Tahribatsız Muayene
OM	: Optik Mikroskop
PBF	: Toz Yatağında Ergitme
PCRT:	Proses Telafili Rezonans Testi
PT	: Penetrant Testi
RPM	: Dakikadaki Devir Sayısı
RT	: Radyografik Test
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SLM	: Seçici Lazer Ergitme
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme

STL : Standart Mozaikleme Dili
TS : Çekme Mukavemeti (MPa)
UNS : Üniversal Numaralandırma Sistemi
UT : Ultrasonik Test
YS : Akma Mukavemeti (MPa)
YY. : Yüzyıl
wt. : Ağırlık
XRD : X-Işını Kristalografisi



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Çalışmanın iş akış şeması, araştırılan özellikler ve test yöntemleri.....	5
Şekil 2.1. Bazı geleneksel imalat yöntemlerinin ve eklemeli imalat yönteminin aşamaları [4].	8
Şekil 2.2. Metal eklemeli imalatta genel iş akışı [5].	8
Şekil 2.3. Eklemeli imalatın, geleneksel yöntemlere göre komplekslik - hacim avantajları ve kırılma noktalarından sonraki kısıtlamaları [6].	10
Şekil 2.4. Eklemeli imalat yöntemleri [7].	10
Şekil 2.5. Metal eklemeli imalat yöntemleri ve üreticileri [9].	12
Şekil 2.6. Metal eklemeli imalat işlem prensiplerine genel bakış [10].	13
Şekil 2.7. EBM sürecinin şematığı ve tüm parçaları içeren EBM inşa odasını gösteren fotoğraf [8].....	15
Şekil 2.8. Elektron demeti ile ergitme yönteminin proses zinciri, kontur ve tarama ergiyik havuzu ARCAM için EBM tarama stratejisi çizimi, (a) kontur tarama (b) dolgulu tarama [14, 15].	15
Şekil 2.9. Seçici elektron demeti ergitmede kullanılan işlem aşamalarının sıralı gösterimi, ilave katman imalatı [17].	16
Şekil 2.10. EBM'deki temel işleme adımlarının fotoğrafları; (a) toz ön ısıtma, (b) çok ışınli mod kullanılarak bileşen çevresinin (kontur) eritilmesi ve (c) tarama [16].	17
Şekil 2.11. ARCAM Elektron Işını Ergitme (EBM) tarafından titanyum toz alaşım malzemelerinden üretilen “Yarış Arabasının Şanzıman Kutusu – Ti-6Al-4V”, “Asetabular Kapaklar (hip-cup) – Ti-6Al-4V ELI”, “Kafatası Kafes İmplantı – Grade 2 Titanium” ve “Diz İmplantı – ASTM F75 CoCr Alaşımı [29-32].	19
Şekil 2.12. Eklemeli imalat ile üretilen parçalarda en çok meydana gelen kusurlara genel bakış; 1) Anahtar Deliği Porozite, 2) Gaz Poroziteleri (a) ve Düzensiz Poroziteler (b), 3) Ergimemiş Toz ve Ergitme Eksikliği, 4) Topaklanma, Çatlak ve Birleşme Eksiği [42-45].	22
Şekil 2.13. Mekanik, kimyasal ve termal ikincil işlem yöntemlerine genel bakış.	25
Şekil 2.14. Farklı yöntemler ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımına uygulanan son paso talaş kaldırma işleminin yüzey altında meydana getirdiği deformasyon ve bunun sonucunda oluşan yüzey altı sertlikleri [50].	27
Şekil 2.15. Dönel ultrasonik son yüzey işleminden sonra EBM parçalarının SEM görüntüleri: Yan ve ön yüzeyler [51].	28
Şekil 2.16. Ultrasonik bilyeli dövme işleminden sonra EBM parçalarının tomografik görüntüleri [52].	28
Şekil 2.17. Bilyeli dövme ve kavitasyonlu bilyesiz dövme uygulanan son paso talaş kaldırılmış numunelerin yorulma ömürleri ($\sigma_a = 400$ MPa'da) [53].	29
Şekil 2.18. HIP işlemi ile malzeme yapısındaki iç gözeneklerin kapanması sonucunda elde edilen üstün yorulma ömrü [67, 68].	32
Şekil 2.19. EBM ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımına uygulanan farklı ısıl işlemler sonucu elde edilen mikroyapılar ve bazı mekanik özelliklerdeki değişim (UTS: Maksimum	

Çekme Mukavemeti, YS: Akma Mukavemeti, el: % Uzama, HV: Vickers Sertlik) [69].	33
.....	33
Şekil 3.1. ARCAM EBM A2X makinesi	36
Şekil 3.2. Ti-6Al-4V alaşım malzemesinden EBM yöntemiyle üretilen farklı geometrilere sahip parçalar ve ölçülendirilmeleri (mm cinsinden).	37
Şekil 3.3. Makino F5 3-eksenli dikey frezeleme tezgâhı.	39
Şekil 3.4. Saykar SK-500 model tezgah üstü kumlama makinesi.	40
Şekil 3.5. ERBA ETP-100 vibrasyonlu yüzey işlem cihazı ve seramik aşındırıcı taşlar.	41
Şekil 3.6. Isıl İşlem Fırını.	41
Şekil 3.7. Ti-6Al-4V $\alpha+\beta$ alaşımının β Transus Sıcaklığı bazı alınarak yapılan ısıl işlemler ve farklı soğutma koşullarında ortaya çıkan mikroyapılar [72].	42
Şekil 3.8. JBS 300B marka çentik darbe test cihazı ve numunenin yerleştirilmesi.	44
Şekil 3.9. KEYENCE dijital mikroskop ölçüm sistemi ve SLM yöntemi ile üretilen Inconel 718 süper alaşım malzemesinin yüzey bütünlüğü analizleri.	44
Şekil 3.10. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.	45
Şekil 3.11. Hassas kesme cihazı	45
Şekil 3.12. Zımparalama ve parlatma cihazı (a) ve diğer ekipmanları (b).	46
Şekil 3.13. Vickers Mikrosertlik ölçüm cihazı	47
Şekil 3.14. Çeker ocak ve dağlama solüsyonu ile dağlama işleminin yapılması	47
Şekil 3.15. TURKYUS RTW Lineer Aşındırma Cihazı	48
Şekil 3.16. Radwag AS 220 R.2 Analitik Terazı	49
Şekil 4.1. İşlem görmemiş parçaların inşa yönündeki topoğrafyası.....	54
Şekil 4.2. İşlem görmemiş parçaların tarama yönündeki topoğrafyası	55
Şekil 4.3. İşlem görmemiş parçaların tarama yönlerindeki kenarlarından alınan topoğrafyalar.....	56
Şekil 4.4. Farklı geometriler ile üretilen EBM parçaların detaylı topoğrafyaları.	57
Şekil 4.5. Isıl işlem görmemiş ve frezelenmiş parçaların topoğrafya görüntüleri.	60
Şekil 4.6. HT-1 ısıl işlem görmüş ve frezelenmiş parçaların topoğrafya görüntüleri. ...	60
Şekil 4.7. HT-2 ısıl işlem görmüş ve frezelenmiş parçaların topoğrafya görüntüleri. ...	61
Şekil 4.8. Vibrasyonlu yüzey işlem sonucu farklı geometrilerdeki parçaların topoğrafyaları.	63
Şekil 4.9. Vibrasyonlu yüzey işlem sonucu farklı geometrilerdeki parçaların detaylı topoğrafyaları.	64
Şekil 4.10. Farklı sürelerde vibrasyonlu yüzey işlem sonucu silindirik geometrideki parçaların detaylı topoğrafyaları.....	65
Şekil 4.11. Kumlama işlemi sonucu farklı geometrilerdeki parçaların topoğrafyaları ve konveks parçada meydana gelen yüzey kalitesindeki iyileşme.....	67
Şekil 4.12. Eklemeli imalat ile üretilen parçaya uygulanan kumlama işleminde yaşanan dalgalanma durumu ve boyutsal doğruluk problemleri.	68
Şekil 4.13. Silindirik parçanın inşa yönündeki yüzey profili.	69
Şekil 4.14. Konveks parçanın inşa yönündeki yüzey profili.	70

Şekil 4.15. Konkav parçanın inşa yönündeki yüzey profili.	70
Şekil 4.16. Yatay üretilmiş kare prizma parçanın inşa yönündeki yüzey profili.	70
Şekil 4.17. Dik üretilmiş kare prizma parçanın inşa yönündeki yüzey profili.	70
Şekil 4.18. Silindirik parçanın inşa ve tarama yönünden alınan Sa ve Sz yüzey pürüzlülüğü.	70
Şekil 4.19. Silindirik parçanın tarama yönündeki pürüzlülük profili.	71
Şekil 4.20. Dik üretilmiş kare prizma parçanın tarama yönündeki profili.	71
Şekil 4.21. Parçanın tarama bölgesinde kenara yakın ve parçanın içindeki yüzey pürüzlülükleri.	72
Şekil 4.22. Vibrasyonlu yüzey işlem görmüş konveks parçanın inşa yönündeki pürüzlülük profilleri.	73
Şekil 4.23. Vibrasyonlu yüzey işlem görmüş yatay üretilmiş kare prizma parçanın inşa yönündeki profili.	73
Şekil 4.24. Vibrasyonlu yüzey işlem görmüş silindirik parçanın inşa yönündeki profili.	74
Şekil 4.25. Vibrasyonlu yüzey işlem görmüş konkav parçanın inşa yönündeki profili.	74
Şekil 4.26. Kumlanmış silindirik parçanın inşa yönündeki pürüzlülük profilleri.	75
Şekil 4.27. Kumlanmış konveks parçanın inşa yönündeki profili.	75
Şekil 4.28. Kumlanmış konkav parçanın inşa yönündeki profili.	76
Şekil 4.29. Kumlanmış yatay üretilmiş kare prizma parçanın inşa yönündeki profili. ..	76
Şekil 4.30. Yüzey işlem uygulanmış parçaların yüzey pürüzlülükleri (HT-1: 950 °C/1H/Su-ile-soğutma, HT-2: 1050 °C/1H/Su-ile-soğutma).	79
Şekil 4.31. İşlem görmemiş parçanın inşa ve tarama yönündeki mikroyapılar.	81
Şekil 4.32. Isıl işlem görmüş parçaların tarama yönündeki mikroyapıları (üst-HT-1, alt HT-2)	82
Şekil 4.33. Isıl işlem görmemiş (en üst), HT-1 (orta) ve HT-2 ısıtma işlem görmüş (en alt) parçaların düşük ilerleme/düşük hız (a) ve yüksek ilerleme/yüksek hız (b) altında mikroyapıda meydana getirdiği deformasyon.	84
Şekil 4.34. Farklı geometrilere sahip parçalarda yüzey altında oluşan kusurlar.	85
Şekil 4.35. Isıl işlem görmemiş parçaya uygulanan frezeleme işlemi sonrası ortaya çıkan mikrosertlik değerleri.	87
Şekil 4.36. HT-1 ısıtma işlem görmüş parçaya uygulanan frezeleme işlemi sonrası ortaya çıkan mikrosertlik değerleri.	87
Şekil 4.37. HT-2 ısıtma işlem görmüş parçaya uygulanan frezeleme işlemi sonrası ortaya çıkan mikrosertlik değerleri.	88
Şekil 4.38. Vibrasyonlu yüzey iyileştirme operasyonu sonucu etkilenen tabaka.	89
Şekil 4.39. Vibrasyonlu yüzey işlem ve kumlama operasyonları sonucu meydana gelen mikrosertlik değişimleri.	90
Şekil 4.40. Çentik-darbe testi sonucu en sünek ve en gevrek davranış gösteren işlem görmemiş (A) ve HT-2 ısıtma işlem görmüş (B) parçaların kesitlerinden alınan yüzey topoğrafyaları.	92

Şekil 4.41. En sünek ve en gevrek davranış gösteren işlem görmemiş ve HT-2 ısıtma işlemi görmüş parçaların görselleri.	94
Şekil 4.42. Tez çalışmasında yararlanılan aşınma oranı hesabı formülünde tercih edilen bilye aşınmasının olmadığı durumu açıklayan görsel.	95
Şekil 4.43. Aşınma testi sonucu ısıtma işlem görmemiş, HT-1 ve HT-2 ısıtma işlem görmüş, frezelenmiş parçalarda meydana gelen aşınma genişlikleri ve aşınma derinlikleri (DHDI: Düşük Kesme Hızı, Düşük İlerleme / YHYI: Yüksek Kesme Hızı, Yüksek İlerleme)..	96
Şekil 4.44. Isıtma işlem görmemiş (en üst), HT-1 (orta) ve HT-2 ısıtma işlem görmüş (en alt) parçaların düşük ilerleme/düşük hız (a) ve yüksek ilerleme/yüksek hız (b) altında aşınma testi sonucu meydana getirdiği topoğrafyalar.....	97
Şekil 4.45. Aşınma testi sonucu parçada meydana gelen deformasyon ve kırılma izleri.	97
Şekil 4.46. Isıtma işlem görmemiş (en üst), HT-1 ve HT-2 ısıtma işlem görmüş parçaların düşük ilerleme/düşük hız (a) ve yüksek ilerleme/yüksek hız (b) altında aşınma testi sonucu meydana getirdiği aşınma oranları.	98
Şekil 4.47. İşlem süresiyle birlikte vibrasyonlu yüzey işlem ile yüzey pürüzlülüğü ve kütle kaldırma değişiklikleri [85].	99
Şekil 4.48. Tasarım, üretim ve ikincil işlem sonucu (vibrasyonlu yüzey işlem) parçaların ağırlıklarındaki değişimler.....	100

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Eklemeli imalatla avantajlar ve dezavantajlar.	9
Tablo 3.1. Ti-6Al-4V alaşımının toz malzemesinin başlangıçtaki kimyasal bileşimi, üretilen Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal bileşimi ve ASTM F2924-14 standartlarına göre kimyasal bileşim, ASEL SAN ve ASTM [70] tarafından sağlanan veriler.	35
Tablo 3.2. ARCAM A2X EBM cihazının teknik özellikleri.	36
Tablo 3.3. Parçaların üretiminde tercih edilen parametreler.	38
Tablo 3.4. Optimum koşullardaki frezeleme testleri için belirlenen kesme koşulu ve parametreleri.	39
Tablo 3.5. Radwag AS 220 R.2 analitik terazinin teknik özellikleri.	49
Tablo 4.1. Ti-6Al-4V parçalara uygulanan çentik darbe testi sonuçları.	93
Tablo 4.2. Parçaların tasarım, üretim ve ikincil işlemlerde meydana getirdiği ağırlıklar.	101



1. GİRİŞ

Eklemeli imalatın (Eİ) 1980'lerin sonunda ilk ticarileşmesi ile başlayan süreç, bu üretim yönteminin geliştirilmesi ve popülerleşmesi ile mevcut dünya literatüründe araştırma konusu olarak yerini almıştır. Başta yalnızca polimer malzemelerin üretimini kapsayan bu serüvende, eklemeli imalat geleneksel imalatın karşısına birçok avantaj ile birlikte çıkmıştır. Bu da eklemeli imalatın umut vadeden bir üretim yöntemi olarak hızla gelişmesiyle sonuçlanmıştır. Ayrıca bu serüvenin devamında diğer birçok farklı malzemenin üretimini destekleyen yöntemler de ortaya çıkmış ve eklemeli imalat son hızla gelişmiştir. Günümüze gelindiğinde ise bu ilkeyi erken benimseyen eklemeli imalat firmalarının tümü, bazıları yeniden markalandırılmış veya satın alınmış olsa da hala varlığını sürdürmüştür. Geleneksel imalat yöntemlerinin var olduğu mevcut düzende ortaya çıkan böylesine farklı bir üretim yöntemi, sunduğu birçok avantajdan dolayı şu anda birçok önemli sektörde kullanılmaktadır.

Titanyum ise 18.yy'da varlığı keşfedilen, 20.yy'ın ortalarında ise ticarileşen ve Dünya'da en çok bulunan dokuzuncu elementtir [1]. Ayrıca, Dünya'nın kabuğunda alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra en bol bulunan yapısal elementtir [1]. Bununla birlikte diğer elementlere ve alaşımlarına kıyasla sunduğu birçok üstün özelliği sebebiyle günümüzde sayısız sektörde önemli sayıda komponentin üretiminde kullanılmaktadır. Özellikle zengin alaşım elementleri ve kontrol edilebilir özellikleri, titanyum ve alaşımlarının kullanım alanını genişletmektedir. Geleneksel yöntemlerin yanında, popülerleşen metal eklemeli imalat yöntemlerinin de birçoğunda tüm titanyum alaşımlarından en yaygın (%50'den fazla komponentin üretiminde) ve bir $\alpha + \beta$ alaşımı olan Ti-6Al-4V alaşımı olarak kullanılmaktadır [1]. Bu alaşım, sunduğu korozyona dayanıklılık, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve temel faydalar arasında biyolojik uyumluluk gibi üstün özellikleri nedeniyle geleneksel yöntemlerde olduğu gibi eklemeli imalat da kapsamlı bir şekilde araştırılma konusu olmuştur [1].

Eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemlerinin gerektirdiği pahalı kalıplama ve yüksek iş gücü gibi dezavantajlardan kurtulmuş durumdadır. Bununla birlikte karmaşık tasarımların net şekle yakın üretimi ve eşdeğer mekanik özelliklerde daha hafif komponentlerin üretimi gibi kritik avantajlar sağlamaktadır. Her ne kadar birçok avantaja sahip de olsa, her üretim sisteminde olduğu gibi birçok dezavantaj da barındırmaktadır. -

Bunlar; yüksek maliyet, düşük üretim hızı, kısıtlı üretim hacmi, sınırlı parça boyutları ve parça kusurları gibi dezavantajlardır. Günümüzde şimdilik daha küçük boyutlu parçaların üretiminde kullanılabilen ve yine de havacılık, otomotiv, tıp gibi önem arz eden alanlarda ciddi kullanım imkânı bulan eklemeli imalatın, ürettiği parçalardaki en çok tartışılan özelliklerden biri de parçalarda meydana gelen dengesiz yüzey morfolojisi ve yüksek yüzey pürüzlülüğüdür. Parçaların kullanımını neredeyse en çok kısıtlayan bu yüzey kalitesi faktörleri ise eklemeli imalat ile üretim sürecine dâhil olmuş bir dizi farklı yöntemi içeren ikincil işlemler ile iyileştirilebilmektedir.

Metal eklemeli imalat yöntemlerinden en çok kullanılan, araştırılan ve diğer yöntemlere nazaran daha yüksek mekanik özelliklere sahip parçaların üretildiği toz yatağı ergitme (TYE, İngilizcesi ile Powder Bed Fusion (PBF)) proseslerinden “Elektron Demeti ile Ergitme (EDE, İngilizcesi ile Electron Beam Melting (EBM))” ve “Seçici Lazer Ergitme (SLE, İngilizcesi Selective Laser Melting (SLM))” yöntemleri, metal tozlarını ergitmek için kullandıkları farklı güç kaynağı (elektron ışını ve lazer ışını) ve çalışma mantığı sebebiyle birbirlerinden ayrılmaktadırlar. Özellikle EBM yöntemi, vakum altında ve yüksek proses sıcaklığı kullanılarak üretildiği için daha az kusur ve kalıntı gerilmenin oluşmasına olanak sağlayarak SLM ve diğer metal eklemeli imalat yöntemlerinden daha avantajlı bir konumda yer almaktadır. Buna rağmen EBM ile üretim sonucu bahsedilen yüzey kalitesi kusurları ise SLM yöntemine ve bazı diğer metal eklemeli imalat yöntemlerine nazaran daha sıklıkla problem olarak üreticilerin, kullanıcıların ve araştırmacıların karşısına çıkmaktadır.

EBM yönteminin sağladığı avantajları etkin bir biçimde kullanmanın sağlanması ve dezavantajların ortadan kaldırılması amacıyla parametre optimizasyonları, kalibrasyonlar, sonlu elemanlar simülasyonları, proses ve ekipmanların geliştirilmesi gibi yöntemlerden yararlanılmaktadır. Buna rağmen, prosesin doğasında var olan ve henüz giderilemeyen problemler, tahribatlı ve tahribatsız muayene teknikleri ile incelenerek, ikincil işlemler başlığı altında toplanan birçok geleneksel ve geleneksel olmayan yöntemlerin kullanılması yoluyla giderilmeye çalışılmaktadır. Bu problemler, eklemeli imalatın günümüzdeki ününü kazanması aşamasında öncelikle prosesin ve proste mevcut ekipmanların iyileştirilme ve geliştirilme sürecini içermiştir. Bu süreç devam ederken, aynı zaman diliminde, kullanılabiliirliği sağlamak ve hızlandırmak adına literatürde mevcut ikincil işlemlerden yararlanılarak parçalarda arzu özelliklerinin elde

edilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede istenilen çekme ve akma mukavemeti, sertlik, yorulma dayanımı gibi mekanik özellik ihtiyaçlarının karşılanmasının yanında, porozitelerin giderilmesi, çarpılmanın engellenmesi, parçaların mevcut kimyasal yapısının korunması gibi daha pek çok özelliğin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi sağlanmıştır.

Eklemeli imalat ile üretilen parçalara uygulanan ikincil işlemlerin çoğu aslen geleneksel üretim yöntemlerini kapsamaktadır. Geleneksel üretim yöntemleri ise genellikle mekanik ikincil işlemler olarak gruplandırılabilen tornalama, frezeleme vb. ikincil işlemleri içermektedir. Geleneksel yöntemler ile parça üretim aşamasının devamında, parçalarda mevcut kusurların giderilmesi ve/veya parçaya yeni özellikler kazandırmak için gerekli olan bir diğer ikincil işlem grubu ise ısıtma işlemleridir. Kimyasal ikincil işlemler ise; kafes yapısı, soğutma kanalları vb. kompleks yapıdaki parçaların üretimi sonrasında kullanılan ve halen gelişmekte olan son ikincil işlem grubudur. Kimyasal ikincil işlemler, diğer ikincil işlem gruplarına nazaran daha az kullanılan, kullanılabilirliği ise her malzemeye özgü kimyasal kullanımının zorunluluğu, sınırlı yöntem sayısı vb. diğer kısıtlamalara sahip işlemlerdir. Anlaşılabileceği üzere mekanik ve ısıtma ikincil işlemler, eklemeli imalat ile üretilen parçalarda daha sık kullanılan ve çok sayıda yöntem ile her parçaya, geometriye ve malzemeye uygun, kullanım maliyeti az ve hatta hâlihazırda üretim yapan birçok firmanın bünyesinde bulunan yöntemlerdir. Onlarca yıldır kullanılan bu yöntemlerin eklemeli imalat ile üretilen parçalarda ikincil işlem olarak tercih görmesi ile bu sektör de yeniden canlanmış ve yeni tekniklerin geliştirilmesinin yolu açılmıştır.

Eklemeli imalat ve ikincil işlemlerini kapsayan literatür, genellikle mekanik ikincil işlemlerin uygulanması ile istenilen yüzey ve yüzey altı özelliklerin sağlanmasını içerirken, ısıtma ikincil işlemler ile ise parçanın mekanik özelliklerinin, arzu edilen mikroyapının vb. özelliklerin elde edilmesini içermektedir. Mekanik ve ısıtma ikincil işlemlerin birçok çalışmaya konu olduğu görülmüş ve yine de üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, eklemeli imalatta uygulama alanının yeni olmasından dolayı üzerinde yapılan araştırmaların sığ ve kısıtlı sayıda olduğu ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda belirli ikincil işlemlerin üzerine her bir çalışmada ayrı ayrı yoğunlaşılırken, bunların birden fazla yöntem ile aynı üretim hacminde üretilmiş parçalar üzerindeki etkisini araştıran çalışma sayısı da yetersiz kalmıştır.

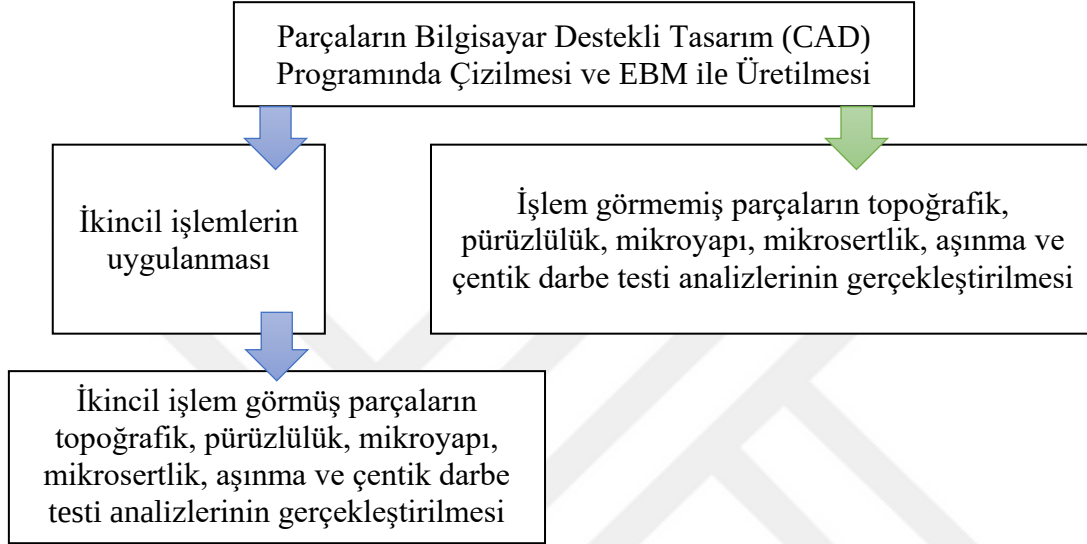
Bu durum göz önüne alındığında EBM ile aynı üretim hacminde üretilen Ti-6Al-4V alaşımlı eklemeli imalat parçalarının üzerinde uygulanacak mekanik ve ısıl ikincil işlemlerin literatüre yeni bir soluk kazandırılacağı öngörülmüş ve bu işlem gruplarının içinden seçilen popüler mekanik ikincil işlemler farklı geometrilere sahip parçalara uygulanmıştır. Yöntemler ele alındığında, bu tez kapsamında, onlarca yıldır üzerinde çalışılan, halen birçok yeniliğin ortaya çıkarıldığı ve en çok kullanılan talaşlı imalat yöntemlerinden biri olan frezeleme operasyonu tercih edilmiştir. Bunun yanında yine uzun bir süredir kullanılan bir kütleli ikincil işlem olan; metal, plastik, seramik, vb. malzemelerin kullanılabildiği havacılık, otomotiv, kuyumculuk, tekstil, medikal gibi sayısız sektörde araştırma imkânı bulmuş olan ve yine o sektörlerde çapak alma, parlatma/pürüzsüzleştirme, temizleme, köşe radyüsleme amacıyla kullanılan vibrasyonlu yüzey işlem teknolojisi tercih edilmiştir. Son olarak da, metalin zamanla pas ve korozyona uğramasından dolayı üzerindeki yağ, kir, pas ve korozyonu kaldırıp boyama işlemi ile metalin kullanım ömrünü uzatmak gibi uygulamalarda kullanılan ve eklemeli imalat da yüzey kalitesinin amacıyla uygulanması araştırılan kumlama yöntemi kullanılmaktadır. Bahsedilen bu mekanik ikincil işlemlerin kullanılması sonucu, bu işlemlerin parçaların yüzey ve yüzey altı özelliklerinde (yüzey topoğrafyası, yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik ve mikroyapı) meydana getirdiği etkinin kıyaslanması amaçlanmıştır. Bunun yanında parçalara uygulanan mekanik ikincil işlemlerin yanı sıra, Ti-6Al-4V alaşım malzemesine özgü olan ısıl ikincil işlemlerin, mekanik özelliklere etkisi de incelenmiştir. Son olarak, ısıl ikincil işlem uygulanan parçalara mekanik ikincil işlemler de uygulanmış ve aşınma davranışları da araştırılmıştır.

1.1. Araştırma Amacı ve Hedefler

Eklemeli imalat, devrim niteliğinde bir üretim tekniği olarak kabul edilmesinin yanında, aynı zamanda zayıf yüzey kalitesi, detay çözünürlüğü ve malzeme özellikleri nedeniyle de kapsamlı eleştiriler almıştır. Bu tezdeki çalışma, eklemeli imalat yöntemleri arasında birçok uygulama için kullanılan EBM sürecinde, küçük boyutlu bileşenlerin üretimi sonrasında meydana gelen yüzey kalitesi problemlerinin üstesinden gelmeye yardımcı olabilecek yeni anlayışlar sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu tez çalışması ile EBM süreci kullanılarak farklı geometrilerde üretilen parçalara uygulanan ikincil işlemlerin, parçaların mekanik özelliklerine etki derecesi incelenirken,

aynı zamanda yüzey kalitesinin de kabul edilebilir seviyelere getirilmesi amaçlanmıştır. Bununla birlikte, ısıt işlemler sonucu meydana gelen mikroyapı dönüşümünün analizi, çentik darbe testi ile de tokluk analizi, aşınma testi ile aşınma dayanımı gibi farklı özelliklerin de nasıl etkilendiğini araştırılmaktadır. Araştırma kapsamında izlenen yol Şekil 1.1’de sunulmaktadır. Çalışma ile ilgili literatür çalışması ise bir sonraki bölümde kapsamlı şekilde tartışılacaktır.



Şekil 1.1. Çalışmanın iş akış şeması, araştırılan özellikler ve test yöntemleri.

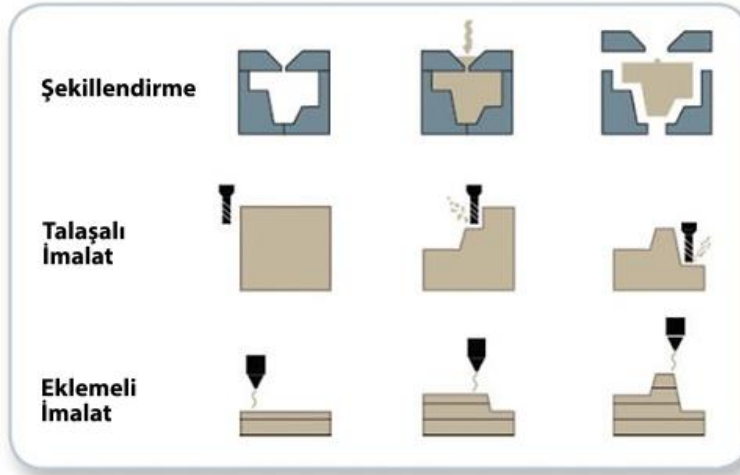
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Eklemeli imalat, uçak, otomobil, kimyasal madde, giyim, bilgisayar, tüketici elektroniği, elektrikli ekipman, mobilya, ağır makine, rafine edilmiş petrol ürünleri, gemiler, çelik, takım ve kalıp vb. üretimi üstelenen bu sektörlerdeki parçaların üretimi yöntemini değiştirecek yüksek teknoloji ile donatılmış makineler ile geleneksel üretim süreçlerini rafa kaldırmak amacıyla şimdiden popüler bir teknoloji olarak pazarda yerini almıştır. Bu bölümde eklemeli imalatın genel hatlarından ve bu sektörlerle nasıl ortak olduğundan bahsedilmiş, odaklanılan araştırma konusunu içeren literatür araştırılmıştır.

2.1. Eklemeli İmalat Terminolojisi, Avantajları ve Dezavantajları

1980'lerde 3D baskı tekniklerinin sadece fonksiyonel veya estetik prototiplerin üretimi için uygun olduğu düşünülüyordu ve bunun için daha uygun bir terim olan hızlı prototipleme kullanılmaktaydı [2]. 2020 itibarıyla ise hassasiyet ve tekrarlanabilirlik oldukça gelişmiş ve malzeme yelpazesi genişlemiştir. Bunun sonucunda bazı 3 boyutlu baskı işlemlerinin endüstriyel üretim teknolojisi olarak uygulanabilir olduğu noktaya kadar gelinmiş, böylece “Eklemeli İmalat” terimi "3 boyutlu baskı" ile eşanlamı olarak kullanılabilmeye başlanmıştır. 3 boyutlu baskı terimi, çoğu zaman teknik olmayan bir bağlamda eklemeli imalat ile eşanlamı olarak kullanılmış olmasına rağmen, bu terim Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM International) ve Uluslararası Standartlar Örgütü'ne (ISO) göre de farklı tanımlamalar içermiş ve şimdiye kadar özellikle düşük fiyat ve/veya genel kabiliyete sahip makinelerle yapılan imalat ile ilişkilendirilmiştir [3].

Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM International) ve Uluslararası Standartlar Örgütü'nün (ISO) oluşturmuş olduğu “ISO/ASTM 52900 Eklemeli İmalat — Genel İlkeler — Terminoloji” standartlarına göre ise 3 boyutlu baskı için “Bir baskı kafası, nozul veya başka bir yazıcı teknolojisi kullanılarak bir malzemenin biriktirilmesi yoluyla nesnelerin üretilmesi” tanımı yapılırken, eklemeli imalat için, “Eksiltmeli imalat ve şekillendirici imalat metodolojilerinin aksine, 3 boyutlu model verilerinden parçalar yapmak için malzemelerin genellikle katman üzerine katman olacak şekilde birleştirmesi işlemidir” [3] denmektedir. Şekil 2.1, bahsedilen bu üç yöntemin de üretim aşamalarını sunmaktadır.



Şekil 2.1. Bazı geleneksel imalat yöntemlerinin ve eklemeli imalat yönteminin aşamaları [4].

Üretim aşaması: 1. CAD parçasının elde edilmesi (Bilgisayar Destekli Tasarım, İngilizcesi Computer Aided Design), 2. CAD formatının STL (stereolitografi) formatına dönüştürülmesi, 3. parçanın destek yapısının atanması ve dosyanın makineye aktarımı ve tanıtılması, 4. Makinenin kurulum, üretim parametreleri, toz geri dönüşümü, makine temizliği ve donanım kurulumu ayarı, 5. Ergitme algoritması veya parametreleri ile üretim süreci, 6. Parçanın cihazdan çıkarılması, 7. Üretim sonrası parçanın taban plakasından ve desteklerden ayılma işlemleri, 8. Uygulamada kullanım (Parçalar, uygulamaya bağlı olarak, örneğin ikincil işlem, boyama gibi kullanım için kabul edilebilir hale gelmeden önce ek son işlem gerektirebilir). El için genel süreç Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Metal eklemeli imalatta genel iş akışı [5].

1980'lerde piyasaya sürüldüğünden beri, eklemeli imalat, giderek daha karmaşık ve zorlu prototiplerin yanı sıra nihai kullanım ürünleri üretmek için giderek daha öne çıkan bir yöntem haline geldi. Ürün tasarımcıları ve mühendisler, şirket içi bir eklemeli imalat sistemi kullanmanın çeşitli avantajlarını farkına vardılar. Bununla birlikte, dikkate alınması gereken en önemli nokta ise kilit karar vericilerin, AR-GE döngülerine adapte etmeden önce eklemeli imalatın şirket bünyesine sağlayacağı avantajların ve ortaya çıkaracağı dezavantajların tartılmasıydı. Aşağıda (Tablo 2.1 ve Şekil 2.3'te) öne çıkan bazı avantajlar ve hemen hemen tüm diğer süreçlerde olduğu gibi eklemeli imalat teknolojisinde de bu işlemi kullanmaya karar vermeden önce göz önünde bulundurulması gereken bazı dezavantajlar sunulmaktadır.

Tablo 2.1. Eklemeli imalatta avantajlar ve dezavantajlar.

Avantajları	Dezavantajları
• Yüksek Kompleksliğe Sahip Parça Üretilirliği • Eşdeğer Mekanik Özelliklerdeki Hafif Komponentler • İstek Üzerine Üretim ve Acil Tasarımların Revizyonları • Üretim ve Montajın Kombinasyonları • Pratik Kullanım ve Daha Az İş Gücü • Takım ve Kalıp Gereksiniminin Az Olması • Daha Az Malzeme İsrafı	• Kısıtlı Üretim Hacmi ve Parça Boyutları • Seri Üretime Uygun Olmaması • Sınırlı Malzeme Seçeneği • Yüksek İlk Yatırım Maliyetleri • İkincil İşlem Gerekliklikleri • Bazı Parçalarda Daha Zayıf Mekanik Özellikler ve Parça Kusurları • Düşük İnşa Hızları • Tasarımda Doğruluktan Sapma

Eklemeli imalat, geleneksel yöntemler karşısında da bazı avantajlar kazanmış durumdadır. Bunlar yukarıda bahsedilenlerin yanı sıra birim başına maliyet olarak bazı başabaş noktalarını meydana getirmiştir. Her iki imalat türünün de birbirini dışlamadığına dikkat edilmelidir. Eklemeli imalatın başlangıç ve düşük hacim maliyetleri geleneksel üretime göre daha düşükken, bu eğilim artan hacimle birlikte değişmektedir. Şekil 4'teki trendlere göre ögenin karmaşıklığı arttıkça bu eğilim tersine dönmektedir.



Şekil 2.3. Eklemeli imalatın, geleneksel yöntemlere göre komplekslik - hacim avantajları ve kırılma noktalarından sonraki kısıtlamaları [6].

2.2. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Belirli bir uygulama için en uygun Eİ sürecini seçmek zor olabilir. Mevcut olan çeşitli eklemeli imalat teknolojileri ve malzemeleri, çoğu zaman seçim için uygun özellikler taşıyabilir, ancak her biri boyutsal doğruluk, yüzey kalitesi ve üretim sonrası gereksinimlerde farklılıklar sunar. Burada amaç, eklemeli imalat teknolojilerinin her biri arasındaki farkları sınıflandırmak ve özetlemektir. ASTM F2792'ye göre eklemeli imalat teknolojileri, aşağıdaki akış şemasıyla (Şekil 2.4) daha iyi anlaşılabilir yedi farklı kategoride kategorize edilebilir:



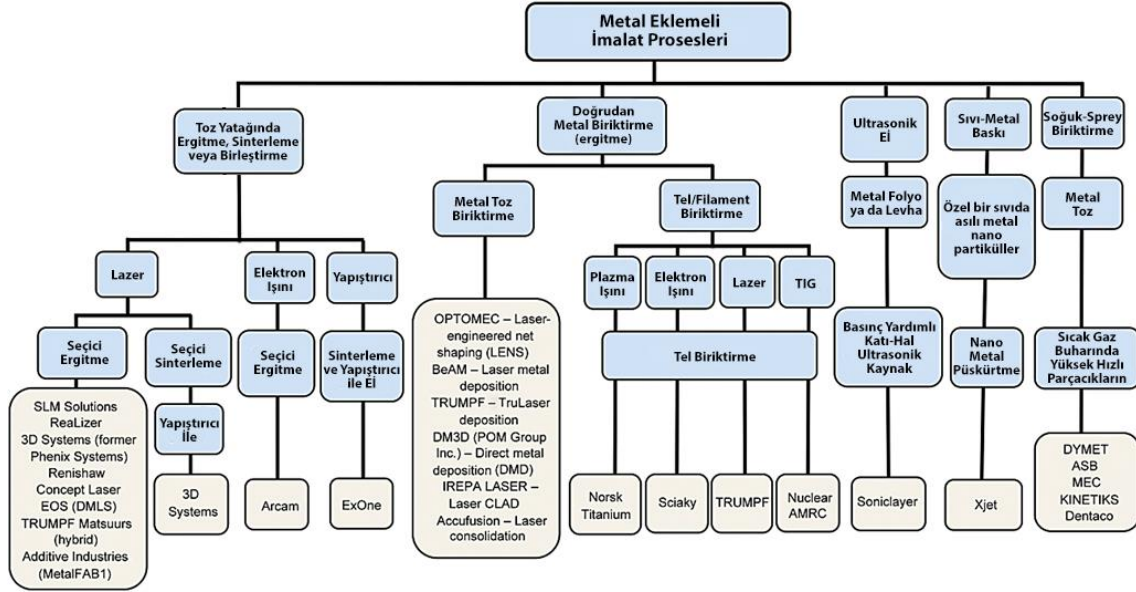
Şekil 2.4. Eklemeli imalat yöntemleri [7].

Metal eklemeli imalat yöntemlerinin bel kemiği olan toz yatağı ergitme (PBF) prosesleri ise, bir plastik veya metal tozunun parçacıkları arasında her seferinde bir kat halinde

füzyon (sinterleme veya ergitme) sağlayan bir termal kaynak kullanarak katı bir parça üretir. Çoğu PBF teknolojisi, bir parça üretimi sırasında ince toz tabakalarını yaymak için mekanizmalar kullanmaktadır. Yayılan toz katmanlarında yalnızca istenilen geometrinin ergitilmesi ve son olarak üretimin tamamlanması, nihai bileşenin yapı tamamlandıktan sonra toz içinde hapsolmasına neden olur. PBF teknolojilerindeki ana varyasyonlar, farklı enerji kaynaklarından (örneğin lazerler veya elektron ışınları) ve işlemde kullanılan tozlardan (plastik veya metaller) kaynaklanmaktadır.

Polimer tabanlı PBF teknolojileri, desteğe gerek olmadığından, karmaşık geometrilerin üretilmesine izin verdiği için çok fazla tasarım özgürlüğü sunar. Hem metal hem de plastik PBF parçaları tipik olarak dökme malzemeden çok daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir [8]. PBF parçalarının nispeten düzgün bir yüzey kalitesine sahip olması ve nihai ürünlerin imalatında kullanılmasının sağlanması için çok çeşitli ikincil işlem yöntemleri de mevcuttur. PBF'de odaklanılan zorluklar ise genellikle yüzey pürüzlülüğü, üretilen parçaların iç gözenekliliği, üretim sırasında çarpılma ve toz geri dönüşümüdür. Şekil 2.5'te metal eklemeli imalat yöntemleri ve günümüzdeki üreticileri sunulmaktadır.

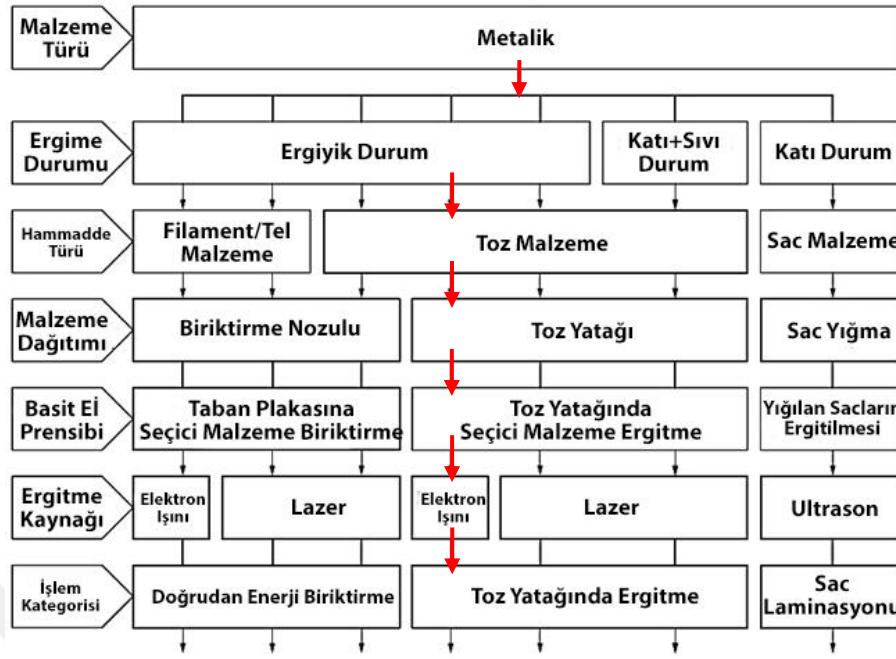
Elektron demeti ile ergitme (EBM), doğrudan metal tozundan tamamen yoğun 3 boyutlu nesneler oluşturmak için bilgisayar kontrollü bir elektron tabancası kullanan en son Eİ tekniklerinden ve metal PBF teknolojilerinde en çok araştırma konusu olan yöntemlerden biridir. Tıp, havacılık, savunma ve otomotiv endüstrilerinde başarılı bir şekilde kullanılan eklemeli imalat teknolojisidir. Metal eklemeli imalat yöntemlerindeki avantajı ise yüksek ergitme kapasitesi ve yüksek verimlilik için gereken enerjiyi üreten yüksek güçlü bir elektron ışını kullanmasıdır. Bu sayede oluşan sıcak işlem, kalıntı gerilme olmadan parçalar üretmeye olanak tanır ve aynı zamanda vakum, temiz ve kontrollü bir ortam sağlar.



Şekil 2.5. Metal eklemeli imalat yöntemleri ve üreticileri [9].

2.2.1. Elektron Demeti ile Ergitme Yöntemi (EBM) ve Ti-6Al-4V Alaşımı

Metal eklemeli imalat ISO/ASTM 52900:2015 (E)'ye göre tek adımlı işleme kategorisine dâhil edilmektedir (Şekil 2.6) [10]. Parçalar, hedeflenen ürünün temel geometrik şekli ve temel malzeme özelliklerinin aynı anda tek bir işlemle elde edilmesiyle üretilir. Destek yapısının çıkarılması ve temizlenmesi gerekli olabilir. Toz yatağı ergitme prosesleri, bu yöntemler arasında en çok bilinen ve yüksek mekanik özelliklere sahip parçaların üretildiği başlıca proses grubudur [11]. EBM ise Şekil 2.6'da oklarla gösterilen presiplere göre işlemektedir. Bununla birlikte EBM'deki destek yapısı diğer yöntemlere nazaran parçaya daha az temas ile tasarlanabilir ve üretilebilir. Bunun nedeni yöntemin sağladığı ön ısıtma sayesinde toz kekinin (powder cake) sinterlenmiş şekilde olmasıdır [8]. Böylece, parçanın daha az destek yapısına gerek duyarak havada, hatta birçok parçayla iç içe üretilebilir. Şekil 2.6'da, metalik malzemeler için tek aşamalı eklemeli imalat yöntemlerinin ilkelerinin genel bakışını temsil etmektedir.



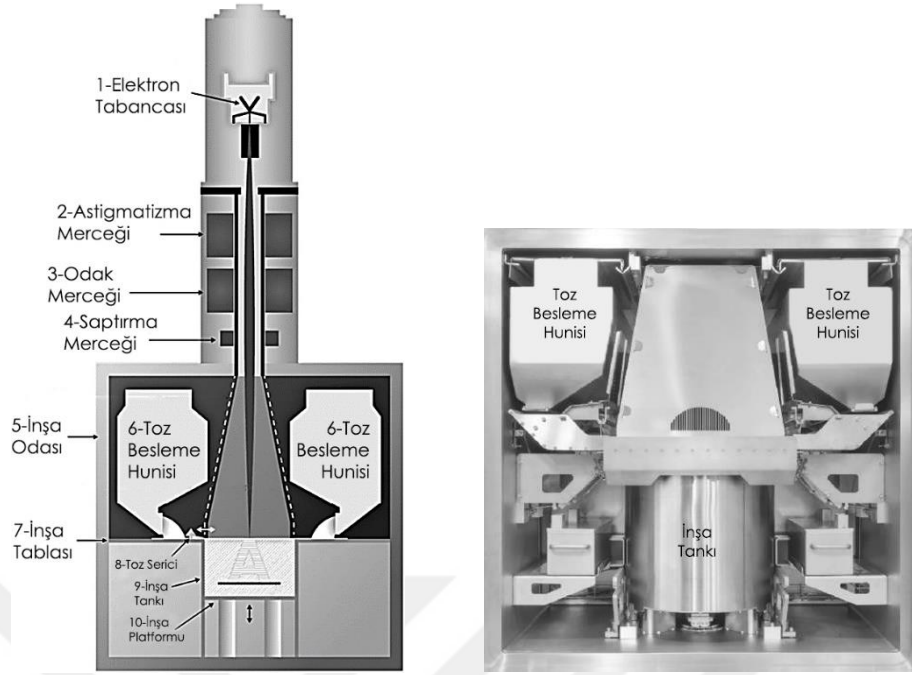
Şekil 2.6. Metal eklemeli imalat işlem prensiplerine genel bakış [10].

Üç boyutlu cisimlerin üretimi için elektriksel olarak iletken tozun bir elektrik ışınıyla katman katman eritilmesi ilkesini açıklayan patentin sahibi ve bu “Elektron Demeti ile Ergitme (EBM)” yöntemini uygulayan makinelerin ilk üreticisi olan ARCAM’a göre (İsveç – Chalmers Teknoloji Üniversitesi – ARCAM – 2001 [12, 13]) bu yöntem yüksek ergitme kapasitesi ve verimlilik için yüksek güçlü bir elektron ışını kullanarak boyutsal olarak doğru şekilde parçaları hızlı ve verimli bir şekilde oluşturmak olarak tanımlanmaktadır. ARCAM, EBM işlemini vakumda ve yüksek sıcaklıkta gerçekleştirir, bu da dökümden daha iyi ve dövme malzemeye karşılaştırılabilir malzeme özelliklerine sahip ve kalıntı gerilimden arındırılmış bileşenlerin üretilmesini sağlar [11].

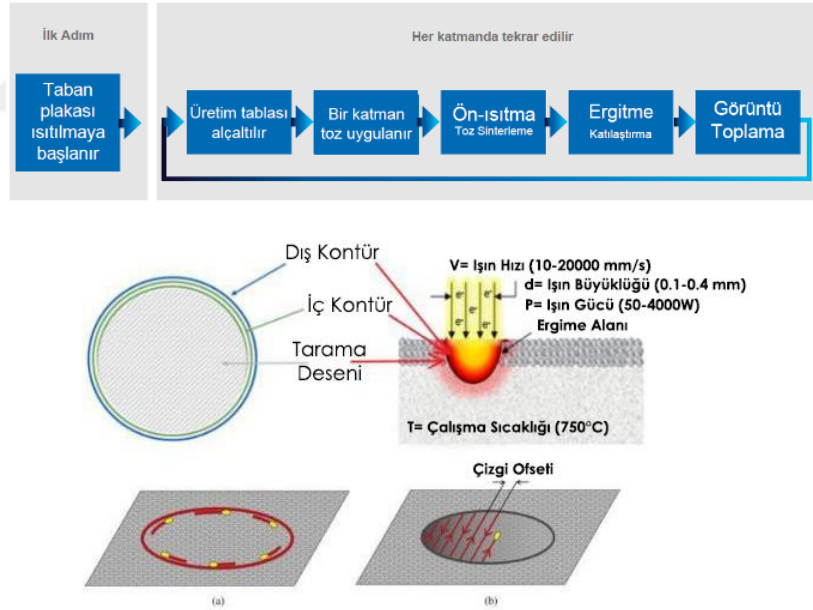
EBM süreci kısmen bir taramalı elektron mikroskobu (TEM, İngilizcesi Scanning Electron Microscope (SEM)) ile benzerdir. Şekil 2.7’de EBM yönteminin tüm hayati parçalarını içeren şematik bir gösterimi sunulmaktadır [12]. Bir SEM’e benzer şekilde, elektron ışını, elektron tabancasında (1) oluşturulur. Bir tungsten filament, bir ızgara kabına veya anoda yerleştirilir. Filamente bir akım uygulanır ve tungsten şerit 1900-2400 °C’ye (yaklaşık olarak 2200-2700 K) ısıtılır. Elektronlar, filament (katot) ve anot arasındaki bir elektrik alanı ile 60 keV’luk bir enerjiye koşutlanır, hızlandırılır ve sürüklenme (drift) tüpü denilen bir bileşeninde e-ışını üretilir. Sürüklenme tüpünde manyetik lensler bulunur. İlk mercek astigmatizmayı düzeltmek (2) ve Gauss enerji

dağılımına sahip dairesel bir elektron ışını oluşturmaya sağlar. İkinci mercek, ışını 0,1 mm'lik küçük bir noktaya odaklayan odak merceğidir (3). Son olarak, saptırma merceği (4), elektron ışını yapı alanı boyunca tarar. İnşa odasında (5) inşa süreci yer almaktadır. İnşa haznesinin içine iki toz besleme hunisi (6) yerleştirilir. Hazneler, işlemde kullanılan toz stok malzemeyi tutar. Haznelerin altında inşa tablası (7) bulunur. İnşa tablası, tozun toz serici (8) tarafından yayıldığı alandır. Toz serici (rake, recoater blade etc.), haznelerden tozu alır ve tozu inşa tablasının üzerine sıyrır. İnşa tablasının ortasında inşa tankı (9) bulunur. İnşa tankının içinde, inşa platformu (10), inşa süreci ilerledikçe z ekseninde (↓) aşağı hareket eder. Işının tozu erittiği gerçek inşa alanı, inşa tablasıyla aynı yükseklikte inşa tankının üzerindedir.

Tüm EBM inşa sistemi, inşa tankı ve elektron ışını sütunu, işlem sırasında vakum altındadır. Elektronlar, eğer mevcutsa, gaz halindeki atomlarla etkileşime girdiği ve saptırılacağı için vakum gereklidir. Bununla birlikte, vakumun kullanılması işlem için avantajlıdır, çünkü vakum, reaktif metaller arasındaki reaksiyonları önleyecektir, örn. oksijen gibi atmosferik gazlarla titanyumun üretilmesi gibi. Ayrıca vakum, proses sıcaklığını yüksek bir sıcaklıkta tutmaya yardımcı olmak için bir yalıtkan görevi görür. EBM işlemi, yüksek bir sıcaklıkta yürütülür. Elektron ışınının yüksek gücü (3 kW'a kadar) ve ışının hızlı hareketi nedeniyle, ışın, yüksek bir sıcaklığı korumak için toz yüzeyi üzerinde odaklanmamış modda hızla taranır (Şekil 2.8). Yükseltilmiş yapı sıcaklığı, bitmiş parçada kalıntı gerilim oluşumunu önlemeye yardımcı olacaktır. Ayrıca, yüksek sıcaklık, tamamen eriyip bitmiş parçayı çevreleyen toz parçacıklarını hafifçe sinterleyecektir. Hafifçe sinterlenmiş bir toz, ayrı ayrı toz taneleri arasındaki iletkenliği artırmaya yardımcı olacaktır.



Şekil 2.7. EBM sürecinin şematığı ve tüm parçaları içeren EBM inşa odasını gösteren fotoğraf [8].



Şekil 2.8. Elektron demeti ile ergitme yönteminin proses zinciri, kontur ve tarama ergiyik havuzu ARCAM için EBM tarama stratejisi çizimi, (a) kontur tarama (b) dolgulu tarama [14, 15].

EBM Arcam makinesindeki temalar, süreçte belirli amaçlar için kullanılan parametre setleridir ve EBM yazılımının kontrol sayfasından erişilebilir. Temalar, ışının hızı, gücü

ve odağı dâhil olmak üzere elektron ışınının tüm özelliklerini içerir. Sonuç olarak EBM, özetlemek gerekirse aşağıdaki sırayla bir parça oluşturmak için genellikle dört ana tema kullanılır (Şekil 2.9) [16]:

(i) Taban plakası ısıtması: taban plakasını önceden tanımlanmış bir sıcaklığa yükseltmek için kullanılır. Standart uygulama, plakayı 740 °C'ye (600-900 °C aralığına) yükseltmektir.

(ii) Toz ön-ısıtma: her bir toz katmanını önceden ısıtmak ve sinterlemek için kullanılır.

(iii) Wafer destek yapıları: Sarkan yüzeylerin altında destek oluşturmak için kullanılır.

(iv) Ergitme: bir bileşenin çevresini (konturlar) ergitmek ve konturlar arasında toplu ergitme (tarama) için kullanılır (Şekil 9).



Şekil 2.9. Seçici elektron demeti ergitmede kullanılan işlem aşamalarının sıralı gösterimi, ilave katman imalatı [17].

Şekil 2.10 (a), dikey bir tarama modeli kullanarak toz ön ısıtma aşamasını gösterirken, Şekil 2.10 (b), çok ışınlı kontur yöntemini kullanarak bileşen konturunun ergitilmesini ve ise Şekil 2.10 (c), dikey bir tarama deseni kullanarak taramayı göstermektedir. Dikey tarama deseni her katmandan sonra 90° döndürülür ve böylece tarama Rx- (X- boyunca) ve Ry- (Y- boyunca) eksenleri boyunca dönüşümlü olarak üretim sağlanır [14, 16].



Şekil 2.10. EBM'deki temel işleme adımlarının fotoğrafları; (a) toz ön ısıtma, (b) çok ışınlı mod kullanılarak bileşen çevresinin (kontur) eritilmesi ve (c) tarama [16].

Eklemeli imalat yöntemlerinde ve özellikle EBM yönteminde, geleneksel yöntemlerde olduğu gibi birçok işlem parametresi (talaşlı imalatla kesme hızı, ilerleme; dökümde çekme ve işleme payları, kalıptan çıkarma açıları; dövme yönteminde pres hızı, kalıp açısı, metal külçe sıcaklığı vb.) bulunmaktadır. Üretim parametreleri dizayn edilen komponentin istenilen özelliklerde oluşmasını sağlarken, aynı zamanda tedarik süresi, malzeme tüketimi vb. diğer ticari parametrelerin de korunmasına yardımcı olmaktadır. Bu parametreler aynı zamanda kullanılan malzemeye uygun şekilde seçilerek, üretilen komponentte kimyasal, mikroyapısal, elektriksel, termal, mekanik ve tribolojik özelliklerin, aynı zamanda estetiklik, boyutsal doğruluk ve pürüzlülük gibi yüzey unsurlarının da istenilen seviyede ortaya çıkmasına yardımcı olarak istenilen yüksek kalitede komponentlerin üretilmesi sağlanmaktadır. EBM’de kullanılan bazı üretim parametreleri aşağıda sıralanmaktadır [18]:

- Maksimum Ergitme Akımı (Max. Melt Current) (mA)
- Hız Fonksiyonu (Speed Function)
- Odak Öteleme (Focus Offset) (mA)
- Nokta Sayısı (No. of Spots) (multi-spot)
- Nokta Zamanı (Spot on Time) (multi-spot) (ms)
- Nokta Bindirme (multi-spot) (mm)
- Katman Kalınlığı (Layer Thickness) (μm)
- Tarama Döndürme (Hatch Rotation) (degree)
- Ön-ısıtma Sıcaklığı (Pre-heat Temperature) ($^{\circ}\text{C}$)
- Taramada Çizgi Öteleme (Line off-set in Hatch) (mm)
- Tarama ve Kontur Arasındaki Öteleme (Off-set Between Hatch and Contour) (mm)
- Konturlar Arasındaki Öteleme (Off-set Between Contours) (mm)

Bahsedilen parametreler ışığında belirli malzemeler için parametre optimizasyonu sırasında kullanılan enerji yoğunluğu ise, genellikle bir toz yatağı füzyon işlemi sırasında malzeme hacmi başına uygulanan ortalama enerjiyi tanımlamak için kullanılır. Önemli işleme parametreleri bir enerji yoğunluğu denklemine dâhil edilmiştir. Örneğin, enerji yoğunluğu, SLM süreci için denklem (1) ile ifade edilebilir [19]:

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad (1)$$

burada P lazer gücünü, v lazer tarama hızını, h tarama aralığını (hatch distance) ve t katman kalınlığını ifade etmektedir. Genel olarak bu parametreler, lazer ergitme işlemi sırasında karmaşık bir karşılıklı etkiye sahiptir. Ergiyik havuzu değişimi ve kusur oluşumu gibi durumlar ise bazı parametreler sabit tutulursa kolaylıkla karakterize edilecektir. Denklem (1) 'de ayrıca lazer gücü ve lazer tarama hızının enerji yoğunluğu ile ilişkisi de görülmektedir. EBM işlemi için, "enerji yoğunluğu" da benzer şekilde denklem (1) ile lazer gücü [20] yerine elektron ışını gücü kullanılarak ifade edilebilir. Ancak, tarama hızı Arcam sisteminde doğrudan değiştirilemez. Doğru eriyik havuzu boyutunu elde etmek için ergitme işlemi sırasında bir "hız fonksiyonu" aracılığıyla dinamik olarak kontrol edildiği belirtilmektedir. Hız fonksiyonu, "maksimum akım" ve "hız fonksiyonu indeksi" ile ilgilidir. Ek olarak, "çizgi ofseti" ve "odak ofseti" de EBM süreci için etkili işleme parametreleridir [21].

Bununla birlikte her ne kadar denklemdeki (1) formül sıklıkla kullanılsa da EBM için araştırılmış ve buna göre optimum enerji yoğunlukları hesaplanmıştır. Özellikle $\alpha + \beta$ titanyum alaşımı tozunu ergitmek için gereken enerji için belirli enerji yoğunlukları bir literatür çalışmasında belirlenmiş ve hesaplamalarda kullanılan formül denklemde (2) gösterilmiştir [22].

$$E = \frac{I \cdot U}{V \cdot l_0 \cdot l_t} \quad (2)$$

burada U hızlanan voltaj [V], I katot akımı [mA], V tarama hızı [mm / s], l_0 tarama aralığı [mm] ve l_t katman kalınlığıdır [mm]. Matematiksel olarak hesaplanan enerji yoğunluğu ile üretimde karşılaşılan enerji yoğunluğunun Ti-6Al-4V tozunu ergitmek için farklı olduğu da literatür çalışmalarında ortaya konmaktadır. Bu durum EBM sisteminin otomatik güç kontrol algoritmaları kullanmasıyla alakalıdır [22]. Algoritma, her katmanı

analiz eder ve katot akımını ve ışın hızını hesaplayarak toz katmanını eritmek için yeterli enerji sağlar. Böylece, hafif alaşım elementlerinin erimiş malzemeden termal gerilimleri ve buharlaşması azaltılır. Algoritmalar ortalama bir kullanıcı tarafından erişilebilir olmadığından, gerçek değerler her çalışma için bilimsel olarak uygun olmayacaktır ve bu nedenle bazen bu işlevsellik kapatılabilmektedir. Bunun dışında genel bir enerji yoğunluğunun yanında eriten çizgi boyunca kararlı bir ergitmenin sağlanabilmesi için gerekli enerji yoğunluğu da Kirchner ve ark. [23] tarafından aşağıdaki denklemdeki (3) şekilde hesaplanabilir:

$$E_l = U_e \times \frac{I_b}{v_{sc}} \quad (3)$$

burada U_e hızlanma voltajıdır, I_b ışın akımıdır ve V_{sc} tarama hızıdır. Çizgi enerjisi, EBM sırasındaki enerji girdisinin miktarının tam bir ölçüsü değildir. Bir dizi üst üste binen tarama çizgisi belirli bir katman alanını oluşturduğundan, birim alan başına katmana sağlanan enerji miktarı ise denklemdeki (4) şu şekilde hesaplanabilir:

$$E_A = \frac{E_l}{L_0} \quad (4)$$

E_A birim alan başına enerji; ve çizgi ofsetini L_0 temsil etmektedir.

EBM yöntemi, Ti-6Al-4V [24], Ti-48Al-2Cr-2Nb [25], CoCr alaşımları [26] ve H13 çelik [27] gibi çok sayıda metalik malzeme türü için üretim imkanı sağlamaktadır. Bugün ise EBM tekniği, diğer uygulamaların yanı sıra, benzersiz geometrik özelliklere sahip özelleştirilmiş titanyum alaşımlı biyomedikal ürünler üretmek için kullanılmaktadır [28]. Şekil 2.11'de, EBM tarafından farklı malzemeler ile üretilen parçaların bazı örnekleri sunulmuştur.



Şekil 2.11. ARCAM Elektron Işını Ergitme (EBM) tarafından titanyum toz alaşım malzemelerinden üretilen “Yarış Arabasının Şanzıman Kutusu – Ti-6Al-4V”, “Asetabular Kapaklar (hip-cup) – Ti-6Al-4V ELI”, “Kafatası Kafes İmplantı – Grade 2 Titanium” ve “Diz İmplantı – ASTM F75 CoCr Alaşımı [29-32].

EBM sürecinde en yaygın olarak kullanılan malzeme, optimize edilmiş işlem parametrelerinin mevcut olduğu ve kapsamlı araştırmaların yapıldığı Ti-6Al-4V alaşımıdır [33]. Mekanik özellikler, döküm ve/veya dövme emsali kadar iyidir ve hatta bir dereceye kadar da üstündür. Mikroyapı ise geleneksel yöntemler ile üretilmiş ve yüksek sıcaklıktaki bir ısıtıl işleminden hızlıca bir şekilde sıvı ile soğutulmuş Ti-6Al-4V mikroyapısına benzer [8]. Bununla birlikte, geleneksel olarak üretilen malzemeye kıyasla EBM ile üretilen malzemede tanecik boyutunun genellikle biraz daha küçük olduğu görülmektedir [8].

Bugün 100'den fazla titanyum alaşımı bilinmektedir, ancak bunlardan sadece 20 ile 30'u ticari statüye ulaşmıştır. Bunlardan en klasik alaşım $\alpha+\beta$ Ti-6Al-4V alaşımıdır ve kullanımın %50'sinden fazlasını kapsar. Diğer %20 ile %30 alaşımsız saf titanyumdur. Alaşım sınıflarına göre kategorize edilen ve halihazırda kullanılan titanyum alaşımları ise α , tek faza yakın α , $\alpha+\beta$, ve β alaşımlarıdır.

Endüstrilerde de en yaygın kullanılan Titanyum (Ti) malzeme sınıfı Ti-6Al-4V'dir. Adından da anlaşılacağı üzere %90 titanyum, %6 alüminyum ve %4 vanadyum içerir, ancak malzeme az miktarda oksijen, hidrojen, nitrojen ve demir gibi başka bileşenler içerebilir [34]. Bu malzeme, korozyona dayanıklılık, daha yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve temel faydalar arasında biyolojik uyumluluk gibi üstün özellikleri nedeniyle kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [35]. Son otuz yılda yapılan tüm bu çalışmalar, üreticilerin kalitelerini geliştirmelerine de yardımcı olmuştur [35, 36].

Ti-6Al-4V alaşımı son derece iyi bir mukavemet, süneklik, yorulma ve kırılma özellikleri dengesine sahiptir. Ancak bu alaşım, yüksek sıcaklıktaki düşük sürünme performansı (low elevated-temperature creep performance) nedeniyle yalnızca yaklaşık 300 °C'ye kadar kullanılabilir [37]. Bu alaşımın mikroyapısı, uygun ısıtıl işlemlerin kullanılmasıyla kolaylıkla değiştirilebilir. Ti-6Al-4V, yaklaşık 800 °C'lik bir denge sıcaklığında yaklaşık %15 β fazlı bir hacimsel oran içerir [37]. Oda sıcaklığında α fazı baskındır, ancak β transusun (β dönüşüm sıcaklığı) üzerine ısıtıldığında, yaklaşık 995 °C'de yalnızca β fazı olarak var olur [38]. Katı çözelti sertleştirme ve α -fazı stabilizasyonu yoluyla alaşımın mukavemetini artırmak için ise alüminyum eklenir. Vanadyum ilavesi hem α hem de β fazlarından dengeli mekanik özellikler elde ederek oda sıcaklığında sünekliği önemli ölçüde artıran β 'yi stabilize eder. β stabilizatörlerinin eklenmesi α

fazının oluşumunu geciktirebilir ve fazının martensit olarak dönüşmesini veya tutulan β fazı olarak kalmasını sağlayabilir. Bu popüler Ti-6Al-4V alaşımının ELI (extra low interstitial) versiyonu ise, mükemmel hasar toleransı özelliğiyle yüksek kırılma tokluğu sağlayarak özellikle biyomedikal sektörde kullanılabilmesinin yolunu açmaktadır [37].

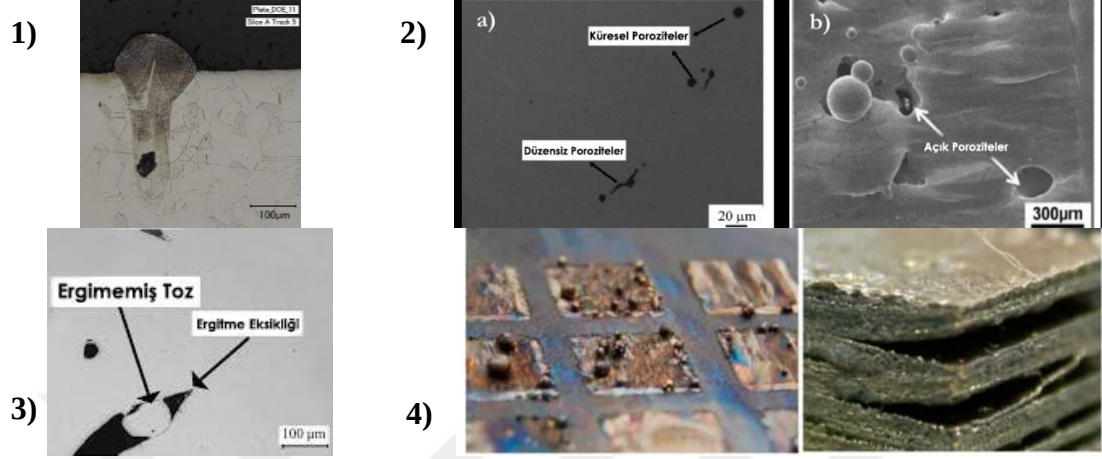
Ti-6Al-4V alaşımının bazı dezavantajları olduğu da unutulmamalıdır. Bunlar örneğin; yüksek oksijen reaktivitesi, çevre dostu olmayan madencilik çalışmaları, titanyum elementinin yüksek üretim maliyeti gibi özellikleridir ki, bu da onu en pahalı malzemelerden biri yapar [39]. Titanyumun sünger ekstraksiyonu için gereken enerjinin çeliklerinkinden 16 kat daha fazla olduğu ve dolayısıyla üretim maliyetinin yüksek olduğu da bildirilmiştir [39]. 350-400 °C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklarda çalışırken malzemenin mukavemetinin kaybettiği de sonuçlar arasında yer almaktadır.

2.2.2. Eklemeli İmalatta Kusurlar ve Tespit Yöntemleri

Eİ proses zinciri sırasında tercih edilen üretim parametreleri ile birlikte belirli özelliklere sahip parçaların oluşturulması istenmektedir. Bu aşamada birtakım parametreler sabit alınırken (katman kalınlığı, tarama aralığı), bazı parametrelerin ise farklı kombinasyonlarda kullanılması ile kabul edilebilir parça özellikleri elde edilmekte, diğer bir deyişle parametre optimizasyonu sağlanmış olmaktadır. Böylelikle en uygun parametre spesifik bir malzeme adına belirlenmiş olur. Bununla birlikte bu durum her ne kadar parametrelerin değişimlerindeki sıkı yakınsamalar ile yapılmış olsa dahi, üretilecek parçanın şekline, boyutlarına ve kompleksliğine göre değişiklik göstermektedir. Özetle dar aralıklarla yapılan parametre optimizasyonundaki yakınsamalarla birlikte optimum bazı değerler elde edilebilir ve çoğu uygulamada tercih edilebilirken, problem yaşanan uygulamalarda parça geometrisine ve malzemesine bağlı olarak, sadece üretilecek parça adına çalışmalar da yapmak gerekebilmektedir.

Eklemeli imalat ile üretilen parçalarda malzemeye ve yönteme bağlı bazı istenmeyen üretim hataları (Flaw-s) oluşmaktadır. Bu üretim hatalarının kabul kriterlerini aşması sonucu kusurlar (Defect-s) meydana gelmektedir. Bu kusurların tespit edilmesi, yeniden işlemeye, onarıma veya parçanın ıskartaya çıkmasına yol açabilmektedir. Eİ'de optimize edilmiş süreç parametrelerinden sapmanın, kusur popülasyonlarının artmasına ve dolayısıyla mekanik özelliklerin azalmasına neden olduğu bilinmektedir [40, 41]. "Kusurlar" terimi, yapıdaki istenmeyen makroskopik, mikroskobik ve kimyasal

heterojenlikleri gruplamak için kullanılır; bu, bir bileşen veya uygulama için şartname dışında olmasına da neden olabilir. Şekil 2.12’de eklemeli imalatta en çok karşılaşılan kusurlara ait bazı görseller yer almaktadır.



Şekil 2.12. Eklemeli imalat ile üretilen parçalarda en çok meydana gelen kusurlara genel bakış; 1) Anahtar Deliği Porozite, 2) Gaz Poroziteleri (a) ve Düzensiz Poroziteler (b), 3) Ergimemiş Toz ve Ergitme Eksikliği, 4) Topaklanma, Çatlak ve Birleşme Eksiği [42-45].

Eklemeli imalatta karşılaşılan kusurlar tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleriyle tespit ve analiz edilebilmektedir. Tahribatsız muayene (Non-destructive testing, kısaca: NDT), inceleme yapılacak olan malzeme ya da parçanın bütünlüğüne zarar vermeden yapılan muayene çeşidi iken, tahribatlı muayene ise inceleme yapılan parçanın çekme, basma, eğilme vb. kalıcı şekil değişikliklerine karşı göstereceği direnci ve dayanımı belirlemek için uygulanan muayene yöntemleridir.

Şu anda çoğu El sistemi, inşa edilmekte olan katmanın sıcaklığını ölçen makine içi izleme sistemleri ve kusurları bulmak için görüntü işlemenin kullanımı gibi teknolojileri de geliştirmeye odaklanmaktadır [46]. Bu bilgi kullanıcıyı bilgilendirmek ve potansiyel olarak başarısız bir yapıyı malzemeyi israf etmeden durdurmak için kullanılır. Yeterlilik ve sertifikasyon için, bu hat içi ölçüm sistemlerinin, inşa edilmiş bir parçanın gözenekliliği ve iç geometrisinin tasarım aşamasında ana hatlarıyla belirtilenler dâhilinde olduğuna dair kanıtlara katkıda bulunabileceği öngörülmektedir. Bu yöntemler ise yerinde izleme (In-situ monitoring) ve EBM Q serisi makinelerde bulunan “LayerxQam™” teknolojisi. Arcam’ın gelecekteki ekipman fonksiyonları, toz yatağı EBM topoğrafyası, kimyasal bileşim ve kusurların izlenmesi için proses içi izleme içerecektir.

2.2.3. Eklemeli İmalat Yöntemlerinde Kullanılan İkincil İşlemler

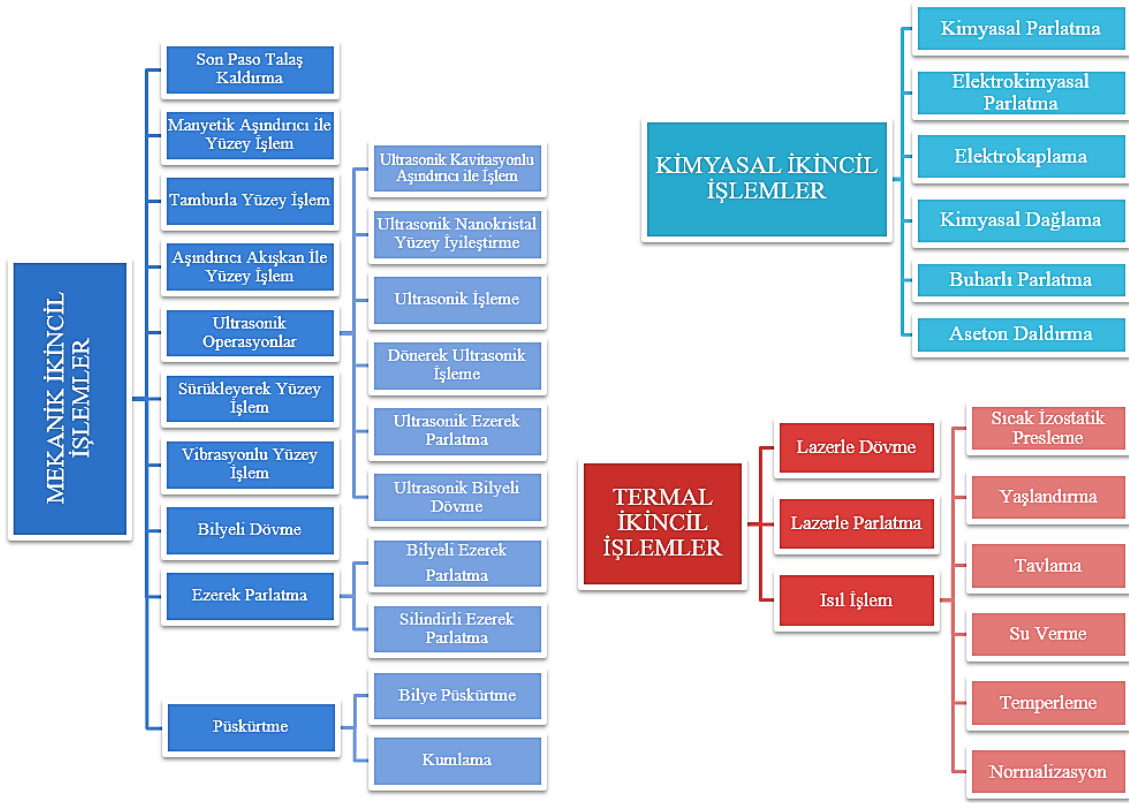
Üretim parametrelerinin geniş ve dar parametre aralıklarında optimize edilebilmesi ile parçaların yüzey kalitelerinde ve mekanik özelliklerinde literatür çalışmalarında da görüldüğü üzere gelişmeler sağlanabilmektedir. Bununla birlikte bu optimizasyon işlemleri bile parçaların her zaman istenilen seviyede üstün özelliklere sahip olmasını sağlayamamaktadır [47]. Ortaya çıkan bu durum eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen parçalara uygulanacak ikincil işlemlerin gerekliliğini ortaya koymuştur [48]. Aynı zamanda eklemeli imalat ile yapılan üretim sürecinde her ne kadar imalat resmindeki geometri ve ölçülere uygun olarak son ürün üretilmeye çalışılsa da istenilen toleranslar çoğu zaman sağlanamamakta ve bu süreçte yine de ikincil işlemlere ihtiyaç duyulduğunu bir kez daha bize göstermektedir. İkincil işlemler, eklemeli imalat yöntemiyle üretilecek ürünün, üretilmesi ve kullanılabilmesi için ihtiyaç duyulan makro ve mikro boyuttaki mekanik, geometrik ve yüzey özelliklerini elde edebilmek için yapılan bir veya daha fazla sayıdaki işlemlerin bütünü olarak tanımlamak mümkündür. Bu işlemlere neredeyse tüm eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen metal ve metal dışı malzemelerden üretilen ürünler için ihtiyaç duyulmaktadır.

Üretim sonrası destek malzemelerinin üründen ayrıştırılması ile başlayan bu süreç, ürünün kullanıma hazır hale gelinceye kadarki sürecinde üründe istenilen mekanik, mikroyapısal ve yüzey özelliklerine bağlı olarak farklılıklar gösterebilmektedir. Mevcut durumda hâlihazırda kullanılan ikincil işlemler ihtiyaçlara hala cevap verebiliyor olmadığından dolayı halen bu konudaki yoğun araştırma ve geliştirme çalışmaları gerek akademik camiada gerekse eklemeli imalat teknolojilerini kullanan endüstrilerde devam etmektedir. İkincil işlemler konusunda yapılacak çalışmalar özellikle eklemeli imalat süreçlerinin daha fazla sayıda ürünü üretebilme ve ön seri, seri imalat gibi süreçleri gerçekleştirmesinde kilit rol oynamaktadır. Mevcut durumda geleneksel imalat yöntemlerinin dahi dijitalleşme ve akıllılaşma sürecini yoğun şekilde yaşaması, modern imalat yöntemi olarak ortaya çıkan eklemeli imalat yöntemlerinin de olmazsa olmazlarından. Dolayısı ile eklemeli imalat süreçlerinin tamamen otomatize edilmesi ve insan müdahalesi olmaksızın imalat sürecinin başından son ürüne kadarki sürecin makineler, robotlar ve yazılımlarla yönetilmesinde mevcut durumda en önemli zorluk ikincil işlemler olarak görülmektedir. Bu anlamda ikincil işlemlerin insan müdahalesine

gerek kalmaksızın üretim hattında gerçekleştirilmesi eklemeli imalatı daha da ileri taşıyabilecek bir durumdur. Bu bakımdan ikincil işlemlerin eklemeli imalatın seri imalata dönüşümünde kilit rol oynadığını söylemek yanlış bir değerlendirme olmayacaktır.

Literatür incelendiğinde eklemeli imalat ile üretilen parçalara istenilen özelliklerin kazandırılması amacıyla mekanik, kimyasal ve termal ikincil işlemler gibi ana başlıklar altında toplanan geleneksel veya geleneksel olmayan işlemler uygulanmaktadır. Bu işlemlerin bir kısmı bütün malzeme gruplarına uygulanabilirken, bir kısmı belirli malzeme tiplerini, bazı işlemler ise yalnızca küçük bir grup malzeme türünü hedef almaktadır.

Her ikincil işlem, bileşenin fiziksel özelliklerini değiştirdiği için kalite üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Toz yatağında ergitme yöntemlerinden olan SLM ile üretim sırasında meydana gelen kalıntı gerilmeler nedeniyle ikincil işlemler (özellikle ısısal işlemler) zorunlu duruma gelmektedir. Destek yapıları ise malzemede meydana gelecek çarpılmayı engellemek ve kalıntı gerilmelerin azaltılmasını sağlamak için gereklidir. İnce cidarlı (<1 mm) ve eğimli yapılarda ise destek yapılarının çarpılmayı önlemek için kesinlikle kullanılması gerekmektedir. Destek yapılarının, ısısal işlem tamamlandıktan sonra sökülmesi gerekirken, bu yapıların sökülmesi sonucu, üretilen parçaya bağlı olan bölgelerde destek yapısının izleri de ortaya çıkmaktadır. Bu durum parçanın kullanım yerine bağlı olarak düzgün montajlanamaması gibi dezavantajlar ortaya çıkaracaktır. Bu nedenle, destek yapısı modeli oluşturma işlemi sırasında parçanın en uygun yönünü belirlemek önemlidir. Lazerle parlatma veya lazerle dövme vb. son işlem süreçleri gibi diğer işlem sonrası adımlar, kalan destek yapılarının ve inşa edilen bileşenin pürüzlü yüzeyinin neden olduğu zayıf yüzey kalitesini iyileştirmek için kullanılabilir. Şekil 2.13'te ikincil işlemler kategorize bir şekilde gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Mekanik, kimyasal ve termal ikincil işlem yöntemlerine genel bakış.

2.2.3.1. Mekanik İkincil İşlemler

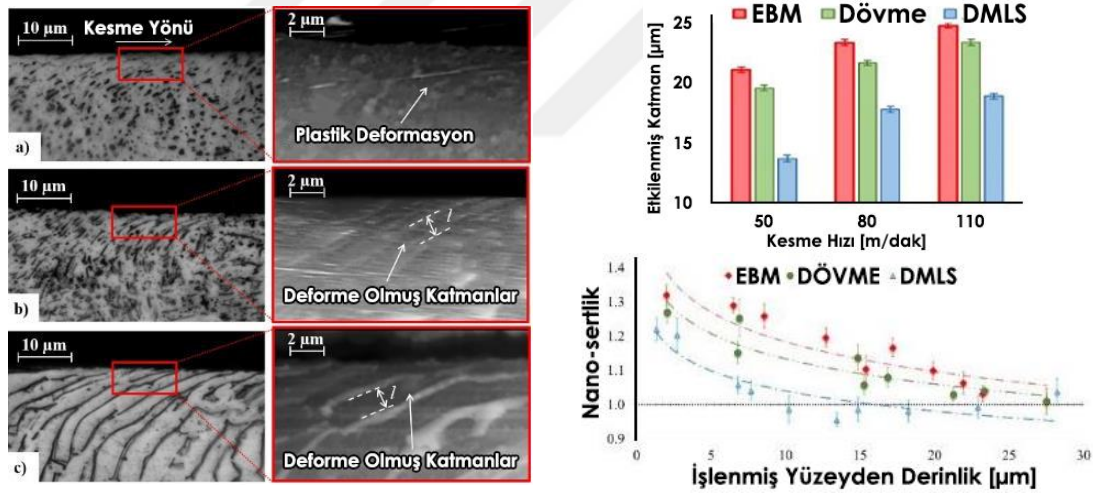
Mekanik ikincil işlemler, en yaygın olarak kullanılan ve birçok farklı yöntemi içeren ikincil işlem grubudur. Bunun ana sebebi mekanik proseslerin daha geleneksel olmasından kaynaklanmaktadır. On yıllardır diğer geleneksel ve geleneksel olmayan üretim yöntemlerinde ve proses zincirlerinde mekanik ikincil işlemlerin yer alması bu yöntemlerin eklemeli imalat da en çok tercih edilen ikincil işlem grubu olmasına yol açmıştır. Şöyle ki oluşan bu durum, bu yöntemlerin hem uygulama tekniği açısından hem makine/teçhizat açısından, hem de kullanılan sarf malzemeleri açısından da gelişmesini sağlamış, daha doğru tabir ile gelişmesini zorunlu kılmıştır. Geleneksel olmayan yöntemlerden biri olan eklemeli imalatın popülerleşme evresi sonrası geleneksel yöntemler ile üretilen parçaların özelliklerinin eklemeli imalat ile her anlamda daha iyi seviyelere getirilmesi, bu yöntemlerin yavaş yavaş yerini alma sürecini başlatmış ve hızla devam ettirmiştir. Fakat eklemeli imalatın doğasında olan bazı kusurlarından dolayı yüzey özelliklerinin ve başka diğer özelliklerinin iyileştirilmesinin gerekmesi ile de ikincil işlem ciddi anlamda söz konusu olmuştur. Böylece, çok çeşitli, kullanımı basit,

yatırım ücreti ve işlem maliyeti az, uzun yıllardır tecrübe edilmiş mekanik işlemler yardımı koştur. Geleneksel yöntemlerle üretilen parçalara uygulandığı gibi eklemeli imalat ile üretilen parçalara da uygulanan mekanik ikincil işlemler, bazı durumlarda eklemeli imalat yöntemlerine uygun olacak ek özelliklerin de eklenmesiyle tam anlamıyla kullanışlı duruma gelmiştir. Aynı zamanda literatür incelendiğinde de mekanik ikincil işlemlerin diğer ikincil işlemlere kıyasla daha çok araştırma konusu olduğu açıkça görülmüştür. Literatür araştırmalarında da görüleceği üzere “*asıl amacın/ilk istenenin*” her yöntemde karşılaşılan bir kusur olan yüksek yüzey pürüzlülüğünü azaltmak ya da genellemek gerekirse yüzey kalitesini istenilen seviyeye getirmektir. İstenilen yüzey kalitesini sağlamanın yanında bazı yöntemlerde yorulma dayanımının artırılması, çatlak oluşumunun önlenmesi, yüzey sertliğinin artırılması gibi mekanik özelliklerde iyileşme de beklenmektedir. Bunun yanında ikincil işlemler kullanım amacına göre de değişiklik göstermektedir. Örneğin, “Aşındırıcı Akışkanla Yüzey İşlem” prosesinde delikli veya kanallı parçaların özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmışken, “Manyetik Aşındırıcı ile Yüzey İşlem” prosesinde ise kompleks parçaların özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca geleneksel yöntemler ile üretilen parçalara uygulanan bazı ikincil işlemler de (kumlama, bilyeli dövme gibi), eklemeli imalatla yüzey kalitesini iyileştirmek ve bazı mekanik özellikler kazandırmak için de tercih edilmektedir. Bununla birlikte literatürde aynı malzemeye uygulanan farklı ikincil işlemlerin birbirlerine göre kıyaslandığı çalışmalar da bulunmaktadır [47, 49]. Bu çalışmalar, farklı mekanik ikincil işlemlerin aynı malzeme üzerindeki etkisinin olumlu ve olumsuz yönleri ile ilgili literatüre ciddi anlamda katkıda bulunmaktadır. Ayrıca şu da unutulmamalıdır ki, her ikincil işlemin farklı malzeme grupları üzerinde oluşturduğu etki, malzemelerin sergilediği mekanik özellikleri gibi etkenlerden dolayı değişiklik gösterebilmektedir.

Eklemeli imalat ile üretilen parçalarda en sık yaşanan problemler Bölüm 2.1.3’te sunulmuştur. Oluşan bu kusurlar tercih edilen yöntemle göre değişiklik gösterebilirken, EBM teknolojisinde kullanılan algoritma sayesinde, bu yöntem ile parçaların daha az kusur ile üretilebilmesi sağlanmaktadır. Bununla birlikte, yine de gaz porozitesi, ergimemiş tozlar, yetersiz bölgesel ergitme vb. kusurlar, EBM ile üretilen parçalarda mevcut olabilmektedir. EBM’de mevcut olan ve çoğunluğu diğer yöntemlere nazaran daha küçük yapıdaki kusurlar ise çoğunlukla Sıcak İzostatik Pres (İngilizcesi Hot Isostatic Press (HIP)) adı verilen termal ikincil işlem yöntemi ile ortadan kaldırılmaktadır.

Bulunduğumuz zaman itibariyle ise, EBM yönteminde yaşanan en büyük problem, yüzey gerilimi nedeniyle ergiyik havuzuna yapışan ergimemiş tozlar, ergiyik bölge (kaynak izi - Plateau Rayleigh), termo-kapiler konveksiyon akışı (Marangoni Etkisi) nedeniyle ortaya çıkan yüksek yüzey pürüzlülüğü ve buna ek olarak kontrol edilemeyen ergitme sebebiyle yüzeyde mevcut olan gözenekliliklerdir. EBM yönteminde katman kalınlığının fazla olmasından da ortaya çıkan ciddi yüzey pürüzlülüğü değerleri, parçanın üretim sonrası kullanımını epey kısıtlayarak, yöntemin kullanım oranını da etkilemektedir. Literatürde ise EBM ile üretilen birçok parçaya aynı şekilde birçok farklı mekanik ikincil işlem uygulanmıştır. Bu ikincil işlemler, parçaların yüzey kalitelerini önemli ölçüde iyileştirmiş ve bununla birlikte aynı zamanda mekanik özelliklerini de geliştirmiştir.

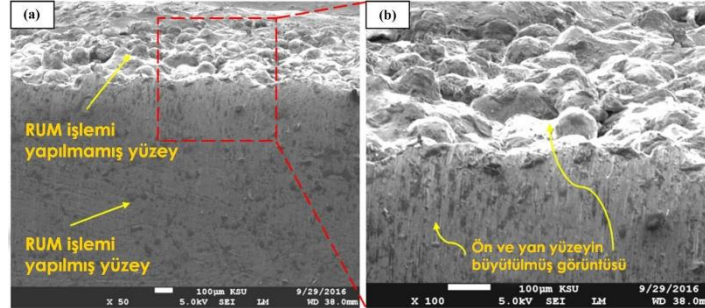
Rotella ve ark. [50], aralarında EBM üretim yönteminin de bulunduğu Ti-6Al-4V malzemesine son paso talaş kaldırma işlemi uygulamıştır (Şekil 2.14). Bunun sonucunda parçaların yüzey ve yüzey altı özellikleri iyileştirilmiş, şekilde görüldüğü üzere en çok etkilenen tabakanın bulunduğu yöntem EBM olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 2.14. Farklı yöntemler ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımına uygulanan son paso talaş kaldırma işleminin yüzey altında meydana getirdiği deformasyon ve bunun sonucunda oluşan yüzey altı sertlikleri [50].

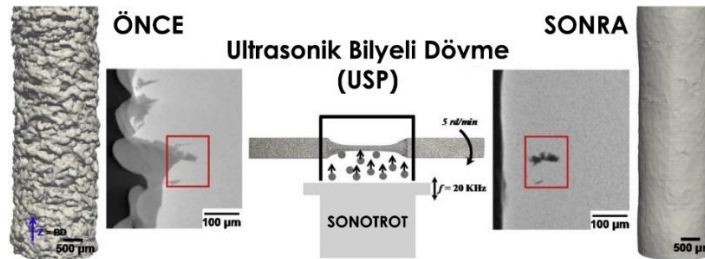
Ahmed ve ark. [51], EBM ile üretilen Ti-6Al-4V malzemesine birçok farklı proses parametreleri ile “Dönel Ultrasonik Son Yüzey İşlemi” uygulamıştır. Bunun sonucunda bu malzemenin işleme parametrelerini kısmen eniyilemiş, ve en iyilenen parametrede yüzey pürüzlülüğünün (R_a) 0.2603 μm değerine kadar düştüğünü analiz etmişlerdir. Bahsedilen bu en iyi yüzey kalitesinin, düşük ilerleme hızı, kesme derinliği, titreşim güç

kaynağı, frekans ve yüksek iş mili hızı değerlerinde elde edilebildiğini ortaya koymuşlardır. Şekil 2.15'te uygulanan ikincil işlem sonucu parçanın yüzeylerinde meydana gelen iyileşme görülmektedir.



Şekil 2.15. Dönel ultrasonik son yüzey işleminden sonra EBM parçalarının SEM görüntüleri: Yan ve ön yüzeyler [51].

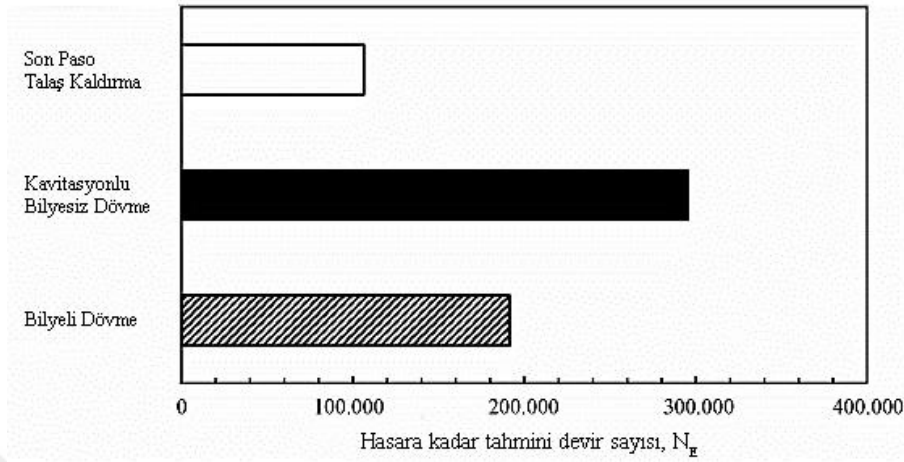
Persenot ve ark. [52], EBM ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım malzemesine uyguladıkları ultrasonik bilyeli dövme işleminden sonra parçanın yüzey kalitesinin önemli ölçüde iyileştiğini (Şekil 2.16) ve yorulma direncinin arttığını ortaya koymuşlardır. Yorulma direncindeki bu artışın ise, esas olarak yüzey kalitesindeki önemli iyileşmenin yanı sıra basma kalıntı gerilmelerin varlığına ve yüzeye yakın şiddetli plastik deformasyona bağlı daha ince bir mikro yapıya bağlı olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.16. Ultrasonik bilyeli dövme işleminden sonra EBM parçalarının tomografik görüntüleri [52].

Sato ve ark. [53], EBM ile üretilen numunelerin düşük yorulma direncine sahip olduğunu ifade ederek, yorulma ömürlerinin, bilyeli dövmeden daha etkili bir şekilde kavitasyonlu dövme ile iyileştirilebildiğini göstermişlerdir. Aynı zamanda kavitasyonla dövmede, işlem görmemiş numunenin yüzeyinin aşırı derecede pürüzlü olmasına rağmen, 194 ± 34 MPa'lık bir basınç kalıntı gerilmesini, bilyeli dövmenin ise, işlem görmemiş numunede 127 ± 30 MPa'lık bir basma kalıntı gerilmesini ortaya çıkardığını analiz etmişlerdir. İşlenmiş örneklerle ilgili olarak, bilyeli dövme ve kavitasyonla dövme, sırasıyla 348 ± 26

ve 648 ± 20 MPa'lık basma kalıntı gerilmelerini meydana getirdiğini göstererek kavitasyonlu dövmenin etkisini ortaya koymuşlardır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Bilyeli dövme ve kavitasyonlu bilyesiz dövme uygulanan son paso talaş kaldırılmış numunelerin yorulma ömürleri ($\sigma_a = 400$ MPa'da) [53].

2.2.3.2. Termal İkincil İşlemler

Termal ikincil işlemler, eklemeli imalat ile üretilen parçanın doğrudan veya dolaylı şekilde ısıya ilişkin teması ile parçanın yüzeyinde veya bütünündeki özellikleri iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Eklemeli imalat yöntemleri ile parça üretimi sonrası tabladan sökerek ya da tabladan sökmeden uygulanacak ısıl işlemler süreç sırasında oluşan kalıntı gerilmeleri en aza indirmektedir. Sonrasında ise başta mikroyapı, mikrosertlik, porozite gibi mekanik özellikleri doğrudan etkileyen unsurlar olmak üzere diğer tüm parça özelliklerini de istenilen seviyeye getirmektedir. Bu durum dolayısıyla malzemelerin ısıl işlem davranışlarının da detaylı incelenmesini, araştırmaların çoğalmasını ve hatta malzemelere özgü ısıl işlem standartlarının oluşmasını sağlamıştır. Literatürde ise bu standartlara dayalı birçok çalışma yürütülmüştür [54-60].

Eklemeli imalat katmanlar, malzemeye bağlı olarak bir bağlayıcı sistem veya lazer/ışın teknolojisi ile birbirlerine bağlanır. Pek çok eklemeli imalat yöntemi, üretilen bileşenlerin daha sonra ısıl işlem görmesini gerektirecek cinsten özellikler barındırmaktadır. Isıl işlemlerin uygulanması aşaması, fırınların gereksinimlerine, bileşen malzemesine, çalışma sıcaklığına, fırındaki atmosfere ve tabi ki eklemeli imalat sürecine bağlıdır. Lazer bazlı prosesler ile işlenen parçalarda lazer işlemleri, hızlı soğutmaya sahip olmaları nedeniyle genellikle kalıntı gerilmelere neden olmaktadır. Bu yüzden, bu parçalar bir

gerilme giderme işlemine tabi tutulabilir. Buna karşılık, elektron ışını esaslı eklemeli imalat parçaları herhangi bir kalıntı gerilme giderme işlemi gerektirmez. Eklemeli imalat ile üretilmiş parçaların özellikle mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla tavlama işlemleri gibi tek kademe ısıt işlemler yapılabildiği gibi, T6 benzeri ısıt işlemler (çökelti sertleşmesi: çözeltiye alma işlemini takiben yapılacak su verme ve sonrasında suni yaşlandırma) de etkili bir şekilde uygulanabilmektedir [61, 62].

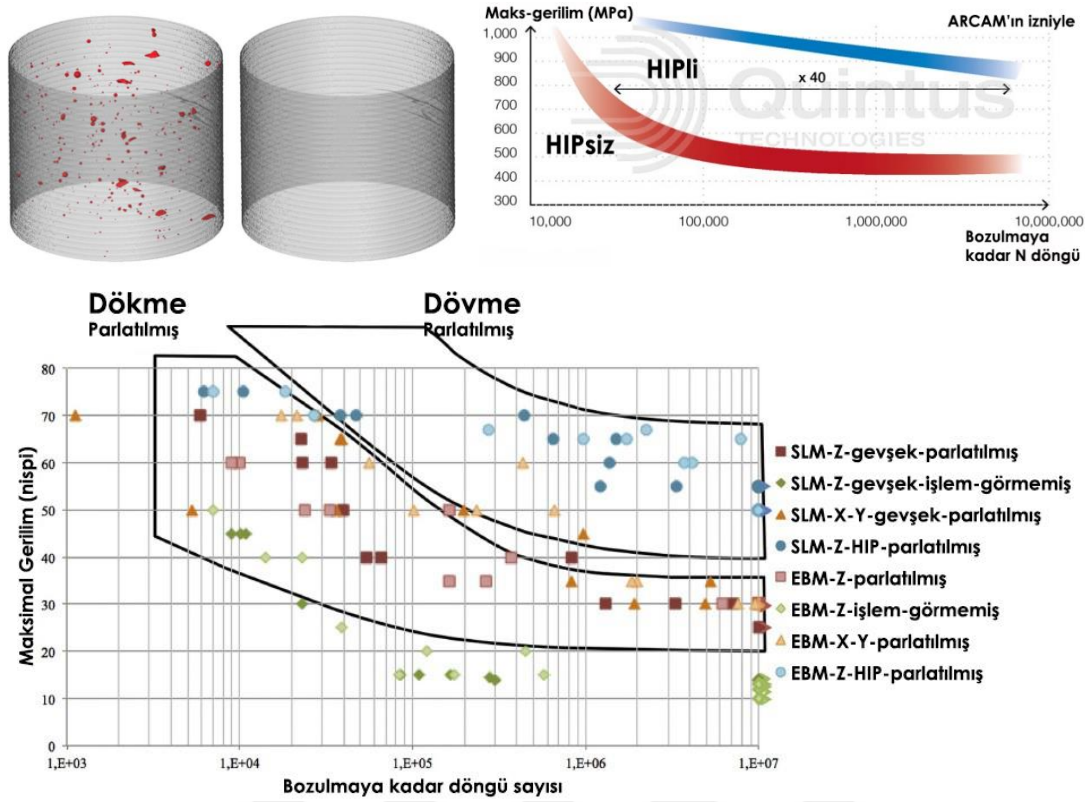
Eklemeli imalat parçaları ısıt işleme tabi olurken, geleneksel ısıt işlemlerde kullanılan fırınlar ve benzer soğutma hızı/soğutma ortamları kullanılmaktadır. Fakat parçalara ısıt işlem uygularken ısıt işlem fırınının atmosferi, yani hangi tür gaz altında işlem yapıldığı veya vakum ortamının olup olmaması önem arz etmektedir. Bilindiği üzere, oksitlenme davranışı açısından hassas parçalar için hava ortamı yerine argon gibi inert atmosferler [63], parçaların korozyon özelliklerinin eniyilenmesi istendiği durumlarda ise inert atmosferler yerine hidrojen ve vakum gibi indirgeyici ortamlar tercih edilmelidir. Dolayısıyla, eklemeli imalat ile üretilen metalik malzemeler göz önüne alındığında, alüminyum alaşımları haricindeki tüm malzemelerin (titanyum, süperalaşım, çelik esaslı vb.) ısıt işlemi sırasında oluşabilecek oksitlenmenin önüne geçmek için işlem koruyucu (inert) atmosferlerde ya da hidrojen ve vakum gibi atmosferlerde ısıt işleme tabi tutulması gerekmektedir.

Ayrıca, ısıt işlemlerin malzemenin yüzey topoğrafyasını da etkilediği bilinmektedir [64]. Malzemenin mikroyapısının ısıt işlemler ile değişim geçirmesi, yüzey özelliklerinin de farklı boyutsal ölçülerde değişiklik göstermesine yol açmaktadır. Bu durum aşınma, yorulma ve korozyon gibi doğrudan malzemenin yüzey özellikleri ile ilişkili özellikleri etkilemektedir.

EBM yönteminin, daha önce de bahsedildiği üzere yüksek proses sıcaklıklarını kullanması, literatürde uygulanan gerilim giderme vb. bazı ısıt işlemlerin uygulanma gerekliliğini ortadan kaldırarak zamandan tasarruf sağlamaktadır. Bununla birlikte EBM ile üretilen parçalarda en çok tercih edilen ısıt işlem yöntemi olan HIP (Sıcak İzostatik Presleme), malzeme özelliklerini önemli ölçüde artırmak için gözenekleri ortadan kaldırmak ve kusurları gidermek için kullanılmaktadır. Ayrıca literatürde yine de tavlama (annealing-normalizing), çökelti-yaşlandırma serleştirme gibi farklı ısıt işlemlerin etkileri de araştırılmıştır [62].

Son on yıl içinde araştırmacıların büyük bir bölümü, HIP metodu ile Eİ parçalarının gözenekleri ve kusurları yok ettiğini, mikroyapıyı değiştirdiğini ve mekanik performansı önemli ölçüde etkilediğini araştırmışlardır [65]. Üretim yönünde meydana gelen hızlı soğutma ve dolayısıyla katılaşma, literatürde diğer yazarların da bahsettiği üzere Eİ L-PBF (Lazerli-PBF, yani SLM gibi) numunelerinde “epitaksiyal gelişen” anizotropik mikroyapının oluşmasına yol açmıştır [66]. Bu olay aynı şekilde EBM yöntemi ile üretilen titanyum alaşımlarında da deneyimlenmiştir [40].

Chastand ve ark. [67, 68], Şekil 2.18, EBM ve SLM ile üretilmiş numunelerin işlem görmemiş ve HIP uygulanmış koşullardaki yorulma dayanımındaki değişimi göstermekle birlikte, döküm ve dövme yöntemler ile üretilen numunelere yakın yorulma dayanımlarının elde edildiği görülmektedir. Şöyle ki SLM ve EBM ile üretilen parçaların yorulma dayanımları HIP prosesi ile birlikte %80 artış göstermiştir. EBM prosesi, yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen üretimi nedeniyle çok düşük kalıntı gerilme değerlerine sahiptir ve bu durum gerilim giderme ısıtma işlemi vb. diğer ısıtma işlem gereksinimini minimuma indirmektedir. Özellikle EBM prosesinde ve titanyum alaşımlarında gerçekleştirilen HIP prosesi, yüksek sıcaklık ve basınç kombinasyonu kullanılarak komponentte mevcut olası gözenekliliği azaltmak için kullanılır. Bu, malzemenin süneklik, darbe dayanımı, yorulma direnci ve güvenilirlik gibi mekanik özelliklerini iyileştirir.

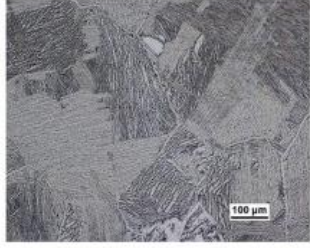
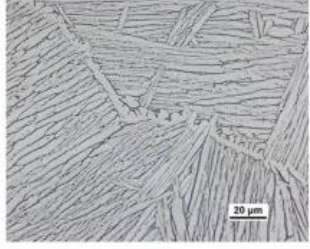
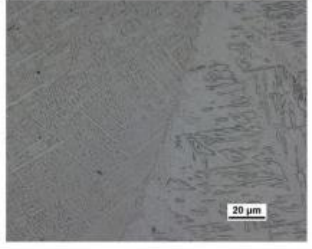
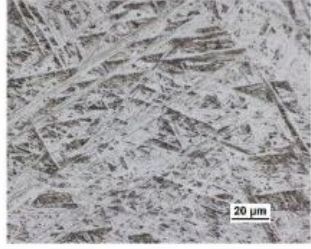


Şekil 2.18. HIP işlemi ile malzeme yapısındaki iç gözeneklerin kapanması sonucunda elde edilen üstün yorulma ömrü [67, 68].

Literatürde HIP işleminin yanında, Ti-6Al-4V malzemesine özgü α ve β faz yapılarının mevcut olması sebebiyle standartlara uygun diğer birçok ısıtıl işlem de uygulanmaktadır. Bu ısıtıl işlemler β -transus sıcaklığı üstünde, β -transus sıcaklığına çok yakın ve β -transus sıcaklığı altında olacak şekilde değişiklik göstermektedir. Bilindiği üzere Ti-6Al-4V malzemesinin dönüşüm sıcaklığı üstünde tamamen β fazında olması ve soğutma hızlarına bağlı olarak faz yapısının α fazı oranının değişiklik göstermesi istenilen özellikleri sağlamak adına önem taşımaktadır [1].

Bu konuyla ilgili olarak literatürde yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birinde, Galarraga ve ark. [69], EBM ile üretilmiş Ti-6Al-4V alaşım malzemesine birçok ısıtıl işlem yapmışlardır. Örneğin Şekil 2.19’da, β -transus sıcaklığı üstünde yapılan ısıtıl işlemlerin parçanın işlem görmemiş malzemeye göre (İşlem görmemiş malzemenin mekanik özellikleri: UTS=1073 MPa (± 45 MPa) YS=1001 MPa (± 42 MPa) el=11% (± 1 %) Hardness: 366 HV (± 5 HV)) su ile soğutmada ciddi anlamda mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir. Hava ve fırın soğutmada ise parçanın

mukavemetinin işlem görmemiş parçaya göre azaldığı, bununla birlikte işlem görmemiş ve su ile soğutulmuş parçaya göre yüzde uzamayı geliştirdiği görülmüştür.

	1100°C/30dak + fırında soğutma	1100°C/30dak + havada soğutma	1100°C/30dak + suda soğutma
100x			
500x			
Özellikler	• UTS=913 MPa (±38 MPa) • YS=774 MPa (±112 MPa) • el=13% (±2 %) • 378 HV (±44 HV)	• UTS=998 MPa (±52 MPa) • YS=847 MPa (±90 MPa) • el=13% (±7%) • 365 HV (±31 HV)	• UTS=1200 MPa (±50 MPa) • YS=932 MPa (±80 MPa) • el=1.8% (±1.5%) • 414 HV (±33 HV)

Şekil 2.19. EBM ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımına uygulanan farklı ısı işlemler sonucu elde edilen mikroyapılar ve bazı mekanik özelliklerdeki değişim (UTS: Maksimum Çekme Mukavemeti, YS: Akma Mukavemeti, el: % Uzama, HV: Vickers Sertlik) [69].

Literatür incelendiğinde, mevcut eklemeli imalat yöntemleri ile farklı malzeme türleri kullanılarak üretilen parçalara aynı şekilde çok sayıda farklı ikincil işlemin uygulandığı görülmektedir. Bu ikincil işlemlerin ise yalnızca birkaçı EBM ile Ti-6Al-4V alaşım malzemesinden üretilen parçalara uygulanmıştır. Bu açıdan bakıldığında literatür, EBM yöntemi ile Ti-6Al-4V alaşım malzemesinden üretilen parçalara uygulanan ikincil işlemler açısından yetersizdir.

Bu tez çalışmasında, literatürde eksikliği hissedilen bu araştırma konusuna odaklanmış ve bu konu derinlemesine araştırılmıştır. EBM yöntemi ile Ti-6Al-4V alaşım malzemesinden üretilen parçalara literatürde uygulanan ikincil işlemlerin yanı sıra, bu yöntemde ilk defa araştırılacak olan ikincil işlemlerin de eklenmesiyle araştırma alanı genişletilmiştir. Tez çalışması, geleneksel ikincil işlemlerin başında gelen talaşlı imalat ile birlikte kitle yüzey iyileştirme proseslerinden olan vibrasyonlu yüzey işlem ve mekanik ikincil işlemler başlığı altında genellikle yüzey temizleme amacı ile kullanılan kumlama yöntemlerini içermektedir. Bu mekanik ikincil işlemlerin yanında ısı işlemler

de uygulanmıştır. Çalışmada, her biri farklı geometriye sahip Ti-6Al-4V parçaların EBM yöntemi ile üretilmesi sağlanmış ve bu parçalara uygulanacak ikincil işlemler ile yüzey kalitelerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu ikincil işlemler hem birbirleri arasında hem de geometriye bağlı olarak yaratacağı etkiler açısından kıyaslanmıştır. Ayrıca uygulanan ikincil işlemler de kendi içinde farklı parametreler ile denenmiş, böylece, belirli bir ikincil işlem yönteminin kullanılması amaçlandığında optimum koşulların da elde edilmesi sağlanmıştır. İkincil işlemler sonucu parçaların yüzey topoğrafyası, yüzey pürüzlülüğü, mikroyapı, mikrosertlik, tokluk, aşınma dayanımı gibi özelliklerindeki değişimlerin analiz edilmesi sağlanmıştır.



3. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DÜZENEKLER

3.1. Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan İş Parçaları ve Malzeme Cinsi

Deneyisel çalışma kapsamında, ASELSAN A.Ş. tarafından “Elektron Demeti ile Ergitme Eklemeli İmalat Yöntemi” kullanılarak farklı geometrilere sahip parçalar üretilmiştir. Bu parçalar yüksek mukavemet/ağırlık oranı, mükemmel korozyon direnci, üstün biyo-uyumluluk gibi özelliklere sahip, havacılık, biyo-mekanik/medikal, gemcilik gibi endüstrilerde sıklıkla kullanılan ve titanyum alaşımları içinde en çok tercih edilen Ti-6Al-4V (ayrıca UNS tarafından R56400, ya da Grade 5 Titanyum olarak da bilinir) alfa-beta alaşımıdır. Bu alaşımın kimyasal özellikleri sırasıyla Tablo 3.1’de sunulmaktadır.

Tablo 3.1. Ti-6Al-4V alaşımının toz malzemesinin başlangıçtaki kimyasal bileşimi, üretilen Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal bileşimi ve ASTM F2924-14 standartlarına göre kimyasal bileşim, ASELSAN ve ASTM [70] tarafından sağlanan veriler.

Element (%)	Ti	Al	V	Fe	O	H
Ti-6Al-4V Alaşım Tozu	Denge	6.5	3.9	0.19	0.08	0.003
EBM ile Üretilen Ti-6Al-4V Parçası	Denge	5.8	3.9	0.19	0.15	0.004
ASTM F2924-14	Denge	5.50-6.75	3.50-4.50	< 0.30	< 0.20	< 0.0015

3.2. Elektron Demeti ile Ergitme Eklemeli İmalat Yöntemi Kullanılarak Parça Üretimi

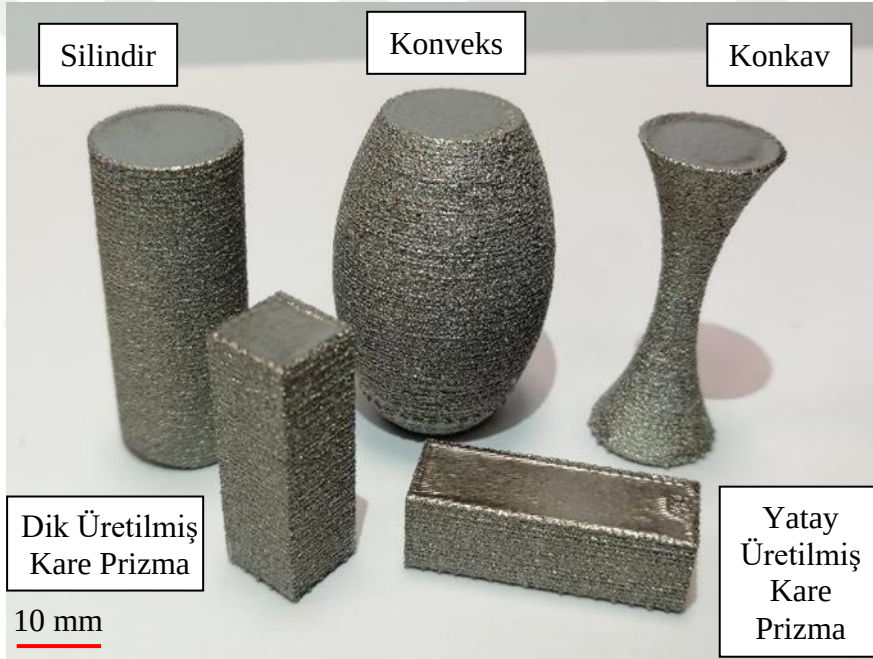
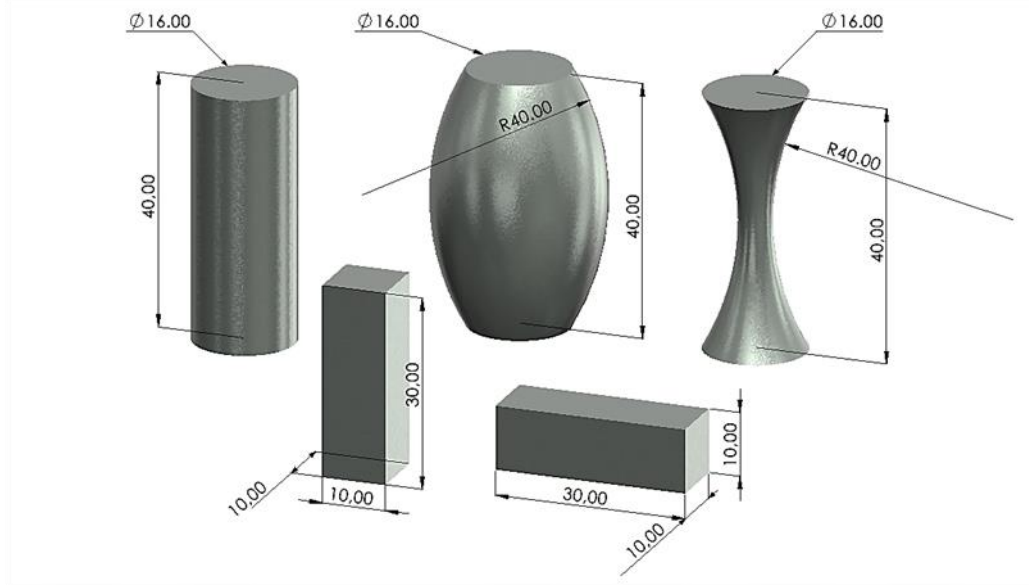
Gaz atomizasyonlu Ti-6Al-4V alaşımının tozları (küresel tozların boyutları 40 µm ve 220 µm arasında olup ortalama toz çapı 75 µm’dir) ASELSAN A.Ş.’de bulunan ARCAM A2X EBM cihazında Şekil 3.2’de gösterilen geometrilerdeki ve ölçülerdeki parçaların üretiminde kullanıldı. Şekil 3.1’de ise ARCAM A2X EBM cihazı ve Tablo 3.2’de de cihazın özellikleri sunulmaktadır. Modellenen parçalar EBM proses zinciri çerçevesinde üretilmiş ve ayrıca destek yapılarından da arındırılmıştır.



Şekil 3.1. ARCAM EBM A2X makinesi

Tablo 3.2. ARCAM A2X EBM cihazının teknik özellikleri.

Maksimum İnşa Yüksekliği	200 x 200 x 380 mm (B x E x Y)
Maksimum Işın Gücü	3kW
Katot Tipi	Tungsten Filament
Minimum Işın Çapı	250 µm
Maksimum Elektron Işını Aktarım Hızı	8.000 m/s
Aktif Soğutma	Mevcut Değil
Minimum Hazne Basıncı	5 x 10 ⁻⁴ mbar
Tipik İnşa Atmosferi	2 x 10 ⁻³ mbar (kısmi helyum basıncı)
He tüketimi, inşa prosesinde	1 litre/saat
He tüketimi, havalandırma	50-75 litre/inşa döngüsü
Güç Kaynağı	3 x 400 V, 32 A, 7 kW
Yaklaşık Boyutları	1.850 x 900 x 2.200 mm (B x E x Y)
Tipi proses sıcaklık aralığı	600-1.100°C
Ağırlık	1.700 kg
CAD arayüzü	Standart: STL
Uygun Malzemeler	Arcam EBM Ti6Al4V Grade 5, P-Mtrl Arcam EBM Ti6Al4V Grade 23, P-MtrlA Arcam EBM Nickel alloy 718, D-Mtrl Arcam EBM TiAl, D-Mtrl



Şekil 3.2. Ti-6Al-4V alaşım malzemesinden EBM yöntemiyle üretilen farklı geometrilere sahip parçalar ve ölçülendirilmeleri (mm cinsinden).

Parçaların üretiminde ARCAM EBM A2X makinesi ile varsayılan şekilde sunulan ve optimum olarak belirlenmiş parametreler kullanılmıştır. Tablo 3.3'te bu parametreler sunulmaktadır. Sunulan parametreler ile gerçekleştirilen üretim sonrası destek yapılarının parçalardan sökülmesi sağlanmış ve parça gerçek geometrisine kavuşmuştur.

Tablo 3.3. Parçaların üretiminde tercih edilen parametreler.

Üretim Parametreleri	Birim	Değer
Katman kalınlığı	mm	0.05
Işın gücü	kW	Maksimum 3
Uygulanan voltaj	kV	60
Işın hızı	m/s	10 (ön-ısıtma) 140 (kontür) 9* (tipik tarama)
Odak ofseti	mA	70 (ön-ısıtma) 6 (kontür) 25 (hatch)
Hız fonksiyonu* (tarama sırasında ışın hızını belirler)		45

3.3. Uygulanan İkincil İşlemlerde Tercih Edilen Cihazlar ve Ekipmanlar

3.3.1. CNC İşleme Merkezi ve Frezeleme Operasyonu

EBM yöntemiyle parçaların üretim aşamasını müteakiben yüzey bütünlüğü özelliklerini geliştirmek amacıyla ikincil işlemlerden biri olan frezeleme ile son paso talaş kaldırma işlemi uygulanmıştır. Frezeleme operasyonu çerçevesinde parçalar uygun bir şekilde bağlanmış ve Şekil 3.3'te gösterilen Makino F5 3-eksenli dikey frezeleme tezgâhında işlenmiştir. Testlerde titanyum alaşımlarına uygun olacak şekilde takım tercih edilmiş ve her testte takımlar yenilenmiştir. Bütün testlerde aynı tezgâhtan ve ekipmanlardan yararlanılmıştır.



Şekil 3.3. Makino F5 3-eksenli dikey frezeleme tezgâhı.

Son paso talaş kaldırma operasyonlarından biri olan frezeleme operasyonunda farklı kesme hızları ve diş başına ilerleme değerleri kullanılmış ve diğer değişkenler sabit olarak kabul edilmiştir. Parametre belirleme aşaması aynı şekilde işlemiş, böylece 100 ve 400 m/dak (1592 ve 6369 rpm) gibi farklı kesme hızlarının yanında 0,05 ve 0,15 mm/diş gibi farklı diş başına ilerlemenin yüzey bütünlüğü karakteristiklerine etkisi oransal bir şekilde incelenmiştir. Numunelerin frezeleme operasyonu bütün testlerde kuru kesme koşulunda ve 1 mm eksenel kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Kesici takım çapı (D) 20 mm olarak ve diş sayısı (z) 3 olarak seçilmiştir. Frezeleme operasyonlarında kullanılan kesme parametreleri özet olarak Tablo 3.4’te sunulmuştur. Bu deney yaklaşımı ile her bir parçaya toplamda 4 deney yapılmıştır.

Tablo 3.4. Optimum koşullardaki frezeleme testleri için belirlenen kesme koşulu ve parametreleri.

Kesme Hızı, V_c (m/dak)	Kesme Koşulları	Radyal Talaş Derinliği, a_e (mm)	Diş Başına İlerleme, f_z (mm/diş)	İlerleme Oranı (mm/dak)
100	Kuru	1	0,05	239-716
400	Kesme		0,15	959-2877

3.3.2. Kumlama Operasyonu

Üretilen parçalara Şekil 3.4’te gösterilen, TS EN 12100:2010 ve TS EN 60204-1 standartlarına uygun olarak üretilen SK-500 tezgah üstü kumlama makinesi ile ikinci işlem uygulanmıştır. Parçalar, geometrilerine uygun olacak bağlama aparatları ile sabitlenmiş ve parçaların her yüzeyine eşit miktarda aşındırıcının nüfuz etmesi amacıyla

3 dakika uygulanma süresi tercih edilmiştir. Kumlama işlemi 600 lt/dak hava tüketiminde ve yaklaşık olarak 6 barda gerçekleştirilmiştir. Kumlamada aşındırıcı malzeme olarak alüminyum oksit (Al_2O_3 - F70: 180-250 μm ortalama tane boyutu) kullanılmıştır. Testler “Kişilerin Maruz Kaldığı Solunabilir ve Toplam Toz Maruziyeti-İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununun 10. Maddesi 4. Bendi” açısından standartlara uygun şekilde yapılmıştır.



Şekil 3.4. Saykar SK-500 model tezgah üstü kumlama makinesi.

3.3.3. Vibrasyonlu Yüzey İşlem Operasyonu

Vibrasyonlu yüzey işlem operasyonu EBM ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım parçalarına uygulanan bir diğer mekanik ikincil işlemdir. Şekil 3.5’te gösterilen ERBA ETP-100 vibrasyonlu yüzey işlem cihazı, 100 lt çalışma haznesi hacmine, 1400 rpm motor hızına, 0.55 kW tahrik gücüne ve 140 kg toplam ağırlığa sahiptir. Parçalar “Açılı Üçgen Prizma Seramik Vibrasyon Aşındırıcı Taşları (25 x 25 mm)” ve “ASP-63 işlev sıvısı (çelik vb. aşındırma ve parlatma özelliğine sahip, 1.2 ph değerindeki işlem sıvısı)” kullanılarak toplamda 12 saat süreyle ikincil işleme tabi tutulmuştur.



Şekil 3.5. ERBA ETP-100 vibrasyonlu yüzey işlem cihazı ve seramik aşındırıcı taşlar.

3.3.4. Isıl İşlem Cihazı

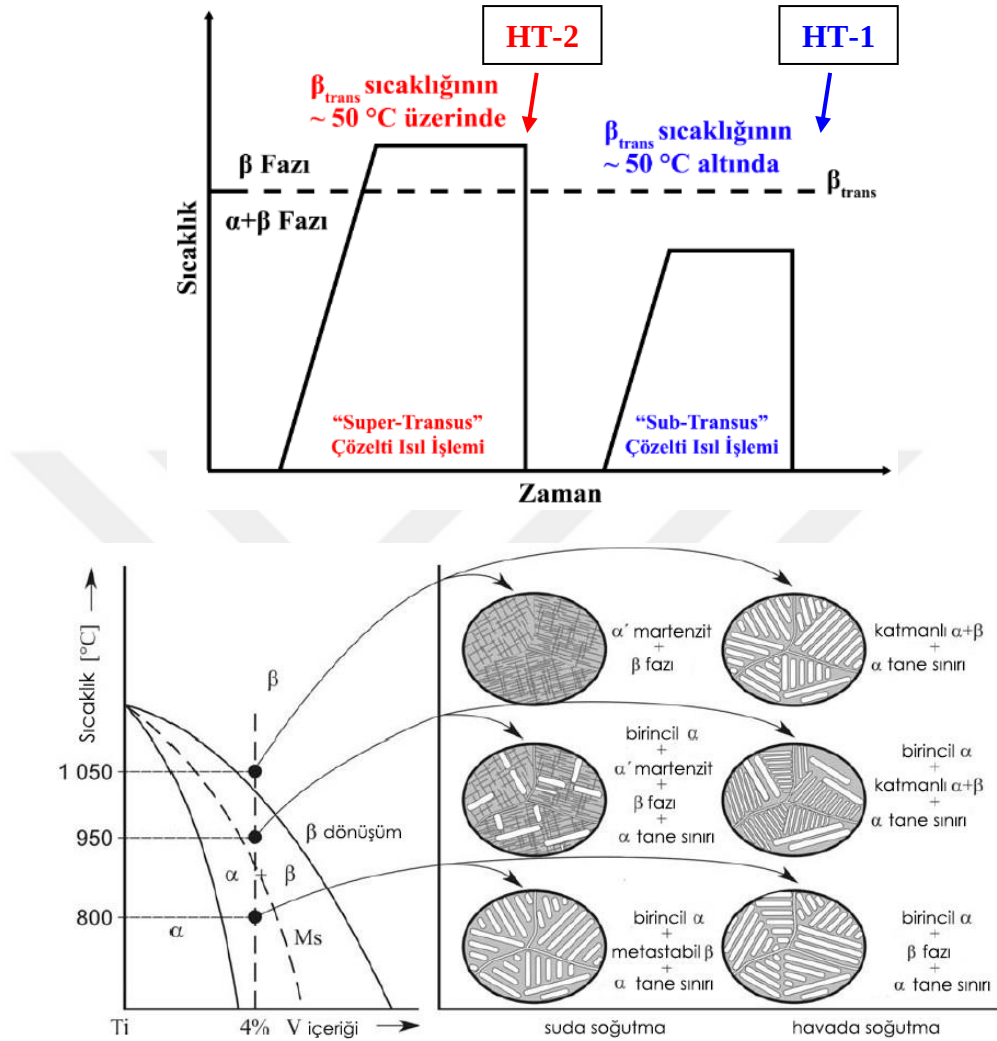
Ti-6Al-4V alaşım parçaları yüksek sıcaklıklara çıkabilen (0-1200°C), 5000 W güce (23 A/Faz) sahip ve 7 step programlanabilir ısıtma işlem cihazı ile ısıtma işlemine tabi tutulmuşlardır. Şekil 3.6’da ısıtma işlem cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Isıl İşlem Fırını.

Isıl işlemler Ti-6Al-4V $\alpha+\beta$ alaşımına özgü olan “ β Transus Sıcaklığı (995 °C) [71]” baz alınarak normal atmosferde bu sıcaklığın altındaki ve üstündeki sıcaklıklarda yapılmıştır. Uygulanan ısıtma işleminin sıcaklık-zaman şeması Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Burada 950 °C / 1 Saat / Suda Soğutma işlemi “HT-1” olarak ve 1050 °C / 1 Saat / Suda Soğutma

işlemi ise “HT-2” olarak adlandırılmıştır. Şekil 3.7’de uygulanan ısıt işlemlerin zaman-sıcaklık diyagramları ve soğutma sonucu oluşabilecek mikroyapılar gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Ti-6Al-4V α+β alaışımının β Transus Sıcaklığı bazı alınarak yapılan ısıt işlemler ve farklı soğutma koşullarında ortaya çıkan mikroyapılar [72].

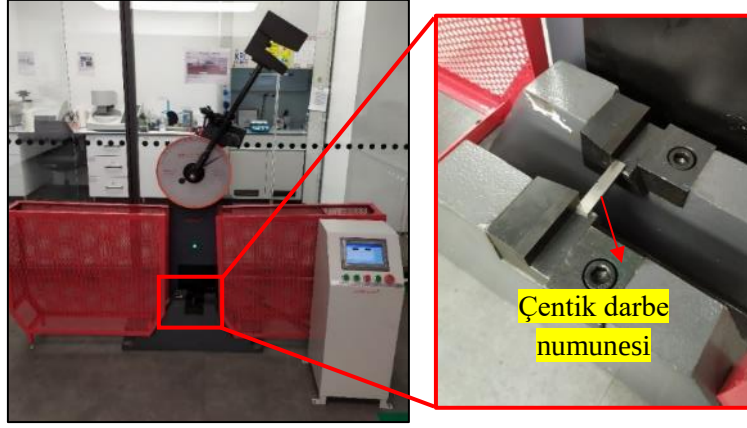
Titanyum alaşımlarının çözeltiliye alma ısıt işlemi, normalde alaışımın beta dönüşüm sıcaklığının biraz üzerinde veya biraz altındaki sıcaklıklara ısıtmayı içerir. Bir alfa-beta titanyum alaşımı çözeltili ısıt işlemine tabi tutulurken β dönüşüm sıcaklığı aşılsa, mukavemet özellikleri (özellikle süneklik) azalır ve sonraki ısıt işlemle tamamen geri kazanılamaz. Alfa-beta çözeltiliye alma işlemi, β dönüşüm sıcaklığının sadece biraz altındaki sıcaklıklara ısıtmayı içerdiğinden, sıcaklığın uygun şekilde kontrol edilmesi önemlidir.

Çözeltiliye alma işlemi iyi bilinen bir ısıtma işlemi yöntemidir. Ti-6Al-4V çözeltiliye alma işlemi ve ardından suda soğutma ile birincil α fazına veya α' martensite dönüştürülür. Bu nedenle, çözeltili işlemi, mikro yapının kontrol edilmesi için özellikle önemlidir. Bununla birlikte, beta dönüşüm sıcaklığı üstünde ısıtma işlemi görmüş alfa-beta alaşımları, süneklikte önemli kayıp yaşar [1]. Bu yüzden genellikle beta transus altındaki bir sıcaklık tercih edilmektedir. Fakat bu durum EBM prosesinde mevcut mikroyapının neredeyse ısıtma işlemi görmüş gibi bir davranış göstermesinden dolayı farklılık gösterebilmektedir. Ayrıca Ti-6Al-4V malzemesinin optimum mekanik özelliklerinin elde edilebildiği ısıtma işlemi aşamalarının başında β dönüşüm sıcaklığının hemen altında yer alan 955–970 °C / 1 Saat / Suda Soğutma çözeltili ısıtma işlemi gelmektedir. Sonrasında yapılan 480–595 °C / 4-8 Saat yaşlandırma ısıtma işlemi ile malzemenin en iyi özellikleri sağlanacaktır [1].

Ti-6Al-4V alaışımının çözeltiliye alma ısıtma işlemi görmüş mikro yapıları, stabilizatör ve çözeltili sıcaklığına büyük ölçüde bağlıdır. Çözeltili işlemi sırasında β fazının dönüşüm davranışı, stabilizatör bölümlenmesinin hâkimiyetindedir. Alüminyum ve vanadyum, sırasıyla α ve β fazları için stabilizatör görevi görür. β fazı, stabilizatör içeriğine bağlı olarak α' martensite veya yarı kararlı β fazına dönüştürülür. Bu durum göz önünde bulundurularak bu tez çalışmasında EBM ile üretilen Ti-6Al-4V alaışımının β dönüşüm sıcaklığı altında ve üstünde su ile soğutulmasının faz dönüşümü üzerindeki etkisi araştırılmaktadır.

3.4. Charpy-Impact/Çentik-Darbe Testi

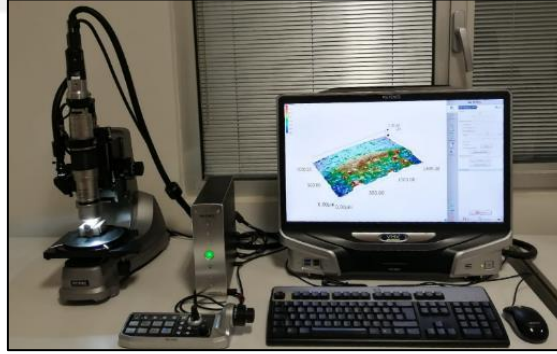
Parçalara ikincil işlemlerin gerçekleştirilmesinin ardından mekanik özelliklerini test etmek amacıyla ISO 148-1:2016 standartları doğrultusunda çentik darbe testi uygulanmıştır. Malzemelerin ani darbelere karşı direncini yani malzemenin tokluğunu belirlemek için gerçekleştirilen çentik darbe testi, oda sıcaklığında ve diğer optimum koşullarda gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8’de darbe testleri için kullanılan 150 Joule ilk enerji değerine sahip JBS 300B marka çentik darbe test cihazı sunulmuştur.



Şekil 3.8. JBS 300B marka çentik darbe test cihazı ve numunenin yerleştirilmesi.

3.5. İşlenmiş Numunelerin Yüzey Bütünlüğü Analizi İçin Kullanılan Ekipmanlar

Numunelerin yüzey iyileştirme operasyonları öncesi/sonrası ve metalografik muayene işlemleri sonucu görüntüleme/ölçüm işlemlerinde Şekil 3.9’da gösterilen 250x-2500x büyütme aralığı, birden çok görüntüyü birleştirme (stitching), 3B görüntü alma, görüntü alma sırasında otomatik odaklanma özelliklerine sahip KEYENCE VHX-6000 dijital mikroskop ve “KEYENCE software” yazılımı kullanılmıştır.



Şekil 3.9. KEYENCE digital mikroskop ölçüm sistemi ve SLM yöntemi ile üretilen Inconel 718 süper alaşım malzemesinin yüzey bütünlüğü analizleri.

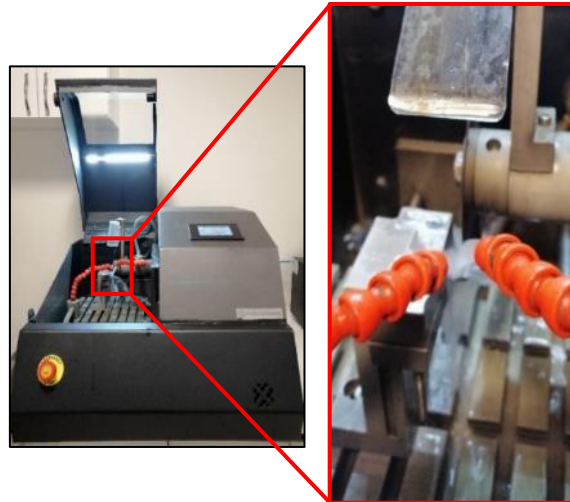
İşlenmiş ve işlenmemiş numunelerin topoğrafik analizlerinde (talaşlı imalat sonucu oluşan yüzey kalitesi incelemelerinde, eklemeli imalat ile üretilen parçaların topoğrafik analizleri vb.) ve parçalarda meydana gelen bozulma, kırılma vb. kusurların (eklemeli imalat ile üretilen parçalarda yaşanan birleşmeme, eriyememe ve katılaşmama, talaşlı imalat operasyonu sonucu parçada gelen mekanik bozulmalarda ve takımlarda meydana gelen kırık ve çatlak analizlerinde vb.) analizinde etkin bir biçimde kullanılmıştır.

İşlenen yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ölçülmesinde Mitutoyo SJ210 (Şekil 3.10) kullanılmıştır. Ölçümlerde ISO 1997 standartları esas alınmıştır. Ölçümlerde parçaların “Aritmetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü”, Ra ve “Maksimum Pürüzlülük Derinliği”, Rz dikkate alınmıştır. Her bir numunenin yüzey pürüzlülüğü eklemeli imalat ile üretilen parçalardaki düzensiz yüzey yapısı nedeniyle tekrarlanabilirliği sağlamak amacıyla farklı bölgelerden on kez tekrarlanarak ölçülmüştür.



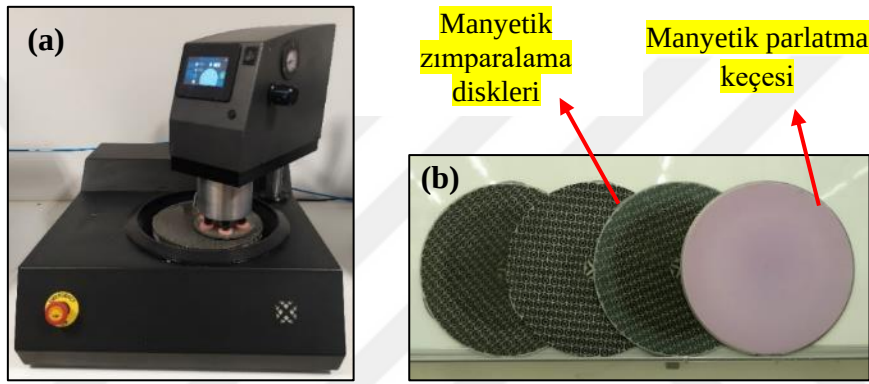
Şekil 3.10. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.

Parçalar, uygulanan ikincil işlemlerin yüzey ve yüzey altında meydana getirdiği değişimleri incelemek için “Mikrotest Multicut Sense Hassas Kesme Cihazı” kullanılarak numuneler şeklinde kesilmiştir. Böylece parçalar metalografik muayene işlemlerine hazırlanmıştır. İlgili cihazların fotoğrafları Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



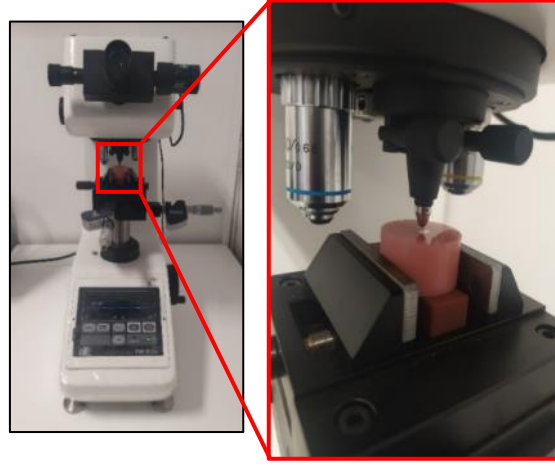
Şekil 3.11. Hassas kesme cihazı

Hassas kesme cihazı kullanılarak elde edilen numuneler, soğuk bakalitleme metodu kullanılarak metalografik muayene işlemlerine hazır hale getirilmiştir. Kesilen ve bakalite alınan numunelerin zımparalama ve parlatma işlemleri Şekil 3.12’de sunulan 250 rpm devir hızına sahip ve 300 N yük uygulayabilen “Multipol Advanced Plus Tam Otomatik Zımparalama ve Parlatma Cihazı”nda yapılmıştır. Numunelerin parlatma aşamasında öncelikle elmas zımpara kullanılırken, parlatma aşamasında ise 15, 30 ve 60 µm hassasiyetli grit manyetik zımparalama diskleri kullanılmış ve son olarak manyetik parlatma keçesi ile 50 nm boyutunda elmas partiküllü parlatma solüsyonu kullanılarak parlatılmıştır.



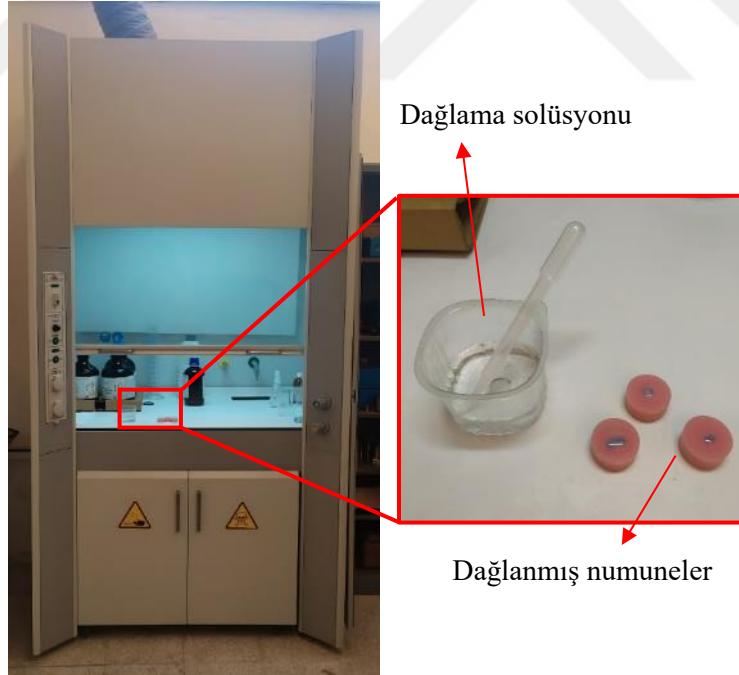
Şekil 3.12. Zımparalama ve parlatma cihazı (a) ve diğer ekipmanları (b).

Hazırlanan metalografik numunelerin yüzey ve yüzey altı sertlikleri Future-Tech FM-310e model Vickers (HV) mikrosertlik cihazı (Şekil 3.13) kullanılarak ölçülmüştür. Mikrosertlik testleri ISO 6507-2 standartlarına uygun şekilde uygulanmış ve analiz edilmiştir. Vickers yöntemiyle yapılan ölçümlerde 50gf-yaklaşık olarak 0.49 N (maksimum 2000 gf) yük 15 saniye uygulama süresi tercih edilmiştir. Bir numune üzerinde 5 kere sertlik ölçümü yapılmış ve ortalaması alınarak sertlik değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3.13. Vickers Mikrosertlik ölçüm cihazı

Numunelerin ikincil işlemler sonrasında yüzey ve yüzey altı özelliklerini incelemek için Şekil 3.14'te sunulan çeker ocakta 92 ml Saf Su, 6 ml HNO_3 ve 2 ml HF (Kroll's Reagent) dağlama solüsyonu hazırlanmıştır [73]. Parlatma işleminden sonra numuneler hazırlanan dağlama solüsyonunda 30 sn-1 dk süre ile dağlanmıştır. Mikroyapı ve yüzey topoğrafi görüntüleri Şekil 39'da sunulan Keyence VHX-6000 dijital mikroskop ile elde edilmiştir.



Şekil 3.14. Çeker ocak ve dağlama solüsyonu ile dağlama işleminin yapılması

3.6. Aşınma Analizi

Aşınma dayanım testleri için TURKYUS RTW Lineer Aşındırma Cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.15). Bu cihaz ileri-geri mekanizması ile ASTM G133 standartlarına göre farklı yükler altında (1Ndan-30Na kadar), farklı bilye türleri (çelik, Si3N4, WC, Al2O3 gibi) ve farklı kayma hızları (5 mm/s’ den 40 mm/s’ ye kadar) ile çalışabilmektedir. Aşınma cihazında deney sonucunda; 20bit hızındaki encoderi sayesinde numunenin gerçek yüzey sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvvetleri elde edilir ve aşınma oranı (optik mikroskop vasıtasıyla aşınma izinin alanı ölçülür ve hacmi hesaplanır) hesaplanır. Tez çalışmasında ise 6 mm çapında “Tungsten Karbür” bir bilye tercih edilmiştir. Ayrıca testlerin doğruluğunun sağlanması amacıyla ön testler yapılmış, böylece uygulanması gereken optimum yük 15N ve optimum süre 30 dk olarak optimize edilmiştir. Kurs boyu (stroke length) ise 6 mm olarak tercih edilmiştir.



Şekil 3.15. TURKYUS RTW Lineer Aşındırma Cihazı

3.7. Hassas Ölçüm

Parçaların ağırlıkları “Radwag As 220 R.2 Analitik Terazı (220 gr/0,0001Gr)” kullanılarak tartılmıştır. Parçalar yüksek hassasiyet ile titreşimsiz ortamda, destek yapılı, destek yapısı sökülmüş halde, aynı zamanda yüzey işlem görmüş halde tasarım ağırlığı tutarlılığını ve parça başına harcanan destek malzeme ağırlığını oranını hesaplamak amacı ile tartılmıştır. Teknik özellikleri Tablo 3.5’da ve cihazın görseli parçaların tartılma aşamasında Şekil 3.16’da sunulmaktadır.



Şekil 3.16. Radwag AS 220 R.2 Analitik Terazi

Tablo 3.5. Radwag AS 220 R.2 analitik terazinin teknik özellikleri.

Kapasite	220 gr / 10 mg	Tekrarlanabilirlik	0,1 mg
Hassasiyet	0,1 mg	Doğrusallık $\pm$	0,2 mg
Dara Alanı	220 gr	Cevap Süresi	3,5 sn



4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Yüzey Topoğrafyası

4.1.1. İşlem Görmemiş Parçaların Yüzey Topoğrafyaları

Topoğrafya “Tipik olarak bir yüzey şekli ve özellikleri ile ilişkili tüm geometrik bilgileri tanımlamak için kullanılan terimdir, burada şekle tipik olarak form [74] denir.” şeklinde tanımlanmaktadır. Eklemeli imalat ile üretilen parçalarda oluşan yüzey topoğrafyası, metroloji ile karakterize edilmekte ve ölçülmektedir [75]. Metroloji, Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu (BIPM, 2004) tarafından tanımlandığı gibi, "bilim ve teknolojinin herhangi bir alanındaki herhangi bir belirsizlik seviyesinde hem deneysel hem de teorik belirlemeleri kucaklayan ölçüm bilimidir" [76].

Yüzey metrolojisi, belirli yüzey dokusu gereksinimlerine uygunluğu doğrulamak için bir araç olarak kullanımının ötesinde, Eİ ile ilgili üretim ve araştırmada kolaylaştırıcı bir rol oynamaktadır. Yüzey dokusu metrolojisi, süreç tarafından oluşturulan yüzey özelliklerinin incelenmesi ve aralarındaki karmaşık, iç içe geçmiş neden-sonuç ilişkileri ağında iki taraflı olacak şekilde Eİ üretim sürecinde meydana gelen fiziksel olaylar hakkında fikir edinmenin bir yolu olarak kullanılabilir. Bu olaylar fiziksel etkileri (örneğin, iletimle ısı transferi, toplanma etkileri (eriyik havuzunun küreselleşmesi)) [77, 78], hidrodinamik etkileri, Marangoni dolaşımını (eriyik yüzeyindeki yüzey gerilimi gradyanına bağlı kütle transferi) [79] ve proses kontrolü değişkenlerini (örneğin, toz konfigürasyonu, lazer veya e-ışın spot boyutu, güç seviyesi ve tarama hızı) [80] içermektedir. Bu olaylar aynı zamanda yüzey pürüzlülüğü gibi yüzey kalitesi sorunlarının da arkasındaki nedenlerdir. Yüzey dokusu metrolojisi ise güçlü bir keşif aracı haline gelerek, süreç hakkındaki bilgileri arttırmakta ve nihayetinde spesifikasyon ile uyumlu parçalar üretebilen gelişmiş Eİ süreçlerinin oluşturulmasına olanak sağlamaktadır.

Yüzey topoğrafyası, birçok fiziksel olayda ikinci derece bir etkiye sahiptir ve bu etkilerle ilgili çalışmalar, kapsam açısından büyük farklılıklar göstermektedir. Yüzey topoğrafyasının performansı eklemeli imalatta uygulanma amacının yanında, triboloji yani “yağlama, sürtünme ve aşınma”, kontak mekaniği, sıvı akışı, kaplama teknolojisi, optik, elektronik ve bilgisayar donanımı, biyo-mühendislik, eczacılık ve hijyen gibi çeşitli uygulamalarda da ciddi derecede öneme sahiptir.

Bu çalışma, EBM tarafından oluşturulan inşa yüzeylerinin çok ölçekli topoğrafyalarının (formdan pürüzlülüğe kadar) incelemesini sunmaktadır. Optimum elektron ışını parametreleri kullanılarak üretilen numuneler Ti-6Al-4V tozundan üretilmiştir. Kompleks parçalar için gözlemlenebilen bölgesel eğimleri test etmek için parçaların farklı geometrileri tercih edilmiştir.

Parçaların bütün yüzeylerinin topoğrafik özellikleri incelenmiş ve benzer topoğrafik özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Bunun sonucunda yüzey topoğrafyaları dâhil bütün analizler parça yüzeylerinin orta bölümlerinde yapılmıştır. Şekil 4.1’de EBM ile üretilmiş ve işlem görmemiş farklı geometrilere sahip parçaların 250x büyütmedeki yüzey topoğrafyaları sunulmuştur. Şekilde gösterilen topoğrafyalar analitik olarak bir sonraki bölümde Ra (değerlendirilen profilin aritmetik ortalama sapması), Rz/RzJIS (tek bir örnekleme uzunluğu içinde profilin maksimum tepeden vadiye yüksekliği), Sa (yüzeyin aritmetik ortalama yüksekliği) ve Sz (yüzeydeki tepe ve çukur arasındaki maksimum yükseklik) yüzey dokusu bileşenleri kullanılarak değerlendirilecek ve karşılaştırılacaktır.

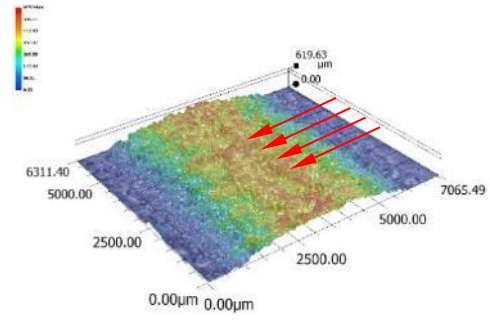
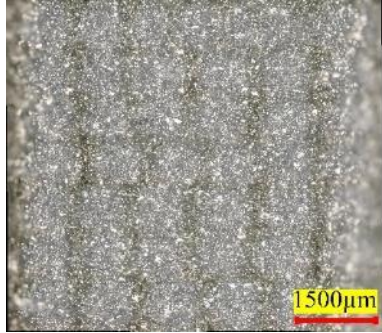
Şekil 4.1 incelendiğinde, EBM ile “Dikiş Metodu” (Stitching) kullanılarak oluşturulmuş numunenin yan/inşa yüzeylerinin morfolojisi, elipsoidal/küresel toplar veya büzülme boşlukları, kısmen erimiş veya sıçrayan toz parçacıkları, açık gözenekler ve elektron ışını izlerinin işaretleri gibi çok sayıda üretim hatası içerir. Buna ek olarak, Diğer Eİ yöntemlerine kıyasla daha büyük toz boyutu ve daha yüksek katman kalınlığı kullanması gibi sebeplerden dolayı tahmin edileceği üzere yüzey ciddi anlamda pürüzlüdür ve nispeten büyük derinliklerde düzensizliklere sahiptir. Kısmen ergimiş metal tozunun veya serpintilerinin ısıdan etkilenen bölge içinde bulunmaları nedeniyle inşa yüzeylerine yapıştığı görülmektedir. Aynı zamanda EBM yönteminde mevcut olan ön-ısıtma ve yüksek sıcaklıktaki işlem bu durumun daha ciddi şekilde seyretmesine zemin hazırlamaktadır.

Yüzey topoğrafyaları incelendiğinde, dairesel kesitlere sahip geometrilerde yüzeye yapışan tamamıyla ergimemiş metal tozlarının dörtgen kesitlere sahip geometrilerle nazaran yüzeye daha kümelenmiş şekilde yapıştığı görülmektedir. Bununla birlikte dörtgen geometriye sahip parçalarda ise katmanların daha belirgin şekilde paralel kümelenmiş birçok katman çizgisinden oluştuğu açıkça görülmektedir (Şekil 4.1’de kırmızı oklarla gösterilmektedir). Bahsedilen farklar oluşsa bile farklı geometrilerde sahip

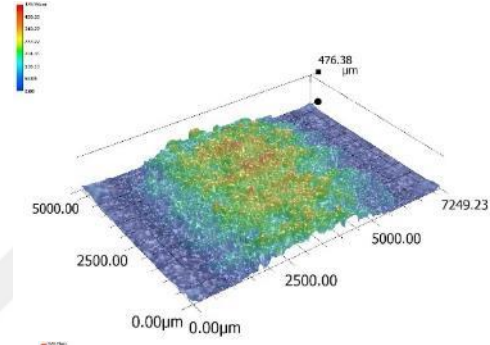
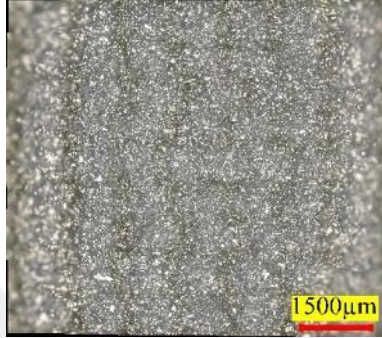
parçaların hepsinde yüzey kalitesi istenilen sınırların ciddi anlamda dışarısında kalmıştır. Bu da farklı geometrilerin yüzey topoğrafyası üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.2 ise dairesel ve düz katman sınırlarına sahip iki farklı geometriye ait parçaların tarama yönlerine ait tarama izlerini içeren yüzey topoğrafyalarını göstermektedir. Elektron ışını izlerinin parçanın en üst tabakasında meydana getirdiği profil, eritilen ve katılaştırılan 2 ışın çizgisi arasındaki nispi tepe ve çukurlardan oluşmaktadır. İnşa yüzeyi ile karşılaştırıldığında çok daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmektedir. Buna rağmen bu yüzey bile belirli düzensizlikleri içermektedir ve kritik uygulamalarda kullanılacak bir bileşen veya montaj parçası olarak tercih edilmeyecektir. Bu yüzden EBM yönteminde asıl odaklanılan konu olan inşa yüzeyinin yanı sıra tarama yapılan yüzeyin de üretilen komponentin kullanım amacına bağlı olarak incelenmesi gerekmektedir.

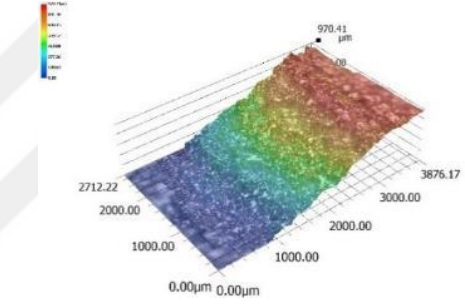
Silindir



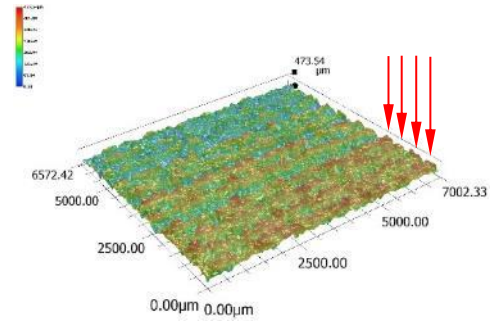
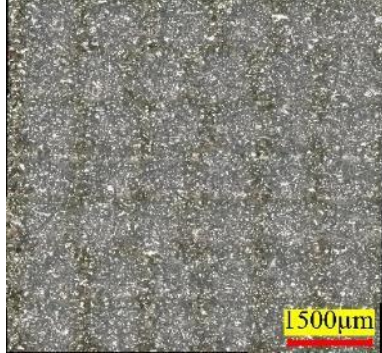
Konveks



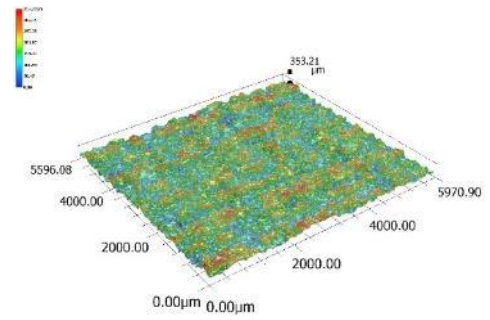
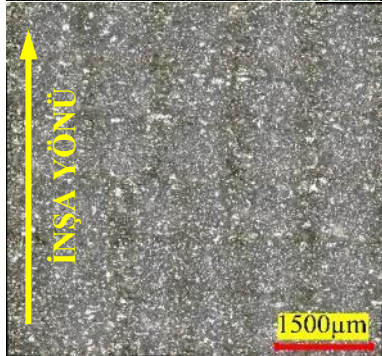
Konkav



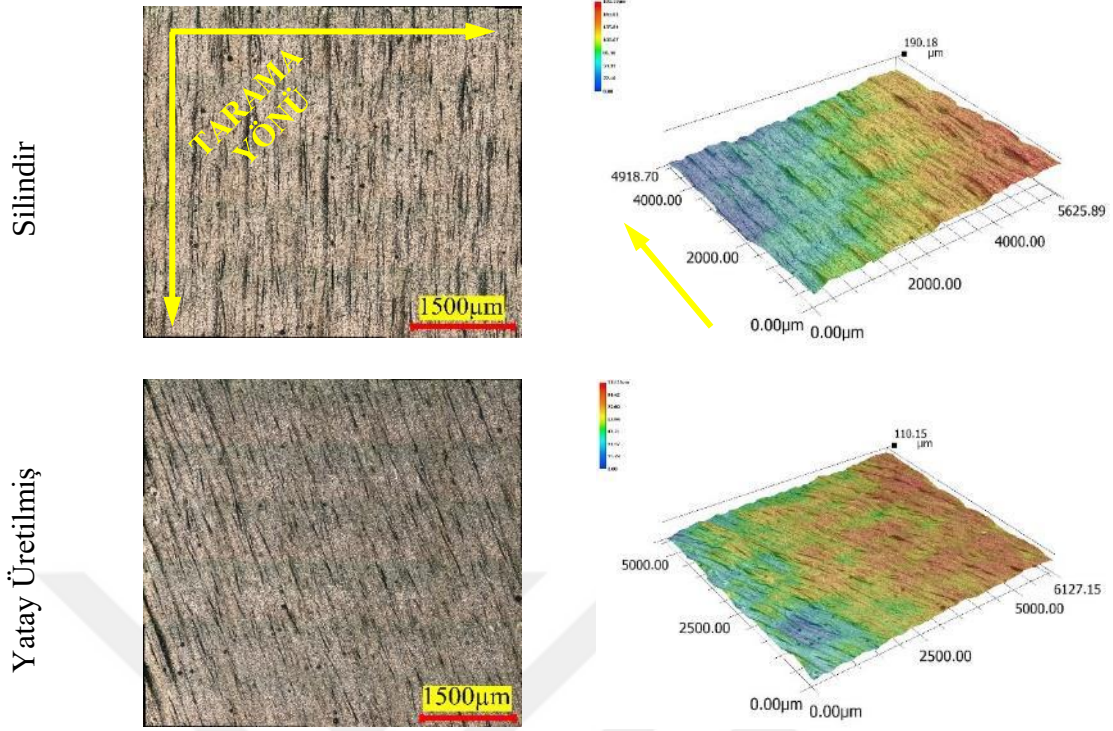
Yatay Üretilmiş



Dik Üretilmiş



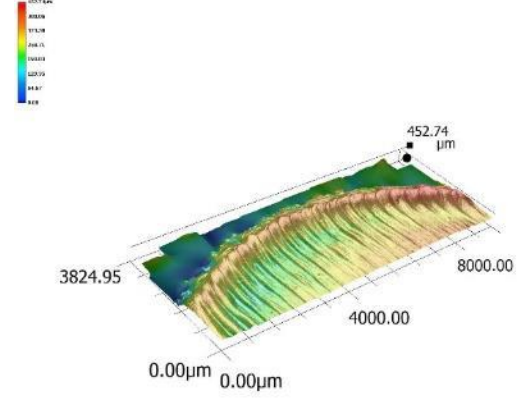
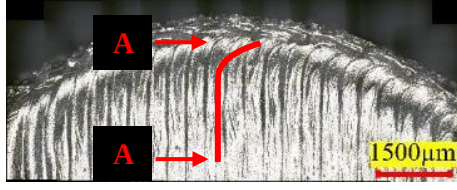
Şekil 4.1. İşlem görmemiş parçaların inşa yönündeki topoğrafyası



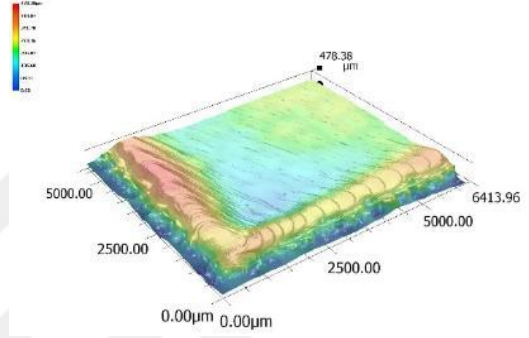
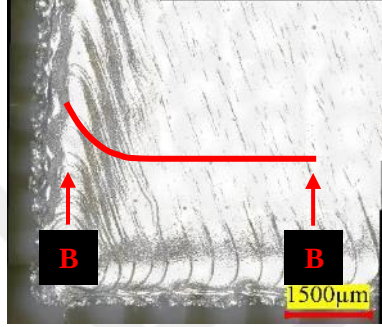
Şekil 4.2. İşlem görmemiş parçaların tarama yönündeki topoğrafyası

Aşağıdaki şekilde (Şekil 4.3), bir önceki şekilde gösterilen (Şekil 4.2), tarama yönü topoğrafyaları bulunan parçaların kenarlarının topoğrafyaları sunulmaktadır. EBM yönteminde önce dış kontürlerin daha sonra iç kontürlerin ergitilmesi sonucunda iç kontürler ile dış kontürlerin birleştiği kısımda yüzey gerilimi gibi sebepler nedeniyle belirlenen katman kalınlığından daha yüksekte tepeler oluşmaktadır (Şekil 4.3'te gösterilmektedir). Bu oluşum da bir kusur olarak değerlendirilebileceği gibi, bir sonraki katmanları etkileyerek parçanın delaminasyona uğramasına ve hatta üretimin durmasına sebebiyet veren toz serici bıçak hatalarına sürükleyebilecek kadar ciddi problemlere neden olacaktır.

Silindir



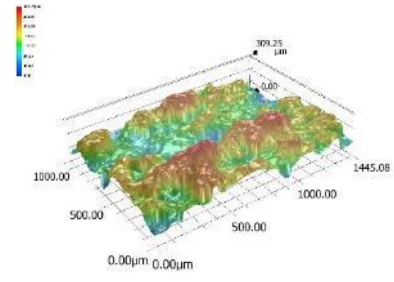
Yatay Üretilmiş



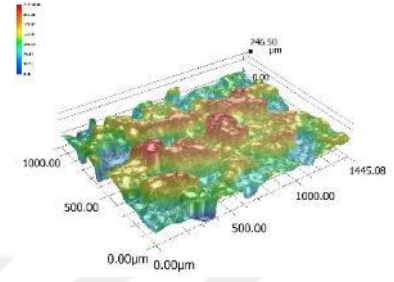
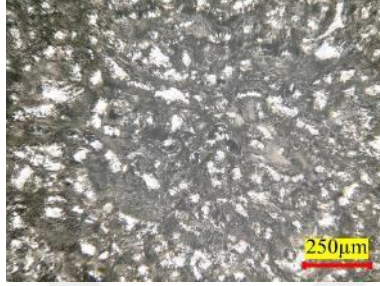
Şekil 4.3. İşlem görmemiş parçaların tarama yönlerindeki kenarlarından alınan topoğrafyalar.

Sonraki şekil (Şekil 4.4), bir önceki şekillerde sunulan parçaların daha detaylı görsellerini ve topoğrafyalarını içermektedir. Bir önceki şekillerde yorumlanan toz partiküllerin parçanın yüzeylerine yapışması ve pürüzlülük yaratma durumu daha da detaylıca görülmektedir. Parçaların yüzeylerinde inşa yönüne dik bir şekilde oluşan paralel katmanların, parça üretiminde kullanılan birçok katman kalınlığı boyunca birleşmesi ile daha kalın bir katman ağı oluşmuş ve bu da yüzeyin ciddi anlamda pürüzlü olmasına yol açmıştır.

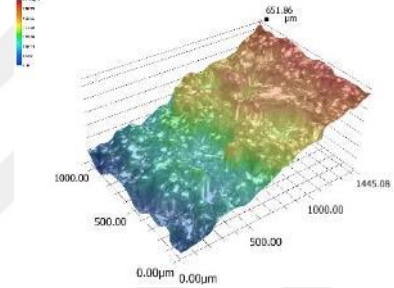
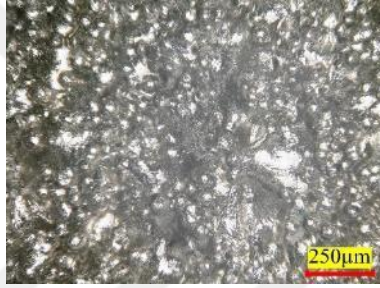
Silindir



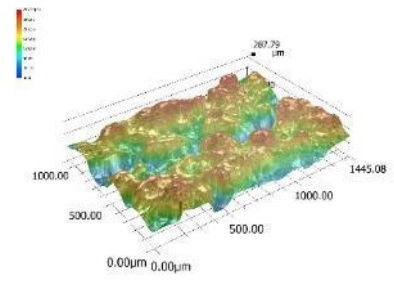
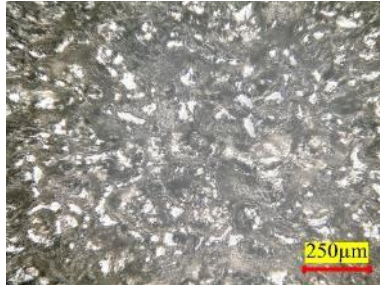
Konveks



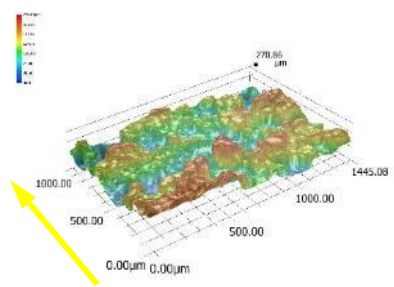
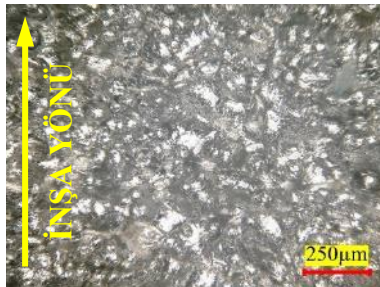
Konkav



Yatay Üretilmiş



Dik Üretilmiş



Şekil 4.4. Farklı geometriler ile üretilen EBM parçaların detaylı topoğrafyaları.

4.1.2. İkincil İşlem Uygulanan Parçaların Yüzey Topoğrafyaları

Bir önceki bölümde, EBM yöntemi ile üretilen parçalardaki yüzey topoğrafyalarının incelenmesi sonucu parçaların yüzey kalitelerinin istenilen seviyede olmadığı ortaya koyulmuştu. Bu bölümdeki çalışma ise tez kapsamında uygulanan ikincil işlemlerin parçaların yüzey kalitelerini iyileştirmesi sonucu meydana gelen topoğrafyaların incelenmesini içermektedir.

4.1.2.1. Frezeleme Operasyonları Sonucu Meydana Gelen Yüzey Topoğrafyaları

Endüstriyelleşmiş üretimde talaşlı imalat ve talaşlı imalatın başında gelen teknolojilerden biri olan frezeleme operasyonu onlarca yıldan beri kullanılan yöntemlerdendir. Eİ ile ortaya çıkan yüzey kalite problemlerinin çözülmesi aşamasında ise ilk başvurulacak yöntemler talaşlı imalat yöntemleri olmuştur. Hatta devamında bu durum doğrudan “Hibrit Üretim” adı verilen Eİ ile talaşlı imalatın bir arada bulunduğu üretim hacmini ortaya çıkarmıştır. Tez çalışmasında ise frezeleme operasyonu aynı şekilde EBM ile üretilen parçaların yüzey kalitelerinin iyileştirilmesi amacıyla başvurulacak ilk yöntemdir. Ayrıca ısıtılmış işlem uygulanmış parçalara da frezeleme operasyonu uygulanmıştır. Bu ikincil işlemlerde farklı kesme hızı ve farklı diş başına ilerleme değerleri tercih edilerek parametrelerin de yüzey kalitesine etkisi araştırılmıştır. Bu bölümde frezeleme operasyonu sonucu parçalarda meydana gelen yüzey topoğrafyaları incelenmektedir.

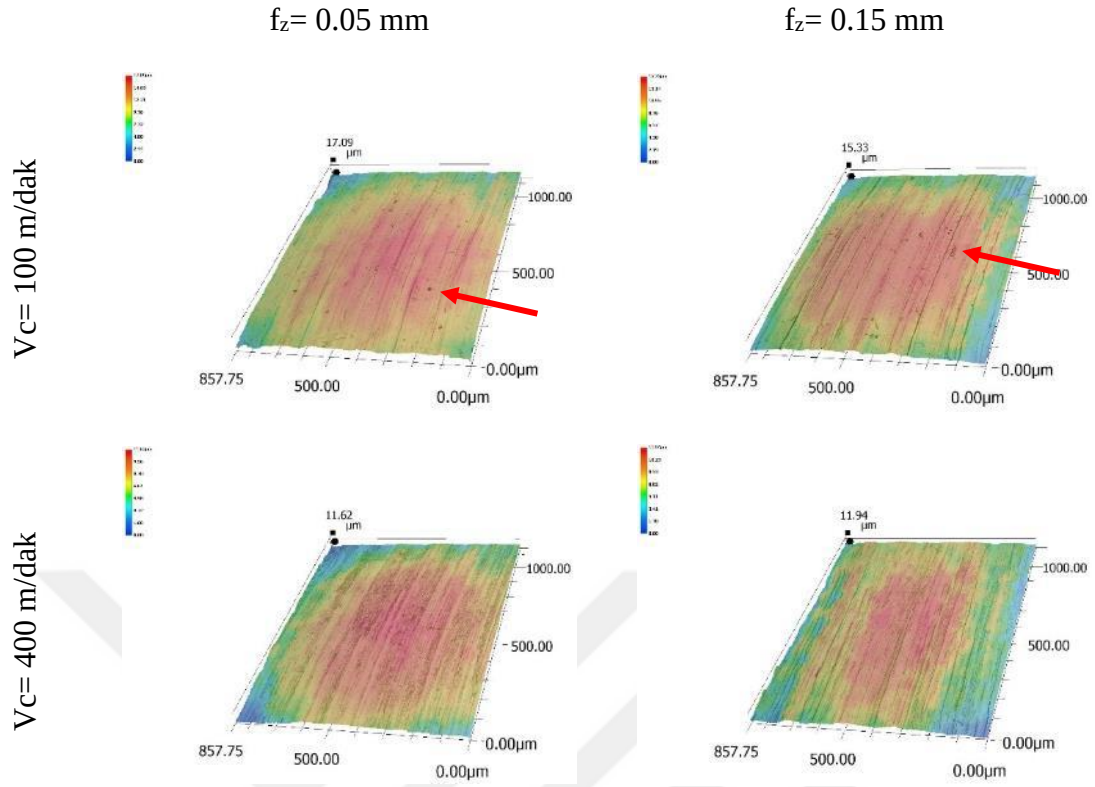
Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7, farklı ısıtılmış işlem uygulanmış dik üretilmiş kare prizma geometriye sahip parçalara farklı kesme hızı ve farklı diş başına ilerleme değerleri kullanılarak uygulanan frezeleme operasyonu sonucu meydana gelen topoğrafya görüntülerini göstermektedir. Şekiller incelendiğinde genel bir kanı ortaya çıkmıştır ki bu; topoğrafik açıdan görüntülerde yalnızca kesici takımın ilerleme izlerinin ve parçaya kaynaklanmış olan bazı mikro talaşların bulunmasıdır (Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de kırmızı oklarla gösterilmiştir). Bununla birlikte işlem görmemiş parçanın yüzeyine yapışmış ve ergimemiş tozlar frezeleme operasyonu ile ortadan kaldırılmış ve kabul edilebilir seviyede düzgün yüzeyler ortaya çıkmıştır. Bu durum parçaların yüzey pürüzlülüğünün, işlem görmemiş EBM parçaların yüzey pürüzlülüğüne kıyasla çok daha az olduğunu net bir şekilde göstermiştir. İlerleme izlerinin etkisiyle ise tepe ve vadiler

oluşturmuştur. Fakat bahsi geçen tepe ve vadiler az da olsa yüzey pürüzlülüklerinin oluşmasına neden olmuştur.

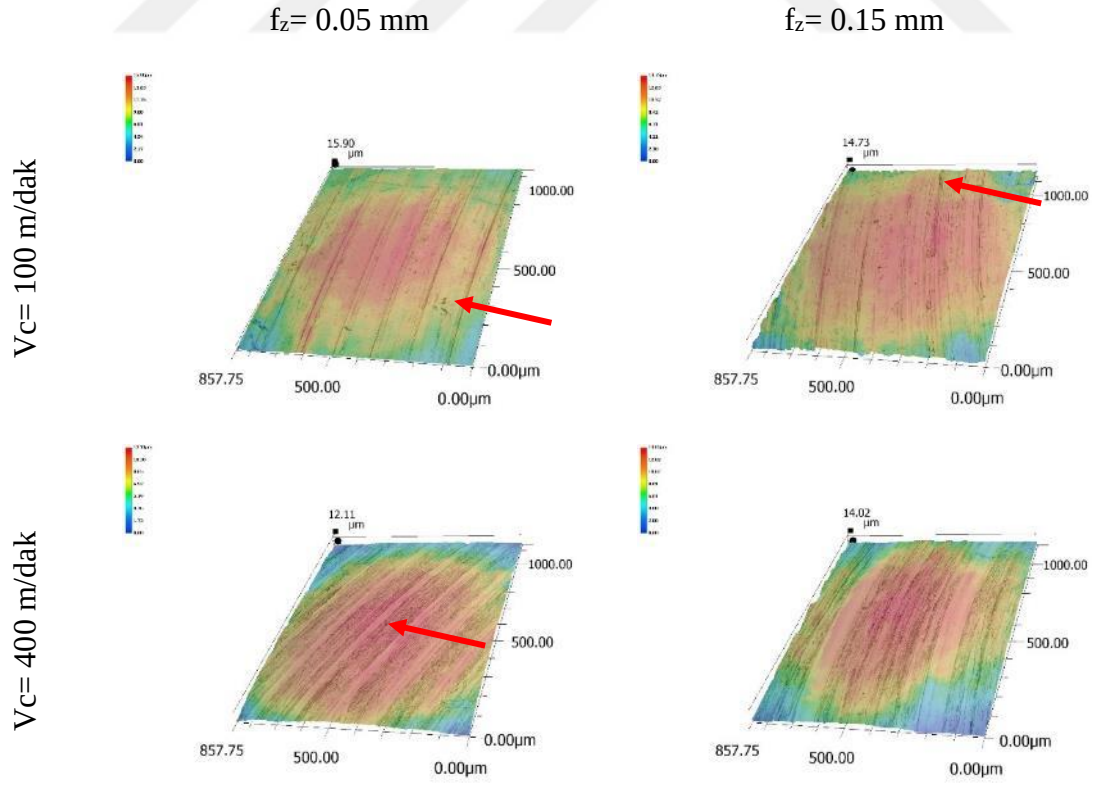
Aynı zamanda bilinen bir diğer durum da dış başına ilerlemenin artması ile yüzey kalitesinin bozulması, kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün azalması durumudur [81, 82]. Fakat bu olgu malzemeye bağlı olarak değişiklik göstermektedir [83], nitekim bu çalışmada da bu kanıya rastlanmıştır ve kesme hızının artması ile bir sonraki bölümde de bahsedileceği üzere pürüzlülüğün arttığı görülmüştür. Fakat bahsedilen detayların topoğrafik olarak belirlenmesi yüzey pürüzlülüklerinin çok düşük olmasından ve kullanılan mevcut mikroskop yeteneklerinin sınırlarından dolayı bu bölümde pek mümkün olmamıştır. Bütün olumsuzluklara rağmen en popüler geleneksel yöntemlerden biri olan frezeleme parçaların yüzey kalitesini ciddi miktarda iyileştirmiştir.

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de ısıtılmış işlem görmüş ve frezelenmiş parçaların topoğrafya görüntüleri sunulmaktadır. İşlem görmemiş parçalarda olduğu gibi ısıtılmış işlem görmüş parçaların topoğrafik görüntülerinde de kesici takımın ilerleme izlerine rastlanmıştır. Parçaların frezelenen tüm yüzeyleri detaylı olarak incelendiğinde yüzeye yapışan mikrotalaş oranında bir artış olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ısıtılmış işlem sonucu yüzeyde oluşan oksit tabakanın, parçanın iç bölgesinden daha sert olması sonucu kesici takımın aşınması ve yüzeye daha çok talaşın kaynaşmasıdır. Yüzey pürüzlülüğü bölümünde incelendiği üzere bu durum yüzey pürüzlülüklerinin işlem görmemiş parçaya göre artması ile sonuçlanmıştır. Fakat işlem görmemiş parçada bahsedildiği şekilde yüzey pürüzlülüğü açısından değişim bu bölümde etkin bir şekilde analiz edilememiştir.

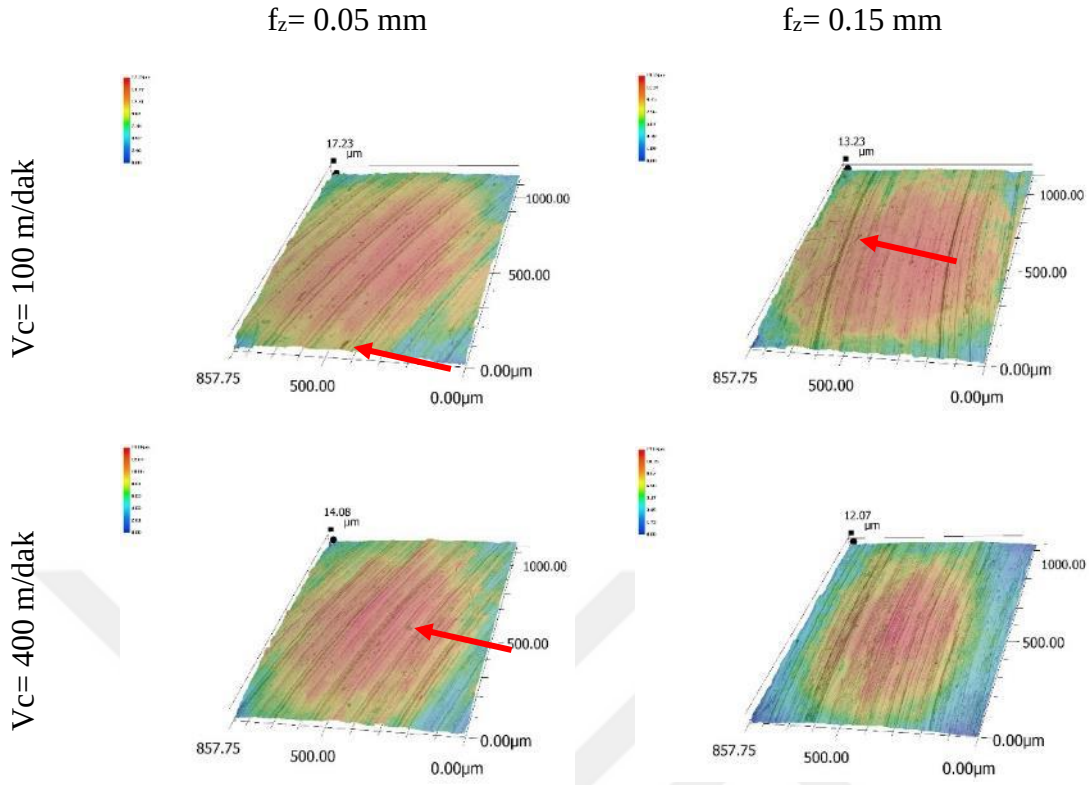
Her ne kadar istenilen yüzey kalitesi elde edilse dahi, frezeleme operasyonunun karmaşık geometriler üzerindeki çaresizliği bilinen bir gerçektir. Mevcut çalışmada frezeleme operasyonu düz yüzeye sahip kare prizma geometrisindeki parçalara basitçe yapılabilirken, eklemeli imalat ile üretilen karmaşık geometrilere uygulanması açısından ciddi sorun yaşamaktadır. Özellikle kanallı, içi boşluklu vb. yapılarda uygulanması ise hâlihazırda imkânsızdır. Bu yüzden frezeleme operasyonunun, genellemek gerekirse talaşlı imalatın eklemeli imalattaki yüzey iyileştirme yeteneği ciddi manada tartışma konusudur. Frezeleme performansının parçalar üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayan diğer veriler ise sonraki bölümlerde paylaşılacaktır.



Şekil 4.5. Isıl işlem görmemiş ve frezelenmiş parçaların topoğrafya görüntüleri.



Şekil 4.6. HT-1 ısıtılmış ve frezelenmiş parçaların topoğrafya görüntüleri.



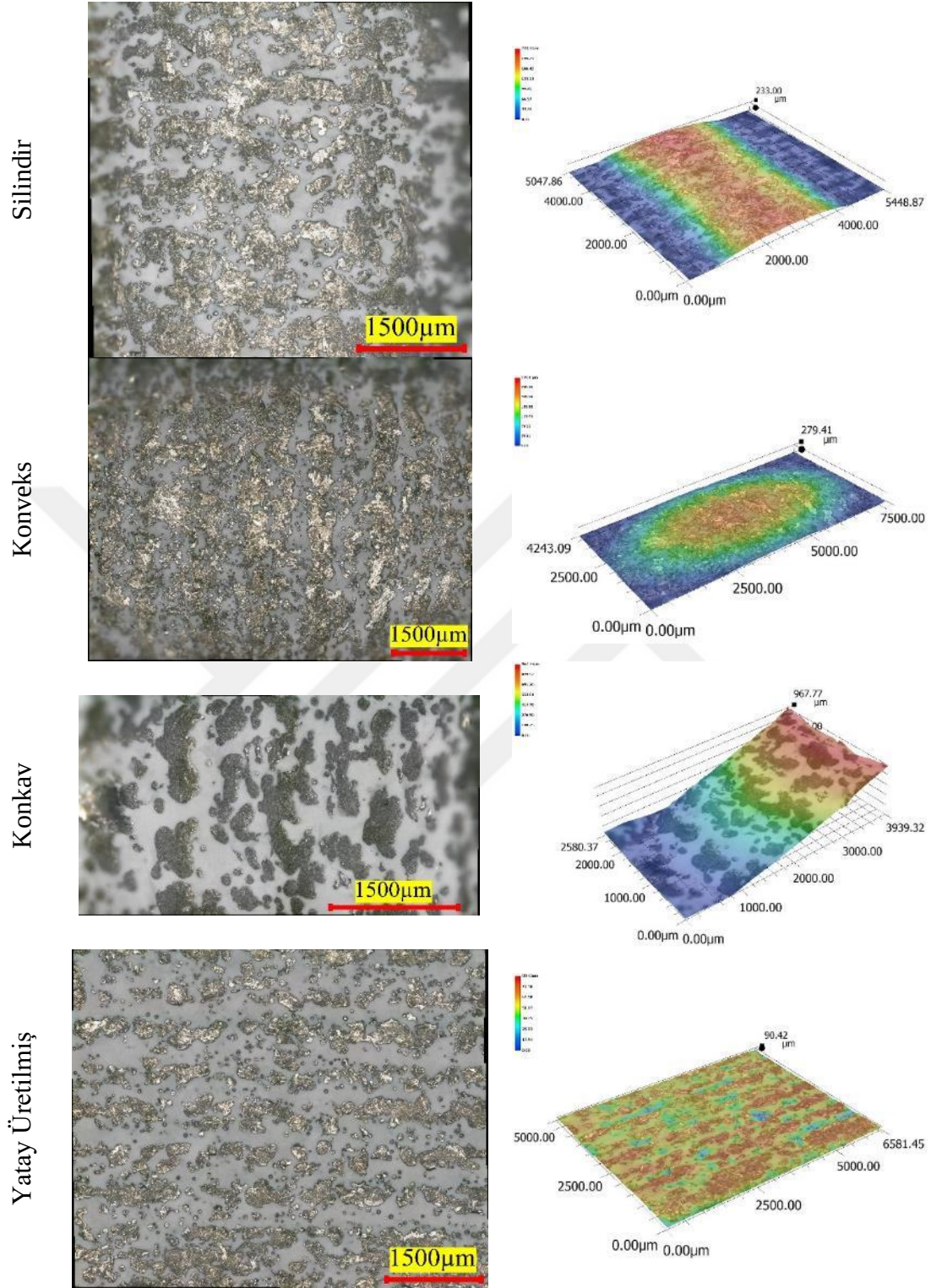
Şekil 4.7. HT-2 ısıtılmış ve frezelenmiş parçaların topoğrafya görüntüleri.

4.1.2.2. Vibrasyonlu Yüzey İşlem Sonucu Meydana Gelen Yüzey Topoğrafyaları

Eİ’de ve diğer birçok endüstride sıklıkla tercih edilen ve efektif bir yöntem olan vibrasyonlu yüzey işlem, bu çalışma kapsamında araştırılan bir diğer ikincil işlemdir. EBM ile üretilen parçalar “Deneysel Çalışma ve Düzenekler” bölümünde açıklanan parametreler ile vibrasyonlu yüzey işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 4.8’de 12 saat süreyle vibrasyonlu yüzey işlem uygulanmış parçaların topoğrafyaları yer almaktadır. Yüzey topoğrafya görüntüleri incelendiğinde yüzey kalitesinin işlem görmemiş parçalara göre ciddi oranda arttığı görülmektedir. İşlem görmemiş parçanın yüzeyinde görülen metal tozlarının, aşındırıcı medyanın yüzeye sürtünmesi ve aşındırması sonucu yüzeyden uzaklaştırıldığı söylenebilir. Görseller her ne kadar parça kalitesinin iyi olmadığını belirtse de bir sonraki bölümde bahsedilecek olan pürüzlülükler ve profiller ışığında yüzey kalitesinin iyileştiği gerçeği daha iyi anlaşılacaktır. İşlem görmemiş parçaların yüzeylerinde mevcut olan kısmen erimiş ya da sinterlenmiş toz parçacıklarının kontrollü bir biçimde yok edildiği, geometriden bağımsız olarak görülmüştür. Parça geometrisine ve yöne bağlı olmayan vibrasyonlu yüzey işlem sayesinde parçaların bütün yüzeyleri aynı

derecede etkilenmiş ve aynı yüzey kalitesini ortaya çıkarmıştır. Fakat araştırma asıl iyileştirmenin olduğu yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip inşa yönünde yapılmıştır. Vibrasyonlu yüzey işlem operasyonu her ne kadar parçaların yüzey kalitesini arttıran bir operasyon olsa da karmaşık geometrili parçaların iç yüzeylerinde, dış yüzeylerdeki kadar etkin olmayacağı düşünülmektedir. Aşındırıcı malzemelerin parçaların iç yüzeylerine nüfuz etmesinin zor olması iç yüzeylerdeki etkinliğinin düşük olmasına sebep olabilir. Ayrıca her ne kadar ucuz bir yöntem veya yüzey kalitesini önemli ölçüde iyileştiren bir ikincil işlem olarak ortaya çıkmış olsa da, çok uzun işlem süreleri sanayideki talebi karşılamaya yetmeyecek, Eİ'nin ve yöntemin meydana getirdiği avantajların önemini yitirmesine neden olacaktır.

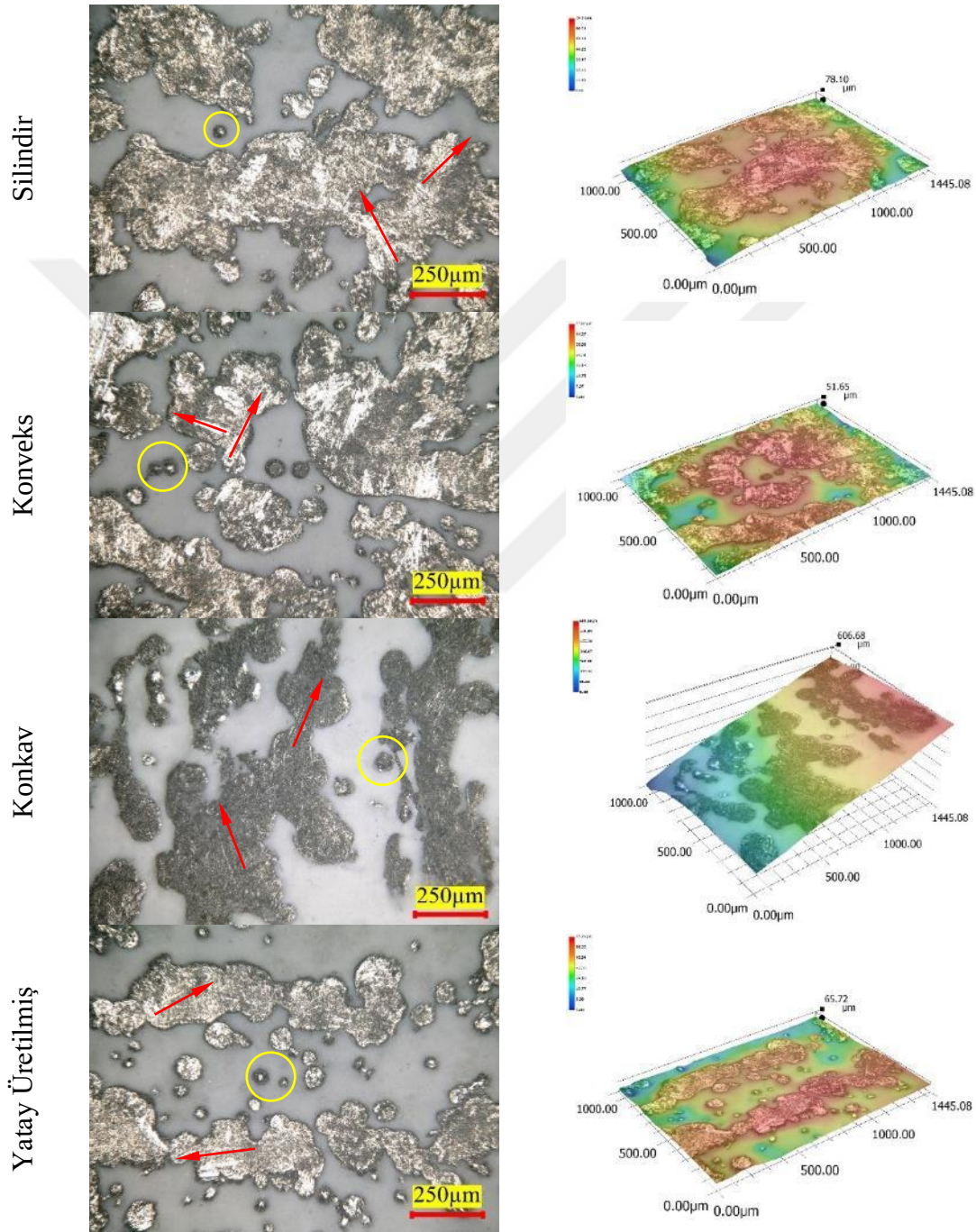




Şekil 4.8. Vibrasyonlu yüzey işlem sonucu farklı geometrilerdeki parçaların topoğrafyaları.

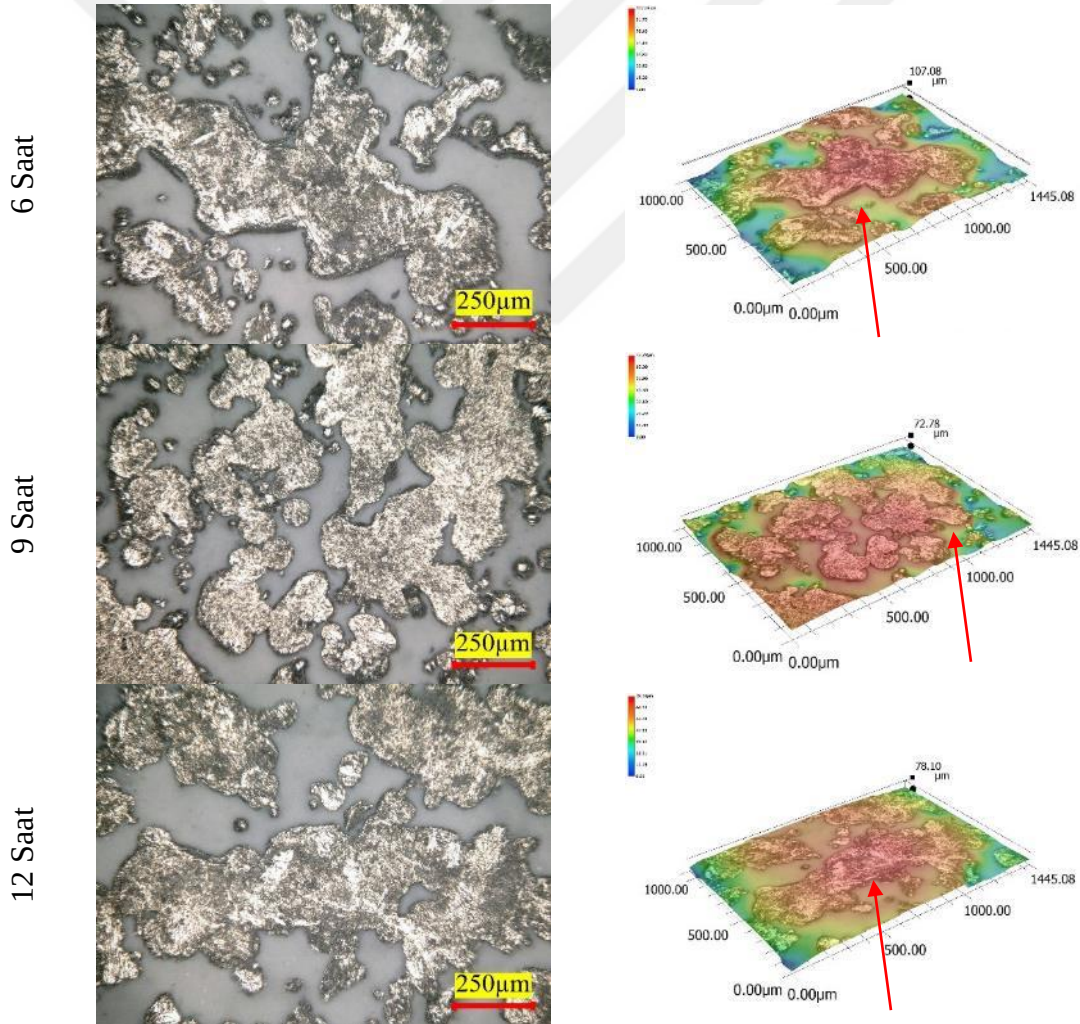
Şekil 4.9’da parçalara uygulanan vibrasyonlu yüzey işlem sonucu parçaların yüzeyleri daha detaylı bir biçimde gösterilmektedir. Parçaların yüzeylerinde aşındırıcı medyanın

izleri farklı yönlerde meydana gelmiş ve aşındırmanın mekaniği ortaya konmuştur. Bunun yanında parçaların yüzeylerinde ergimemiş toz parçacıklarının daha büyük boyutlarda ergimemiş toz topaklarının altında kaldığı da (re-entrant surface) aşındırma sonucu ortaya çıkmıştır. Kullanılan işlem sıvısının parçanın yüzeyini darbe durumundan çıkarıp aşındırma ve parlatma durumuna sokması söz konusudur.



Şekil 4.9. Vibrasyonlu yüzey işlem sonucu farklı geometrilerdeki parçaların detaylı topoğrafyaları.

Ayrıca sürtünmenin sıvı işlemi ile azalması parçanın yüzeyinin çizilmesine neden olmaktadır. Bu işlem sıvısı aynı zamanda parçaların yüzeyinde ince bir film tabakası oluşturarak korozyona karşı direnç kazanmasını da sağlamaktadır [84]. Şekilde (Şekil 4.10), parçaların süreye bağlı olarak aşındırma davranışında/meکانiginde herhangi bir değişiklik olmadığı, bununla birlikte parçanın daha pürüzlü yapısının giderek azaldığı topoğrafyalardan görülmektedir. Benzer aşındırma davranışları parçaların görselleri üzerinde bulunan farklı yönlerdeki aşınma izlerinden belli olmaktadır. Bunun yanında kuru işlemden talaş kaldırma mekanizması normal etki yaratırken, şekilde görüldüğü üzere ıslak işlemden çizilme meydana gelmektedir. Bunun ıslak koşullarda sürtünmedeki azalmaya bağlı olduğu düşünülmektedir [85]. Yüzey kalitesi ise 12 saatin sonunda ciddi anlamda iyileşmiştir.



Şekil 4.10. Farklı sürelerde vibrasyonlu yüzey işlem sonucu silindirik geometrideki parçaların detaylı topoğrafyaları.

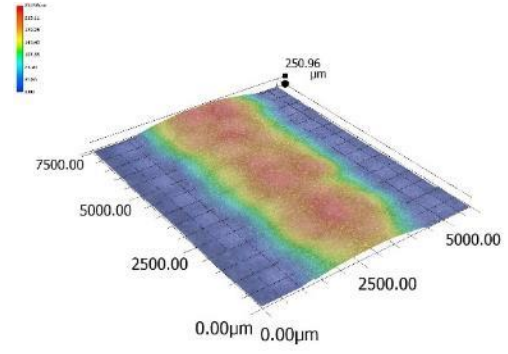
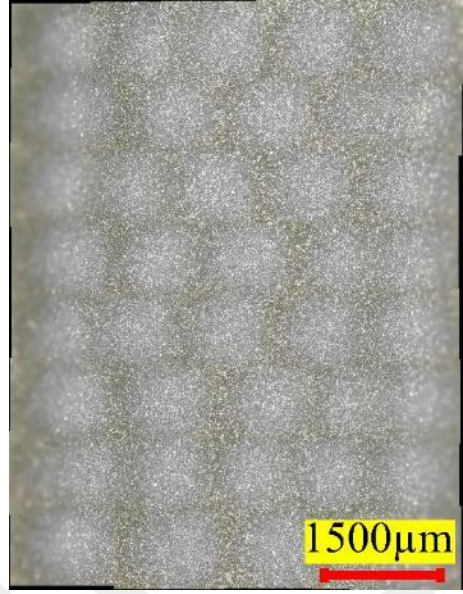
4.1.2.3. Kumlama Operasyonları Sonucu Meydana Gelen Yüzey Topoğrafyaları

Son olarak kullanılan bir diğer ikincil işlem ise kumlamadır. Literatür kısmında da bahsedildiği üzere eklemeli imalatta amacı dışında kullanılan kumlama prosesi, parçalarda meydana gelen yüksek yüzey pürüzlülüğünü azaltmada rol oynayabilecek potansiyelde görülmüş ve bazı çalışmalarda ikincil işlem olarak tercih edilmiştir. Bu çalışmada da kumlama operasyonunun parçaların yüzey bütünlüğüne etkisi incelenmiştir.

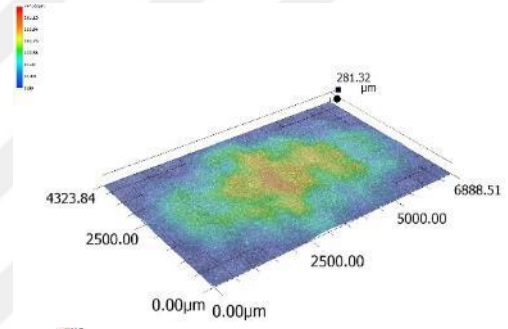
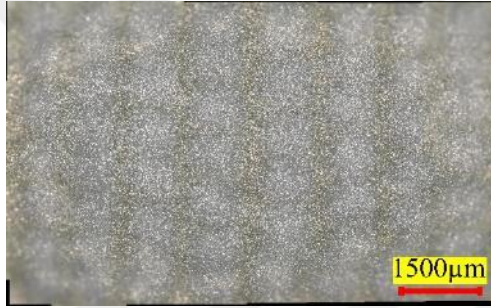
Şekil 4.11, kumlama operasyonları sonucu parçaların yüzeylerindeki değişimi gösteren topoğrafyaları sunmaktadır. Şöyle ki, diğer yöntemlerde görülen tutarlı yüzey iyileştirme durumu, kumlama ile yüzey işleme tabi tutulan parçalarda mevcut değildir. Fakat etki derecesi olarak diğer yöntemlerden çok daha hızlı ve etkili bir yöntem olduğu göze çarpmaktadır. Kumlama operasyonları sayesinde parçalar, yüzeylerinde herhangi bir ergimemiş toz vb. kusurlar barındırılmayacak şekilde aşındırmaya maruz bırakılmış ve parçaların yüzeyleri ciddi anlamda pürüzsüz hale getirilmiştir. Bununla birlikte parçaların yüzeyleri her ne kadar pürüzsüz de görünse, kumlama nozulundan çıkan kumun yüzeye eşit bir şekilde temasının sağlanamadığı ve bundan dolayı yüzeyin dalgalı bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Oluşan durum şunu göstermektedir ki, işlemin hızlı ve etkili oluşu her ne kadar avantaj olarak da görünse yüzey iyileştirme konusunda kontrol edilmesi zor bir ikincil işlem olması en büyük dezavantajdır. Bahsedilen problem çok iyi optimize edilmiş bir otomasyon sistemine dönüştürülüp ortadan kaldırılabilir fakat bu da beraberinde ciddi maliyet problemlerine yol açacaktır. Sonuç olarak test edilen bu operasyonda dalgalı yüzey ve nispi pürüzlülüklerden kaçınılması pek de mümkün değildir.

Şekil 4.12 yüzeyde dalgalı yapının oluşmasına neden olan kumlama operasyonunun, aynı zamanda parçanın eşit bir şekilde aşındırılmasına olanak tanımayarak boyutsal doğruluğunu da bozacağını göstermektedir. Ayrıca, bir sonraki bölümde de bahsedileceği üzere kumlama operasyonunun aynı yüzeye uygulanması bir süre sonra işlemin etkisini yitirmesine ve yüzey kalitesini daha fazla iyileştirememesine yol açmaktadır. Sonuç olarak kumlamanın eklemeli imalat ile üretilen parçaların yüzey kalitesini iyileştirici bir ikincil işlem olarak tercih edilmesi pek de olası değildir.

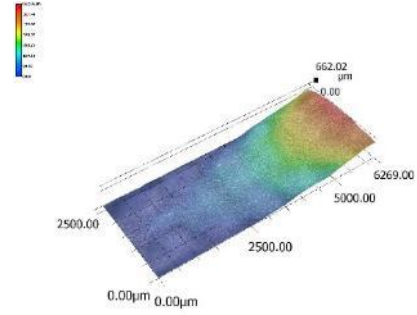
Silindir



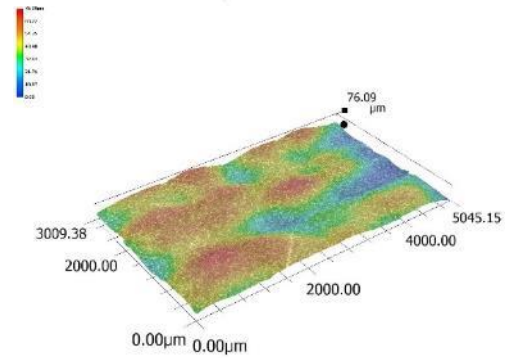
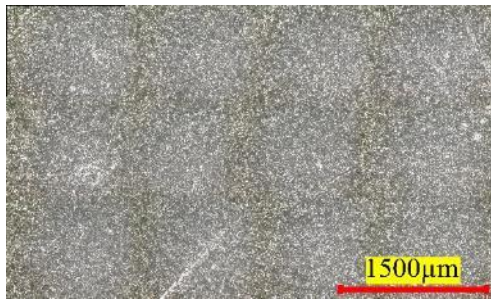
Konveks



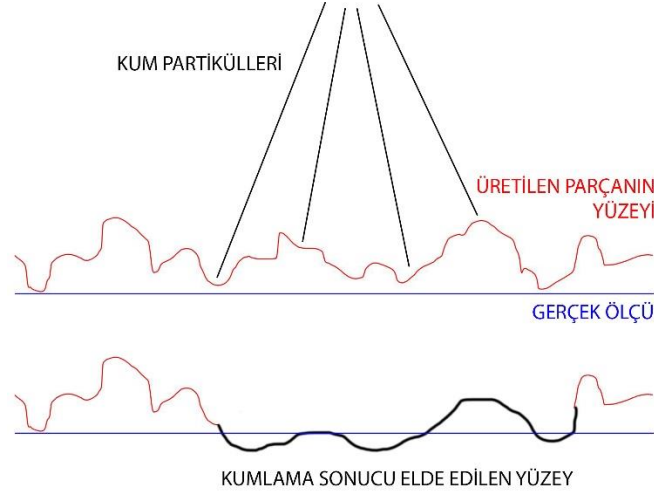
Konkav



Yatay Üretilmiş



Şekil 4.11. Kumlama işlemi sonucu farklı geometrilerdeki parçaların topoğrafyaları ve konveks parçada meydana gelen yüzey kalitesindeki iyileşme.



Şekil 4.12. Eklemeli imalat ile üretilen parçaya uygulanan kumlama işleminde yaşanan dalgalanma durumu ve boyutsal doğruluk problemleri.

4.2. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, bir parçanın yüzey topolojisindeki değişimin bir ölçüsüdür. Çoğu parça için mühendislik gereksinimleri, yüzey pürüzlülüğü özelliklerini içerir. Pürüzlülük, parça estetiğini (ör. parlak veya mat) ve çatlak başlatma, aşınma direnci, yorulma ömrü, geçme yeteneği (örn; sıkı), sızdırmazlık, yatak ve akışkan dinamikleri gibi mekanik davranışları etkiler.

Bir parçanın yüzey pürüzlülüğü, işlevi ve uzun vadeli performansı için kritiktir. Metal eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen parçalar ise genellikle istenilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin dışında kalmaktadır. Bu durum da ikincil işlem proseslerinin uygulanmasını gerektirir. Optimum üretim iş akışını seçmek için, metal Eİ'nin yüzey pürüzlülüğü yeteneklerinin yanı sıra ikincil işlem tekniklerinin, bunlarla ilişkili zaman ve maliyet ilişkilerinin de anlaşılması gerekmektedir.

Neredeyse parçanın net şekline yakın üretim yapan Eİ süreçleri, nihai tasarıma yakın olan ancak istenen nihai boyutlara ve pürüzsüzlüğe ulaşmak için ikincil işlem gerektiren parçalar oluşturur. Döküm, dövme gibi birçok üretim yöntemi ile üretilen parçalar, metal Eİ yöntemleri ile üretilen parçalara göre daha az yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahiptir ve daha az yüzey iyileştirme işlemlerine ihtiyaç duyar. Sonuç olarak, çoğu uygulama için metal Eİ teknolojileri - seçilen belirli teknolojiye bağımsız olarak - net şekle yakın süreçlerdir, fakat yüzey pürüzlülüğü net şekle oldukça yakın üretilen parçaların doğrudan

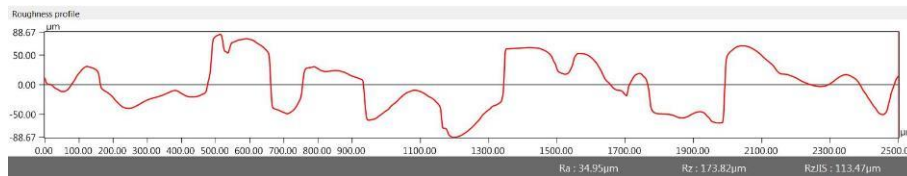
kullanılabilmesini kısıtlayan temel unsurların başında gelmektedir. EBM yönteminde ise meydana gelen yüzey pürüzlülüğü, metal eklemeli imalat yöntemleri arasında DED yöntemlerinden sonra gelen en yüksek yüzey pürüzlülüğünü oluşturan yöntemdir. Bu pürüzlülüğü oluşturan unsurlar ise bir önceki bölümde detaylıca tartışılmıştır. Sonraki bölümlerde ise tez kapsamında kullanılan ikincil işlemlerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi kapsamlıca incelenmiştir.

4.2.1. İşlem Görmemiş Parçaların Yüzey Pürüzlülüğü

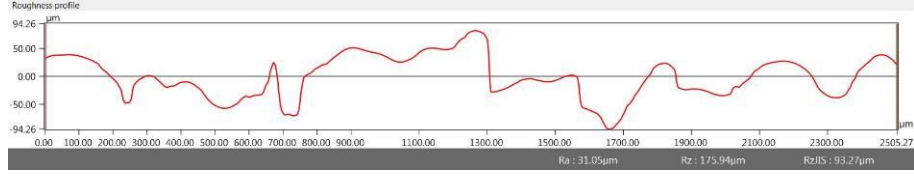
Çalışma kapsamında EBM ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım malzemeleri temaslı ve temassız ölçüm yöntemleri arasından temassız bir ölçüm yöntemini kullanan dijital mikroskop yardımıyla ölçülmüştür. Ölçüm aşamasında, önceki bölümde parçalardan elde edilen yüzey topoğrafyaları kullanılmış ve yüzeyi en iyi şekilde temsil edecek yüzey pürüzlülükleri çizgi ve alan olacak şekilde ortaya çıkarılmıştır.

Şekil 4.13-4.17’de işlem görmemiş parçaların yüzey pürüzlülüklerinin profilleri, Ra, Rz ve RzJIS şeklinde gösterilmiştir. İşlem görmemiş parçalar incelendiğinde parçaların ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin yaklaşık 30 μm ile 40 μm arasında olduğu görülmektedir. Bu durum bir önceki bölümlerde de sunulan EBM yönteminde beklendiği üzere yüksek katman kalınlığı, büyük toz malzeme vb. değişkenlerin kullanılması ile de ilgilidir. Literatür ile kıyaslandığında sonuçlar tutarlılık göstermektedir [86]. Topoğrafik analizlerin sunulduğu bölümde ise pürüzlülüğü oluşturan temel nedenlerden (ergimemiş toz, proses kontrolü, yüzey gerilmesi vb.) bahsedilmiştir.

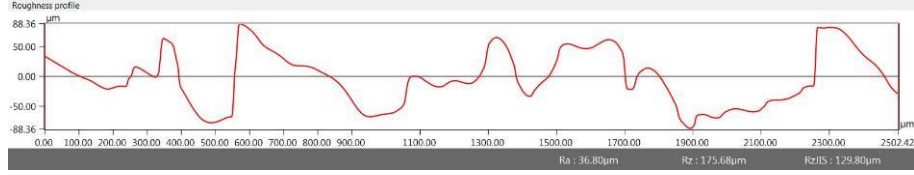
Şekil 4.18’de ise Sa ve Sz standardında yüzey pürüzlülüğü gösterilmiştir. Sa değerleri parçaların inşa yönünde 30 μm ile 40 μm değerleri arasındadır. Sz değerleri ise parçaların tepe ve çukur noktaları arasında ciddi miktarda ergimemiş toz yüksekliği olduğunu göstermektedir. Bu değerler parçaların Ra ve Rz yüzey pürüzlülüklerindeki gibi yakın olduğundan, temsili olarak sadece silindirik parçadan alınan bir yüzeyin Sa ve Sz değerleri sunulmuştur.



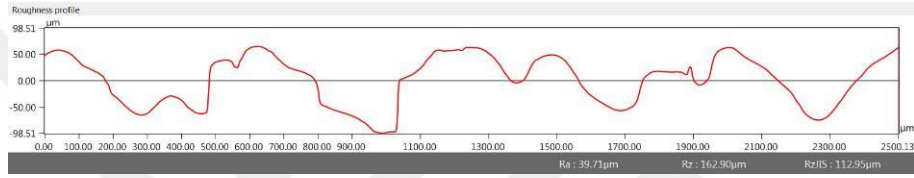
Şekil 4.13. Silindirik parçanın inşa yönündeki yüzey profili.



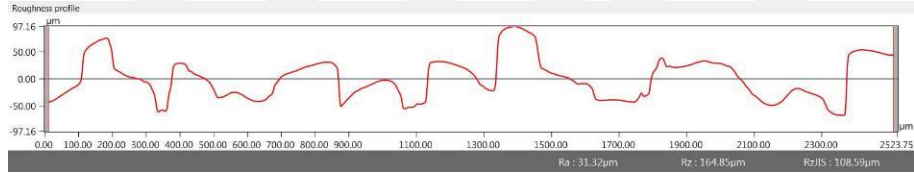
Şekil 4.14. Konveks parçanın inşa yönündeki yüzey profili.



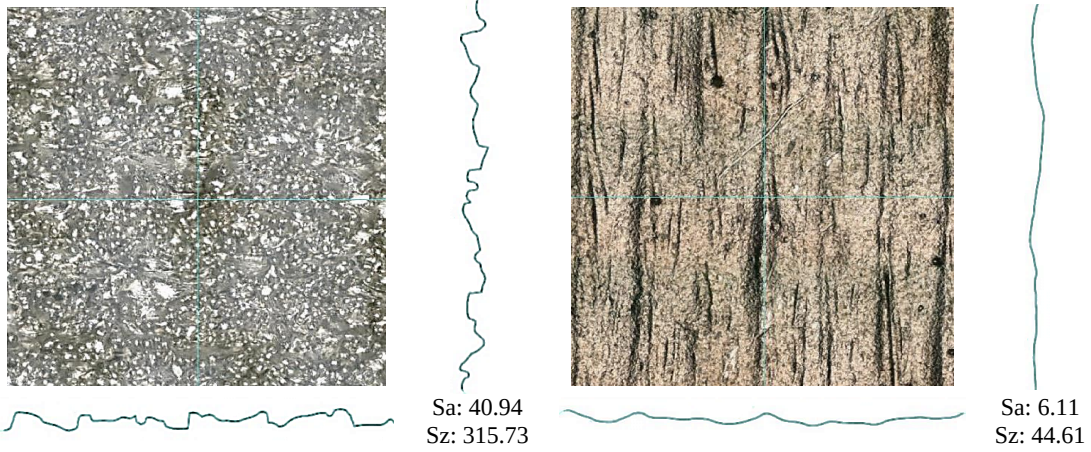
Şekil 4.15. Konkav parçanın inşa yönündeki yüzey profili.



Şekil 4.16. Yatay üretilmiş kare prizma parçanın inşa yönündeki yüzey profili.

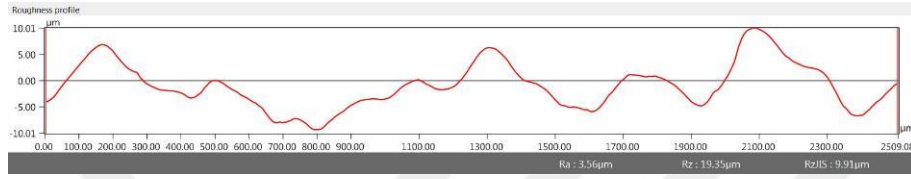


Şekil 4.17. Dik üretilmiş kare prizma parçanın inşa yönündeki yüzey profili.

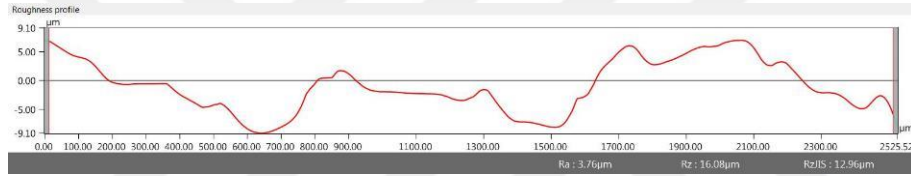


Şekil 4.18. Silindirik parçanın inşa ve tarama yönünden alınan Sa ve Sz yüzey pürüzlülüğü.

İşlem görmemiş parçaların yüzey pürüzlülükleri incelendiğinde, inşa yönünde olduğu gibi tarama yönü ile ilgili de pürüzlülüğü oluşturacak sebepler detaylıca topoğrafik analiz kısmında bahsedilmektedir. Pürüzlülük değerleri bütün parçalarda ölçülmüş ve birbirlerine çok yakın sonuçların çıkması sebebiyle silindirik ve kare kesitli (dairesele ve düz şekillerde olması sebebiyle) parçaların pürüzlülük değerlerinden bahsedilmiştir. Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de görüldüğü üzere ve diğer ölçümler sonucu parçaların pürüzlülük değerleri 3 μm ile 4 μm arasında oluşmaktadır.

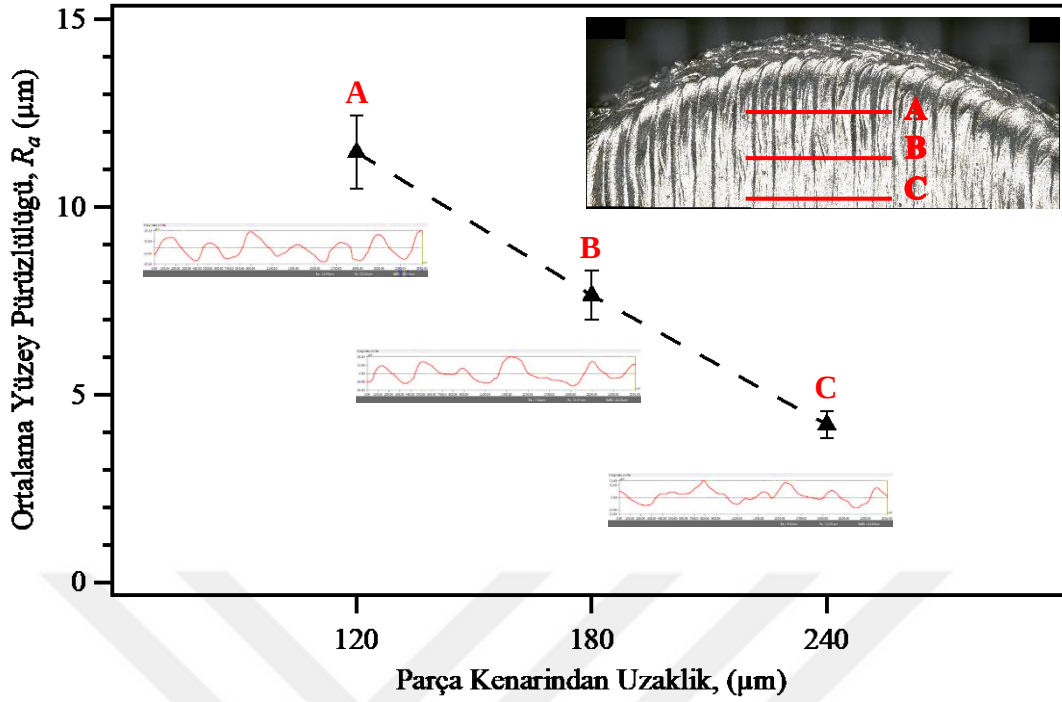


Şekil 4.19. Silindirik parçanın tarama yönündeki pürüzlülük profili.



Şekil 4.20. Dik üretilmiş kare prizma parçanın tarama yönündeki profili.

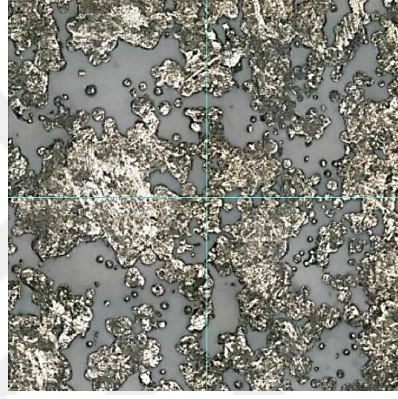
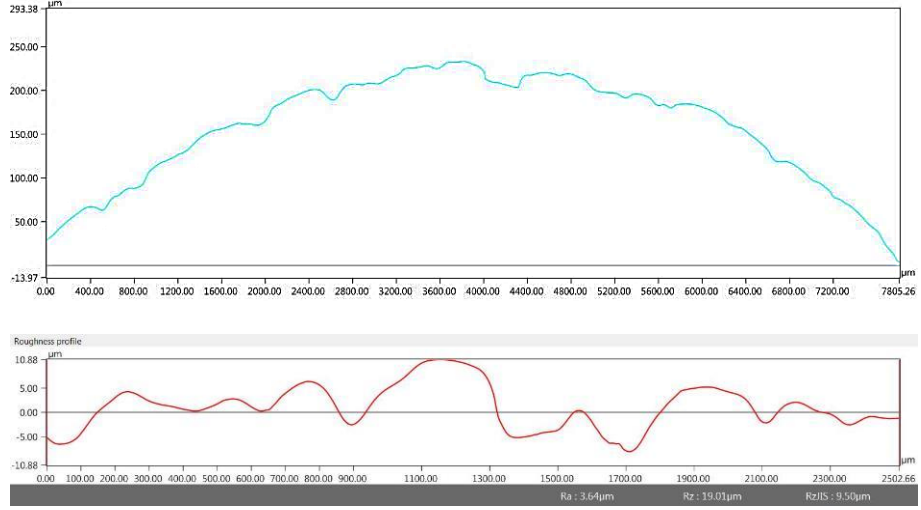
Topoğrafyalarda bölümünde sunulan ve parçaların kenarlarında meydana gelen birikme durumu, parçaların kontur içinde kalan ergitme bölgesine doğru yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığını ortaya koymaktadır (Şekil 4.21). Silindirik parçadan alınan topoğrafya görüntüsünde, parçanın en dışında kalan kısmından en içte kalan kısmına doğru yaklaşık 7 μm ’lik bir yüzey pürüzlülüğü azalışı görülmektedir.



Şekil 4.21. Parçanın tarama bölgesinde kenara yakın ve parçanın içindeki yüzey pürüzlülükleri.

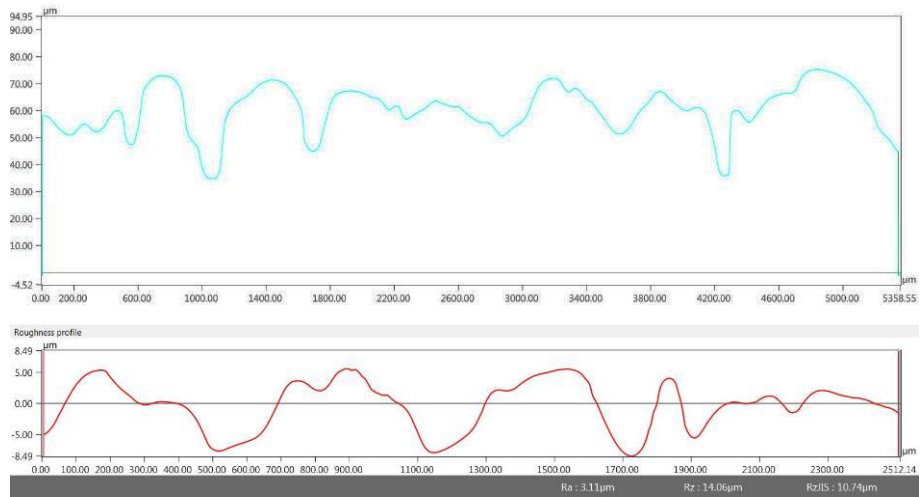
4.2.2. İkincil İşlem Uygulanmış Parçaların Yüzey Pürüzlülüğü

Farklı geometriler ile üretilen EBM parçalarına uygulanan ikincil işlemler sonucu ortaya çıkan topoğrafyalar bir önceki bölümde detaylıca sunulmuştur. Şekil 4.22-4.25'te vibrasyonlu yüzey işlem görmüş parçaların yüzey pürüzlülük değerleri sunulmaktadır. Şekiller incelendiğinde ciddi bir değişimin ortaya çıkması söz konusudur. İşlem görmemiş parçalarda meydana gelen yüksek pürüzlülüğü değerleri, vibrasyonlu yüzey işlem sayesinde 3 μm ile 6 μm aralığına düşmüş ve önemli ölçüde yüzey kalitesini iyileştirmiştir. Vibrasyonlu yüzey işlemin kontrollü yüzey iyileştirmesi, parçaların istenilen pürüzlülüğe gelene kadar uygulanabilmesini sağlamıştır. Sa pürüzlülük değerleri ise geometriden bağımsız olarak benzer çıkmış ve sonuçta temsili olarak konveks parçanın değerleri sunulmuş, bu değerler de 6 μm ile 10 μm aralığında ölçülmüştür.

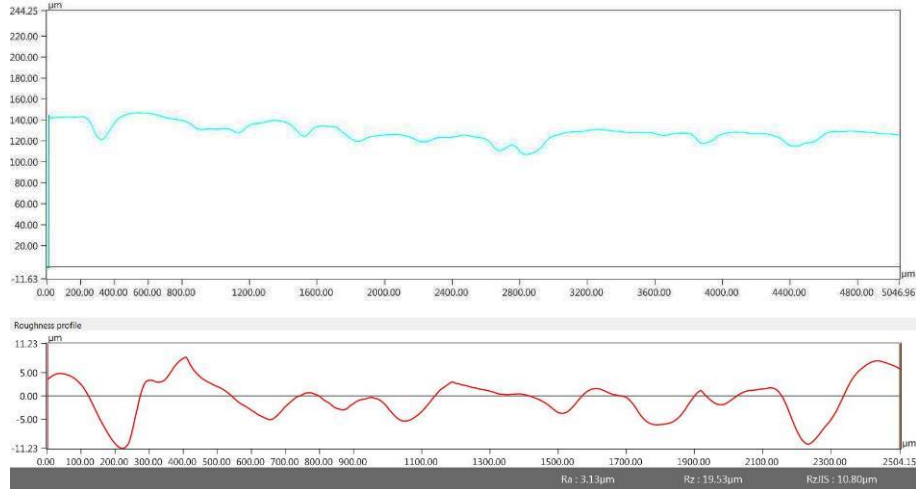


Sa: 5.41
Sz: 47.74

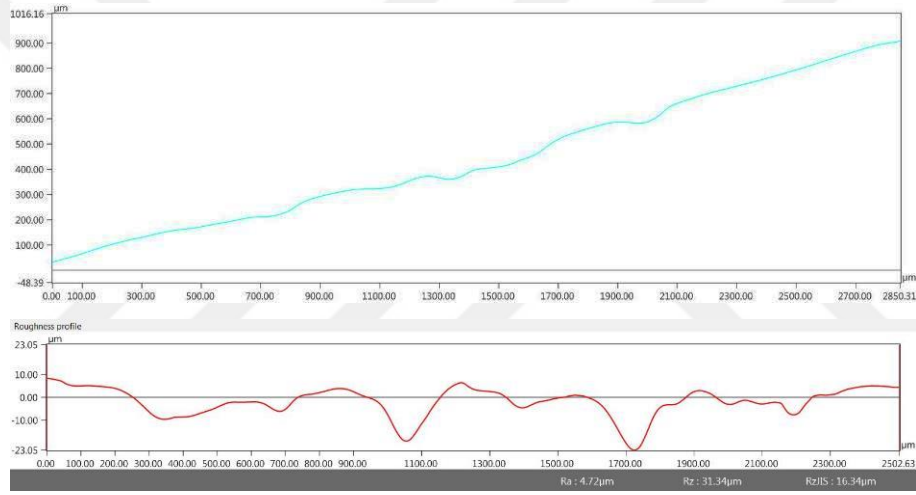
Şekil 4.22. Vibrasyonlu yüzey işlem görmüş konveks parçanın inşa yönündeki pürüzlülük profilleri.



Şekil 4.23. Vibrasyonlu yüzey işlem görmüş yatay üretilmiş kare prizma parçanın inşa yönündeki profili.

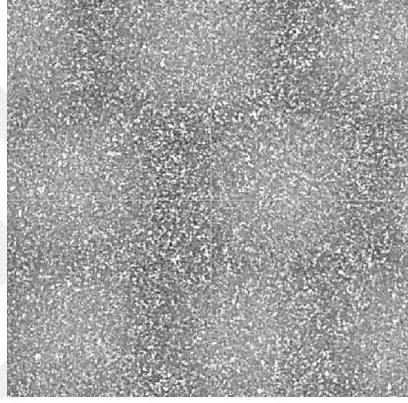
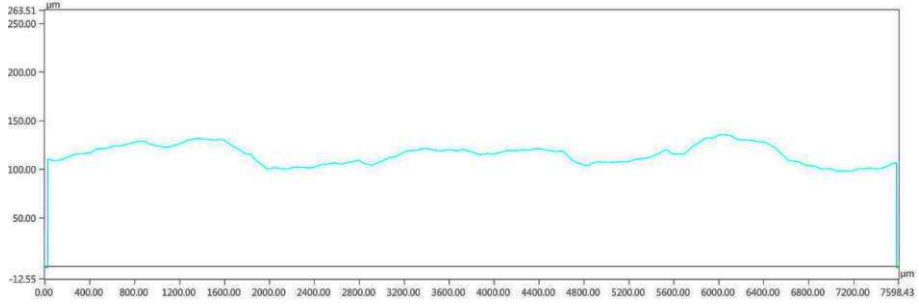
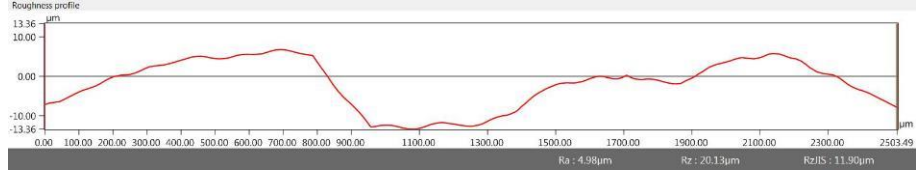


Şekil 4.24. Vibrasyonlu yüzey işlem görmüş silindirik parçanın inşa yönündeki profili.



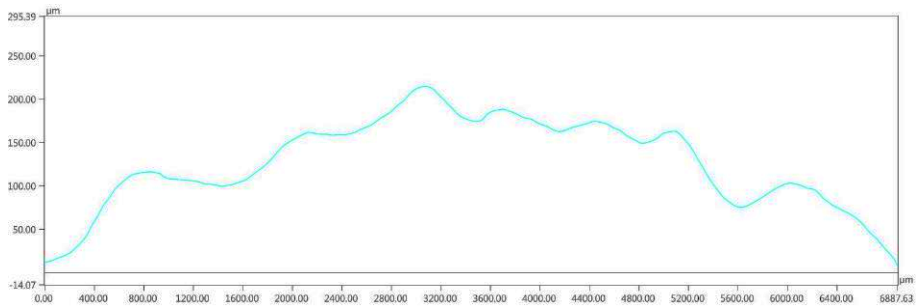
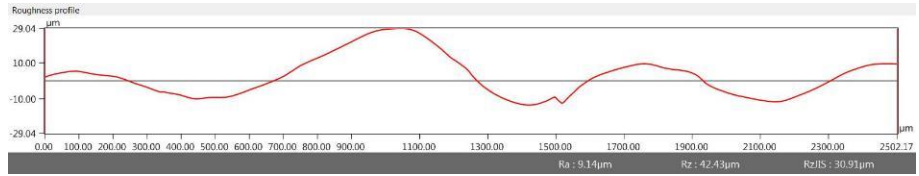
Şekil 4.25. Vibrasyonlu yüzey işlem görmüş konkav parçanın inşa yönündeki profili.

Bir diğer ikincil işlem olan kumlama, topoğrafya bölümünde işlendiği üzere dengeli bir yüzey iyileştirme sağlayamamıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 4.26-4.29’da incelendiği üzere, yaklaşık olarak 5 μm ile 10 μm değerleri arasındadır. Yüzey pürüzlülük profillerinden ve birincil profillerden de anlaşılacağı üzere kumlama işlemi, vibrasyonlu yüzey işleme göre daha dalgalı bir yapı ortaya çıkarmıştır. Sa pürüzlülük değerleri ise benzer şekilde geometriden bağımsız olarak aynı şekillerde azalmış 8 μm ile 14 μm aralığında meydana gelmiştir.

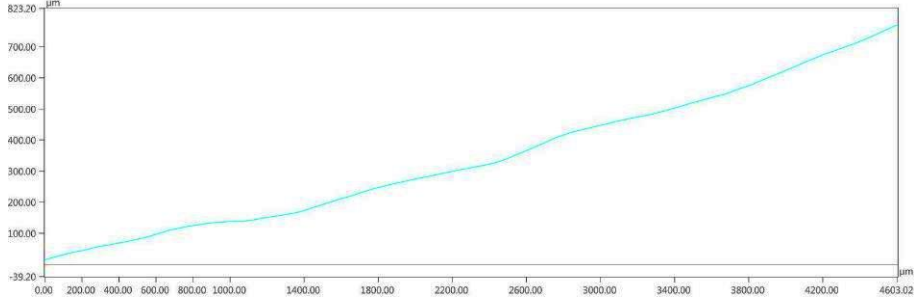
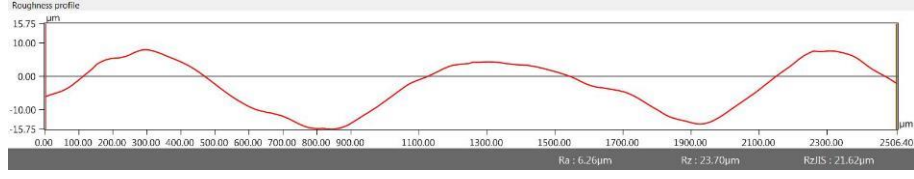


Sa: 8.81
Sz: 62.81

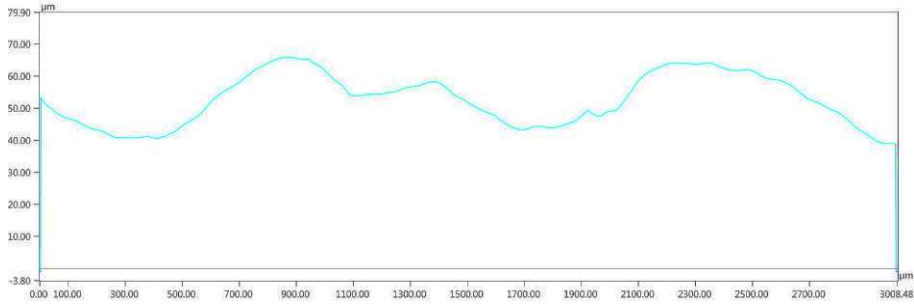
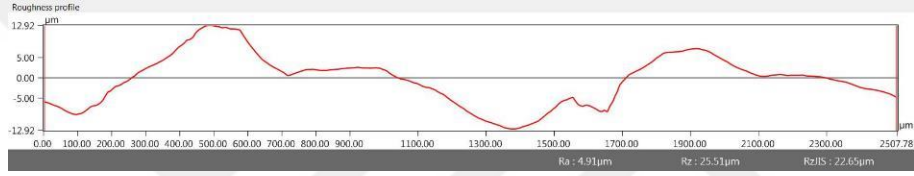
Şekil 4.26. Kumlanmış silindirik parçanın inşa yönündeki pürüzlülük profilleri.



Şekil 4.27. Kumlanmış konveks parçanın inşa yönündeki profili.



Şekil 4.28. Kumlanmış konkav parçanın inşa yönündeki profili.



Şekil 4.29. Kumlanmış yatay üretilmiş kare prizma parçanın inşa yönündeki profili.

Son olarak, diğer ikincil işlem olan frezeleme yönteminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Frezeleme başlığı altında iki farklı ısıtma işlemi uygulanmıştır. Isıtma işlemi uygulanan ve ısıtma işlemi görmeyen dik üretilmiş kare prizma şeklindeki parçalar farklı kesme hızlarında ve farklı diş başına ilerleme değerlerinde frezeleme operasyonuna tabi tutulmuşlardır. Şekil 4.30’da, diğer ikincil işlemlerin de ortalama pürüzlülük değerlerini içeren grafiğin içine yerleştirilen ve grafikte göstermesi güç, çok düşük yüzey pürüzlülüklerini ortaya çıkaran frezeleme operasyonu sunulmaktadır.

Titanyum alaşımları ve diğer birçok alaşımın frezeleme, tornalama, delik delme gibi geleneksel yöntemlerle işlenmesinde kesici takımın ilerleme değerinin (frezelemede diş başına ilerleme, tornalamada ilerleme vb.) pürüzlülük üzerindeki etkisinin, kesme

hızından çok daha baskın olduğu literatürde birçok çalışmada bahsedilmektedir [87]. Bununla birlikte yürütülen proseslerde ilerlemenin artması ile yüzey pürüzlülüklerinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir [87, 88]. Literatürde, bu tez çalışmasında Ti-6Al-4V alaşım malzemesinin frezeleme operasyonlarında kullanılan kesme hızı değerlerinden daha düşük değerlerde yapılan testlerde kesme hızının artmasının belirli bir kesme hızı değerine kadar yüzey pürüzlülüklerini azaltmada rol oynadığı görülmektedir [83, 87]. Yüksek kesme hızında işleme sırasında, takım-iş parçası arayüzündeki kısa temas uzunluğu nedeniyle kesme sıcaklığı artar. Bunun nedeni, takım-iş parçası arayüzünde düşük sürtünme ile sonuçlanan sürtünme katsayısının değerindeki düşüş olduğu düşünülmektedir [87]. Bu faktörler, yüzey pürüzlülüğü değerlerinde iyileşmeye katkıda bulunabilir [89]. Ek olarak, kesme hızı arttıkça daha fazla ısı üretilir ve böylece iş parçası malzemesi yumuşar ve bu da yüzey pürüzlülüğünü iyileştiren bir diğer etkidir. Bununla birlikte, düşük bir kesme hızı, talaş yığılmasına neden olabilir ve dolayısıyla işlenmiş yüzeyi bozabilir. Yüksek ilerleme hızında yüzey pürüzlülüğünün, muhtemelen yüksek ilerleme hızında üretilen farklı ilerleme izleri nedeniyle zayıf olduğunu ortaya çıkarmaktadır [90]. Bu tez çalışmasında ise tercih edilen yüksek kesme hızlarında bu durum yerini kesici takımda meydana gelen aşınmaya bırakmış ve böylece yüzey pürüzlülüğünün hızla artmasına neden olmuştur [83].

Bahsedilen sonuçların yanında Shunmugavel ve ark. [91] eklemeli imalat ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım malzemesine uygulanan talaşlı imalat operasyonlarında geleneksel yöntem ile üretilen malzeme arasında yüzey pürüzlülük değerleri arasında bir kıyaslama yapmıştır. Bu kıyaslama sonucu nispeten yüksek kesme hızı ile yapılan işlemde yüzey pürüzlülüğünün kesme hızı ile arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, kesici takımda meydana gelen ciddi bir hata nedeniyle yüksek kesme hızında talaşın takıma dolanmasına ve yapışmasına neden olmuş, sonuç olarak ise talaşın takım ile parça arasına girerek işlenmiş yüzeyde birikmesine sebebiyet vermiştir. İşlenmiş yüzeyde yeniden biriken bu malzeme daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne ve zayıf yüzey kalitesine yol açmıştır. Takım yan yüzünde talaş ve çalışma malzemesi birikmesinin, pürüzlülüğü arttırarak takımı orijinal rotasından uzaklaştırabileceği de bilinen bir gerçektir [92].

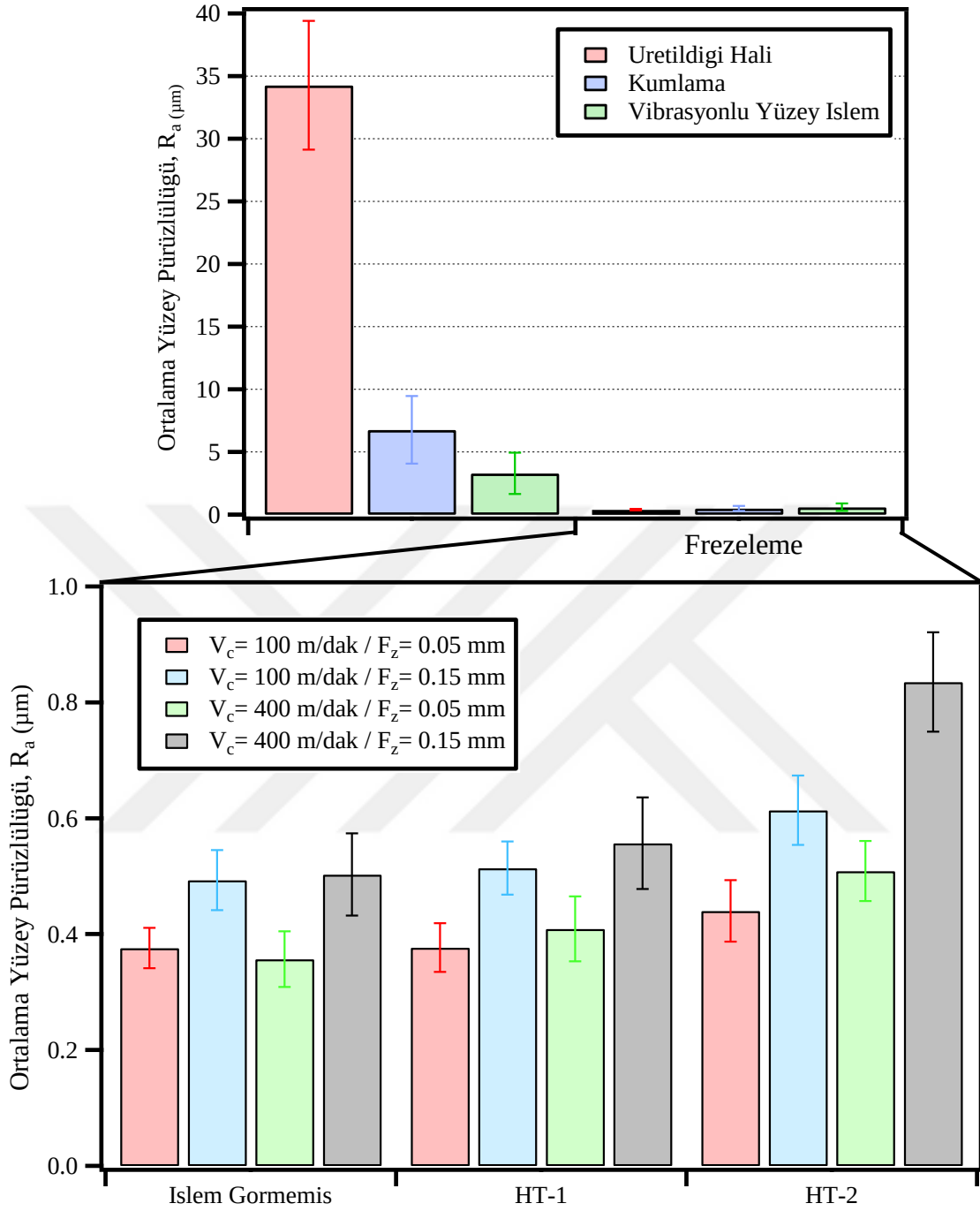
Vibrasyonlu yüzey işlem cihazı ile yapılan yüzey iyileştirme çalışmalarında ise, medyaların arasında kalan alaşım malzemeleri, aşındırmaya maruz kalarak pürüzlülük değerlerinin azalmasını sağlamıştır. Bu durum literatürde de belirtildiği üzere işlem

süresine bağı olarak yüzey pürüzlülüğünün zamana bağı olarak belirli seviyelere kadar ciddi miktarda azalmasına, belirli süreden sonra ise parçaya etkisinin sürenin artmasına bağı olmadan etkisiz olmasına neden olmaktadır [85]. Bununla birlikte, daha pürüzlü bir yüzeyin, daha pürüzsüz bir yüzeye göre daha fazla malzeme kaldırma sağladığı bildirilmektedir. Bu tür doygunluğun nedeninin ne olduğunun belirsizliği, ortam partiküllerinin doğası ve işlem koşulları ile bağlantısının henüz kesinleşmemesine bağlanmaktadır [93].

Çeşitli araştırmacılar tarafından [94, 95] hem sünek hem de gevrek malzemeler için aşındırıcı partiküllerin tekrarlanan etkisiyle hedef malzemenin uzaklaştırılması konusunda farklı mekanizmalar öne sürülmüştür. Sünek malzemeler söz konusu olduğunda, malzeme, plastik deformasyon ve kesme aşınmasıyla münasebet halindedir. Gevrek malzemeler söz konusu olduğunda ise girinti kopması, elastik-plastik deformasyon, radyal çatlama ve yayılma gibi mekanizmalar devreye girerek malzemenin parça üzerinden kaldırılmasını sağlar.

Yürütülen çalışmada parçanın yüzeyindeki pürüzlü yapıda mevcut olan ergimemiş tozlar vb. yüzeye yapışık fakat daha kolay kopabilen partiküllerin kumlama yöntemiyle parçadan kopartılması sağlanmışken, parçada merdiven etkisi vb. diğer etkilerden mevcut olan ve parçanın asıl yüzeyine dahil olan kusurların ise yüzeye sıvandığı, diğer bir deyişle yaydırıldığı bir önceki bölümde sunulan topoğrafyalarda da görülmektedir. Kumlama sonucu bahsedilen sebeplerden dolayı yüzey dalgalı hal almaktadır.

Sonuç olarak kıyaslama yapıldığında geleneksel yöntemler içinde en sık kullanılan yüzey işlem operasyonlarından biri olan frezelemenin her ne koşulda olursa olsun (kesme hızı, ilerleme ya da ısı işlem) çok daha düşük yüzey pürüzlülükleri meydana getirdiği görülmektedir. Diğer yöntemlerden ise vibrasyonlu yüzey işlemin yüksek işlem süresine rağmen kumlamadan daha iyi bir yüzey ortaya çıkardığı görülmüştür. Fakat kumlamanın kısa sürede yapılması ve vibrasyonlu yüzey işlem ile neredeyse yarışır konumda olması da kumlamanın kendi avantajıdır. Gerekli optimizasyonların yapılması durumunda bu değerlerin değişebileceği göz önüne alınmalıdır.



Şekil 4.30. Yüzey işlem uygulanmış parçaların yüzey pürüzlülükleri (HT-1: 950 °C/1H/Su-ile-soğutma, HT-2: 1050 °C/1H/Su-ile-soğutma).

Şekil 4.30 incelendiğinde uygulanan ısı işlemlerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi bulunmaktadır. Özellikle yapılan β -transus sıcaklığı üzerindeki ısı işlemin (“HT-2” 1050 °C/1H/Su-ile-soğutma) bir sonraki bölümde açıklanacak olan sertlikteki artıştan dolayı kesici takımın aşınmasının daha fazla olması ile yüzey pürüzlülük değerlerinin nispeten daha yüksek şekilde oluşması buna bir örnektir. Bununla birlikte β -transus altındaki ısı

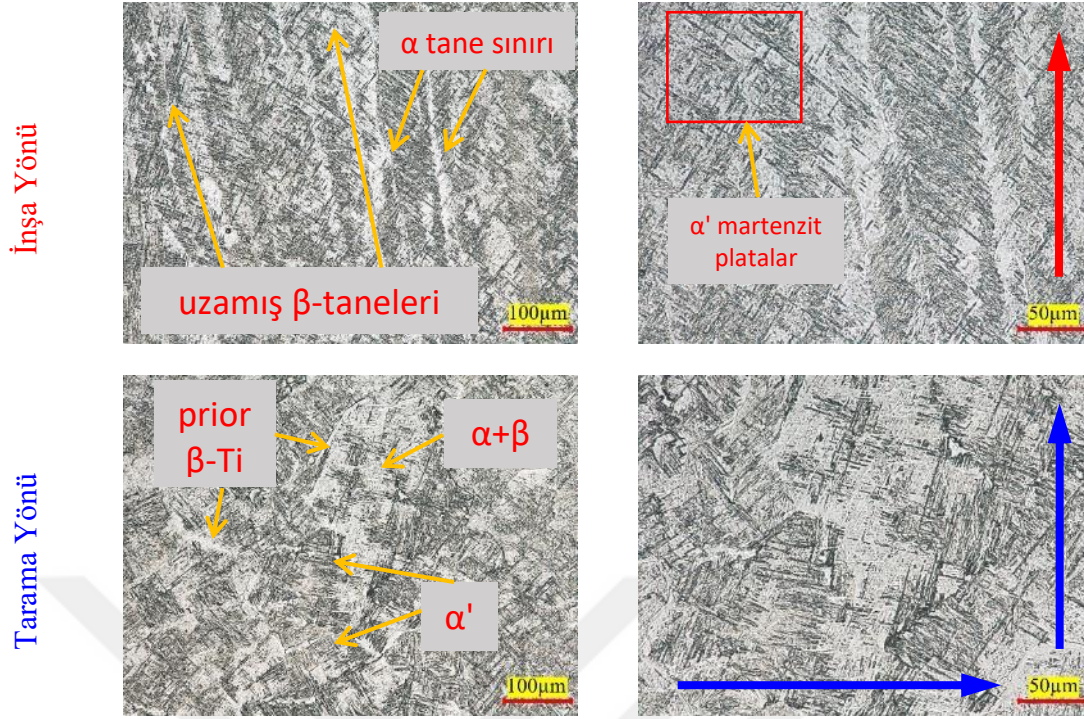
işlemin (“HT-1” 950 °C/1H/Su-ile-soğutma) ise hâlihazırda daha düşük sertliğe sahip olması, işlem görmemiş malzeme ile aralarında hata barları da göz önüne alındığında yüzey pürüzlülük değerlerinin parametrelerin değişimi ile neredeyse aynı sonuçları ortaya çıkardığı anlaşılmaktadır. Özellikle β -transus sıcaklığı üstündeki ısıtıl işlemin hem parçanın ciddi derecede sertleşmesine yol açması hem de yüksek kesme hızlarında bahsedilen yüksek takım aşınması durumları da göz önüne alındığında diğer bütün pürüzlülüklerden daha yüksek seviyede seyretmesi bu şekilde açıklanabilmektedir.

4.3. Mikroyapı Analizi

Literatür kısmında hem geleneksel yöntemler ile hem de eklemeli imalat ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım malzemesinin mikroyapısal özelliklerinden bahsedilmiştir. Bu yüzden bu bölümde mevcut çalışmada oluşan mikroyapılardan bahsedilecektir.

Ti-6Al-4V alaşım malzemesinin faz diyagramı “Bölüm 3.3.4’teki Şekil 3.7’de” sunulmuştur. Bu faz diyagramı ile değerlendirildiğinde, işlem görmemiş parçaların inşa yönünde mevcut olan mikroyapı, EBM tarafından üretilen tüm Ti-6Al-4V parçalarında, sütunlu β -taneli yapıların mikroyapıyı domine ettiğini göstermektedir (Şekil 4.31). Ergiyik havuzun katılaşması üzerine, ergiyik ilk önce sıcaklık katılaşma sıcaklığına yaklaştığında önceki β fazına (prior β grains) dönüştürülür ve daha sonra sıcaklık β -transus sıcaklığının altına düştüğünde önceki β tanelerinde α / α' fazları oluşur. Tüm bu mikroyapılar, çok katmanlı enine kesitler üzerinde uzanan sütun şeklindeki taneciklere sahiptir. Bu β taneler açıkça katman kalınlığından çok daha uzundur. Görünüşe göre, epitaksiyel büyüme, yeniden ergitme ve yeniden katılaştırma işlemleri yoluyla önceki katmanın üst yüzeyinde çekirdeklenme yoluyla gerçekleşmiş olmalıdır [96].

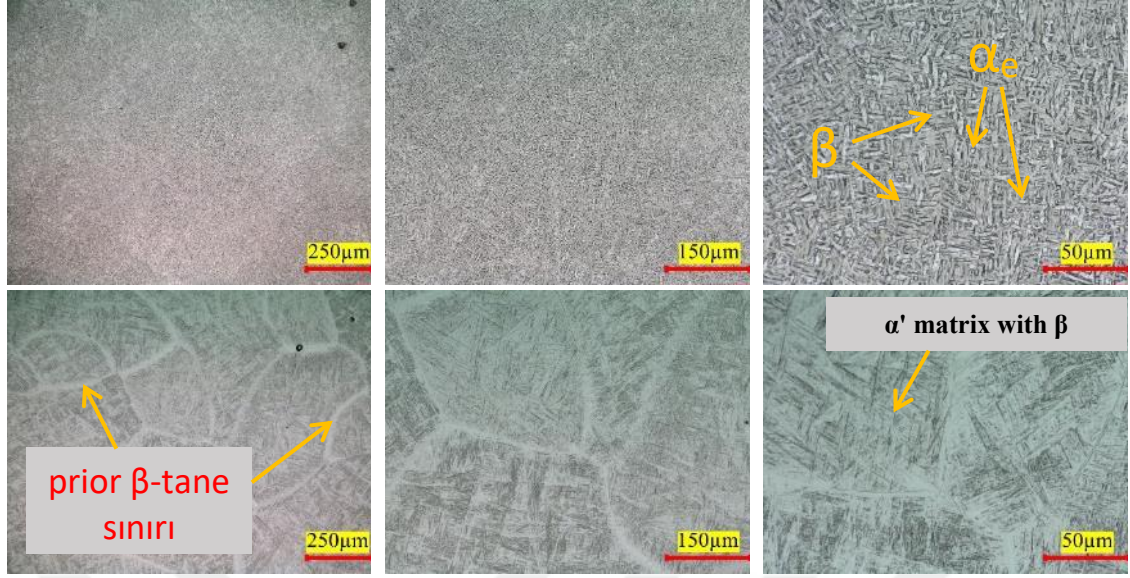
Tarama yönünde ise, parçalarda α' - Ti martensitik fazın yanı sıra α + β - Ti matrisi ve önceki β - Ti tane sınırlarından oluştuğu fark edildi [97]. EBM ile üretilen parça, ince martensitik çیتالardan oluşuyordu, ancak bu çیتالara kıyasla miktar olarak daha azdı.



Şekil 4.31. İşlem görmemiş parçanın inşa ve tarama yönündeki mikroyapılar.

Şekil 4.32 incelendiğinde, β -transus üstü ısıtma işlemi uygulanan numunelerin mikroyapılarındaki dönüşüm görülmektedir. Yapılan HT-1 (950 °C / 1 Saat / Suda Soğutma) ısıtma işlemi, martenzitik mikro yapının, eş eksenli- α (α_e) ve β fazının bir karışımına dönüştüğünü göstermektedir [98]. Suda hızla soğuyan numune ile yüksek sıcaklıkta mikroyapı bilgisi elde edilmiştir. HT-2 (1050 °C / 1 Saat / Suda Soğutma) işlemi sonucu ise, mikroyapılar, önceki β tane sınırları (GB) ile bölünmüştür. Bunun yanında α' - Ti martensitik faz ile birlikte β yapısı da yer almaktadır [99].

Uygulanan bu ısıtma işlemleri sonucu mikrosertlik bölümünde de bahsedildiği üzere mikrosertlikler artış göstermiştir. Bu durum hızlı soğutma ile α' - Ti martensitik faza dönüşüm ile ilgilidir. Parçalar bu şekilde daha yüksek çekme mukavemetine sahip olurken, aynı zamanda sünekliği azalarak gevrekleşmektedir. Bahsedilen fazın bu davranışı göstermesi yanı sıra, daha gevrek olan α fazının daha yoğun bir şekilde yapıda bulunması da gevrekliği arttıran bir diğer faktördür.



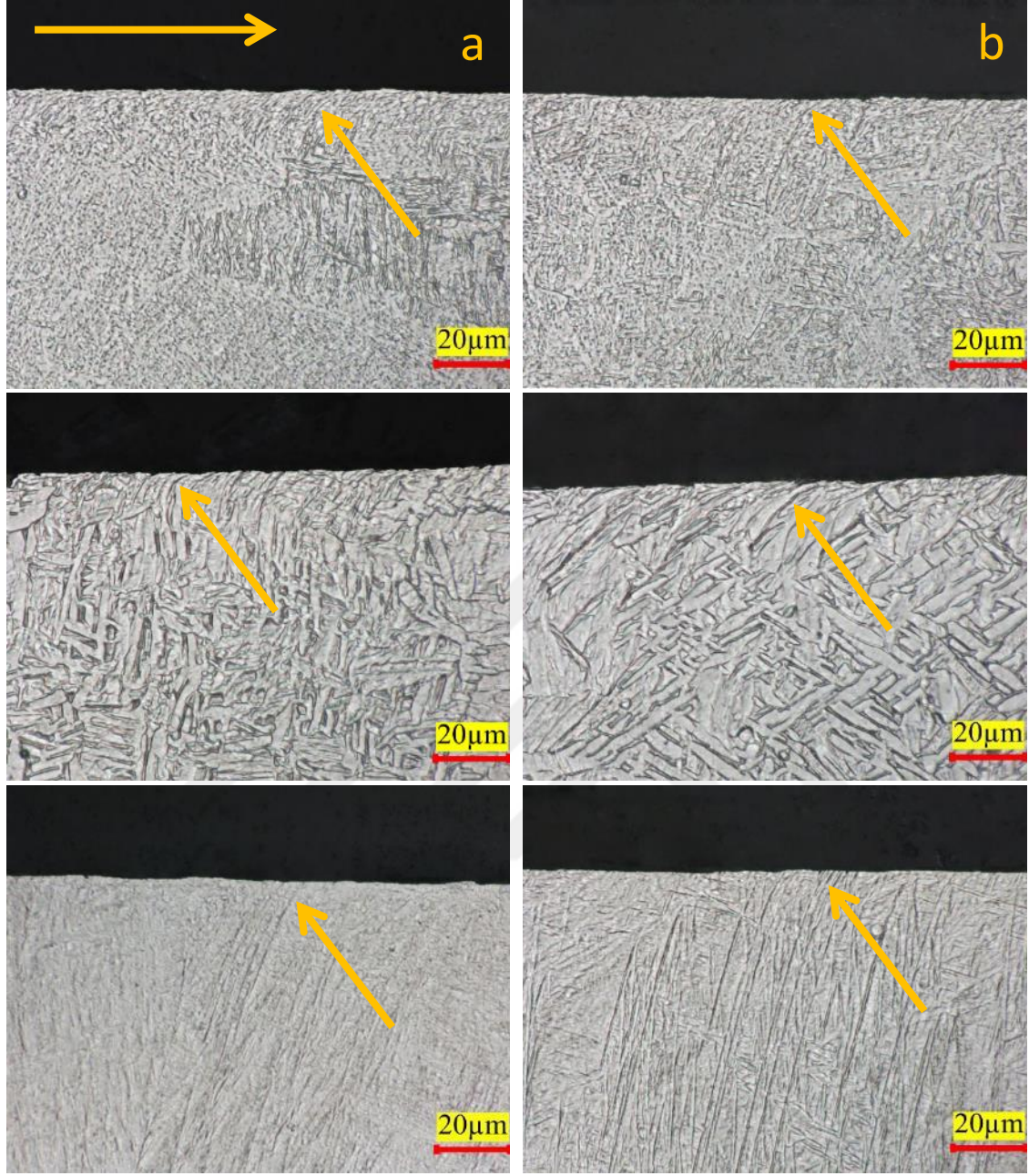
Şekil 4.32. Isıl işlem görmüş parçaların tarama yönündeki mikroyapıları (üst-HT-1, alt HT-2)

İşlenmiş yüzeyin ve yüzey altının plastik olarak deforme olduğu kolayca fark edilebilir. Yüzey altında meydana gelen plastik deformasyon özellikle aşırı gerilme, gerinim hızı ve sıcaklığın etkisinden kaynaklanır [100]. Takım hareketi yönünde bir plastik akış, maruz kalan yüzeyin deforme olmasına neden olur [101]. İşlenmiş yüzeyin altındaki bu ciddi deformasyonun sebebini birçok araştırmacı yüksek kesme hızıyla ilişkilendirmiştir [102]. Yüzeyin işlenmesi sonucu yüzey altında üç bölge meydana gelir, nispeten pürüzlü bir parça yüzeyi, plastik olarak deforme olmuş bir katman ve etkilenmemiş bölge.

Çoğu durumda, ilerleme yönüne doğru plastik deformasyon meydana gelir. Titanyum alaşımlarını daha yüksek kesme hızlarında ve ilerleme hızlarında işlerken, daha kalın bir plastik deformasyon gözlemlenebilir. Bu durumda, takım-talaş arayüzü arasındaki sıcaklık artar, böylece yapışkan bir sürtünme bölgesi oluşur. Bu nedenle, yüksek kesme sıcaklığı ve yapışma sürtünmesinin kombinasyonu, şiddetli ve fark edilebilir yüzey altı plastik deformasyonunu güçlendirir [90]. Aynı zamanda ortaya çıkan bu sıcaklığın ve yüksek kesme kuvvetlerinin plastik deformasyon üzerinde baskın faktörler olduğu belirtilmektedir. Bu olayda, işleme sırasında meydana gelen plastik deformasyonların iş parçasına etki eden kesici takımın ortaya çıkardığı mekanik kuvvetlerden kaynaklandığı sonucuna da varılmıştır [103]. Ayrıca işlenmiş yüzey alanının bölgesel olarak ısınması da sıcaklık değişimleri ile birlikte ek deformasyon da meydana getirebilmektedir.

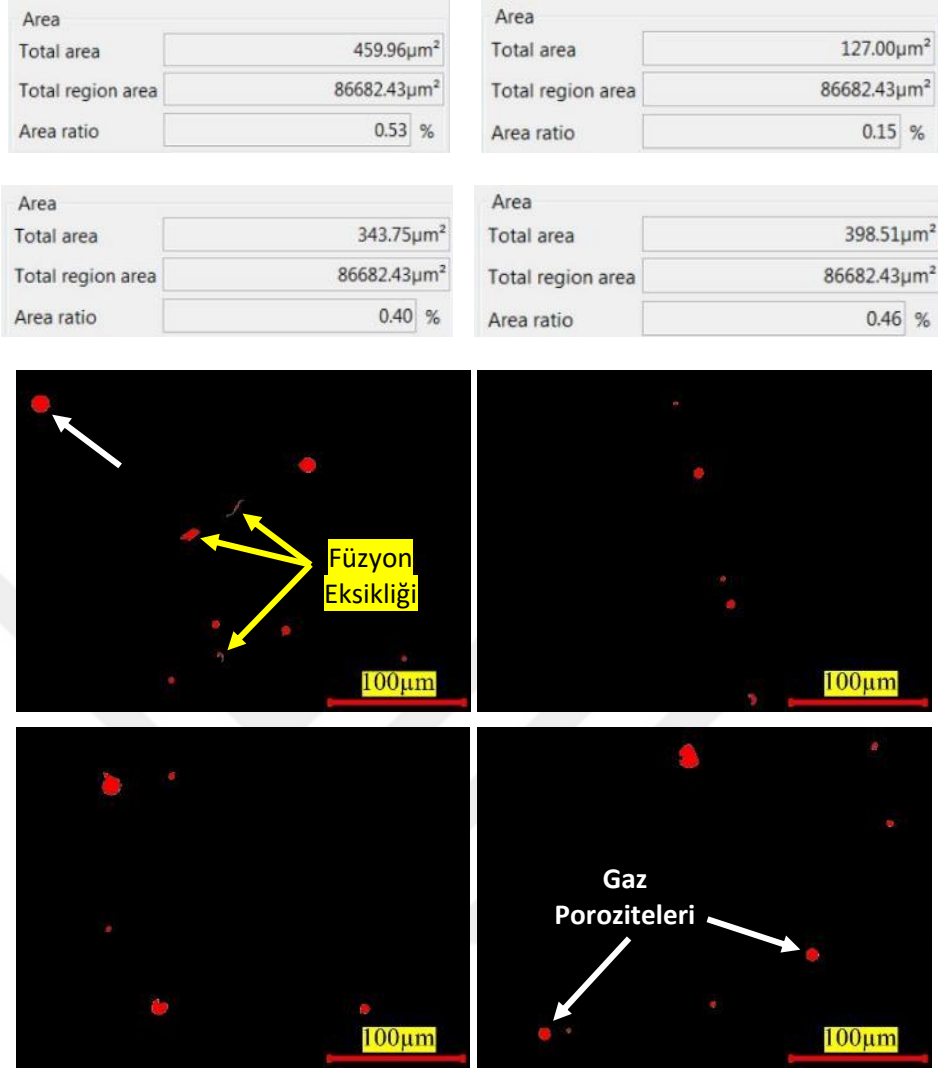
Şekil 4.33'te frezelenmiş yüzeylerden alınan mikroyapı görüntüleri sunulmaktadır. Tüm kesme koşulları için işlenmiş yüzeyin altında bozulmuş veya plastik olarak deforme olmuş bir katman tabakası bulunmuştur. Bahsedildiği üzere kesme hızının artmasıyla nispi bir deformasyon artışı ortaya çıkmıştır. Bu plastik deformasyon, tanelerin takım hareketinin yönü boyunca deformasyonu ile net bir şekilde görülmektedir. Mikroyapısal plastik deformasyonun, bu malzemelerin işlenmesi sırasında yüksek termal ve mekanik yüklerin birleşik etkisine bağlı olarak kesme hızı ve takım aşınmasıyla arttığını göstermektedir [91]. Parçanın deforme edilebilme kabiliyetine bağlı olarak sert malzemede daha az deformasyon görülmektedir.





Şekil 4.33. Isıl işlem görmemiş (en üst), HT-1 (orta) ve HT-2 ısııl işlem görmüş (en alt) parçaların düşük ilerleme/düşük hız (a) ve yüksek ilerleme/yüksek hız (b) altında mikroyapıda meydana getirdiği deformasyon.

Şekil 4.34'te ise parçada bulunan bazı gaz porozitesini ve ince bir füzyon eksikliğini göstermektedir. Parçada mevcut olan porozite miktarı ile birlikte, parçanın yoğunluğunun yaklaşık olarak %99.5 oranından daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.34. Farklı geometrilere sahip parçalarda yüzey altında oluşan kusurlar.

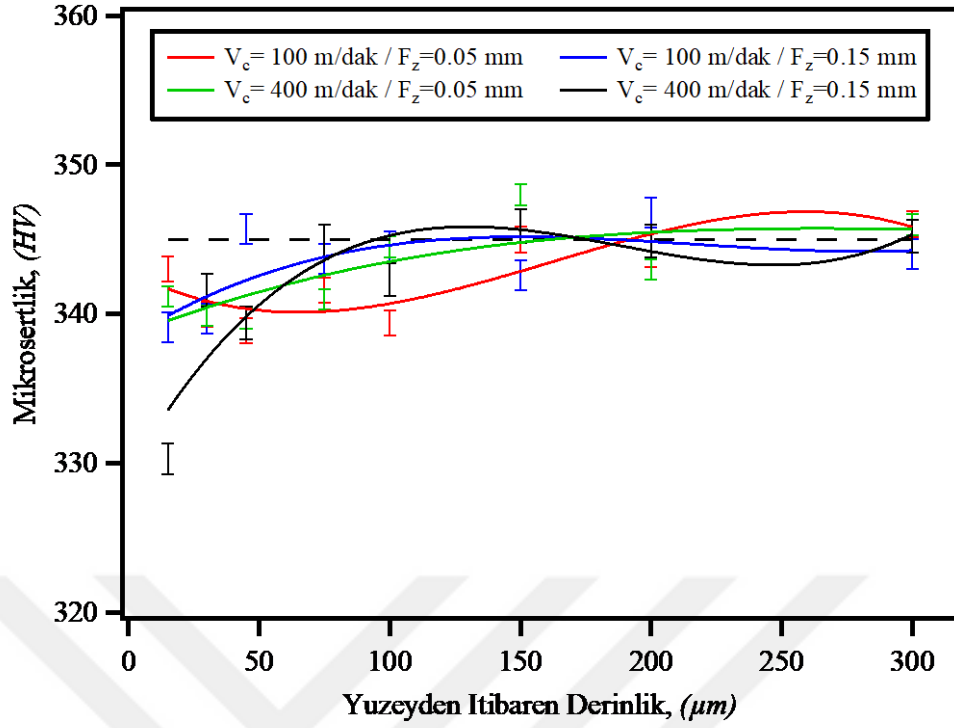
4.4. Mikrosertlik Analizi

Talaşlı imalat sonrasında gözlemlenen mikrosertlik değişimleri termal, mekanik ve kimyasal reaksiyonun etkisine bağlı olabilir. Pek çok araştırmacı, iş parçası malzemesinin, özellikle yüksek kesme sıcaklığı ve basıncında işleme sırasında sertleşme veya ısıl yumuşatma etkisine maruz kaldığına inanmaktadır [104]. Titanyum alaşımları işlenirken, işlenmiş yüzeyin hemen altındaki sertliğin, termal yumuşatma etkisinden dolayı işlem görmemiş malzeme sertliğinden daha yumuşak olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, işlenmiş yüzeyin altındaki derinlik arttığında, sertlik değeri tepe değerine ulaşmadan artmaya başlar ve sonunda Şekil 4.35-4.37’de gösterildiği gibi frezelenmemiş malzeme sertliğine kademeli olarak düşer. Sertlik değerindeki artış,

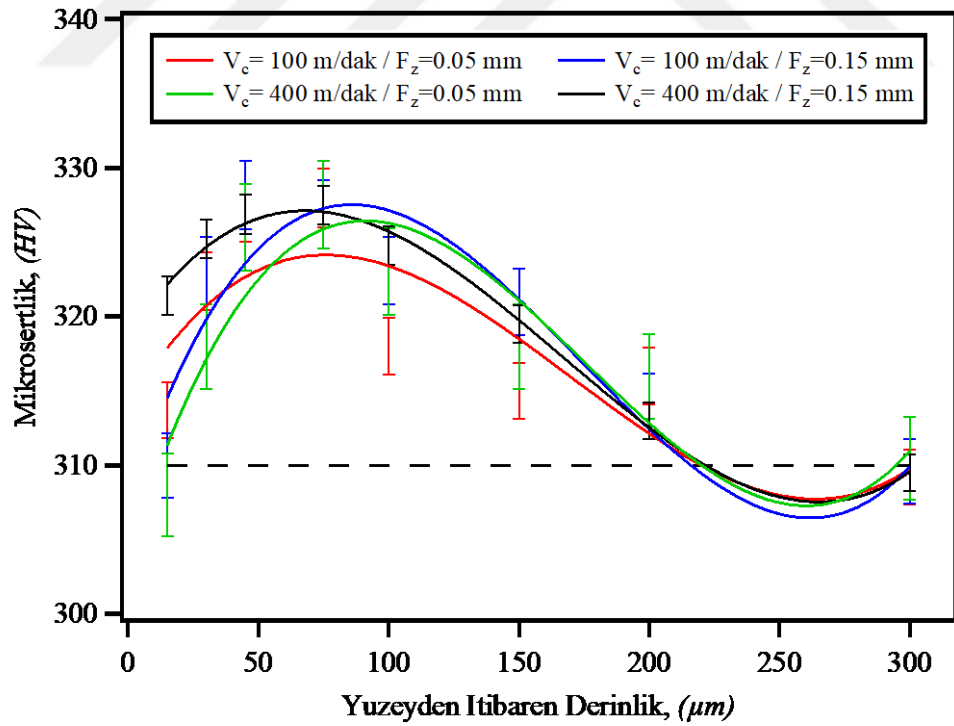
doğrudan pekleşmenin etkisi ile ilişkilidir [87]. Bu etki sıcaklığa, kesme süresine ve iç gerilim gevşeme mekanizmasına bağlıdır [104].

Şekil 4.35 ve Şekil 4.37 incelendiğinde, frezlenmiş yüzeyin 15 µm altındaki alt yüzeyin mikro sertliğinin ortalama taban malzemesi sertliğinin altında olduğunu görülmektedir. Bu, işlenmiş yüzeyin ısı yumuşatma etkisi yaşadığını veya frezeleme işlemi sırasında lokalize ısınma nedeniyle aşırı yaşlandığını gösterir. Rahim ve Sasahara [89], Haron ve Jawaid [105] ve Ginting ve Nouari [104] tarafından titanyum alaşımlarının tornalama testi de işlenmiş tabakanın yüzeyine yakın mikro sertlik değerinde önemli düşüş olduğunu göstermiştir. Yüksek kesme sıcaklığı ve yüksek kesme basıncının yüzey bölgesinde belirgin bir yumuşama yarattığına dikkat çekmişlerdir [87]. Termal yumuşamaya maruz kalan katmanlardan daha derin bölgelerde ise kesme parametrelerine (yani kesme hızı ve diş başına ilerleme), mekanik ve termal etkileşime bağlı olarak pekleşme (work-hardening) meydana gelmiş ve bundan dolayı nispi bir sertlik artışı olmuştur. Pekleşme bölgesinde kesme hızı ve ilerleme hızının artmasıyla ise mikrosertliğin genellikle arttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada da durum nispeten böyledir. Yüksek diş başına ilerleme değerinin bir sonucu olarak yüzey tabakasının mikro sertliğindeki bir artış, takım ile işlenmiş yüzey arasındaki yüksek sürtünme yükü ve bunun sonucunda pekleşme etkisi ile ilişkilendirilebilir [87].

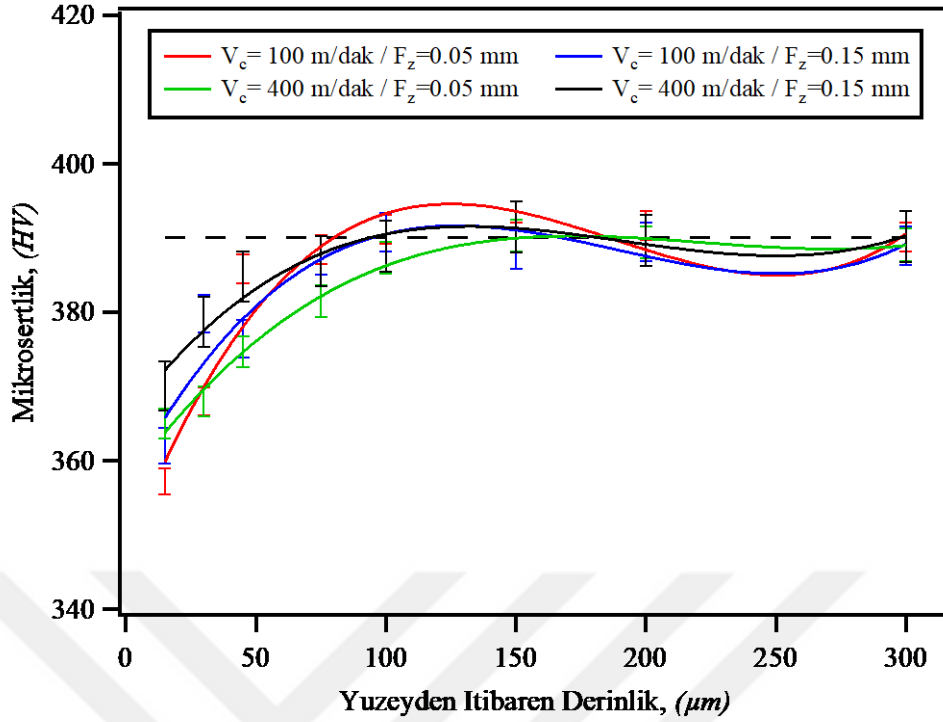
Isıl işlem görmüş parçalarda ise bu durum benzerdir. Belirlenen kesme derinliği ile oksit tabakasının etkisi ortadan kaldırılmış ve sonuçlara herhangi bir etkisinin olduğu da görülmemiştir. HT-2 ısııl işlem görmüş parçada mikroyapısal dönüşümler sayesinde sertlik ısııl işlem görmemiş parçaya göre yaklaşık 45 HV artış göstermişken, HT-1 ısııl işlem uygulanan parça ise benzer mikroyapısal dönüşüm sebeplerinden dolayı yumuşamıştır (Şekil 4.36). Sertliğin artmasıyla deforme edebilme yeteneğinin azalması yukarıda açıklanan durumlar neticesinde termal yumuşamaya neden olmuştur. Sertliğin azalması ile deforme edilebilirlik artmış, parça daha kolay işlenebilmiş ve yalnızca plastik deformasyona uğrayan parçanın yüzeyden itibaren 50 µm'ye kadar yaklaşık olarak 15 HV sertleşmiştir. Yüzeyden itibaren derinlik 200 µm oluncaya kadar sertlik artışı varlığını sürdürmüş ve bu durum yukarıdaki paragrafta da bahsedildiği üzere pekleşme bölgesinin varlığıyla açıklanmıştır. İlerlemenin artması ile meydana gelen sertlik artışı ise yok sayılabilecek miktarlarda olmuştur.



Şekil 4.35. Isıl işlem görmemiş parçaya uygulanan frezeleme işlemi sonrası ortaya çıkan mikrosertlik değerleri.



Şekil 4.36. HT-1 ısıtılmış parçaya uygulanan frezeleme işlemi sonrası ortaya çıkan mikrosertlik değerleri.

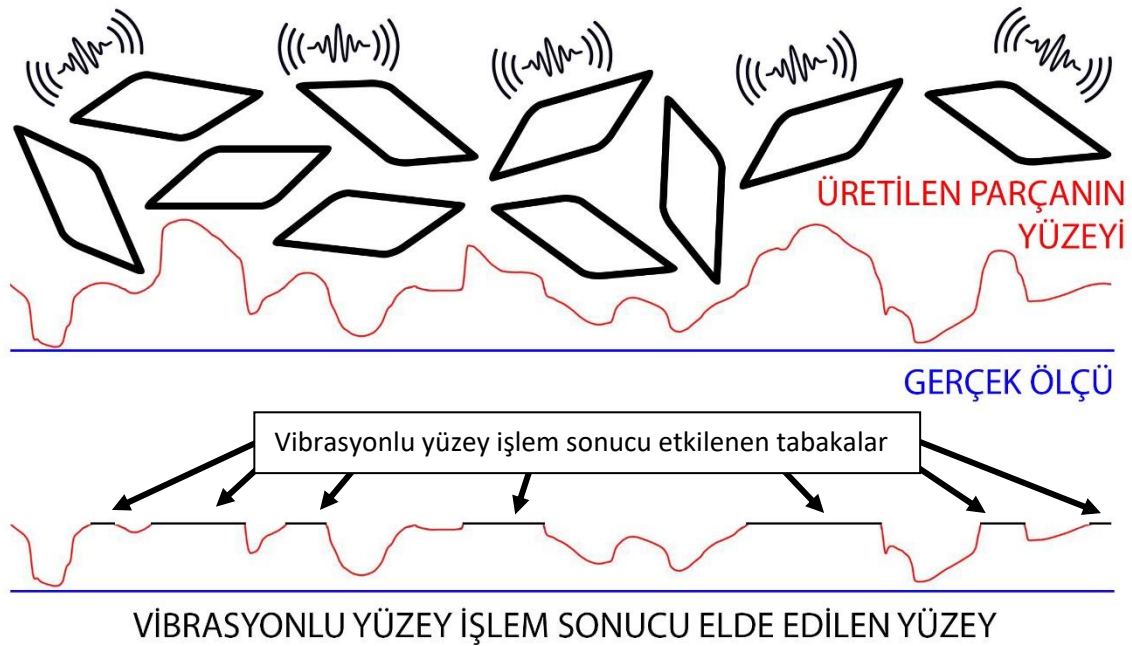


Şekil 4.37. HT-2 ısıtılmış parçaya uygulanan frezeleme işlemi sonrası ortaya çıkan mikrosertlik değerleri.

Kumlama ve vibrasyonlu yüzey işlem ile yapılan yüzey iyileştirme prosesleri parçaların istenilen yüzey kalitesine gelene kadar yürütülmüştür. Belirli sürelerin üstünde parçaların iyileşmeyi durdurduğu ve bu süreden sonra parçanın geometrisini bozduğu (aşındırma sonucu parçadan gereğinden fazla malzeme kaldırmasıyla) görülmüştür. Bu yüzden kumlama ile yüzey iyileştirme prosesinin belirli sayıda ve geometride parçaya uygulanmasıyla kritik süre belirlenmiş ve belirlenen süre boyunca kumlama uygulanan parçaların mikrosertlikleri bu şekilde ölçülmüştür. Bahsedilen geometrilerin bozulmasının engellendiği ve kumlamamanın maksimum etkiye sahip şekilde uygulandığı parçalardan alınan topoğrafyalar ve yüzey profilleri ise önceki bölümlerde sunulmuştur.

Parçaların sertlik değerleri, kumlanmış ve vibrasyonlu yüzey işlem görmüş parçaların yüzeylerinin hemen altından başlayarak etkilediği derinlik boyunca ve etkinin kaybolduğu yere kadar doğruluğu sağlamak amacıyla tekrarlanarak ölçülmüştür. Bununla birlikte vibrasyonlu yüzey işlem ve kumlama operasyonlarına tabi tutulmuş parçalarda da işlem görmemiş parçalarda görünen ergimemiş tozların kümeleşip katmanlaşmasından meydana gelen merdiven efekti davranışı görülmektedir. Yüzey altı mikrosertlik değerleri ise vibrasyonlu yüzey işleme göre kumlamada daha yüksek olarak sonuçlanmıştır. Bunun

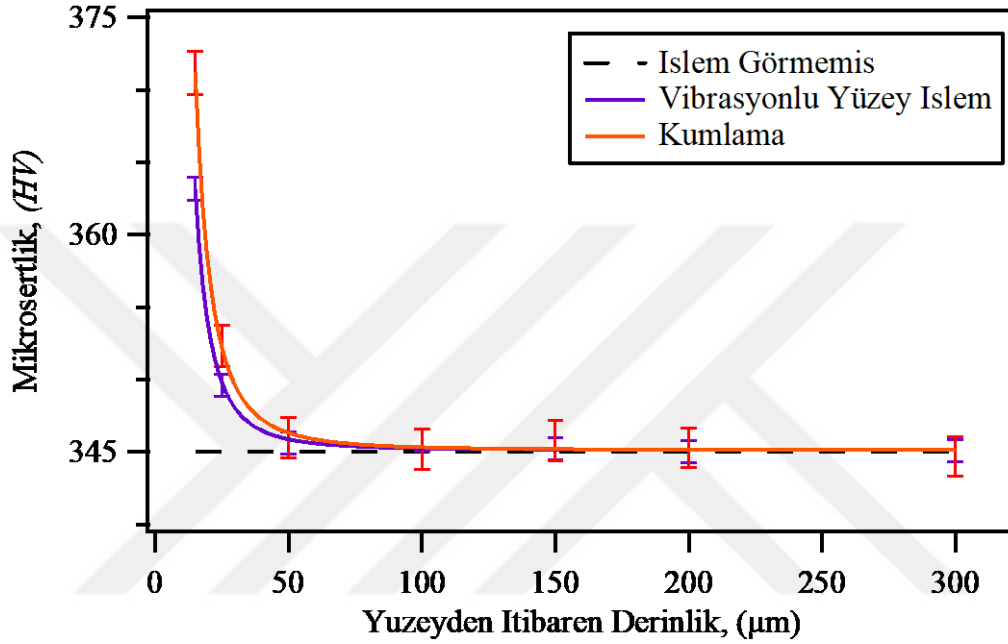
nedeni kum partiküllerinin işlem görmemiş yüzeyde bulunan ergimemiş tozları geçerek parçanın asıl ergimiş yüzeyine ulaşmasıyla ilişkilidir. Fakat bazı ergimemiş tozları da yüzeye sıvamasıyla birlikte mikrosertlik artışları bütün yüzey boyunca eşit dağılım göstermemiştir. Kumlama operasyonu yüzey tabakasının altında daha fazla plastik deformasyon ve molekül dislokasyonu meydana getirmiştir [106]. Sonuç olarak tane boyutu azalmakta ve sertlik değerleri artmaktadır [107]. Vibrasyonlu yüzey işleminde ise yüzeyde biriken plastik darbe hasarı nedeniyle pekleşme oluşarak yüzey ve yüzey altı mikrosertliği arttırmaktadır [108]. Zamanın da etkisiyle yüzeyde meydana gelen plastik deformasyonun etkisi yavaş yavaş artmıştır. Bununla birlikte, kontrollü bir şekilde yalnızca yüzeydeki ergimemiş tozları aşındıran bu işlem sonucu kumlamaya benzer şekilde yüzeyin her tarafında eşit bir sertlik artışı oluşturulamamıştır. Şekil 4.38’de vibrasyonlu yüzey işlem sonucu etkilenen tabakalar gösterilmektedir. Aşındırıcı medyanın aşındırılan yüzeylere erişebilmesi yalnızca bu yüzeylerde sertlik artışını sağlayabilmiştir. Bu sertlik artışının kumlamaya nazaran daha düşük seviyelerde kalmasının sebebi ise vibrasyonlu yüzey işleminde işlem sıvısının kullanılmasıdır [108].



Şekil 4.38. Vibrasyonlu yüzey iyileştirme operasyonu sonucu etkilenen tabaka.

Şekil 4.39’da vibrasyonlu yüzey işlem ve kumlama operasyonlarına tabi tutulmuş parçalarda meydana gelen mikrosertlik artışları sunulmaktadır. Sertlik ölçümleri, frezeleme operasyonuna tabi tutulan parçalarda olduğu gibi yüzeyin 15 µm altından

başlayarak 300 μm derinliğe kadar yürütülmüştür. Yüzey işlemleri neticesinde etkilenen fakat eşit dağılım göstermeyen bölgelerde yapılan ölçümler sonucunda kumlama operasyonu yüzeye en yakın noktalarda 25 HV kadar artış göstermiştir. Bu sonuçlar vibrasyonlu yüzey işleminde ise bahsedilen sebeplerden dolayı 15 HV değerinde kalmıştır. Ortaya çıkan nispi sertlik artışı, titanyumun aşındırma direncinin – önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere – yüksek olmasına da bağlıdır.



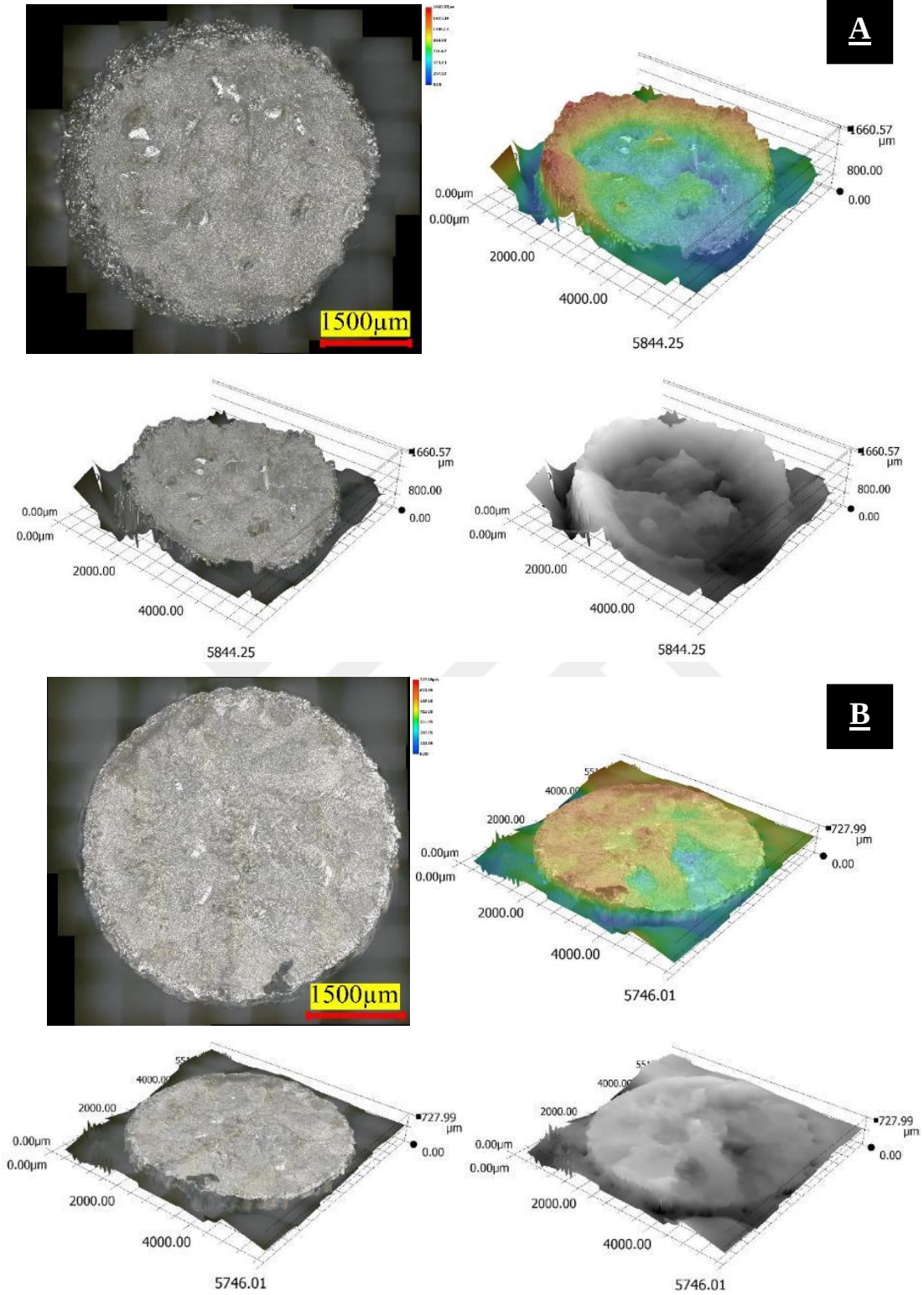
Şekil 4.39. Vibrasyonlu yüzey işlem ve kumlama operasyonları sonucu meydana gelen mikrosertlik değişimleri.

4.5. Çentik-Darbe Testi Analizi

V-çentik testi olarak da bilinen çentik-darbe testi, kırılma sırasında bir malzeme tarafından emilen enerji miktarını belirleyen standartlaştırılmış bir yüksek gerinim oranı testidir. Emilen enerji, malzemenin çentik tokluğunun/kırılganlığının bir ölçüsüdür [109]. Hazırlanması ve yürütülmesi kolay olduğu, hızlı ve ucuza sonuç alınabildiği için endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. En önemli dezavantajı ise, bazı sonuçların yalnızca karşılaştırmalı olmasıdır. Bununla birlikte üretilen parçanın teste tabi tutulması sonucu kesitlerinde meydana gelen kırık bölgesinde yapılacak detaylı analizler sonucu daha derin bir malzeme değerlendirilmesi sağlanabilmektedir.

Parçalara uygulanan ikincil işlemlerin ve ısıt işlemlerin parçalar arasında karşılaştırma sağlaması açısından parçalara çentik-darbe testi uygulanmıştır. Bu sayede ikincil işlemlerin ve ısıt işlemlerin parçaların gevrek veya sünek davranışlarını hangi yöne doğru geliştirdiği analiz edilmiştir. Bu aşamada mikroyapı dönüşümü, mikrosertlik değişimi, yüzey pürüzlülüğünün azaltılması gibi etkenler grevreklik veya süneklik davranışı ciddi şekilde etkilemektedir. Belirtilmesi gereken en önemli durum ise ISO-148 standartlarında yer alan çentik darbe testi parça standartlarına uygun olmayan parçalar üzerinde denenmesidir. Bunun sebebi mevcut olan numuneler arasında, metodun aynı malzeme ve aynı üretim grubu ile üretilen parçaları içeren karşılaştırmalı bir teknik olmasına olan güvendir. Bununla birlikte elde edilen sonuçlar standartlar açısından bir uygunluk sağlamamasına rağmen, parçaların birbirlerine göre gevreklik/süneklik özelliklerindeki değişimleri sunmaktadır. Standartlara uygun olarak üretilecek aynı malzeme ve üretim grubuna mensup parçaların aynı işlemlerin uygulanması sonucu farklı sonuçların ortaya çıkabileceği unutulmamalıdır.

Şekil 4.40'ta uygulanan çentik-darbe testleri sonucu en sünek ve en gevrek davranış gösteren işlem görmemiş ve HT-2 ısıt işlemi görmüş parçaların kırık kesitleri gösterilmektedir. Tablo 4.1'de ise parçalara uygulanan çentik-darbe testi sonucu elde edilen enerji absorbe değerleri sunulmaktadır. Her bir çentik-darbe testi her biri farklı olan 7 parçaya uygulanmıştır. Vibrasyonlu yüzey işlem yapılan parçaya herhangi bir ısıt işlem uygulanmayarak yalnızca karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Burada asıl amaç, işlem görmemiş malzeme ile yalnızca ısıt işlem görmüş, yalnızca kumlanmış ve hem ısıt işlem görmüş hem de kumlanmış parçaların kıyaslanma durumu olmuştur. Testler standart koşullarda (1 atmosfer (atm) basınç ve 25 °C sıcaklıkta) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.40. Çentik-darbe testi sonucu en sünek ve en gevrek davranış gösteren işlem görmemiş (A) ve HT-2 ısııl işlem görmüş (B) parçaların kesitlerinden alınan yüzey topoğrafyaları.

Tablo 4.1. Ti-6Al-4V parçalara uygulanan çentik darbe testi sonuçları.

İkincil İşlem	Absorbe Edilen Enerji (J)
İşlem Görmemiş	34.00
Kumlanmış	26.66
950 °C Isıl İşlemli	8.22
950 °C Isıl İşlemli + Kumlanmış	10.54
1050 °C Isıl İşlemli	1
1050 °C Isıl İşlemli + Kumlanmış	1.37
Vibrasyonlu Yüzey İşlem	25.13

Parçaların kırılma bölgelerinden alınan görseller yorumlandığında ve ayrıca parçalara uygulanan çentik-darbe testleri sonucu elde edilen absorbe enerjileri değerleri analiz edildiğinde parçaların gevrek kırılmaya maruz kaldığı açıkça görülmektedir. Özellikle HT-2 ısıtılma işlemine tabi tutulan ve ciddi bir mikrosertlik artışı bulunan parça, hem sayısal olarak hem de görsel olarak tamamen gevrek bir kırılma göstermiştir. Bu davranışa kıyasla işlem görmemiş parça daha yüksek süneklik davranışı ile kırılmış ve daha doğal olarak fazla enerji absorbe etmiştir. Parçada mevcut olan farklı kırılma mekaniği bunu da doğrulamaktadır. HT-1 ısıtılma işlemi uygulanmış parça ise daha sünek bir davranış sergilemiştir. Çentik-darbe testi ile gerçekte gevreklik-süneklik geçiş sıcaklığı araştırılırken, bu tez çalışmasında numuneler standart koşullar altında teste tabi tutulmuşlardır. Bununla birlikte titanyum ve alaşımları bu sıcaklık değişimlerinden zaten en az etkilenen gruplardan biridir. Bu durumda baskın unsur ise kesinlikle ısıtılma işlemidir. Uygulanan yüzey iyileştirme operasyonları ise çentik-darbe testi sonuçlarına pek bir etki edilememiştir.

Şekil 4.41’de ise Şekil 4.40’te kesitlerinden topoğrafya görüntüleri alınan çentik-darbe testi uygulanmış parçaların görselleri yer almaktadır. Nispeten sünek olan işlem görmemiş malzeme daha fazla deformasyonu absorbe etmiş ve dayanamadığı noktada kırılmışken, gevrek olan parçanın herhangi bir deformasyona izin vermeden anırsız kırıldığı görülmektedir.



Şekil 4.41. En sünek ve en gevrek davranış gösteren işlem görmemiş ve HT-2 ısıtıl işlemi görmüş parçaların görselleri.

4.6. Aşınma Analizi

Aşınma, temas eden iki yüzey arasındaki mekanik etkileşimden kaynaklanan giderek artan madde kaybı olarak tanımlanabilir [110]. Genel olarak, bu yüzeyler, ya kayar ya da yuvarlanır ve yük altında göreceli hareket halinde olacaktır. Aşınma, yüksek gerilimli arayüz bölgelerinin yerel mekanik arızası nedeniyle oluşur ve arıza modu genellikle çevresel faktörlerden etkilenir. Yüzey bozulması, yapışma ve partikül transfer mekanizmaları ile karakterize edilen bir dizi olayla veya talaşlı imalata benzer bir doğrudan partikül üretimi süreci veya bazı durumlarda bir yüzey yorgunluğu hatası şeklinde aşınma partiküllerinin üretimine yol açabilir. Bu üç mekanizma yapışkan, abrasif ve yorulma aşınması olarak adlandırılır. Her üç durumda da, gerilim aktarımı esas olarak katı-katı bir arayüz aracılığıyla gerçekleşir.

Titanyum alaşımları, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve korozyon direncinin mükemmel kombinasyonu nedeniyle mühendislik uygulamalarında artan bir öneme sahiptir ve diğer bütün özellikleri ve uygulamaları literatür kısmında detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bununla birlikte, Ti-6Al-4V alaşımının, özellikle aşınma ve sürtünme içeren alanlarda uygulamalarını kısıtlayan zayıf aşınma direncine sahip olduğu bilinmektedir [111]. Molinari ve ark. [112], alaşımın düşük yüklerde plastik deformasyona karşı düşük aşınma direncini ve yüzey oksit tarafından uygulanan zayıf korumayı doğrulamak için farklı kayma hızlarında ve uygulanan yüklerde kendine karşı kayan Ti – 6Al – 4V alaşımının kuru kayma aşınma davranışını inceledi. Ti – 6Al – 4V

alaşımının zayıf aşınma direncinin baskın nedeni, tribooksitlerin uyguladığı düşük korumadır. Ti – 6Al – 4V alaşımının tribo-katmanı kırılgandır, sürekli parçalanma eğilimindedir ve substrata yapışmaz, bu nedenle koruyucu bir rol sunmaz [112]. Magaziner ve ark. [113], karşılıklı kayma koşulları altında Ti-6Al-4V'nin aşınma davranışını incelemiş ve aşınma kaybının, tribooksitlerin etkisine değinmeksizin yapışma ve aşınma mekanizmasına bağlı olduğunu da gözlemlemiştir.

Gelişmiş aşınma direnci için titanyum alaşımlarının tribolojik özelliklerini geliştirmek için bilinen bir yaklaşım, artan sertlik ve sürtünme katsayısında azalma için yüzey modifikasyonları yapmaktır [114]. Yüzey işleme, Ti – 6Al – 4V aşınma direncinin yükseltilmesi için uygun çözümdür. Termal oksidasyon da, aşınma direncini önemli ölçüde artıran popüler bir işlemdir [115].

Çalışma kapsamında işlem görmemiş ve ısıtılmış parçalara uygulanan frezeleme operasyonu sonucu parçalara aşınma testi uygulanmıştır. Parçalar aksel olarak ileri geri hareket etme yöntemini kullanan aşınma testi ile aşınma testine maruz bırakılmış ve ortaya çıkan topoğrafyalarda meydana gelen aşınma genişliği ve aşınma derinliği grafikleştirilmiş (Şekil 4.42'de gösterildiği gibi), topoğrafyaları sunulmuş ve aşağıda sunulan aşınma formülü ile aşınma oranları hesaplanmıştır [116].

$$V_{total} = V_A + V_B$$

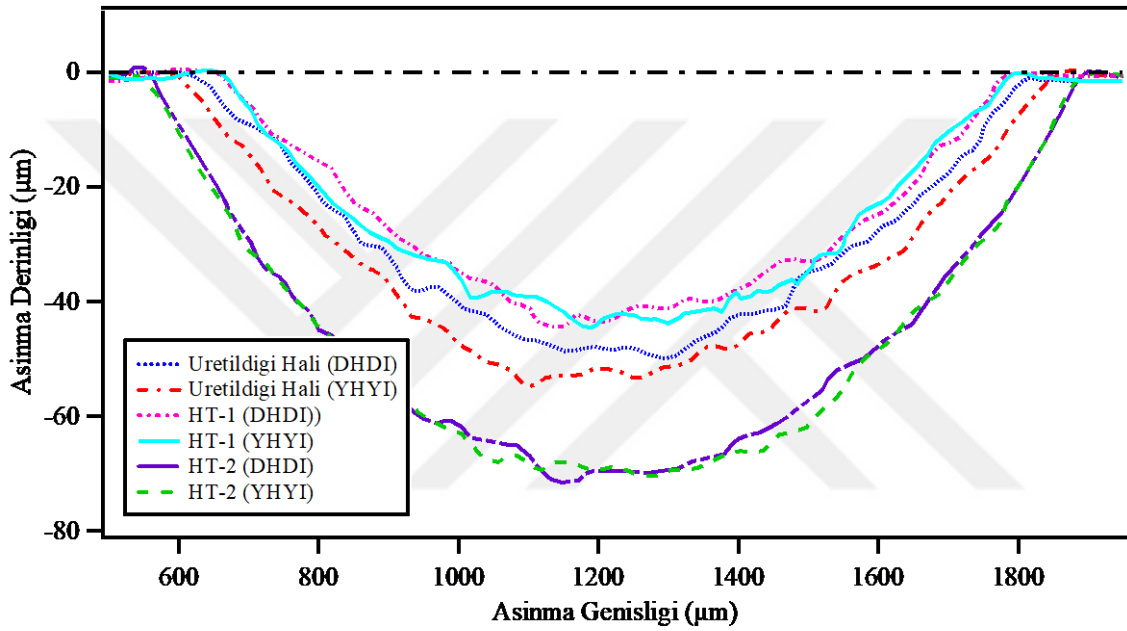
$$= L \left[r^2 \sin^{-1} \left(\frac{w}{2r} \right) - \frac{w}{2} \left(r^2 - \frac{w^2}{4} \right)^{1/2} \right] + \frac{\pi}{3} \left[2r^3 - 2r^2 \left(r^2 - \frac{w^2}{4} \right)^{1/2} - \frac{w^2}{4} \left(r^2 - \frac{w^2}{4} \right)^{1/2} \right] \quad (5)$$



Şekil 4.42. Tez çalışmasında yararlanılan aşınma oranı hesabı formülünde tercih edilen bilye aşınmasının olmadığı durumu açıklayan görsel.

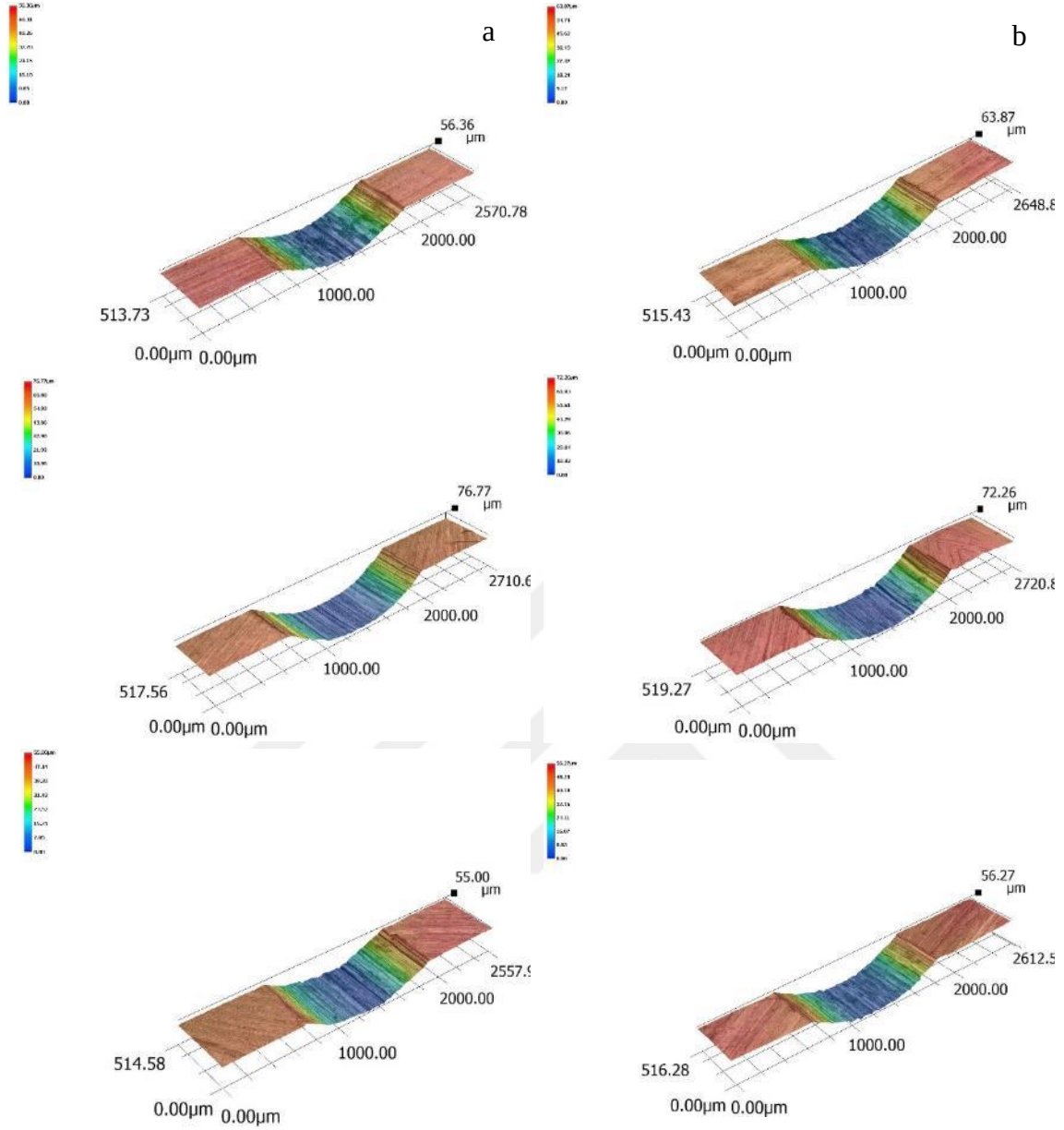
Burada V, L, w ve r sırasıyla aşınma hacmi (mm³), strok uzunluğu (mm), aşınma yolunun genişliği (mm) ve karbür bilyenin yarıçapıdır (mm) olarak hesaplanmıştır. Sharma ve ark. [116] yaptıkları çalışmada bilyenin aşınması ve aşınmaması durumuna göre hesapladıkları formülde bilyenin aşınma durumu olmayan formül seçilmiştir. Çünkü kullanılan bilye tungsten karbür bilyelerdir ve yapılan incelemeler sonucu herhangi bir

aşınmaya rastlanmamıştır. Şekil 4.42’de bu durum görsel olarak sunulmaktadır. Şekil 4.43 ve Şekil 4.44’te aşınma sonucu elde edilen aşınma topoğrafyası ve test sonucu oluşan aşınma genişlikleri ve aşınma derinlikleri sunulmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere aşınma testi belirli numunelere yapılmıştır. Aşınmayı en çok etkileyen unsur olan mikrosertlik değerlerinin farklı frezeme parametreleri ile işlenen parçalarda neredeyse aynı olmasından dolayı kesme hızı ve diş başına ilerleme değerleri en yüksek ve en düşük parametreler ile işlenen parçalar tercih edilmiştir. Yüzey işlem operasyonu olarak ise yalnızca içlerinde en düşük yüzey pürüzlülüğünü sağlayabilen frezeleme tercih edilmiştir.



Şekil 4.43. Aşınma testi sonucu ısıl işlem görmemiş, HT-1 ve HT-2 ısıl işlem görmüş, frezelenmiş parçalarda meydana gelen aşınma genişlikleri ve aşınma derinlikleri (DHDI: Düşük Kesme Hızı, Düşük İlerleme / BHYI: Yüksek Kesme Hızı, Yüksek İlerleme).

Şekil incelendiğinde (Şekil 4.44 ve Şekil 4.45) aşınmış yüzeylerde plastik deformasyon ve kırılma ile izlerin varlığı gözlemlendi. Kayma yönü boyunca, oluk ve çıkıntıda sürekli ezme ve karşı yüz tarafından kazıma fark edildi. Tüm aşınma yüzeyleri tipik bir “abrasif aşınma” göstermektedir.

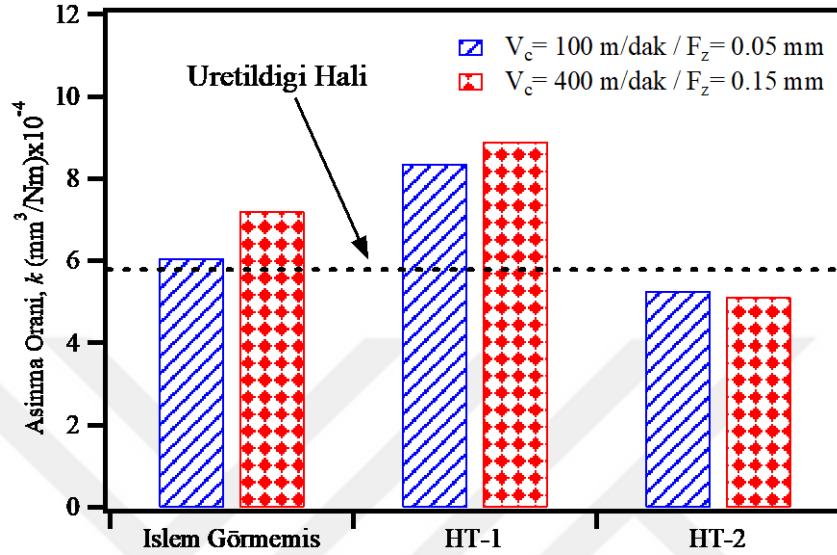


Şekil 4.44. Isıl işlem görmemiş (en üst), HT-1 (orta) ve HT-2 ısııl işlem görmüş (en alt) parçaların düşük ilerleme/düşük hız (a) ve yüksek ilerleme/yüksek hız (b) altında aşınma testi sonucu meydana getirdiği topoğrafyalar.



Şekil 4.45. Aşınma testi sonucu parçada meydana gelen deformasyon ve kırılma izleri.

Aşınma oranları kıyaslandığında yüzey sertlikleri ile doğru orantılı şekilde sonuçlar oluşmuştur. Böylece yüzeyi en sert olan HT-2 ısıl işlem görmüş parça en az aşınma oranına sahiptir. Şekil 4.46'da 5 numaralı aşınma formülü kullanılarak hesaplanan aşınma oranları sunulmaktadır.



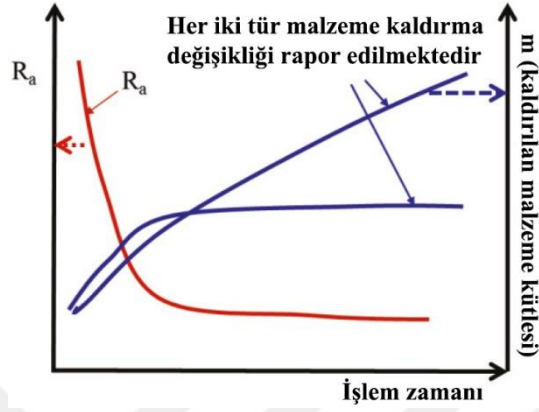
Şekil 4.46. Isıl işlem görmemiş (en üst), HT-1 ve HT-2 ısıl işlem görmüş parçaların düşük ilerleme/düşük hız (a) ve yüksek ilerleme/yüksek hız (b) altında aşınma testi sonucu meydana getirdiği aşınma oranları.

Şekil 4.47 incelendiğinde, aşınma testi sonucu hesaplanan aşınma oranlarından hareketle daha önce de bahsedildiği üzere mikrosertlik değeri daha fazla olan parçanın daha az aşındığı görülmektedir. Kesme hızları ve diş başına ilerleme değerleri değiştirildiğinde ise nispeten yakın değerler ortaya çıkmıştır.

4.6.1. Vibrasyonlu Yüzey İşlem ile Meydana Gelen Aşınma

Vibrasyonlu yüzey işlemde ikincil işlem uygulanan parça zamanla doyumluğa ulaşarak daha iyi yüzey kalitesini sunmakta zorlanmaktadır. Yani, belirli bir işlem süresinden sonra, yüzey kalitesini daha fazla iyileştirmek mümkün olmamaktadır. Bu doyumluğa ne zaman ulaşıldığını tespit etmek, işlem sürelerini belirlemek için önem taşımaktadır. Bununla birlikte daha pürüzlü bir yüzeyin daha pürüzsüz bir yüzeye göre daha fazla malzeme kaldırdığı bildirilmektedir. Şekil 4.47, bu durumu açıklayıcı bir genel grafik sunmaktadır. Grafikte belirtilen kırmızı çizgi parçanın pürüzlülüğünün işlem süresi boyunca azaldığını fakat bir süre sonra bu etkinin ciddi şekilde azaldığını ortaya

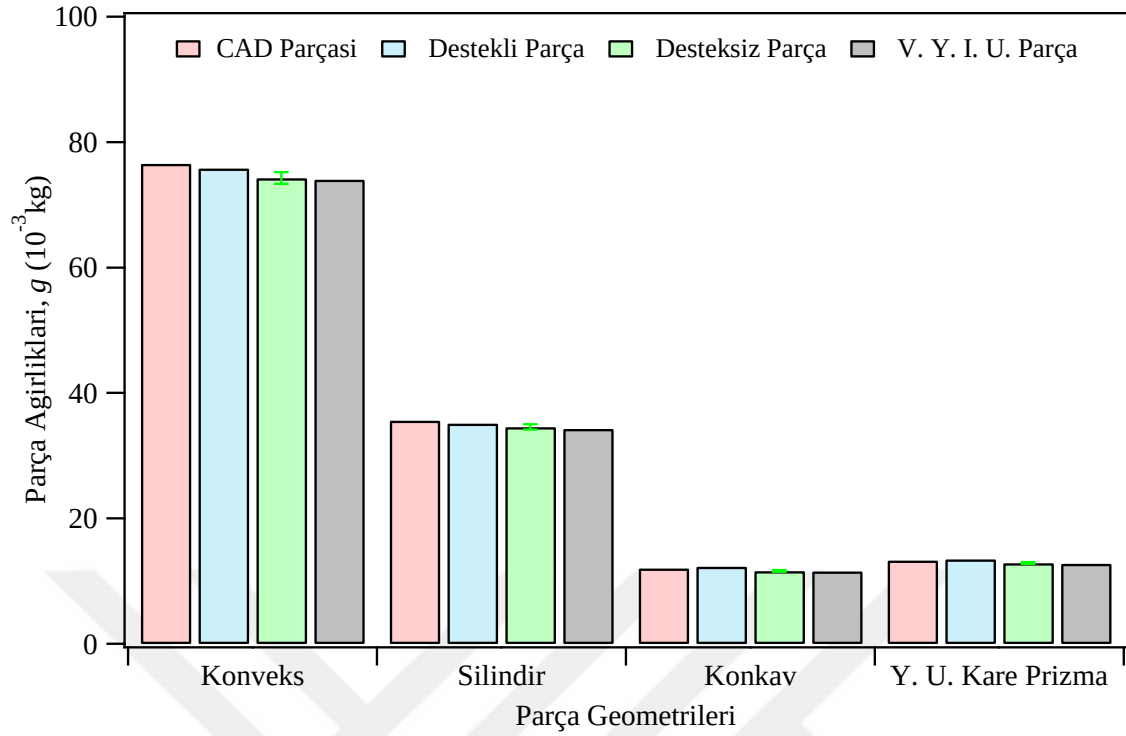
koymaktadır. Bununla birlikte aşındırıcı medyadan ve malzemeden kaldırılan toplam ağırlık da mavi çizgilerle gösterilmektedir. İşlem zamanı artsa bile pürüzlülüğün azalmasının yavaşladığı belirtilmişken, aşındırıcı medyanın devamlı olarak aşındığı fakat herhangi bir sonuç elde edemediği görülmektedir.



Şekil 4.47. İşlem süresiyle birlikte vibrasyonlu yüzey işlem ile yüzey pürüzlülüğü ve kütle kaldırma değişiklikleri [85].

EBM ile üretilen parçalarda mevcut olan yüksek pürüzlülük nedeniyle parçaların yüzeylerinden kaldırılacak malzeme oranı da haliyle önem taşımaktadır. Bununla birlikte parçaların CAD modelinde Ti-6Al-4V malzemesinin tanımlanmasıyla oluşturduğu ağırlık, üretilen parçanın destek yapılı ve destek yapısı sökülmüş parçayla kıyaslanmıştır. Vibrasyonlu yüzey işlem uygulanan (V. Y. I. U.) parça ise, işlem uygulanmadan önceki parça ağırlıkları ile kıyaslanmıştır.

Karşılaştırmalar sonucu konveks ve silindir parçada, beklenmeyen şekilde destekli yapının sökülmediği hali ile oluşturduğu ağırlığın CAD modelindeki ağırlıktan düşük olduğu görülmüştür (Şekil 4.48). Konkav ve Y.U. (yan üretilen) kare prizmada ise bu durum olması gerektiği gibi parçanın destekli yapısının CAD modelindeki ağırlığından daha fazla olarak ortaya çıkmıştır. Ağırlıklardaki değişim Tablo 4.2’de detaylı olarak sunulmaktadır.



Şekil 4.48. Tasarım, üretim ve ikincil işlem sonucu (vibrasyonlu yüzey işlem) parçaların ağırlıklarındaki değişimler

Tablo 4.2, parçaların tasarımdan üretime, üretimden ikincil işleme kadar ağırlıklarındaki değişimleri sunmaktadır. Kumlama operasyonlarındaki dengesiz malzeme kaldırmadan dolayı ağırlıklar hesaplanmamıştır. Frezeleme operasyonunda ise geometrinin korunması amaçlanmayıp diğer yüzey bütünlüğü özellikleri incelenmiştir, bu yüzden bu işlemler uygulanan parçalar da analiz edilmemektedir. Vibrasyonlu yüzey işlemim kontrollü bir şekilde ve her noktadan eşit malzeme kaldırdığı düşünüldüğünde en iyi karşılaştırmanın bu yüzey işleme tabi tutulan parçalarda olacağı düşünülmüş, dolayısıyla bu parçaların ağırlıkları ölçülmüştür. Değişimler incelendiğinde parçaların ikincil işlemten sonra %1'den daha az olacak şekilde malzeme kaldırıldığı görülmektedir. Aynı zamanda tasarımda desteksiz CAD parçasına tanımlanan ağırlıktan yaklaşık olarak %3 ile %4,5 oranlarında daha hafif parçalar üretilmiştir. Buna yüzeyde ergimemiş tozlar vb. tasarımda hesaplanmayan malzemelerin de eklenmesiyle parçanın aslında hesaplanandan çok daha hafif üretildiği sonucuna varılmaktadır. Bu durumun nispeten içyapıda bulunan porozitelerden dolayı meydana geldiği düşünülse de önceki bölümlerde sunulan porozitenin düşük oranı düşüldüğünde hala yüksek miktarda kütle kaybı mevcuttur. Bu durumun, parçaların boyutsal doğruluğunun istenilen ölçüde sağlanamamasından dolayı

oluştugu da düşünölmüştür. Bu düşünce de bölümün başında bahsedilen destekli parçanın CAD parçasından hafif olmasını açıklar niteliktedir. Nitekim parçalar üretildiği haliyle destek yapısı ile ölçüldüğünde bile daha hafif olmaktadır.

Tablo 4.2. Parçaların tasarım, üretim ve ikincil işlemden meydana getirdiği ağırlıklar.

	Konveks	Silindir	Konkav	Y. U. Kare Prizma	D. U. Kare Prizma
CAD Parçası	76.58*	35.62*	12.05*	13.29*	13.29*
Destekli Parça	75.8386**	35.1224**	12.312**	13.5062**	12.8931**
Desteksiz Parça	74.2665*** ↓ (*%3,021) (**%2,073)	34.5703*** ↓ (*%2,947) (**%1,572)	11.6215*** ↓ (*%3,556) (**%5,608)	12.882*** ↓ (*%3,07) (**%4,622)	12.6851*** ↓ (*%4,552) (**%1,613)
V. Y. İ. U. Parça	74.025 ↓ (***%0,3252)	34.2876 ↓ (***%0,818)	11.5517 ↓ (***%0,601)	12.788 ↓ (***%0,73)	X



5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, son zamanlarda diğer geleneksel yöntemlere göre avantajlarından dolayı tercih edilen EBM yönteminin havacılık, uzay, otomotiv ve biyomedikal sektörlerinde kritik bileşenlerde kullanılan Ti-6Al-4V alaşımının farklı geometriler ile üretilen parçalarının ikincil işlemler sonucu yüzey kalitesinde ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Farklı ikincil işlemlerin işlem görmemiş parçaya göre yüzey, yüzey altı ve mekanik özelliklere etkisi kapsamlı bir şekilde karşılaştırmalı olarak incelenirken, uygulanan mekanik testin ve metrolojik incelemenin etkisi de araştırılmıştır.

İşlem görmemiş ve ikincil işleme tabi tutulmuş parçaların yüzey topoğrafyalarında, yüzey pürüzlülüklerinde, mikrosertliklerinde ve mikroyapılarında oluşan değişim incelenmiş ve analiz edilmiştir. İşlem görmemiş ve ikincil işlem görmüş parçalar çentik darbe testi ile tokluk özellikleri açısından kıyaslanmış ve ayrıca parçaların 3 boyutlu ölçüm ve analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapılan test ve analizler sonucunda elde edilen kilit bulgular aşağıda sunulmaktadır;

- İşlem görmemiş parçaların yüzey topoğrafya görüntüleri EBM ile üretim sonucu parçanın inşa yönünde yüzeye yapışmış ergimemiş veya ergimiş tozların yoğunlukta olduğu göstermiştir. Tarama yönünde daha iyi bir yüzey elde edilmesine rağmen parçanın kullanılacak diğer yüzeylerinde mevcut yüksek pürüzlülük nedeniyle kullanımı kısıtladığı sonucuna varılmıştır.
- İkincil işlemler sonucu parçaların topoğrafya görüntüleri incelenmiş ve yüzeylerin işlem görmemiş parçalara nazaran çok daha tutarlı ve kabul edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda kumlama yüzeyi tozlardan ciddi oranda arındırsa da dalgalı bir yapıyı ortaya çıkarmış, vibrasyonlu yüzey işleminde ise parçanın yüzeye yapışık tozları arındırdığı, daha iyi ergimiş ve yüzeye yapışmış tozları ortaya çıkardığı buna rağmen yüzeyi daha kontrollü şekilde kaliteli hale getirdiği görülmüştür. Frezeleme sonucu ise parçanın yüzey kalitesi ciddi miktarda iyileşmiş ve yalnızca kesici takımın ilerlemeden dolayı ortaya çıkardığı izler oluşmuştur.
- İşlem görmemiş parçaların ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri 29 – 39 μm olarak ölçülmüştür. İkincil işlemler sonucu ise yüzey pürüzlülük değerleri ciddi miktarda azalmıştır. Frezeleme operasyonu ile pürüzlülük değerleri 1 μm 'den

daha düşük değerlere iyileştirilirken, vibrasyonu yüzey işlem ile 2 – 5 μm aralığına, kumlama ile 4 – 9.5 μm aralığına indirilmesi sağlanmıştır.

- İşlem görmemiş parçaların üretim yönündeki mikroyapısı, sütun oluşturan uzamış β -taneleri ve bunları sınırlayan α tane sınırlarını içermektedir. Bazı bölgelerde ise α' martenzit tabakalar görülmektedir. İşlem görmemiş parçaların tarama yönündeki mikroyapısında ise, önceki β -Ti (prior β -Ti), $\alpha+\beta$ ve α' martenzit fazları görülmektedir. Bu durum parçanın EBM süreci ile üretimde kullanılan yüksek sıcaklıkla ilgilidir. Isıl işlem ile parçaların mikroyapıları ciddi anlamda değişmiş, HT-1 işlemi ile eş eksenli- α ($\alpha\epsilon$) ve β fazının bir karışımına dönüştüğü, HT-2 işlemi sonucu ise, mikroyapılar, önceki β tane sınırları (GB) ile bölünmüş ve bunun yanında α' - Ti martensitik faz ile birlikte β yapısı da yer almıştır.
- Isıl işlemlerin uygulanması ile parçalara faz dönüşümü meydana gelmiştir ve bu dönüşüm sertlikleri de etkilemiştir. Isıl işlem görmemiş parça yaklaşık olarak 345 HV değerinde ölçülmüştür. Bununla birlikte HT-1 ısıtma işlemi işlem görmemiş parçaya nazaran mikrosertlik değerlerinin %10,15 azalarak 310 HV, HT-2 ısıtma işlemi ise mikrosertlik değerlerinin %13,04 artarak 390 HV olmasına yol açmıştır.
- Frezeleme operasyonları sonucu işlem görmemiş ve farklı ısıtma işlem görmüş parçaların da sertlik değerlerinde değişim meydana gelmiştir. İşlem görmemiş ve HT-2 ısıtma işlem görmüş parçalara uygulanan frezeleme operasyonları sonucu sertlik değerleri azalmışken, HT-1 ısıtma işlem görmüş parçaya uygulanan frezeleme operasyonları parçanın sertliğini nispeten arttırmıştır. Bununla birlikte bütün frezeleme operasyonu uygulanan parçaların yüzey altında deformasyon meydana gelmiştir. Kesme hızı ve diş başına ilerleme değerine bağlı olarak deformasyon derinliği artış göstermiştir.
- Parçalar üzerinde yürütülen çentik-darbe testleri, uygulanan ısıtma işlemlerin ve diğer ikincil işlemlerin parçaların tokluğu üzerindeki etkisinin tamamen parçanın gevrekleşmesi ile sonuçlandığını göstermektedir. Parçalar üzerindeki en etkili operasyon ise ısıtma işlemlerdir. HT-2 ısıtma işlemi sonrası parça en gevrek durumuna geçmiştir.
- Uygulanan ısıtma işlemler ve frezeleme operasyonu sonrası parçaların bu yüzeylerine aşınma testleri yapılmıştır ve parçaların aşınma profillerinden aşınma oranları hesaplanmıştır. Aşınma mekanizmalarından ise yoğun olarak abrasif

aşınmanın varlığı mevcuttur. Aşınma davranışlarının parçaların sertlikleriyle birebir uyumlu olarak sert olan parçada daha az aşınma ve yumuşak olan parçada daha çok aşınma ile sonuçlanmıştır.

- Vibrasyonlu yüzey işlem uygulanmış parçalar, hassas terazi ile ölçülerek işlem görmemiş malzemeye göre ağırlıkları ve aşınma miktarları hesaplanmıştır. Değişimler incelendiğinde parçalarda ikincil işlem sonrası %1'den daha az malzeme kaldırıldığı ve tasarlanan parçaya göre ağırlığın %3 ile %4,5 oranlarında hafif olduğu ortaya çıkmıştır.





KAYNAKÇA

1. Leyens, C. and M. Peters, *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. 2003: John Wiley & Sons.
2. TMG-Muenchen. *Deep Dive Additive Manufacturing*. No Date 08.05.2020]; Available from: <https://www.tmg-muenchen.de/training-course/11/Additive-Manufacturing?flang=en>.
3. Salmi, M., et al., *Accuracy of medical models made by additive manufacturing (rapid manufacturing)*. Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery, 2013. **41**(7): p. 603-609.
4. Garnet Hertz. *15 MINUTE REVIEW ON THE DIFFERENCES BETWEEN 3D PRINTING, LASER CUTTING, CNC*. 2020; Available from: <http://conceptlab.com/teaching/intd310/>.
5. protolabs.com, *Post-Processing for Metal 3D Printing*. 2020.
6. Maamoun, A., M. Elbestawi, and S. Veldhuis, *Influence of shot peening on AlSi10Mg parts fabricated by additive manufacturing*. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2018. **2**(3): p. 40.
7. Astm, I.J.A.I., *ASTM F2792-10: standard terminology for additive manufacturing technologies*. 2010.
8. ArcamAB, *Welcome to Manufacturing UNBOUND*.
9. Qian, M., et al., *Additive manufacturing and postprocessing of Ti-6Al-4V for superior mechanical properties*. 2016. **41**(10): p. 775-784.
10. Standard, A.J.A.F.-e., *ISO/ASTM 52900: 2015 Additive manufacturing-General principles-terminology*. 2012.
11. Beyer, C.J.J.o.M.S. and Engineering, *Strategic implications of current trends in additive manufacturing*. 2014. **136**(6).
12. Gibson, I., D. Rosen, and B.J.N.Y. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, 498 Springer. 2014.
13. ArcamAB. *Arcam History*. 2014 [cited 2020 11.19.2020]; Available from: <http://www.arcam.com/company/about-arcam/history/>.
14. Al-Bermani, S., et al., *The origin of microstructural diversity, texture, and mechanical properties in electron beam melted Ti-6Al-4V*. 2010. **41**(13): p. 3422-3434.
15. Muzangaza, E., *The effects of titanium Ti-6Al-4V powders manufactured using electron beam melting (EBM)-additive manufacturing on metallurgical evaluation*. 2018, University of Birmingham.
16. Al-Bermani, S.S., *An investigation into microstructure and microstructural control of additive layer manufactured Ti-6Al-4V by electron beam melting*. 2011, University of Sheffield.
17. Heintl, P., C. Körner, and R.F.J.A.E.M. Singer, *Selective electron beam melting of cellular titanium: mechanical properties*. 2008. **10**(9): p. 882-888.
18. Balachandramurthi, A.R., et al., *Additive manufacturing of alloy 718 via electron beam melting: Effect of post-treatment on the microstructure and the mechanical properties*. 2019. **12**(1): p. 68.
19. Thijs, L., et al., *A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V*. Acta materialia, 2010. **58**(9): p. 3303-3312.

20. Kahnert, M., S. Lutzmann, and M. Zaeh. *Layer formations in electron beam sintering*. in *2007 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2007.
21. Gong, H., et al. *The effects of processing parameters on defect regularity in Ti-6Al-4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting*. in *24th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference*, Austin, TX. 2013.
22. Kurzynowski, T., et al., *The Effect of EBM Process Parameters on Porosity and Microstructure of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe Alloy*. Scanning, 2019. **2019**.
23. Kirchner, A., et al., *Process window for electron beam melting of Ti-6Al-4V*. 2015. **58**(4): p. 246-249.
24. Gibson, I., *Advanced manufacturing technology for medical applications: reverse engineering, software conversion and rapid prototyping*. 2006: John Wiley & Sons.
25. Biamino, S., et al., *Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation*. 2011. **19**(6): p. 776-781.
26. Murr, L., et al., *Microstructure and mechanical properties of open-cellular biomaterials prototypes for total knee replacement implants fabricated by electron beam melting*. 2011. **4**(7): p. 1396-1411.
27. Cormier, D., O. Harrysson, and H.J.R.p.j. West, *Characterization of H13 steel produced via electron beam melting*. 2004.
28. Thomsen, P., et al., *Electron beam-melted, free-form-fabricated titanium alloy implants: Material surface characterization and early bone response in rabbits*. 2009. **90**(1): p. 35-44.
29. AB, A., *Ti6Al4V Titanium Alloy*. ARCAM AB: Website-<https://www.btech.com.tr>. p. 3.
30. AB, A., *Grade 2 Titanium*. ARCAM AB: Website-<https://www.btech.com.tr>. p. 3.
31. AB, A., *Ti6Al4V ELI Titanium Alloy*. ARCAM AB: Website-<https://www.btech.com.tr>. p. 3.
32. AB, A., *ASTM F75 CoCr Alloy*. ARCAM AB: Website-<https://www.btech.com.tr>. p. 3.
33. Horn, T.J. and O.L.J.S.p. Harrysson, *Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications*. 2012. **95**(3): p. 255-282.
34. Campbell, G., et al., *The HCP to BCC phase transformation in Ti characterized by nanosecond electron microscopy*. 2005, Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States).
35. Donachie, M.J., *Titanium: a technical guide*. 2000: ASM international.
36. Bikramjit, B., *Biomaterials for Musculoskeletal Regeneration*. 2016, Singapore: Springer.
37. Lütjering, G. and J.C. Williams, *Titanium*. 2007: Springer Science & Business Media.
38. Ahmed, T., H.J.M.S. Rack, and E. A, *Phase transformations during cooling in $\alpha + \beta$ titanium alloys*. 1998. **243**(1-2): p. 206-211.
39. Welsch, G., R. Boyer, and E. Collings, *Materials properties handbook: titanium alloys*. 1993: ASM international.
40. Tamas-Williams, S., et al., *XCT analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti-6Al-4V components manufactured by Selective Electron Beam Melting*. 2015. **102**: p. 47-61.

41. Gong, H., et al., *Defect Morphology of Ti-6Al-4V Parts Fabricated by Selective Laser and Electron Beam Melting*. 2013. **22**(12): p. 3872-3883.
42. King, W.E., et al., *Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing*. Journal of Materials Processing Technology, 2014. **214**(12): p. 2915-2925.
43. Karimi Neghlani, P., *SLM additive manufacturing of Alloy 718: effect of process parameters on microstructure and properties*. 2016.
44. Karimi, P., et al., *Influence of laser exposure time and point distance on 75- μ m-thick layer of selective laser melted Alloy 718*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. **94**(5): p. 2199-2207.
45. Sames, W.J., et al., *The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing*. International materials reviews, 2016. **61**(5): p. 315-360.
46. Everton, S.K., et al., *Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing*. 2016. **95**: p. 431-445.
47. Kaynak, Y. and O. Kitay, *The effect of post-processing operations on surface characteristics of 316L stainless steel produced by selective laser melting*. Additive Manufacturing, 2019. **26**: p. 84-93.
48. Bourell, D., et al., *Materials for additive manufacturing*. CIRP Annals, 2017. **66**(2): p. 659-681.
49. Lesyk, D., et al., *Post-processing of the Inconel 718 alloy parts fabricated by selective laser melting: Effects of mechanical surface treatments on surface topography, porosity, hardness and residual stress*. Surface and Coatings Technology, 2020. **381**: p. 125136.
50. Rotella, G., et al., *Surface integrity of machined additively manufactured Ti alloys*. Journal of Materials Processing Technology, 2018. **259**: p. 180-185.
51. Ahmed, N., et al., *Electron beam melting of titanium alloy and surface finish improvement through rotary ultrasonic machining*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. **92**(9-12): p. 3349-3361.
52. Persenot, T., et al., *Effect of ultrasonic shot peening on the surface defects of thin struts built by electron beam melting: Consequences on fatigue resistance*. Additive Manufacturing, 2019. **28**: p. 821-830.
53. Sato, M., et al., *Using cavitation peening to improve the fatigue life of titanium alloy Ti-6Al-4V manufactured by electron beam melting*. Materials Sciences and Applications, 2016. **7**(4): p. 181-191.
54. Milewski, J.O., *Additive Manufacturing of Metals*. Vol. 258. 2017: Springer International.
55. Brandt, M., *The role of lasers in additive manufacturing*, in *Laser Additive Manufacturing*, M. Brandt, Editor. 2017, Woodhead Publishing. p. 1-18.
56. Gebhardt, A. and J.-S. Hötter, *Additive Manufacturing*, in *Additive Manufacturing*, A. Gebhardt and J.-S. Hötter, Editors. 2016, Hanser. p. I-XX.
57. Girelli, L., et al., *Study of heat treatment parameters for additively manufactured AlSi10Mg in comparison with corresponding cast alloy*. Materials Science and Engineering: A, 2019. **739**: p. 317-328.
58. Girelli, L., et al., *Evaluation of the impact behaviour of AlSi10Mg alloy produced using laser additive manufacturing*. Materials Science and Engineering: A, 2019. **748**: p. 38-51.

59. Salman, O.O., et al., *Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 316L steel synthesized by selective laser melting*. Materials Science and Engineering: A, 2019. **748**: p. 205-212.
60. Zhou, L., et al., *Microstructure, precipitates and mechanical properties of powder bed fused inconel 718 before and after heat treatment*. Journal of Materials Science & Technology, 2019. **35**(6): p. 1153-1164.
61. Fan, Z. and H. Feng, *Study on selective laser melting and heat treatment of Ti-6Al-4V alloy*. Results in Physics, 2018. **10**: p. 660-664.
62. Raghavan, S., et al., *Heat treatment of electron beam melted (EBM) Ti-6Al-4V: Microstructure to mechanical property correlations*. Rapid Prototyping Journal, 2018.
63. Jüstel, M., et al. *Synthesis and Characterization of the LiFePO₄-LiMnPO₄ Solid Solution*. in *ECS Meeting Abstracts*. 2011. IOP Publishing.
64. Behera, A.K. and H. Ou, *Effect of stress relieving heat treatment on surface topography and dimensional accuracy of incrementally formed grade 1 titanium sheet parts*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. **87**(9): p. 3233-3248.
65. Hou, S., et al., *Optimising the dynamic process parameters in Electron beam melting (EBM) to achieve internal defect quality control*. 2017. **2017**.
66. Attallah, M.M., et al., *Additive manufacturing of Ni-based superalloys: The outstanding issues*. 2016. **41**(10): p. 758.
67. Tech., Q.; Available from: <https://quintustechnologies.com/knowledge-center/brochure-quintus-compact-hip-systems/>.
68. Chastand, V., et al., *Comparative study of fatigue properties of Ti-6Al-4V specimens built by electron beam melting (EBM) and selective laser melting (SLM)*. Materials Characterization, 2018. **143**: p. 76-81.
69. Galarraga, H., et al., *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, 2017. **685**: p. 417-428.
70. ASTM, A.J.A.I., *F2924-14: Standard Specification for Additive Manufacturing Tita-nium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion*. 2014.
71. Barriobero-Vila, P., *Effect of heat treatments on the microstructure of deformed Ti-6Al-4V*. 2010, Wien.
72. Abbas, A., et al. *Microstructure and Hardness of Subzero Quenched and Heat Treated Ti-6Al-4V Alloy*. in *Proceedings of the 3rd Pan American Materials Congress*. 2017. Springer.
73. Walker, P. and W.H. Tarn, *CRC handbook of metal etchants*. 1990: CRC press.
74. Whitehouse, D.J., *Surfaces and their Measurement*. 2004: Elsevier.
75. Townsend, A., et al., *Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review*. 2016. **46**: p. 34-47.
76. Jorio, A. and M.S. Dresselhaus, *Nanostructured Materials: Metrology*, in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2016, Elsevier.
77. Gu, D., *Laser additive manufacturing of high-performance materials*. 2015: Springer.
78. Gu, D., Y.J.M. Shen, and Design, *Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods*. 2009. **30**(8): p. 2903-2910.

79. Yin, H., T.J.M. Emi, and M.T. B, *Marangoni flow at the gas/melt interface of steel*. 2003. **34**(5): p. 483-493.
80. Taylor, J. *Surface characteristics of additive-manufactured components*. in *15th international conference on metrology and properties of engineering surfaces*. 2015.
81. Parhad, P., et al., *The effect of cutting speed and depth of cut on surface roughness during machining of austempered ductile iron*. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2015. **68**(1): p. 99-108.
82. Al-Dolaimy, K.A., *Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness in Turning Operations*. Al-Qadisiyah J. Eng. Sci, 2016. **9**(4).
83. TRDINE, O.O.I.K., *Machinability of a Ti-6Al-4V alloy with cryogenically treated cemented carbide tools*. Materiali in tehnologije, 2014. **48**(4): p. 577-580.
84. LTD., I.C.C. *Vibratory Finishing Products*. 2021 [cited 2021 29.03.2021]; Available from: <http://www.ilve.com.tr/en/products/vibratory-finishing-compounds.html>.
85. Prakasam, P.K., S. Castagne, and S. Subbiah, *Mechanism of surface evolution in vibratory media finishing*. Procedia Manufacturing, 2015. **1**: p. 628-636.
86. Doğu, M.N., et al., *Microstructural and texture evolution during thermo-hydrogen processing of Ti6Al4V alloys produced by electron beam melting*. Materials Characterization, 2020. **168**: p. 110549.
87. Sharif, S., E. Rahim, and H. Sasahara, *Machinability of titanium alloys in drilling*. Titanium Alloys-Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications, 2012. **3**: p. 117-137.
88. Sun, J. and Y. Guo, *A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti-6Al-4V*. Journal of materials processing technology, 2009. **209**(8): p. 4036-4042.
89. Rahim, E. and H. Sasahara, *Investigation of tool wear and surface integrity on MQL machining of Ti-6AL-4V using biodegradable oil*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011. **225**(9): p. 1505-1511.
90. Rahim, E. and H. Sasahara. *The Effect of MQL Fluids on the Drilling Performance of Nickel-Based Superalloy*. in *4th International Conference on High Performance Cutting*. 2010.
91. Shunmugavel, M., et al., *Tool wear and surface integrity analysis of machined heat treated selective laser melted Ti-6Al-4V*. International Journal of Materials Forming and Machining Processes (IJMFMP), 2016. **3**(2): p. 50-63.
92. Mantle, A.L. and D.K. Aspinwall, *Surface integrity of a high speed milled gamma titanium aluminide*. Journal of Materials Processing Technology, 2001. **118**(1-3): p. 143-150.
93. Prakasam, P.K., *Experimental investigation of surface modification mechanism in vibratory finishing process*. 2015.
94. Slikkerveer, P., P. Bouten, and F. De Haas, *High quality mechanical etching of brittle materials by powder blasting*. Sensors and actuators A: Physical, 2000. **85**(1-3): p. 296-303.
95. Wakuda, M., Y. Yamauchi, and S. Kanzaki, *Effect of workpiece properties on machinability in abrasive jet machining of ceramic materials*. Precision engineering, 2002. **26**(2): p. 193-198.

96. Liu, S. and Y.C. Shin, *Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review*. Materials & Design, 2019. **164**: p. 107552.
97. Cottam, R., et al., *Diffraction line profile analysis of 3D wedge samples of Ti-6Al-4V fabricated using four different additive manufacturing processes*. Metals, 2019. **9**(1): p. 60.
98. Zhao, Z., et al., *Achieving superior ductility for laser solid formed extra low interstitial Ti-6Al-4V titanium alloy through equiaxial alpha microstructure*. Scripta Materialia, 2018. **146**: p. 187-191.
99. Lin, J., et al., *Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment*. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 2017. **69**: p. 19-29.
100. Khan, M.A., et al., *Statistical analysis of energy consumption, tool wear and surface roughness in machining of Titanium alloy (Ti-6Al-4V) under dry, wet and cryogenic conditions*. 2019. **10**(2): p. 561-573.
101. Jeelani, S. and K. Ramakrishnan, *Subsurface plastic deformation in machining 6Al-2Sn-4Zr-2Mo titanium alloy*. Wear, 1983. **85**(1): p. 121-130.
102. Velásquez, J.P., et al., *Sub-surface and surface analysis of high speed machined Ti-6Al-4V alloy*. Materials Science and Engineering: A, 2010. **527**(10-11): p. 2572-2578.
103. Cantero, J., et al., *Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005. **45**(11): p. 1246-1255.
104. Ginting, A. and M. Nouari, *Surface integrity of dry machined titanium alloys*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009. **49**(3-4): p. 325-332.
105. Che-Haron, C. and A. Jawaaid, *The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6% Al-4% V*. Journal of materials processing technology, 2005. **166**(2): p. 188-192.
106. Isa, M.R., et al. *Effect of sandblasting process on mechanical properties of ASTM A516 grade 70 steel*. in *Key Engineering Materials*. 2018. Trans Tech Publ.
107. Belbasi, M. and M. Ramezani, *The effect of sandblasting time on producing nanocrystalline surface of PO733 steel (DIN: 1.8509)*. Materials Physics and Mechanics, 2013. **17**(1): p. 33-37.
108. Wang, S., R.S. Timsit, and J.K. Spelt, *Experimental investigation of vibratory finishing of aluminum*. Wear, 2000. **243**(1-2): p. 147-156.
109. Rossoll, A., et al., *Mechanical aspects of the Charpy impact test*. Nuclear Engineering and Design, 1999. **188**(2): p. 217-229.
110. Neale, M.J., *Lubrication and reliability handbook*. 2001: Newnes.
111. Budinski, K.G., *Tribological properties of titanium alloys*. Wear, 1991. **151**(2): p. 203-217.
112. Molinari, A., et al., *Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy*. Wear, 1997. **208**(1-2): p. 105-112.
113. Magaziner, R., V. Jain, and S. Mall, *Investigation into wear of Ti-6Al-4V under reciprocating sliding conditions*. Wear, 2009. **267**(1-4): p. 368-373.
114. Liu, X., P.K. Chu, and C. Ding, *Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications*. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2004. **47**(3-4): p. 49-121.

115. Guleryuz, H. and H. Cimenoglu, *Surface modification of a Ti–6Al–4V alloy by thermal oxidation*. Surface and Coatings Technology, 2005. **192**(2-3): p. 164-170.
116. Sharma, S., S. Sangal, and K. Mondal, *On the optical microscopic method for the determination of ball-on-flat surface linearly reciprocating sliding wear volume*. Wear, 2013. **300**(1-2): p. 82-89.





ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Tolga Berkay ŞİRİN

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans: Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü (2018-2021)

Lisans: Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü (2014-2018)

PROJELER

- "Şekil Hafızalı NiTiHf Malzemelerin Talaşlı İmalatı-Yüzey Bütünlüğü-Ürün Performansı Arasındaki İlişkinin Araştırılması", Destekleyen Kuruluş: TÜBİTAK ARDEB (TÜBİTAK-1001 Projesi), NASA Glenn Research Center, ABD, Görev: Proje Bursiyeri, Proje NO: 116M346
- " Seçici Lazer Ergitme Yöntemiyle Inconel 718 Alaşımından Üretilen Parçaların Yüzey Bütünlüğü Karakteristiklerinin İncelenmesi ve İyileştirilmesi", Destekleyen Kuruluş: TÜBİTAK ARDEB (TÜBİTAK-1001 Projesi), Görev: Proje Bursiyeri, Proje NO: 118R039
- "Elektron Demeti ile Ergitme Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Farklı Geometrillerdeki Ti-6Al-4V Alaşım Malzemelerine Uygulanan İkincil İşlemlerin Malzemenin Yüzey Bütünlüğüne Etkisinin İncelenmesi", Destekleyen Kuruluş: Marmara Üniversitesi BAP Projesi, Görev: Proje Araştırmacısı, Proje NO: FEN-C-YLP-130319-0064

YAYINLAR ve BİLDİRİLER

- Şirin, T. B., & Kaynak, Y. (2021), Prediction of residual stress and distortion in laser powder bed fusion additive manufacturing process of Inconel 718 alloy. *Procedia CIRP*, 99, 330-335.
- Khan, H. M., Sirin, T. B., Tarakci, G., Bulduk, M. E., Coskun, M., Koc, E., & Kaynak, Y. (2021). Improving the surface quality and mechanical properties of selective laser sintered PA2200 components by the vibratory surface finishing process. *SN Applied Sciences*, 3(3), 1-14.
- Uçurum, M., Güneşsu, E., Şirin, T. B., & Kaynak, Y. (2021) Farklı kesme parametreleriyle işlenmiş 316LVM paslanmaz çelik malzemesinin talaşlı imalat-yüzey bütünlüğü-aşınma direnci arasındaki ilişkinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Basımda.
- Şirin, T. B., & Kaynak, Y. (2020) Surface Integrity and Wear Resistance of Maraging Steel Produced by Additive Manufacturing Direct Metal Laser Sintering. *Journal of Advances in Manufacturing Engineering*, 1(3), 83-92.

- Şirin, T.B., Kaynak, Y. (2019) Surface integrity and wear resistance of maraging steel produced by additive manufacturing direct metal laser sintering, IMCC2019, Shenyang, Çin, 9-12 Ekim 2019, 651-661.
- Şirin, T.B., Tascioglu, E., Kaynak Y. (2019) Farklı kesme koşullarında işlenmiş Ti-5553 alaşımmalzemesinin aşınma dayanımının incelenmesi, 10th International Congress on Machining (UTIS 2019), Antalya, Türkiye, 7-9 Kasım 2019, 176-182.
- Şirin, T.B., Kaynak, Y., Tan, E., Gümüş, B. (2019) The effect of post processing on surface properties of as-printed and heat treated Ti-6Al-4V alloy produced by electron beam melting, Additive Manufacturing Conference (AMC Turkey 2019), İstanbul, Türkiye, 17-18 Ekim, 2019, 110-112.

