MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Tİ-6AL-4V ALAŞIM TOZLARINDAN ELEKTRON IŞINI İLE ERGİTME YÖNTEMİ KULLANILARAK ÜRETİLEN PARÇALAR İÇİN SÜRÜKLEMELİ YÜZEY İŞLEM SÜREÇLERİ GELİŞTİRME

KÜBRA YILMAZ

(52320012)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2023

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ti-6Al-4V ALAŞIM TOZLARINDAN ELEKTRON IŞINI İLE ERGİTME YÖNTEMİ KULLANILARAK ÜRETİLEN PARÇALAR İÇİN SÜRÜKLEMELİ YÜZEY İŞLEM SÜREÇLERİ GELİŞTİRME

KÜBRA YILMAZ

(52320012)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği

Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2023

ÖNSÖZ

İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarında lisansüstü eğitimim sürecimde TÜBİTAK ve ASELSAN projelerinde bana çalışma imkânı veren ve en önemlisi bu süre içerisinde akademik ve mesleki anlamdaki engin tecrübelerinden yararlandığım tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Yusuf KAYNAK'a çok teşekkür ediyorum.

Lisansüstü tez çalışmam süresince İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarı'nda birlikte çalıştığım, her konuda yardımını ve desteğini esirgemeyen Nihal YAMAN'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam için sağladığı desteklerden dolayı ASELSAN firmasına teşekkür ederim.

Ağustos, 2023 **Kübra YILMAZ**

İÇİNDEKİLER

ÖZET vi

ELEKTRON IŞINI İLE ERGİTME YÖNTEMİ İLE Tİ-6AL-4V ALAŞIM TOZLARINDAN ÜRETİLEN PARÇALAR İÇİN SÜRÜKLEME İLE YÜZEY İŞLEM SÜREÇLERİ GELİŞTİRME vi

ABSTRACT viii

1. GİRİŞ 1

2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 4

2.1. Eklemeli İmalat ve Sınıflandırılması 4

1.Yapıştırıcı Püskürtme 5

2.Direk Enerji Biriktirme 5

3.Malzeme Ekstrüzyonu 5

4.Malzeme Püskürtme 6

5.Toz Yataklı Füzyon 6

6.Plaka Tabakalaştırma 6

7.Havuz Fotopolimerizasyonu 7

2.1.1. Elektron Işını İle Ergitme Yöntemi 7

2.1.1.1 Elektron Işını İle Ergitme Yönteminin Avantajları 15

2.1.1.2 Elektron Işını İle Ergitme Yönteminin Dezavantajları 16

2.1.2. Ti-6Al-4V Alaşımı ve Üretimi 18

2.2. Eklemeli İmalat Sonrası Uygulanan İkincil İşlemler 21

2.2.1. Sürükleme İle Yüzey İşlem 25

3. GEREÇ VE YÖNTEM 29

3.1. Deneysel Çalışma ve Düzenekler 29

4. BULGULAR VE TARTIŞMA 34

4.1. Yüzey Topografyası ve Pürüzlülük Analizi 34

4.2. Mikroyapı ve SEM Analizi 41

4.3. Mikrosertlik 44

4.4. Aşınma Analizi 47

5. SONUÇLAR 56

6. KAYNAKÇA 58

ÖZET

Tİ-6AL-4V ALAŞIM TOZLARINDAN ELEKTRON IŞINI İLE ERGİTME YÖNTEMİ KULLANILARAK ÜRETİLEN PARÇALAR İÇİN SÜRÜKLEMELİ YÜZEY İŞLEM SÜREÇLERİ GELİŞTİRME

Ti-6Al-4V, havacılık, otomotiv ve medikal implant endüstrilerinde kullanılan en çekici malzemelerden biridir. Diğer metallerle karşılaştırıldığında, titanyum ve titanyum alaşımları yüksek korozyon direnci ve yüksek özgül mukavemet-ağırlık oranı sergiler. Günümüzde en yaygın kullanılan titanyum alaşımı Ti-6Al-4V'dır. Bu alaşım, mekanik özelliklerin ve işlenebilirliğin dengeli bir kombinasyonuna sahiptir ve kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Nispeten düşük termal iletkenlik nedeniyle, titanyum ve alaşımlarının işleme yoluyla işlenmesi genellikle zordur. Saf titanyum metalinin çıkarılması da zordur, bu da ham titanyum için diğer metallere kıyasla nispeten yüksek bir fiyatla sonuçlanır. Bu nedenle, işleme sırasında hurda oluşturan malzeme kaldırma yöntemleri uygun değildir. Üretilen hurda miktarını azaltmak için dövme veya döküm gibi net şekle yakın işlemler kullanılabilir. Bununla birlikte, oksijen veya Ti-6Al-4V'ın kalıbı ile yüksek reaktivitesinden dolayı dökümü zordur. Dökme Ti-6Al-4V için ortaya çıkan özellikler, örneğin çekme mukavemeti de genellikle dövme muadilinden daha düşüktür. Bu nedenle, daha az hurda üretimi ve daha verimli üretim süreçleri ile yeni üretim teknolojileri faydalıdır. Minimum malzeme atığı ve kafes hücresel yapılar gibi benzersiz geometriler ile net şekle yakın parçalar üretme olasılığı, eklemeli imalat tekniklerinin önemli avantajlarındandır.

Son yıllarda, farklı eklemeli imalat (AM) süreçleri hem prototiplerin hem de tamamlanmış parçaların üretilmesi için çekici teknikler olarak kabul edilmiştir. Mevcut eklemeli imalat teknikleri, polimerler, seramikler ve metaller gibi birçok malzeme tipine uygulanabilir. Tüm eklemeli imalat süreçlerinin ortak bir özelliği, parçaları oluşturmak için katman bazında bir yöntem kullanmalarıdır. Elektron Işını Ergitme (EBM), 3D-CAD modelleri kullanılarak art arda katman eklenmesiyle parçaların oluşturulmasına izin veren toz yataklı füzyon işlemidir. Elektron Işını Ergitme (EBM), tamamen yoğun ve net şekle yakın parçaların karmaşık geometrilerini üretmek için doğrudan dijital üretim yöntemlerinden biridir.

Uzay ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V parçalarının yüzey kalitelerinin önemli olmasının yanında yüksek sıcaklıklara ve yüklere maruz kalacağından dolayı mekanik özelliklerinin de geliştirilmiş olması önemlidir.

Literatürdeki çalışmalarda, EBM üretim süreçlerinin iyileştirilmesi için optimum parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ancak her ne kadar optimum parametreler seçilerek parçaların yüzey kaliteleri ve mekanik özellikleri iyileşse de Ti-6Al-4V parçalarının yaygın olarak kullanıldığı havacılık endüstrisi için istenilen seviyeye erişilememiştir. Bu yüzden EBM ile üretilen parçalara ikincil işlemlerin yapılmasına gerek duyulmaktadır.

Önerilen tez çalışmasında, EBM ile Ti-6Al-4V parçalarının yüzey özelliklerini ve yüzey altı karakteristiklerini iyileştirecek ve böylece bu yöntemle üretilecek parçaların kullanılmalarında yüzey kaynaklı sorunların ortaya çıkmasını ve çalışma performans ve yorulma ömürlerinin azalmasını engelleyecek yaklaşımlar ortaya konulacaktır.

Tez kapsamında EBM ile üretilen parçalara yüzey iyileştirme operasyonu (Sürükleme ile yüzey iyileştirme (SYİ)) uygulanarak her bir yüzey iyileştirme operasyonunun EBM ile üretilen parçaların yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkisi ortaya konulacaktır ve optimum operasyon parametreleri belirlenecektir. Bu operasyonda kullanılan değişken parametreler, yüzey pürüzlülüğü, boyutsal doğruluk ve mikrosertlik dikkate alınarak en iyilenecektir. Bu kapsamda sürükleme ile yüzey iyileştirme işlemi sırasındaki farklı parametre setlerinin, elektron ışını ile ergitme yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V parçalarının yüzey bütünlüğüne etkisinin deneysel ve ampirik yaklaşımlarla incelenerek belirli oranlarda birbiriyle uyuştuğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektron Işını İle Ergitme, Ti-6Al-4V, Yüzey İyileştirme Operasyonları, Sürüklemeli Yüzey İşlem, Yüzey Bütünlüğü

ABSTRACT

DEVELOPING SURFACE TREATMENT PROCESSES BY DRAG FINISHING FOR PARTS PRODUCED FROM Ti-6Al-4V ALLOY POWDERS BY ELECTRON BEAM MELTING

Ti-6Al-4V is one of the most attractive materials used in the aerospace, automotive and medical implant industries. Compared with other metals, titanium and titanium alloys exhibit high corrosion resistance and a high specific strength-to-weight ratio. The most widely used titanium alloy today is Ti-6Al-4V. This alloy has a balanced combination of mechanical properties and machinability and has been extensively researched. Due to the relatively low thermal conductivity, titanium and its alloys are often difficult to machine by machining. Pure titanium metal is also difficult to extract, resulting in a relatively high price for crude titanium compared to other metals. Therefore, material removal methods that generate scrap during processing are not suitable. Near net shape processes such as forging or casting can be used to reduce the amount of scrap produced. However, it is difficult to cast because of its high reactivity with the die of oxygen or Ti-6Al-4V. The resulting properties for cast Ti-6Al-4V, such as tensile strength, are also generally lower than forged counterparts. Therefore, new production technologies with less scrap production and more efficient production processes are beneficial. Minimal material waste and the producing parts of producing parts close to net shape with unique geometries such as lattice cellular structures are key advantages of additive manufacturing techniques.

In recent years, different additive manufacturing (AM) processes have been recognized as attractive techniques for producing both prototypes and finished parts. Existing additive manufacturing techniques can be applied to many types of materials such as polymers, ceramics and metals. A common feature of all additive manufacturing processes is that they use a layer-by-layer method to create parts. Electron Beam Melting (EBM) is a powder bed fusion process that allows parts to be created by successive layer additions using 3D-CAD models. Electron Beam Melting (EBM) is one of the direct digital fabrication methods to produce complex geometries of fully dense and near net shape parts.

In addition to the important surface qualities of Ti-6Al-4V parts, which are widely used in the aerospace industry, it is important that their mechanical properties are improved since they will be exposed to high temperatures and loads.

In the studies in the literature, it is aimed to determine the optimum parameters for the improvement of the EBM production processes. However, although the surface quality and mechanical properties of the parts have been improved by choosing the optimum parameters, the desired level has not been reached for the aviation industry where Ti-6Al-4V parts are widely used. Therefore, secondary processing is required for the parts produced with EBM.

In the proposed thesis study, approaches that will improve the surface properties and sub-surface characteristics of EBM and Ti-6Al-4V parts and thus prevent the emergence of surface-related problems and the reduction of operating performance and fatigue life in the use of parts produced by this method will be introduced.

Within the scope of the thesis, the effect of each surface improvement operation on the surface and subsurface properties of the parts produced with EBM will be revealed by applying the surface improvement operation (Surface improvement by dragging (SRI)) to the parts produced with EBM and the optimum operation parameters will be determined. The variable parameters used in this operation will be optimized by considering surface roughness, dimensional accuracy and microhardness. In this context, the effect of different parameter sets during the drag surface treatment process on the surface integrity of Ti-6Al-4V parts produced by electron beam melting method was investigated by experimental and empirical approaches and it was concluded that they agree with each other at certain rates.

Keywords: Electron Beam Melting, Ti-6Al-4V, Surface Treatment Operations, Drag Surface Treatment, Surface Integrity, Drag Finishing

SEMBOLLER

E : Enerji Yoğunluğu (J/mm^3)

Ra : Aritmetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (µm)

Sa : Alansal Aritmetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (µm)

µm : Mikrometre

N **:** Newton

P **:** Lazer Gücü (W)

V **:** Lazer Tarama Hızı (mm/sn)

h **:** Tarama Aralığı (µm)

t **:** Katman Kalınlığı (µm)

°C : Santigrat Derece

nm : Nanometre

K : Kelvin

W : Watt

J : Joule

Kg : Kilogram

% : Yüzde

GPa : Gigapascal

MPa : Megapascal

s **:** Saniye

mm : Milimetre

KISALTMALAR

Eİ : Eklemeli İmalat

EBM : Elektron Işını ile Ergitme

ASTM : Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu

XRD : X-Işını Kristalografisi

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

LPBF :Toz Yatağında Ergitme

SLM : Seçici Lazerle Ergitme

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Tasarımdan nihai ürünün elde edilmesine kadar olan EBM sisteminin şematik diyagramı[24] 9

Şekil 2.2EBM tarama stratejisi: a) "zikzak" modeli[38]. b) kontur deseni[39] 11

Şekil 2.3. Hat ofsetine karşı EBM Ti–6Al–4V numunelerinin gözenekliliği[44]. 12

Şekil 2.4. a) Düzensiz füzyon gözenekliliği eksikliği), **(b)** küresel gaz gözenekliliği [46]. 13

Şekil 2.5 Ana işlem eksiklikleri (sol eriyik top oluşumu(melt ball formation), sağ delaminasyon(delamination))[69] 17

Şekil 2.6 (a) β stabilizatör konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak Ti alaşımının sınıflandırılması. **(b)** Yarı kararlı (ω + β) ve (β' + β) faz alanı şeması[80]. 19

Şekil 2.7 Eklemeli imalat ile üretilen parçalara uygulanan ikincil işlemlerin sınıflandırılması. 22

Şekil 2.8 Seçici Lazer Ergitme yöntemi ile üretilen Inconel 718 süper-alaşım parçalarının işlem görmemiş ve vibrasyonlu yüzey işlem uygulanmış topografileri[97]. 24

Şekil 2.9 (a) toz yatağında ergitme yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V'nin öğütme(grinding) işlemi öncesindeki hali (Ra=4,13 µm), **(b)** Ra = 130,8 nm'ye götüren 40 µm Nikel bağlı öğütücü, **(c)** Ra = 65,6 nm ile 9 µm Nikel bağlı öğütücü ve **(d)** R'li 3 µm Reçine bağlı öğütücü dahil olmak farklı öğütücüler kullanılarak öğütme işleminden sonra Ra =8,6 nm olan yüzeyden alınmıştır[102]. **(e)**Lazerle toz yatağında ergitme yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V (Ra = 17,9 µm) (f) Lazerle toz yatağında ergitme yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçanın öğütme işlemi sonrasındaki halinin (Ra = 0,3 µm) SEM görüntüleri[68]..... 25

Şekil 2.10. Sürükleyerek yüzey işlem cihazının temel bileşenleri. 26

Şekil 2.11. Çalışmada kullanılan sürüklemeli yüzey işlem cihazına genel bakış (a), kuvvet ölçüm sisteminin ayrıntılı görünümü (b), aşındırıcı medyanın türleri ve boyutları (c), ölçülen normal kuvvetlerin küresel medya için (d) ve üçgen medya için değerleri [109]. 27

Şekil 2.12 Medya akışı (beyaz oklar) ve yönlendirme açıları (a) ve dört yönlendirme açısında 0◦(b), 30◦, (c) 60◦, (d) 90◦, (e) her iki aşındırıcı medya ile 210 dakikalık sürüklemeli yüzey işlem sonrası ölçülen S_a değerleri [110]..... 28

Şekil 2.13. Ti-6Al-4V alaşım tozu morfolojisini gösteren SEM görüntüleri (100x, 250x, 1000x)..... 30

Şekil 2.14. Sürükleme ile yüzey işlemde kullanılan 06x06 Yıldız Üçgen seramik aşındırıcı 30

Şekil 2.15. Sürükleme ile yüzey işlem makinesi teknik özellikleri..... 31

Şekil 2.16. MITUTOYO SJ210 yüzey pürüzlülükleri ölçüm cihazı..... 31

Şekil 2.17. KEYENCE dijital mikroskop..... 32

Şekil 2.18. MİKROTEST MULTİCUT SENSE hassas kesme cihazı 32

Şekil 2.19. MULTİPOL ADVANCED PLUS zımparalama ve parlatma cihazı 32

Şekil 2.20. FUTURE-TECH FM-310e Vickers (HV) mikrosertlik cihazı 33

Şekil 2.21. TURKYUS RTW lineer aşındırma cihazı 33

Şekil 2.22. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçaların a)iki boyutlu ve b) üç boyutlu görüntüleri 34

Şekil 2.23. Sabit daldırma derinliğinde (1,25 cm), 3 farklı işlem süresi ve 3 farklı hızda sürükleme ile yüzey işlem uygulanmış Ti-6Al-4V parçaların optik mikroskop ile alınmış 3 boyutlu görüntüleri 35

Şekil 2.24. Daldırma derinliği 1.25, 2.5 ve 5 cm olacak şekilde uygulanan sürükleme ile yüzey işlem sonrası ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri grafikleri. 39

Şekil 2.25. İşlem görmemiş (a), en kötü (b) ve en iyi (d) sonuç veren sürükleme ile yüzey işlem sonrası elde edilen yüzey topografileri. 40

Şekil 2.26. 3 farklı daldırma derinliği ve 3 farklı hız için 360 dakika çalışma süresinde sürükleme ile yüzey işleme tabi tutulmuş olan Ti-6Al-4V parçaların SEM görüntüleri(2000x)..... 41

Şekil 2.27 (a) işlem görmemiş EBM ile üretilmiş Ti-6Al-4V parça (5000x), **(b)** sürükleme ile yüzey işlem çalışma hızı 30 rpm olan parça (5000x), **(c)** sürükleme ile yüzey işlem

çalışma hızı 60 rpm olan parça (5000x) ve **(d)** sürükleme ile yüzey işlem çalışma hızı 90 rpm olan parça (5000x)..... 42

Şekil 2.28 (a) işlem görmemiş EBM ile üretilmiş Ti-6Al-4V parça (5000x), **(b)** 1,25 cm daldırma derinliğinde sürükleme ile yüzey işlem uygulanmış olan parça (5000x), **(c)** 2,5 cm daldırma derinliğinde sürükleme ile yüzey işlem uygulanmış olan parça (5000x), ve **(d)** 5 cm daldırma derinliğinde sürükleme ile yüzey işlem uygulanmış olan parça (5000x) 43

Şekil 2.29. Daldırma derinliği=1,25, işlem süresi=360 dakika olan 3 farklı hızdaki sürükleme ile yüzey iyileştirme işleminin mikrosertlik grafiği..... 45

Şekil 2.30. Daldırma derinliği=2,5, işlem süresi=360 dakika olan 3 farklı hızdaki sürükleme ile yüzey iyileştirme işleminin mikrosertlik grafiği..... 45

Şekil 2.31. Daldırma derinliği=5, işlem süresi=360 dakika olan 3 farklı hızdaki sürükleme ile yüzey iyileştirme işleminin mikrosertlik grafiği 46

Şekil 2.32. Daldırma derinliği=5 cm, yüzeyden 15μm uzaklıktan ölçülen 3 farklı hızdaki sürükleme ile yüzey iyileştirme işleminin işlem süresine bağlı olan mikrosertlik grafiği 47

Şekil 2.33. TURKYUS RTW Lineer Aşındırma Cihazı**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

Şekil 2.34. 1,25 cm daldırma derinliğinde, farklı işlem sürelerinde sürükleme ile yüzey işlem yapılmış numunelerin aşınma profilleri. 50

Şekil 2.35. 2,5 cm daldırma derinliğinde, farklı işlem sürelerinde sürükleme ile yüzey işlem yapılmış numunelerin aşınma profilleri. 52

Şekil 2.36. İşlem hızı 60 rpm, işlem süresi 120 dk ve daldırma derinliği 1,25 cm (a), 2.5 cm (b) ve 5 cm (c) olan sürükleme ile yüzey işlem sonrası elde edilen yüzey topografileri. 53

Şekil 2.37. 5 cm daldırma derinliğinde, farklı işlem sürelerinde sürükleme ile yüzey işlem yapılmış numunelerin aşınma profilleri..... 55

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 EBM yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V parçaları için yapılan literatür analizi. 14

Tablo 2.2. Ti-6Al-4V parçalarının üretim parametreleri. 29

Tablo 2.3. Pürüzlülük değerleri 36

Tablo 2.4. Optimum zaman (T) 38

Tablo 2.5. Elektron ışını ile toz yatağında füzyon yöntemi ile üretilen Ø19x80 mm boyutundaki Ti-6Al-4V parçalara 1,25 cm daldırma derinliğinde, farklı işlem sürelerinde uygulanan sürükleme ile yüzey işlemleri sonrasında yapılan lineer aşındırma testleri sonucu elde edilen aşınma izleri. 48

Tablo 2.6. Elektron ışını ile toz yatağında füzyon yöntemi ile üretilen Ø19x80 mm boyutundaki Ti-6Al-4V parçalara 2,5 cm daldırma derinliğinde, farklı işlem sürelerinde uygulanan sürükleme ile yüzey işlemleri sonrasında yapılan lineer aşındırma testleri sonucu elde edilen aşınma izleri. 51

Tablo 2.7. Elektron ışını ile toz yatağında füzyon yöntemi ile üretilen Ø19x80 mm boyutundaki Ti-6Al-4V parçalara 5 cm daldırma derinliğinde, farklı işlem sürelerinde uygulanan sürükleme ile yüzey işlemleri sonrasında yapılan lineer aşındırma testleri sonucu elde edilen aşınma izleri. 54

1. GİRİŞ

İmalat, çeşitli hammaddelerin işlenerek kullanılabilecek bir ürün haline dönüştürülme sürecinin tamamıdır. Eski zamanlardan günümüze kadar birçok farklı imalat yöntemi kullanılmış ve çeşitli ihtiyaçlardan kaynaklı olarak imalat yöntemleri geliştirilmiştir. Günümüzde imalat yöntemleri geleneksel ve geleneksel olmayan imalat yöntemleri olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Geleneksel imalat yöntemleri ise talaşlı ve talaşsız imalat yöntemleri olarak ikiye ayrılmıştır. Talaşsız imalat yöntemleri olarak kaynak, döküm, dövme, toz metalürjisi gibi yöntemleri sayabiliriz. Talaşsız imalat yöntemin de nihai şekle yakın ürün talaş çıkarmadan üretilirken, talaşlı imalat yöntemlerin de işlem sonrasında talaş çıkmaktadır. Talaşlı imalat yöntemi olarak tornalama, delik delme, freze, planyalama ve taşlama gibi yöntemler sayılabilir. Geleneksel olmayan imalat yöntemleri ise hem talaşlı imalatta ortaya çıkan talaş kaynaklı malzeme israfının önlenmesi hem de işlenmesi zor ve karmaşık şekilli parçaların üretiminin geleneksel yöntemlerle mümkün olmaması gibi gerekçelerle ortaya çıkmıştır. Geleneksel olmayan imalat (ileri imalat) yöntemleri geleneksel imalatın sınırlamaları ve zayıf yönlerinin aksine birçok avantaj sunmaktadır. İleri imalat yöntemlerinin avantajlarından bazıları; karmaşık geometrili parça üretimine olanak sağlaması, talaş israfının olmaması, nihai ürüne yakın ürünün tek seferde üretilmesi, işlenmesi zor malzemelerin kullanılabilmesi, yüksek hassasiyet, hızlı prototipleme vb. şeklinde sıralanabilir.

Eklemeli imalat en bilindik ve hızlı gelişen ileri imalat yöntemlerden birisidir. Eklemeli imalat yöntemi katmanlı imalat olarakta bilinmektedir. Eklemeli imalat geleneksel imalata nazaran çok parçalı ürünlerin tek bir komponent olarak üretilebilmesine olanak sağlar ve bu sayede montaj sürecini ortadan kaldırarak birçok açıdan avantaj sağlar. Seri üretim için henüz uygun olmayan bu ileri imalat yöntemi özellikle havacılık, uzay, savunma ve biyomedikal gibi az sayıda ve spesifik ürünlerin üretildiği alanlarda oldukça fayda sağlama potansiyeline sahiptir. Bundan dolayı havacılık, biyomedikal ve savunma sanayi gibi endüstriler bu üretim yöntemindeki ilerlemeleri güncel olarak yakından takip etme ve ne derece uygulanabilir olduğunu önemsemektedir.

Birçok eklemeli imalat yöntemi mevcut olmakla beraber, eklemeli imalat yöntemlerine gereksinim duyan endüstrilerin isteklerini karşıladığı için en yaygın kullanılan Eİ

yöntemlerinden biri olan LPBF yöntemidir. Literatür incelendiği zaman LPBF yöntemi, havacılık, uzay ve biyomedikal alanlarda yaygın olarak Ni ve Ti bazlı alaşımların sıklıkla kullanıldığı ve bu konularda çalışmaların hızla arttığı görülmektedir.

Ti-6Al-4V işlenmesi zor malzemeler sınıfına girmektedir. Bunun sebepleri; yüksek kimyasal reaktivite, düşük termal iletkenlik, yüksek sıcaklıktaki yüksek mukavemet özellikleri, düşük elastikiyet modülüdür. Yüksek kimyasal reaktivitesi, işleme sırasında kesici takıma kaynak yapma eğilimine neden olur. Düşük termal iletkenlik, takım ile iş parçası arasındaki ısı transferini önler ve buna bağlı olarak aşırı ısınan takım olumsuz etkilenir. Yüksek sıcaklıkta mukavemetini koruması ve düşük elastikiyet modülü izlenebilirliğini zorlaştırır. Bu sebeple Ti-6Al-4V'nin eklemeli imalat ile üretimi söz konusudur. EBM, Ti-6Al-4V parçalarının üretimi için kullanılan yöntemlerden biridir. EBM ile üretimde diğer toz yataklı ergitme proseslerinden farklı olarak ergitme lazer yerine elektron ışını enerjisi ile sağlanır ve elektron ışını saçılmasını en aza indirgemek için ayrıca reaktivite kontrolünü sağlamak için kontrollü bir vakum atmosferi kullanır. Eklemeli imalatın genel avantajı olan hedeflenen ürünün temel geometrik şekli ve temel malzeme özelliklerinin aynı anda tek bir işlemle elde edilebilmenin yanında EBM yöntemi düşük kalıntı gerilimi, hızlı üretim hızı ve yüksek enerji verimliliği nedeniyle diğer metal eklemeli üretim tekniklerine göre avantajlar sergiler. Elektron demeti ile ergitme yöntemi ile metalik parçaların imalatında karşılaşılan en önemli sorunların başında yüksek yüzey pürüzlülükleri ve porozite yoğunluğu gelmektedir. Bu sorunlar literatürdeki birçok çalışmada ifade edilmiş ve ortaya konulmuş olmasına rağmen bu sorunların çözümüne katkı sunacak çalışmalar sınırlıdır. Bu sorunlar parçaların yüzey ve yüzey altı özellikleri (yüzey bütünlüğü) açısından önem arz etmekte, parçaların mekanik performanslarını önemli derecede etkilemektedirler. Uzay ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V parçalarının yüzey kalitelerinin önemli olmasının yanında yüksek sıcaklıklara ve yüklere maruz kalacağından dolayı mekanik özelliklerinin de geliştirilmiş olması önemlidir.

Sürükleme ile yüzey iyileştirme işlemi yüzey ve yüzeyaltı özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan oldukça etkili bir toplu finisaj işlemidir. Bu ikincil yüzey iyileştirme işlemi karmaşık yapılı parçaların yüzey ve yüzey altı özelliklerini iyileştirmede kullanılmaktadır. Dolayısıyla da EBM yöntemi ile üretilen parçaların sahip olacakları yüzey ve yüzey altı özelliklerin araştırılması ve iyileştirilmesi konusundaki çalışmalar

ülkemiz havacılık ve savunma endüstrisi başta olmak üzere dünyadaki bu konu üzerine yapılan araştırmalara da katkı sağlayacaktır. Bu konuda yapılacak olan sistematik çalışmalar ile elde edilecek olan faydalı bilgiler ve bunun endüstriyel uygulaması ve yaygınlaşması bu tezin amacı ve hedefidir. Önerilen tezin amaçları ve hedeflenen çıktılar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

-EBM yöntemiyle Ti-6Al-4V tozlarından parça imalatı gerçekleştirilecek ve işlem görmemiş parçanın özellikleri test edilerek ortaya konacaktır.

-EBM yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V parçalarına farklı parametrelerde sürükleme ile yüzey iyileştirme işlemi uygulanacak ve yüzey kalitelerindeki iyileşmeye katkısı ortaya konacaktır.

-Sürükleme ile yüzey işlem operasyonunda kullanılan parametreler optimize edilecek.

- Sürükleme ile yüzey işlem operasyonunda kullanılan parametreler ile zaman arasında kurulmuş olan çeşitli denklemlerle[1] istenen pürüzlülük değerlerinin hangi sürelerde elde edilebileceği tahmin edilecektir.

-Sürükleme ile yüzey işlem operasyonunda ile elde edilen yüzeyin, herhangi bir işlem görmemiş EBM ile üretilen Ti-6Al-4V parçalarının yüzeylerine göre ne derece aşınma dirençlerinin iyileştirildiği ortaya konulacaktır.

-Çalışma kapsamında EBM ile üretilen Ti-6Al-4V parçalarının yüzey ve yüzey altı özellikleri ile mikroyapı ve yüzey iyileştirme süreci-performans arasındaki ilişki kapsamlı olarak araştırılmış olacak ve dünya literatüründe bu konuda çok önemli boşlukları doldurulmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca bu tez kapsamında yapılmış olan sürükleme ile yüzey işlem operasyon parametrelerinden daldırma derinliğinin parçalara olan etkisinin dünya literatürdeki eksikliği giderilmiş olacaktır.

2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Eklemeli imalat teknolojileri, günümüzde uzay, havacılık, otomotiv ve biyomedikal alanlarda oldukça yaygın olarak kullanılmakta ve her geçen gün kullanım alanları genişlemektedir. Kullanımının yaygınlaşması bu alandaki bilgi gereksinimini de beraberinde getirmiştir. Bu bölümde eklemeli imalat yöntemleri, eklemeli imalat yöntemlerinden olan elektron ışını ile ergitme yöntemi, EBM ile üretilen Ti-6Al-4V parçalar ve üretilen Ti-6Al-4V parçalara uygulanan ikincil işlemlerden sürükleme ile yüzey iyileştirme işlemi ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır.

2.1. Eklemeli İmalat ve Sınıflandırılması

Eklemeli imalat katman katman malzeme biriktirme prensibiyle çalışan bir imalat yöntemidir[2, 3]. Eklemeli imalat geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında birçok avantaja sahiptir ve bu avantajlar da eklemeli imalatı tercih edilen bir üretim yöntemi haline getirmiştir. Eklemeli imalatın endüstrideki kullanım alanları giderek yaygınlaşmakla beraber şu an da bile gıda sektörü, otomotiv, tıp/ilaç, biyomedikal, savunma, havacılık ve uzay gibi birçok sektörde kullanılmaktadır[4-6]. Özellikle havacılık endüstrisinde üretilen ürün miktarlarının az olması ve karmaşık şekilli parçalara gereksinim duyulması nedeniyle bu yöntemin gelecekte çok yaygın olarak kullanılacağı öngörülmektedir. Ayrıca havacılık sektöründe daha hafif bileşenlere ihtiyaç duyulması da eklemeli üretimi cazip hale getirmektedir[7]. Eklemeli imalatın en büyük dezavantajlarından birisi de seri üretim için henüz uygun olmamasıdır. Seri imalat gerektirmeyen ürünlerin üretildiği alanlarda oldukça iyi bir potansiyele sahiptir[8]. Bu yüzden özel üretimin olduğu havacılık, uzay, savunma gibi birçok endüstri eklemeli imalat alanındaki gelişmeleri yakından takip etmektedir. Ayrıca bazı firmalar kendi bünyelerine aldıkları eklemeli imalat makineleriyle çeşitli çalışmalar gerçekleştirerek bu alandaki çalışmalara katkı sunmaktadır[9]. Eklemeli imalat teknolojileri, Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (İng. ASTM International) tarafından ASTM F2792-12a standardına göre; Yapıştırıcı Püskürtme, Direk Enerji Biriktirme, Malzeme Ekstrüzyonu, Malzeme Püskürtme, Toz Yataklı Füzyon, Plaka tabakalaştırma, Plaka tabakalaştırma, Havuz Fotopolimerizasyonu olmak üzere 7 temel gruba ayrılmıştır [10].

1.Yapıştırıcı Püskürtme

Parçacıkların birbirine bir yapıştırıcı sayesinde yapıştırılarak katman katman inşa edildiği üretim yöntemidir. Tasarım özgürlüğü, yüksek üretim hızı, destek yapısına ihtiyaç duymama ve nispeten düşük maliyet gibi avantajlarının yanı sıra düşük yüzey kalitesi ve yetersiz mekanik özelliklere sahip kırılgan parça üretimi bu üretim yönteminin dezavantajlarıdır. Bu imalat yönteminde polimerler, seramikler, kompozitler, metaller ve hibrit malzemeler kullanılır.

2.Direk Enerji Biriktirme

Enerji kaynağının odaklanmış ısı enerjisi ile maddeyi ergiterek tabaka üzerinde ergimiş maddeyi biriktirmesi prensibiyle çalışan üretim metodudur. Lazer biriktirme, lazer şekillendirme, elektron ışını, plazma ark eritme olmak üzere 4 gruba ayrılır. Yüksek kaliteli ve kontrollü tane yapısına olanak sağlaması bu yöntemin avantajlarındandır. Birçok eklemeli imalat yönteminde olduğu gibi direk enerji biriktirme yönteminde de düşük yüzey kalitesine sahip parçalar üretilir. Bu yöntemde yalnızca metaller ve hibrit malzemeler hammadde olarak kullanılabilir. Bu da bu yöntemin kısıtlayıcı bir yanı olduğu için önemli bir dezavantajıdır.

3.Malzeme Ekstrüzyonu

Malzeme ekstrüzyon yöntemi iyi bilinen bir yöntemdir. Bu yöntemde polimerler ekstrüde edilir veya haraketli bir kol üzerine monte edilmiş bir nozülden dışarı itilir. Katmanlar arasındaki uygun yapışma hassas sıcaklık kontrolü veya kimyasal bağlayıcılarla sağlanır. Ergiyik yığma modelleme, ergiyik filamen fabrikasyonu ve ergiyik katman modelleme olmak üzere 3 gruba ayrılır. Yaygın olarak kullanılması, ucuz oluşu ve tamamen işlevsel parçalar oluşturabilmesi bu yöntemin avantajlarıdır. Ayrıntılar için uygun olmama ve basamaklı yüzey oluşturma ise bu yöntemin dezavantajlarındandır. Malzeme ekstrüzyon yönteminde polimerler ve kompozit malzemeler kullanılır.

4.Malzeme Püskürtme

Malzeme jetleme yöntemi diye de adlandırılan bu yöntem 2D mürekkep püskürtmeli yazıcılara benzer ancak bu yöntemde 3B malzemeler üretildiği için buradaki püskürtme kafası x, y ve z eksenlerinde hareket eder. Üretim esnasında damlacıklar püskürtülerek katmanlar oluşturulur. Katmanlar ya kendiliğinden soğuyarak sertleşir ya da ultraviyole ışıkla kürlenir. 3B inkjet teknolojisi ve direkt mürekkep yazdırma olmak üzere 2'ye ayrılır. Bu yöntemin avantajlarını şöyle sıralayabiliriz; yüksek damlacık biriktirme doğruluğu, düşük atık oluşturma, çoklu malzeme parçaları üretebilme ve çok renkli parçalar üretebilme. Destek malzemesi gerekliliği ve fotopolimerler ve termoset reçine gerekliliği ise bu yöntemin dezavantajlarıdır. Malzeme püskürtme yöntemin de polimerler, seramikler, kompozitler, hibrit malzemeler ve biyolojik malzemeler kullanılır.

5.Toz Yataklı Füzyon

Bu yöntem, ince bir katman şeklinde serilen toz katmanının eritmek veya kısmen eritmek için lazer, elektron ışını veya termal baskı kafalarının kullanılarak gerçekleştirilen bir üretim yöntemidir. Süreç tamamlandığında fazla toz nesneden uzaklaştırılır ve varsa destek parçaları da temizlenerek nihai ürün elde edilmiş olur. Elektron ışını ergitme, direkt metal lazer sinterleme, seçici lazer sinterleme, lazerle toz yatağında füzyon olmak üzer 4 gruba ayrılır. Nispeten ucuz bir teknoloji olması ve geniş malzeme seçeneklerinin bulunması bu yöntemin tercih sebepleri arasındadır. Bu yöntemin birtakım dezavantajları da mevcuttur. Bunlar; yapısal bütünlük eksikliği, nispeten yavaş olma, boyut sınırlamaları, yüksek güç gerekliliğidir. Toz yataklı füzyon yönteminde polimerler, seramikler, kompozitler, metaller ve hibrit malzemeler kullanılır.

6.Plaka Tabakalaştırma

Plaka tabakalaştırma yönteminde sac/folyo gibi ince malzemelerin katman katman birbirine yapışkan malzeme veya ultrasonik kaynakla birleştirilmesi sonucu gerçekleşe üretim yöntemidir. Tabakalı malzeme üretimi ve ultrason birleştirme/ultrason eklemeli üretim olmak üzere 2 gruba ayrılır. Bu yöntem de üretim hızı yüksektir, düşük maliyetlidir ve malzeme taşıma kolaylığı vardır. İşlem sonrasında ikincil işlemler gerekebilir ve sınırlı

malzeme kullanımı vardır. Plaka tabakalaştırma yöntemin de polimerler, seramikler, metaller ve hibrit malzemeler kullanılır.

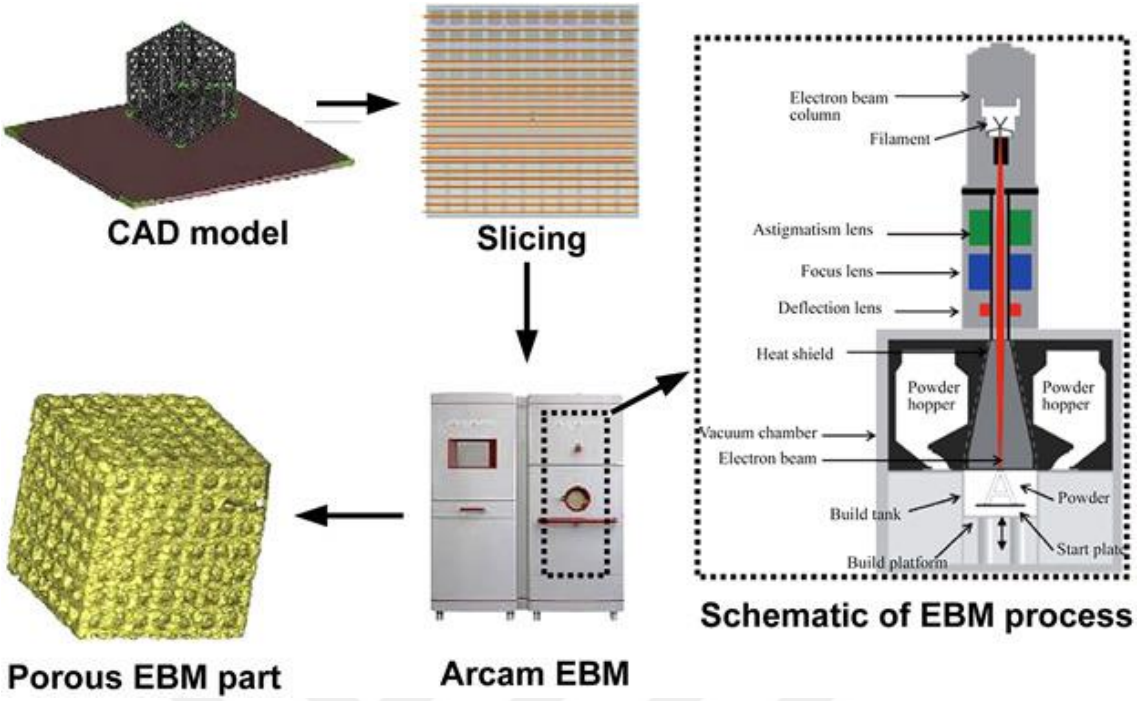
7.Havuz Fotopolimerizasyonu

Bir havuzdaki her mikro ince sıvı reçine katmanının aynalar tarafından hassas bir şekilde yönlendirilen ultraviyole ışık kullanılarak sertleşmesiyle gerçekleştirilen üretim yöntemidir. SLA ve dijital ışık işleme olmak üzere 2'ye ayrılır. Bu yöntemle büyük boyutlu parçalar üretilebilir, mükemmel boyutsal hassasiyet sağlanır ve mükemmel yüzey detayları sağlanır. Havuz fotopolimerizasyon yönteminin bazı dezavantajları da vardır. Bunlar; sadece fotopolimerlerle sınırlı olması, inşa işleminin yavaş olması, pahalı bir yöntem olması ve fotopolimerlerin düşük mekanik özelliklere sahip olmasıdır. Bu yöntem de polimerler ve seramikler kullanılır.

2.1.1. Elektron Işını İle Ergitme Yöntemi

Eklemeli imalat yöntemlerinden birisi olan Elektron Işını İle Ergitme (EBM) yöntemi bir Toz Yatağında Ergitme yöntemidir. Lazer ışını tabanlı teknolojileriyle (örneğin seçici lazer ergitme, SLM) hemen hemen aynı temel çalışma ilkelerine sahiptir [11]. 1997 yılında kurulan Arcam, elektron demetine (EB) dayalı ilk katkı teknolojisini geliştirdi[12]. Elektron Işını Eritme (EBM) işleminde, metal tozunu 3 boyutlu CAD verilerinden alınan bilgilere göre katmanlar halinde hızlı ve seçici bir şekilde eritmek için yüksek enerjili bir elektron ışını kullanılır[13, 14]. EBM ile üretimde diğer toz yataklı ergitme proseslerinden farklı olarak ergitme lazer yerine elektron ışını enerjisi ile sağlanır ve elektron ışını saçılmasını en aza indirgemek için ayrıca reaktivite kontrolünü sağlamak için kontrollü bir vakum atmosferi kullanır [15-17]. Vakum ortamında işleme, toz oluşmasına sebep olan işlem alanındaki artık hava ile toz etkileşimini önemli ölçüde azaltarak toz bozunmasını en aza indirme avantajına sahiptir. Bu durun Ti ve Ti6Al4V gibi oksijen afinitesi yüksek malzemeler için çok kritiktir. Bundan dolayı standartlaştırılmış yüksek saflıktaki tozların[18, 19] EBM ile parça üretimi sorasında vakum altında kullanılması, oksijen gibi mekanik özellikler konusunda oldukça etkili olan iz elementlerin birikimi üzerinde kontrol sağlar[20]. Bir elektron ışını tabancası, nispeten düşük ışın akımı ve nispeten yüksek bir tarama hızı kullanarak toz tabakasını

önceden ısıtır. Bu durum iki şeye sebep olur. Bunlardan birincisi, sonraki eritme sırasında onu yerinde tutan tozun kısmi sinterlenmesi; ikincisi ise, son erimiş katman ile parçanın oluşturulmuş gövdesi arasındaki termal gradyanı azaltır [21].Bir katmanın ergitilmesinden sonra, baskı plakası bir katman kalınlığına eşit bir kademe indirilir ve başka bir toz katman serilir ve eritilir ve üç boyutlu parçayı elde etmek için işlem tekrarlanır. Oluşturma işlemi tamamlandıktan sonra, kısmen sinterlenmiş parçacıkları yüzeyden çıkarmak için parçaya aynı işlenmiş toz püskürtülür[22]. Bu prosesi detaylandırmak gerekirse, yapı plakasının ön ısıtma sonrası belirlenen katman kalınlığında aşağı inerek toz haznesinden yerçekimi etkisiyle dökülen tozların plakanın üzerine serilmesi ile homojen bir dağılım oluşturulur. Sonrasında elektron tabancasından ışın akımı 1-50 mA arasında olan ve 60 kV voltaja sahip bir ışın mercek sistemi ve ışın saptırma bobinleri kullanılarak toz yatağına odaklanır ve bilgisayar destekli bir sistem tarafından kontrol edilen bu sistem alandaki tozu seçici olarak tarar ve eritir. Duman etkisini önlemek için inşa odasına 10^{-3} mbar basınçlı ("kontrollü vakum") az miktarda helyum gazı verilir[23]. Özetle numune katman katman üretilir ve her bir katman aşağıdaki dört işleme tabi tutulur: 1) ön ısıtma, 2) eritme, 3) yapı levhasının düşürülmesi ve 4) yeni bir toz katmanının serilmesi. Son katmanı bitirdikten sonra yani üretim tamamlandığında, numuneler inşa odası içinde oda sıcaklığına kadar soğutulur[23]. Bu soğutma işlemi, işlem odasının helyum atmosferiyle doldurulması ile oluşturulmuş olan bir ortam için normal şartlar altında 2 saatten fazla sürer. Şekil 2.1 Arcam® EBM sisteminin şematik diyagramını ve Arcam® makinesinin temel komponentlerini göstermektedir[24].



Şekil 2.1 Tasarımdan nihai ürünün elde edilmesine kadar olan EBM sisteminin şematik diyagramı[24]

EBM teknolojisi metalik parça üretebilme kabiliyetinden dolayı oldukça rağbet gören bir yöntemdir. EBM teknolojisinde kullanılan metal veya alaşım tozlarına uygun olarak parametre belirlenmesi çok kritik bir konudur. Bu üretim yöntemin de tüm parametreleri kendimiz belirleyememekteyiz ve bu parametreler EBM cihazının kendisi tarafından belirlenmektedir. Aynı şekilde kullanılan tozun ön ısıtma sıcaklığının sınır koşullarını tanımlayan bazı özellikler (toz sinterleme sıcaklığı ve toz iletkenliği gibi) sabittir ve bu parametreler değiştirilemez[17]. Bunun yanı sıra diğer parametreler değiştirilebilir ve istenilen nitelikte ürün elde edebilmek için bu parametrelerin optimizasyonu çok büyük önem teşkil etmektedir. Değiştirilebilen bu parametrelerden bazıları; ışın akımı [25], hız fonksiyonu [26], nokta sayısı [27], odak ofseti [28], katman kalınlığı [29], ön ısıtma sıcaklığı [30], tarama stratejisi [31], toz boyutu [32] gibi farklı parametrelerdir ve ürün özelliklerine etkisi konusunda literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Üretim parametreleri dizayn edilen komponentin istenilen özelliklerde oluşmasını sağlarken, aynı zamanda tedarik süresi, malzeme tüketimi vb. diğer ticari beklentilerinin 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 üretilebilmesi sağlanmaktadır [33]. Örneğin; ışın gücü, spot çapı, tarama hızı ve ön ısıtma sıcaklığı gibi anahtar değişkenlerin tümü parçanın termal geçmişini ve dolayısıyla katılaşma ve çekirdeklenme mekaniğini etkiler [34, 35].

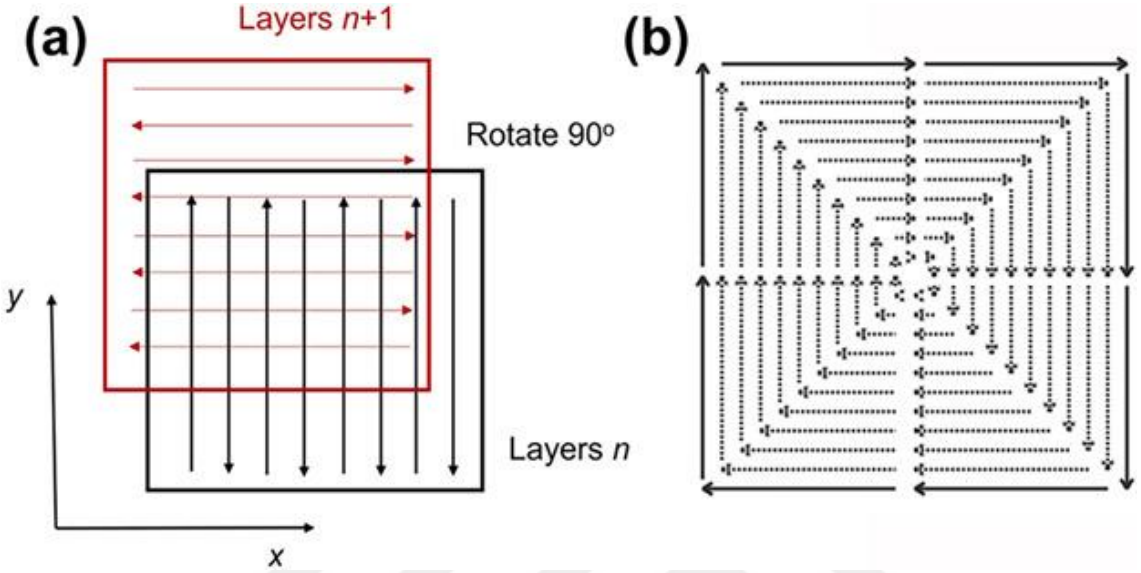
Işın akımının ve tarama hızının etkileri, birleşik bir parametre ile değerlendirilebilir: enerji yoğunluğu. Ek olarak, tarama frekansının artmasıyla ısı konsantrasyonu arttığından, tarama frekansının malzeme birikimi üzerinde önemli bir etkisi vardır[36]. Genel olarak, belirli bir malzeme için, EBM sırasında belirli bir toz malzeme hacmine uygulanan girdi enerji yoğunluğu, denklem 1'deki formül ile tanımlanır[37]:

$$E = \frac{P}{v.t.s} \qquad (1)$$

Burada P elektron ışınının gücü (W), v tarama hızı (mm s^{-1}), t katman kalınlığı (mm) ve s tarama aralığıdır (mm). Girdi enerjisi yoğunluğu, EBM ile üretilmiş parçaların yoğunluğu ve kalitesi için bu kilit faktörlerin bir fonksiyonudur ve böylece üretilen ürünün birçok özelliğini belirler. Denklem 1'de görüldüğü gibi, enerji yoğunluğu elektron ışınının gücü ile doğru orantılıyken, tarama hızı, katman kalınlığı ve tarama aralığıyla ters orantılıdır. Daha yüksek bir giriş enerjisi yoğunluğu, daha geniş bir toz yatağı alanını eritir ve bu nedenle son durumda daha yüksek bir yoğunlukla sonuçlanır. Tamamen erimiş bir bölge oluşturmak, tamamen yoğun parçalar üretmek için çok önemli olduğundan, yüksek yoğunluklu parçalar elde etmek için toz malzemelere uygulanan yeterli girdi enerjisi yoğunluğu gereklidir. Tamamen erimiş bir katmanın oluşması tamamen yoğun bir parçanın üretilmesi için önemli olduğundan, yüksek yoğunluklu bir parça elde etmek için taramanın toz yatağında yeterli giriş elektron ışını enerji yoğunluğuna sahip olması gerekir[17].

Tarama uzunluğu ve elektron ışını tarama vektörlerinin modeli dahil olmak üzere tarama stratejileri, inşa sürecindeki diğer önemli faktörlerdir. Zikzak deseni (tarama izi düz bir çizgidir ve bir katman bittikten sonra 90° döner (Şekil 2.2a [38]), kontur deseni (tarama izi, dışarıdan başlayan bir konturdur ve içe doğru ilerleyen (Şekil 2.2b [39]) ve zikzak ve

kontur desenlerinin birleşimi olmak üzere çeşitli tarama stratejileri mevcuttur. Tarama iz çizgileri arasındaki mesafe, giriş enerjisine ve tarama hızına bağlı olarak değiştirilebilen tarama alanıdır. Ek olarak, bir katman içindeki veya ardışık katmanlar arasındaki tarama modellerinin yönü değiştirilebilir[17].

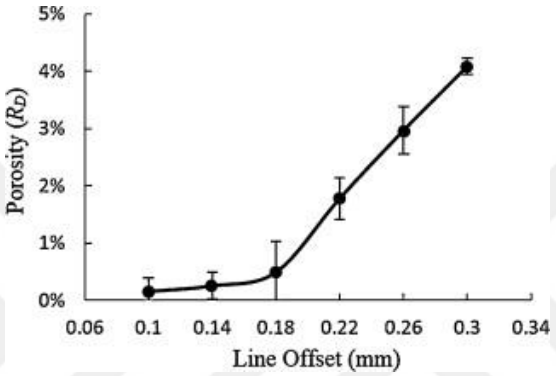


Şekil 2.2EBM tarama stratejisi: a) "zikzak" modeli[38]. b) kontur deseni[39]

Bu parametrelerin optimize edilmemesi durumunda üretilen parçalarda çeşitli kusurlar meydana gelmektedir. Bunlar; yüzey pürüzlülüğü, gözeneklilik, çatlak, düşük boyutsal doğruluk, kalıntı gerilmesi gibi kusurlardır. Elektron Işını Ergitme yöntemi ile üretilen parçalar yüksek standartlara sahip olan sektörlerde kullanılmakta ve bu yüzden üretim sonrası oluşan bu kusurların minimize edilmesi çok önemli bir konudur. Kusurların eklemeli imalat ile üretilen parçaların mekanik performansı üzerindeki oldukça fazla etkileri vardır ve literatürde de bu konuyla ilgili birçok çalışma mevcuttur[35, 40-42]. Buna rağmen sınırlı bilgi ve kaynaklar kusurların altında yatan sebepleri açıklamaktadır. Füzyon kusurlarının çoğunlukla optimize edilmemiş süreç parametrelerinin ve eklemeli imalat proseslerinin donanım ve kararsız süreç parametrelerinden kaynaklanmaktadır[42]. Bu kusurlardan yüzey pürüzlülüğü oldukça önemlidir. Yüzey pürüzlülüğü artan numune kalınlığı ve ışın akımı ile artarken ofset odak ve tarama hızındaki artışla azalır[25]. Rebecca Klingvall Ek ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre yüzey pürüzlülüğü için en önemli parametrelerin birincisi elektron ışını ayarı, konturlardaki "hız ve akımın" birleşimidir. İkinci en önemli parametre "kontur ofseti"

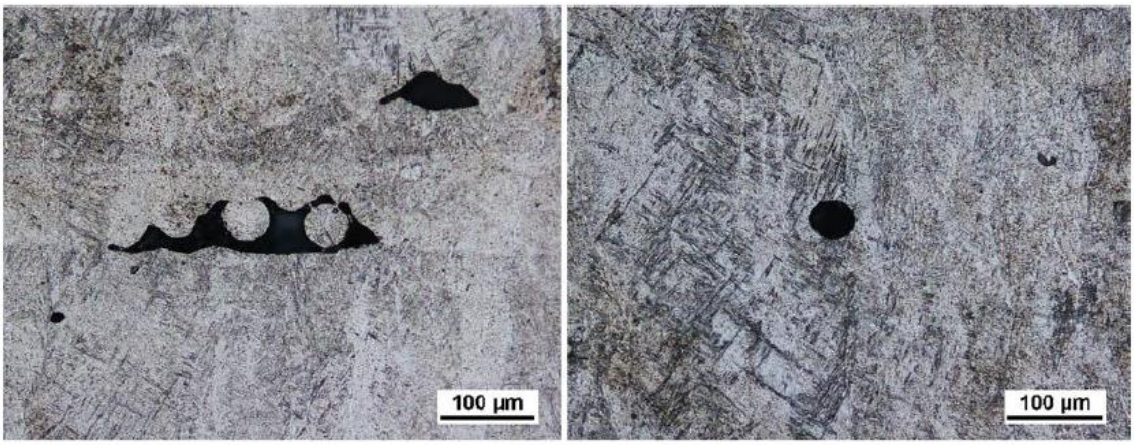
’dir. "Kontur sayısı" ve "kontur ofseti" arasındaki etkileşim de diğer etkileşimlerden çok daha yüksek bir aktif olma olasılığı gösterdiği için önemli görünmektedir. Sonuçlar, konturları kullanırken "çizgi kaymasının" önemli olmadığını göstermektedir[43].

Çizgi ofseti, iki tarama çizgisi arasındaki mesafeyi ifade eder (SLM'deki tarama aralığına benzer). Artan hat ofseti, EBM sürecindeki enerji yoğunluğunu azaltır. EBM Ti–6Al–4V numunelerinin çizgi ofsetine karşı gözenekliliği, Şekil 2.3’te gösterilmektedir. Özellikle çizgi ofseti 0,18 mm'den büyük olduğunda, çizgi ofseti ile gözenekliliğin önemli ölçüde arttığı görülebilir[44].



Şekil 2.3. Hat ofsetine karşı EBM Ti–6Al–4V numunelerinin gözenekliliği[44].

Çizgi ofseti veya hız faktörünün düşük olması, çok fazla yüksek enerji girdisine yol açar. Bu durum da metal elementler bir dereceye kadar buharlaşabilir ve buharlaşma tarafından üretilen geri tepme basıncı, erimiş havuz içinde katılaşmadan sonra ciddi bir kusura dönüşerek gözeneklerin oluşmasına yol açar. Çok daha yüksek bir çizgi ofseti veya hız faktörü seçildiğinde ise, enerji girişi metal tozlarını tamamen eritmek için çok düşük gelebilir, bu da gözenek oluşumuna neden olur. Gözenekliliğin varlığı malzemelerin akma mukavemetini azaltmaktadır[45]. Dolayısıyla çizgi ofseti ve hız faktörü gibi gözenekliliğe etki eden parametrelerin doğru seçimi akma mukavemeti üzerinde oldukça etkilidir. Şekil 2.4, işlem sırasında Elektron Işını İle Ergitme yönteminde bulunan tipik ergime eksikliği kusurunu ve küresel gözenek kusurlarını gösterir.



Şekil 2.4. a) Düzensiz füzyon gözenekliliği eksikliği), **(b)** küresel gaz gözenekliliği [46].

EBM yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V parçaların değişen üretim parametrelerine karşılık parçanın yüzey ve yüzey altı ve performans özelliklerinin incelendiği makaleler Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 EBM yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V parçaları için yapılan literatür analizi.

Ref.	Üretim Parametreleri					Yüzey ve Yüzey Altı Özellikleri		Performans		
	Katman Kalınlığı (μm)	Işın Akımı (mA)	Hız Fonk. /Tarama Hızı (mm/s)	Odak Ofseti (mA)	Çizgi Ofseti (mm)	Gözenek-lilik (%)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra,Sa) (μm)	UTS (MPa)	YS (MPa)	EL (%)
[47, 48]	70	7.5	30	19	-	-	-	1007.7	952.2	12.3
[49]	100	20	15000 mm/s	10	0.21	-	35	-	-	-
[50]	-	5	6000 mm/s	0	-	-	15.4	-	-	-
[27]	50	4	4	0		-	19.7	-	-	-
[16]	50	21	98	3	0.1	-	-	1012	962	8.8
[51]	70	-	36	19	0.2	-	-	-	997	
[52]	50	15	10000 mm/s	3	0.1	-	-	~1000	-	~1.8
[45]	90	-	35	39	0.25	1.51	-	966.3	753.8	15.5
[45]	90	-	29	48	0.25	1.94	-	981.6	747.7	15.9
[45]	90	-	35	48	0.25	1.67	-	980.8	831.1	16.1
[45]	90	-	35	48	0.28	1.72	-	1000.3	871.2	14.7

Literatürdeki çalışmalarda, Elektron Işını İle Ergitme yöntemi ile üretim süreçlerinin iyileştirilmesi için optimum parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ancak optimum parametreler seçilerek parçaların yüzey kaliteleri ve mekanik özelliklerinde daha iyi sonuçlar elde edilse de Ti-6Al-4V parçalarının yaygın olarak kullanıldığı havacılık endüstrisi için istenilen seviyeye erişilememiştir. Bu yüzden Elektron Işını İle Ergitme yöntemi ile üretim parçalara ikincil işlemlerin yapılmasına gerek duyulmaktadır.

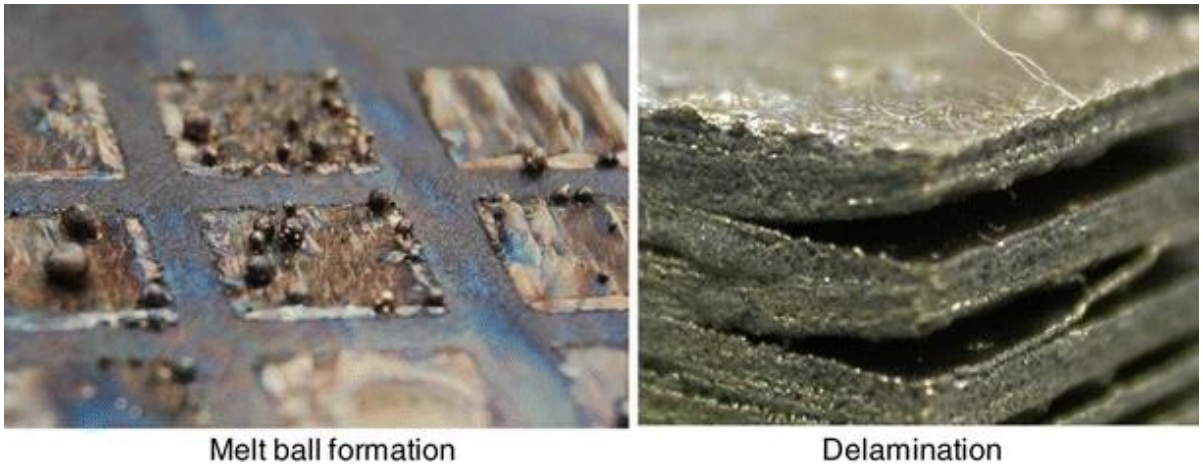
2.1.1.1 Elektron Işını İle Ergitme Yönteminin Avantajları

Eklemeli imalatın genel avantajı olan hedeflenen ürünün temel geometrik şekli ve temel malzeme özelliklerinin aynı anda tek bir işlemle elde edilebilmenin yanında EBM yöntemi düşük kalıntı gerilimi, hızlı üretim hızı ve yüksek enerji verimliliği nedeniyle diğer metal eklemeli üretim tekniklerine göre avantajlar sergiler [53]. Eklemeli imalat (AM) süreçleri, hızlı prototipleme[54] amaçları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Metalik parçalar oluşturma yeteneği ve diğer birçok teknolojik gelişme ile, süreçler artık doğrudan son kullanım parçalarının üretilmesini içeren hızlı imalat amaçları için de kullanılabilir[55]. EBM yönteminin sağladığı avantajlardan birisi de özgün tasarım imkânı sunmasıdır. Geleneksel üretim yöntemlerinde karmaşık, delikli ve çok parçalı ürünlerin üretilmesi mümkün değilken EBM yöntemi bu parçaların üretimini mümkün kılar bu da onu tasarım konusunda daha özgür bir yöntem yapmaktadır. Karmaşık geometrili ve yüksek doğrulukta metal bileşenlerin üretilebilmesi EBM yönteminin önemli avantajlarındandır[56-59]. EBM yönteminde net şekle yakın ürün üretildiği için malzeme israfı minimum düzeydedir. Malzeme israfının az olması bu yöntemi daha çevreci bir yöntem yapmaktadır[60]. Geleneksel yöntemlerin aksine takım ve takımın kurulum maaliyetleri olmadan süreç tamamlanır bu yüzden ekonomik bir yöntemdir. Ayrıca bu yöntem vakum altında gerçekleştiği için oksit oluşumu ve yabancı maddeleri ortadan kaldırır[15-17]. Ayrıca bu vakum ortamında üretilen parçaların gözeneklilik seviyesi, lazer tabanlı toz yatağı tekniklerine göre üretilen parçaların gözeneklilik seviyesinden daha az ve EBM ile üretilmiş parçalar %99,8'in üzerinde yoğunluklara sahiptir[61]. EBM işlemi sırasında benimsenen yüksek sıcaklık, geleneksel teknolojilere kıyasla nihai parçalarda daha ince mikro yapının yanı sıra daha düşük artık gerilimlerle sonuçlanır[62] [63]. Eklemeli imalat yoluyla karmaşık geometrilere sahip metalik endüstriyel parçaların imalatı, örneğin pompa çarkları, yakıt memeleri , türbin kanatları

ve hatta bütün bir jet motoru, son yıllarda dünya çapında üretimi sağlanmıştır[64]. EBM yönteminde birçok malzeme hammadde olarak kullanılmaktadır. EBM yönteminde paslanmaz çelik (17-4), takım çeliği (H13), Ni bazlı süper alaşımlar (625 ve 718), Co bazlı süper alaşımlar (Stellite 21), düşük genleşmeli alaşımlar (Invar), sert metaller (NiWC), intermetalik bileşikler, alüminyum, bakır, berilyum ve niyobyum gibi birçok farklı malzeme sınıfı kullanılabilir[65]. Yine de, bu teknolojinin kullanımı şu anda titanyum ve çeşitli titanyum alaşımlarına odaklanmıştır[65],[66].

2.1.1.2 Elektron Işını İle Ergitme Yönteminin Dezavantajları

Elektron ışını ergitme yönteminin en büyük dezavantajlarının başında yüzey pürüzlülüğü gelmektedir[60]. EBM yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalarının kötü yüzey pürüzlülüğü ve düşük mekanik özellikleri, bu parçalara ikincil işlemlerin uygulanmasını gerektirir [67]. Havacılık uygulamaları için yüzey kaliteleri için standart yönergeler, tipik olarak, döküm veya dövme parçalar için Ra = 3,2 μm veya daha düşük bir yüzey pürüzlülüğü gerektirir [68]. EBM yöntemi ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülük değerleri endüstride istenen seviyelerin çok üzerinde olmaktadır ve bu da üretilen parçaların doğrudan kullanılmalarına engel teşkil etmektedir. EBM sonrası pürüzlülük değerlerini düşürmek için yapılması gereken ikincil işlemler parça maaliyetini artırması bu yöntemin olumsuz yanlarındandır. EBM yöntemindeki kusurlardan bir tanesi de üretim sonrasında katmanların ayrılması ve ergimiş top görüntüsünün oluşmasıdır. Ergiyik toplarının oluşumu ve katmanlara ayrılmanın ortaya çıkması Şekil 2.5'de de görüldüğü üzere EBM'nin şimdiye kadarki proses kararlılığını ağırlıklı olarak azaltır[69]. Eriyik top oluşumu, eriyik havuzun kararsızlıkları nedeniyle oluşur. Bu durum, elektron demetinden toza iletilen yetersiz enerji yoğunluğundan etkilenir ve sözde top etkisi ile sonuçlanır. Böylece, erimiş sıvının yüzey gerilimi, önceden katılaşmış olan tabakanın ıslatma kabiliyetini aşar[70]. Şekil 2.5'te de görüldüğü gibi , eriyik toplarının görünümü, üst tabakada pürüzlü ve engebeli bir yüzeye sebep olduğundan dolayı işlemin devam etmesini engellemektedir[69].



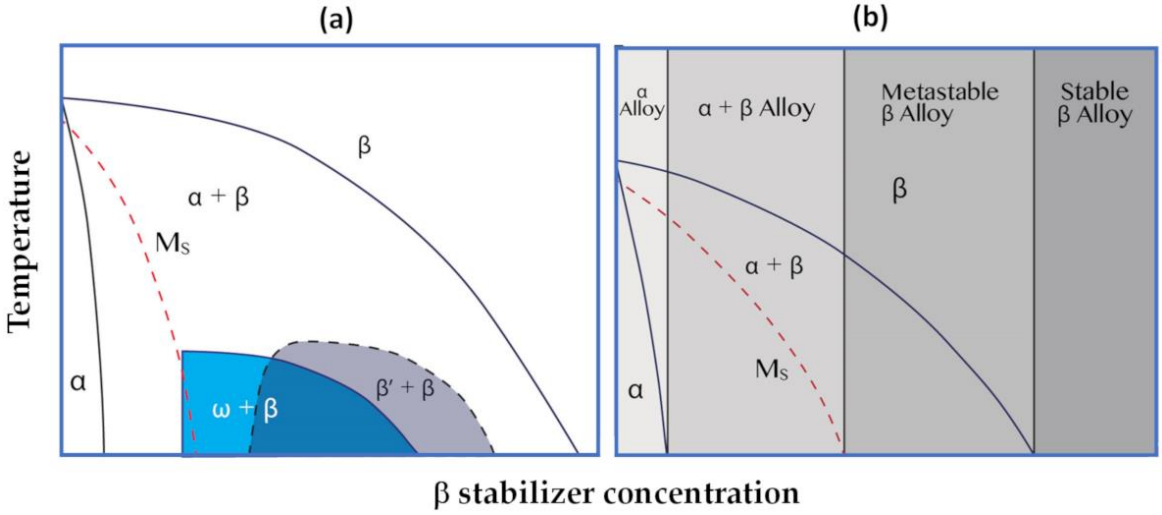
Şekil 2.5 Ana işlem eksiklikleri (sol eriyik top oluşumu(melt ball formation), sağ delaminasyon(delamination))[69]

Eklemeli imalat ile üretilmiş parçalar üzerinde yapılan bazı çalışmalar göstermiş ki yüksek yüzey pürüzlülüğü dinamik yükler altında çatlak oluşumu gibi yüzey kusurlarının başlamasına sebep olduğu için düşük mekanik özelliklerle ilişkilidir[71]. EBM yönteminin bir diğer dezavantajı ise delaminasyondur. Bu yöntemin çalışma prensibi her bir katman için serilen tozun seçici olarak ergitilerek bir önceki katmana yapışması ve sonrasında katılaşması sağlanıyor bu işlem sırasında enerji malzemeye üniform olmayan bir şekilde giriyor. Bu durum sıcaklık gradyanlarının ortaya çıkmasına ve kalıntı gerilmelerine sebep olur. Bu kalıntı gerilmeler üst katman ile bir önceki katman arasındaki bağlanma kabiliyetinden daha fazla olduğunda delaminasyon meydana gelir. Bu durumda üretim süreci durdurulmalıdır aksi takdirde şekil 2.5'te görüldüğü üzere parça kusurlu olacaktır[69] . Delaminasyonun büyük ölçüde seçilen tarama stratejisine bağlı olduğunu gösteren çalışmalar mevcuttur[72]. Tarama vektörlerinin yönelimi ve uygulanan enerji girişi de delaminasyon da oldukça etkilidir[73]. EBM sürecindeki bir başka olumsuz durum ise destek yapıların gerekliliğidir. Özellikle boşluklu ve karmaşık yapıların üretimi sırasında destek yapıları kullanılır bu da işlem sonrası istenilen parçayı elde edebilmek için destek yapılarından ayırma işlemi yani işçilik gerektirir. Bu durum zaman kaybına ve işçilik ve fazla malzeme kullanımı kaynaklı maaliyet artışına sebep olur. Eklemeli imalat ile üretilen parçalar, yüksek yüzey pürüzlülüğü, zayıf süneklik, boyutsal uyumsuzluk, zayıf korozyon, zayıf aşınma davranışı ve mevcut kusurların üstesinden gelmek için daha ileri işlemlere ihtiyaç duyduklarından, hemen hemen tüm

ana uygulamalarda doğrudan kullanım için uygun değildir[74].EBM yöntemi ile üretilen parçalarda meydana gelen yukarıda bahsetmiş olduğum olumsuz durumları gidermek için çeşitli ikincil işlemler yapılmaktadır ve bunlarla ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur[71, 75-78].

2.1.2. Ti-6Al-4V Alaşımı ve Üretimi

Günümüzde en yaygın kullanılan titanyum alaşımı Ti-6Al-4V'dir [68]. Titanyum ve titanyum alaşımları yapı malzemeleri olarak önem kazanmıştır. Tıbbi teknoloji, kimyasal işleme, spor, eğlence, denizcilik ve havacılık gibi uygulamaların tümü, titanyum malzemelerin özelliklerinin avantajlı kombinasyonundan yararlanır [69]. Bu alaşım, mekanik özelliklerin ve işlenebilirliğin dengeli bir kombinasyonuna sahiptir ve kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır [70]. Diğer metallerle karşılaştırıldığında, titanyum ve titanyum alaşımları yüksek korozyon direnci ve yüksek özgül mukavemet-ağırlık oranı sergiler [71]. Ti-6Al-4V hem α hem de β mikroyapısal fazların oda sıcaklığında bir arada bulunduğu bir α+β alaşımıdır ve α alaşımlarının mukavemeti ile β alaşımlarının sünekliğinin kombinasyonunu sunar [85, 86]. Alaşımın mikro yapısı ve özellikleri, ısıl işlem ve termomekanik işleme uygulanarak değiştirilebilir [64] ve yüksek mukavemet/ağırlık oranı ile alaşım, ağırlığa duyarlı parçalar yapmak için giderek daha fazla kullanılmaktadır [86]. Saf titanyum, oda sıcaklığında, α fazı olarak adlandırılan, altıgen, sıkı paketlenmiş (hcp) bir yapıya sahiptir. α hcp yapısından β vücut merkezli kübik (bcc) yapıya faz dönüşümü β transus sıcaklığında (883 °C) gerçekleşir. Alaşımlar söz konusu olduğunda, β transus sıcaklığı, genellikle α-stabilizörler (Al, C ve O gibi) ve β-stabilizörler (V, Mo gibi) olarak sınıflandırılan alaşım elementlerinin kimyasal yapısına ve bileşimine bağlıdır (örneğin; V, Mo, Ta ve Nb gibi). β-stabilizör miktarı arttıkça β transus sıcaklığı azalır (şekil 2.6a). Ti alaşımları genellikle yapılarına göre sınıflandırılır, yani α, (α + β) ve β-stabilizatör konsantrasyonuna bağlı olarak değişen β-tipi. Buna göre, β izomorf faz diyagramında farklı varoluş bölgeleri tanımlanabilir (şekil 2.6b)[79-82].



Şekil 2.6 (a) β stabilizatör konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak Ti alaşımının sınıflandırılması. **(b)** Yarı kararlı (ω + β) ve (β' + β) faz alanı şeması[80].

Nispeten düşük termal iletkenlik nedeniyle titanyum ve alaşımlarının işleme yoluyla işlenmesi genellikle zordur [72]. Saf titanyum metalinin çıkarılması da zordur, bu da bakır titanyum için diğer metallere kıyasla nispeten yüksek bir fiyatla sonuçlanır. Bu nedenle, işleme sırasında hurda oluşturan malzeme kaldırma yöntemleri uygun değildir [73]. Üretilen hurda miktarını azaltmak için dövme veya döküm gibi net şekle yakın işlemler kullanılabilir. Bununla birlikte, oksijenle veya Ti–6Al–4V kalıbıyla yüksek reaktivitesinden dolayı dökümü zordur. Dökme Ti–6Al–4V için ortaya çıkan özellikler, örneğin çekme dayanımı da genellikle dövme muadilinden daha düşüktür [74]. Bu nedenle, daha az hurda üretimi ve daha verimli üretim süreçleri ile yeni üretim teknolojileri faydalıdır [68]. Son yıllarda, farklı eklemeli imalat (AM) süreçleri hem prototiplerin hem de tamamlanmış parçaların üretilmesi için çekici teknikler olarak kabul edilmiştir [75]. Tüm AM süreçlerinin ortak bir özelliği, parçaları oluşturmak için katman bazında bir yöntem kullanmalarıdır. Malzeme, net şekle yakın parçalar oluşturmak için bir 3D CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) modeline dayalı olarak ince katmanlar halinde eklenir. Toz metalleri hammadde olarak kullanan AM prosesleri için katmanlar, CAD modeline dayalı olarak her bir katmanın seçici olarak eritilmesi yoluyla oluşturulur [76]. Enerji kaynağı olarak bir elektron ışını veya lazer kullanan metal tozu yataklı AM prosesleri, tamamen yoğun metal ürünler üretebilir [77]. Minimum malzeme atığı [76] ve

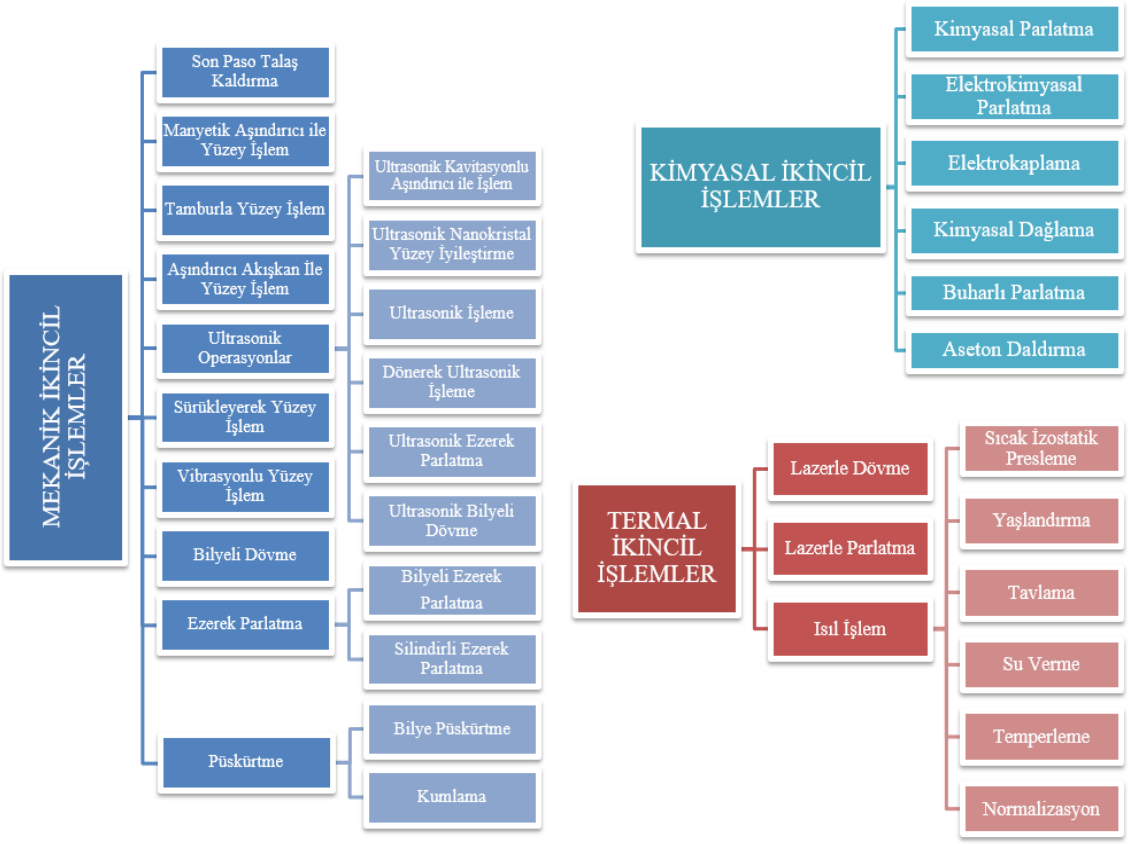
kafes hücresel yapılar gibi benzersiz geometriler ve kafes hücresel yapılar gibi benzersiz geometriler [78] ile net şekle yakın parçalar üretme olasılığı, AM teknikleriyle önemli avantajlardır. Elektron Işını Eritme (EBM), oldukça yakın zamanda ticari olarak kullanıma sunulan bir eklemeli üretim tekniğidir. Aşağıda, bu eklemeli üretim süreci için EBM terimi kullanılacaktır. Teknik, iletken metal tozlarını (ArcamAB) seçici olarak eritmek için yoğun bir yüksek enerjili elektron ışını kullanır [31]. Günümüzde EBM tekniği, diğer uygulamaların yanı sıra, benzersiz geometrik özelliklere sahip özelleştirilmiş titanyum biyomedikal ürünleri üretmek için kullanılmaktadır [79].

Ti'nin endüstride kullanımı son derece sınırlıdır çünkü birçok tüketici uygulaması için engelleyici derecede pahalıdır. Toz metalurjisi, uzun süredir geleneksel dövme yöntemlerine göre düşük maliyetli bir üretim alternatifi olarak önerilmiştir[83] . Toz metalurjisi yöntemleri, kalıp presleme ve sinterleme, metal enjeksiyon kalıplama ve sıcak izostatik preslemeyi içerir, ağ şekline yakın kabiliyeti nedeniyle malzeme kullanımının verimliliği açısından geleneksel dövme yöntemine göre avantajlara sahiptir. Son on yılda, eklemeli imalat teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla birlikte, seçici lazer ile ergitme (SLM) ve elektron ışını ile ergitme (EBM) teknikleri kullanılarak Ti bileşenlerinin üretimi, Ti imalatının en önemli alanlarından biri olarak ortaya çıktı[84-86]. Bu yöntemlerin tümü, dökme malzemeleri ve bileşenleri yapmak için Ti veya Ti alaşım tozlarını kullanır. Söylemeye gerek yok, Ti alaşımı ve bileşenlerinin kalitesi ve performansı büyük ölçüde kullanılan Ti alaşımı tozlarının kalitesine ve maliyetine bağlıdır. Her şeyden önce tozlar, düşük oksijen içeriği de dahil olmak üzere Ti alaşımları için katı kimyasal bileşim gereksinimlerini karşılamalıdır. Ti-6Al-4V alaşımı için tipik spesifikasyonlar, bitmiş Ti ürünlerinin oksijen içeriğinin ağırlıkça %0,2'den düşük olmasını zorunlu kılar ki bu, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Ti için çok zorlayıcı olmuştur[87]. Genel olarak, Ti tozunun oksijen içeriği partikül boyutları ile ters orantılıdır[88]. Yani toz boyutu ne kadar küçükse, oksijen içeriği o kadar yüksek olur. Bu tozları kullanarak üretim yapan alanlarda tozun iyi derecede akışkan olması gerekir. Bu da tozun küresel bir şekle sahip olması gerektiğini ve parçacık boyutlarının makul ölçüde büyük olması gerektiğini belirtir. Tozun akışkanlığı, partikül boyutunun azalmasıyla azalır. Ayrıca, tozlar, üretilen parçaların yoğunluğunu ve tekdüzeliğini de etkileyen iyi görünür yoğunluğa ve doldurma yoğunluğuna sahip olmalıdır. Kısacası, düşük oksijen ve iyi akışkanlığa sahip küresel Ti alaşım tozu yüksek talep görmektedir [87].

Geleneksel küresel Ti tozu üretim yöntemleri, plazma dönen elektrot işlemini (PREP), gaz atomizasyonunu (GA) ve plazma atomizasyonunu (PA) içerir[89] . PREP tozu çok yüksek saflığa ve oldukça fazla küresel bir şekle sahiptir. Bununla beraber, PREP tozunun boyutu da tipik bir şekilde daha kabadır (örneğin; 50–350 μm [90]) ve boyut dağılımı, eklemeli imalat veya metal enjeksiyon kalıplama uygulamaları için istenenden daha geniştir. Bununla birlikte, GA ve PA yöntemleriyle daha ince küresel toz üretilebilir. GA ve PA Ti alaşım tozlarının tipik parçacık boyutları 10 ila 300 μm arasındadır[89]. Atomize toz istenen boyutta kesimler elde etmek için sınıflandırılabilse de sınıflandırma kullanılabilir boyuttaki kesimlerin verimini düşürür ve malzemelerin maliyetini daha da artırır. Genel olarak, iyi akışkanlık elde etmek için zararlı olan GA tekniklerinde uydu oluşumundan kaçınmak zordur[88] . Kapana kısılmış argon içeren bireysel parçacıklar içindeki iç boşluklar, GA tozları için başka bir endişe kaynağıdır. Püskürtme tekniklerinin çoğu, yüksek yerleşik maliyetleri olan ve yüksek kaliteli tozların maliyetini düşürmeyi zorlaştıran teller veya çubuklar gibi yüksek kaliteli değirmen ürünlerinin kullanılmasına bağlıdır. Küresel Ti-6Al-4V tozunun fiyatı kilogram başına bir ila beş yüz dolar aralığındadır[91] ve partikül boyutuna, safsızlık ve miktarına bağlı olarak değişir.

2.2.Eklemeli İmalat Sonrası Uygulanan İkincil İşlemler

Eklemeli imalat süreçleri sonrasında parçaların mekanik, yüzey ve yüzey altı özelliklerinde istenen özellikler elde edilmeyebilmektedir[92]. İstenen özelliklerin elde edilebilmesi için ikincil işlemler yapılmaktadır. Eklemeli imalat ile üretilen parçalara uygulanan ikincil işlemler 3 ana başlık altında incelenebilir. Bunlar mekanik, kimyasal ve termal ikincil işlemlerdir. Eklemeli imalat sonucunda üretilmiş olan parçalara kazandırılmak istenilen özelliklere göre bu ikincil işlemlerden bir tanesi veya birkaç tanesi peş peşe uygulanabilir. Birden fazla ikincil işlemin peş peşe uygulanması literatürde hibrid ikincil işlemler olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.7’ de ikincil işlem sınıflandırılması yer almaktadır.

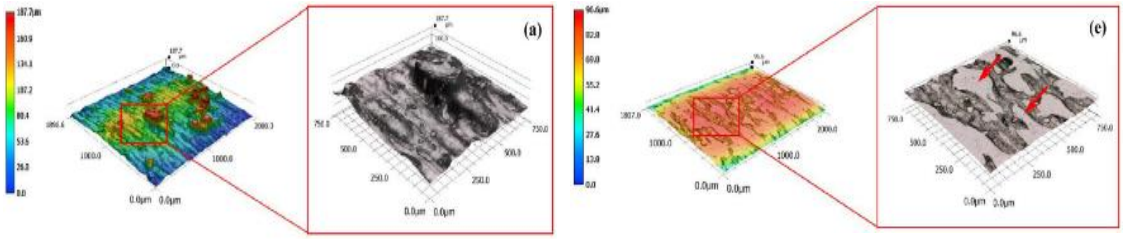


Şekil 2.7 Eklemeli imalat ile üretilen parçalara uygulanan ikincil işlemlerin sınıflandırılması.

Literatürde eklemeli imalat ile üretilmiş parçaların ikincil işlemler sonrası mekanik, yüzey ve yüzey altı özelliklerindeki değişimler ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Yapılan bir çalışmada farklı sıcaklıkların seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilmiş olan 316L paslanmaz çelik parçaların mikroyapı, mikrosertlik ve aşınma davranışı üzerine etkilerini incelemiş ve üretilen bu parçaların mikroyapısını değiştirmek için gereken kritik ısıl işlem sıcaklığı 850°C olarak bulunmuştur. Bulunan bu sıcaklıkta eriyik havuz kaybolmaya başlar ve homojen bir mikroyapı oluşur. Bu yöntem ve bu malzemede görüldüğü üzere ısıl işlem sırasında sıcaklığı arttırmak sertliği ve gözenekliliği azaltmaktadır[93]. Bir diğer çalışmada lazer toz yatağı füzyonu ile üretilen Ti-6Al-4V numunelere farklı aşındırıcılarla ve farklı parametrelerle yapılan sürükleme ile yüzey işlem sonrasında ortaya çıkan yüzey özellikleri ve aşınma davranışı hakkındadır. Bu çalışma açıkça göstermektedir ki son işleme tabi tutulan numunelerin aşınma direnci kayda değer bir artış göstermektedir. Ayrıca sürükleme ile yüzey iyileştirme işleminin aşınma direncinin yanı sıra aşınma hızını kontrol etmekte de dikkate değer bir rol

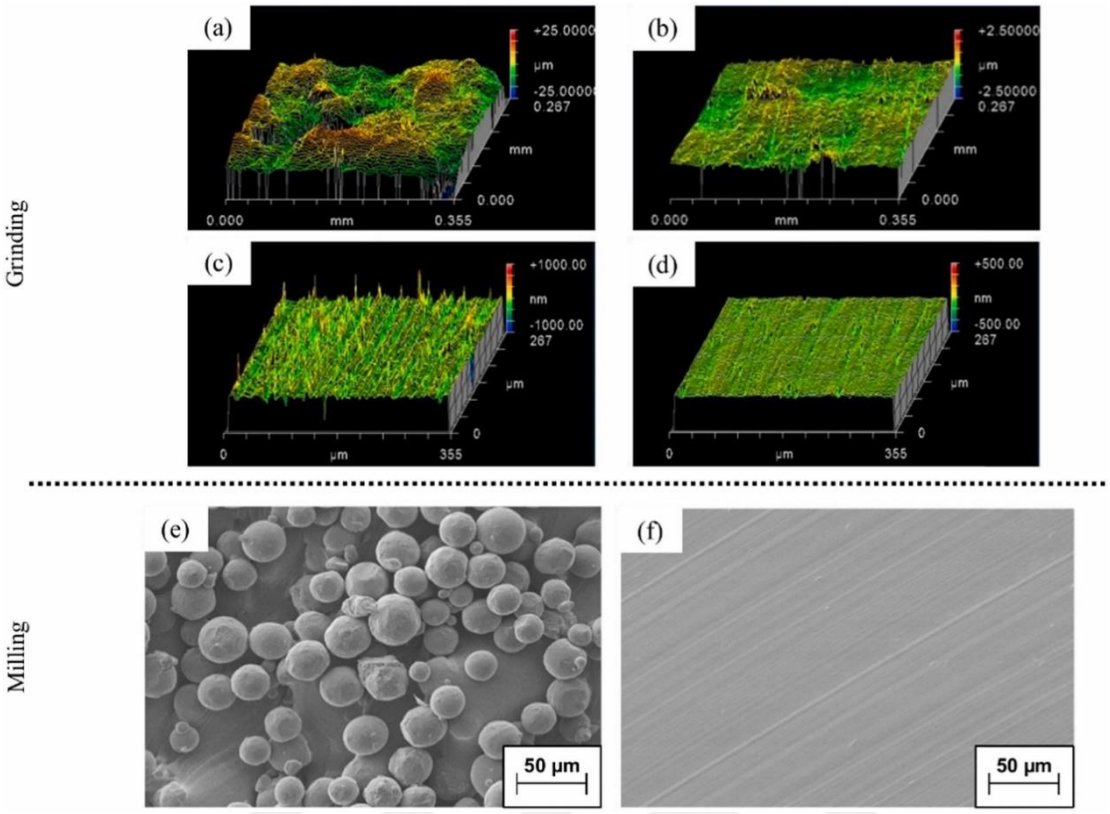
oynadığı görülmektedir[94]. Başka bir çalışmada EBM ile üretilmiş Ti-6Al-4V ELI alaşımına yapılan HIP ikincil işlem sonrasında mikroyapı ve mekanik özellikleri ile korozif koşullara karşı direnci ile ilgili faktörler dikkate alındığında, herhangi bir EBM işleminden sonra HIP işleminin kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Eklemeli imalat ile üretilen parçalara uygulanan HIP parçaların plastik özelliklerini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda korozyon direncini de olumlu yönde etkiler ki bu, kişiselleştirilmiş tıp ve özel yapım implantların üretimi düşünüldüğünde büyük önem taşıyabilir[95]. Literatürdeki çalışmalardan birinde de EBM kullanılarak üretilmiş olan Ti-6Al-4V numunelerine uygulanan lazerle parlatma yöntemi detaylı olarak ele alınmıştır. İlk olarak lazer parametreleri bir deney tasarımı ile optimize edildi, sonrasında sayısal analiz yöntemi kullanıldı. Çalışma, özellikle yüzey ve yüzey altı arasındaki termal etkileşimi ve ayrıca yüzey bütünlüğünü araştırdı. Bu bağlamda kesit alanındaki yüzey morfolojisi, mikroyapı ve mikrosertlik analizleri yapıldı. Yeniden eritilmiş bölge, iğnemsi (α') bir mikro yapı ile karakterize edilen tam bir ($\beta \rightarrow \alpha'$) faz dönüşümü sergiledi . Isıdan etkilenen bölgede, martenzitik ve katmanlı yapıların bir kombinasyonu ile sonuçlanan ($\beta \rightarrow \alpha'$) faz dönüşümü görüldü. Numunenin daha ilerisinde, lazerle parlatma işleminden etkilenmeyen EBM malzemesi, tipik katmanlı ($a + \beta$) yapısını sergiledi. Lazerle parlatılan yüzeyin sertliğinin yaklaşık %12,5 oranında artış gösterdiği gözlemlendi[78]. Mekanik işlemlerden birisi olan frezeleme yöntemi ile ilgili çalışmalar da mevcuttur ve bunlardan bir tanesinde EBM ile üretilmiş silindirik Ti6Al4V numunelere frezeleme işlemi uygulanmış ve yüzey kalitelerinde iyileştiği gözlemlenmiştir[60]. Bu çalışma frezeleme işlemi sırasında en iyi yüzeyi elde etmenin yanı sıra enerji tasarrufu için işlem parametrelerinin incelendiği bir çalışmadır. Bir diğer ikincil işlem olan vibrasyon ile yüzey iyileştirme işlemi bir toplu finisaj işlemi olarak endüstride kullanılmaktadır ve yüzey kalitesini iyileştirme amacıyla kullanılmaktadır. Aşındırıcı medyanın malzemesi, boyutu, geometrisi ve yoğunluğu yüzey kalitesini etkiler [96]. Diğer taraftan ortamın akışını iyileştirmek ve iş parçasının yüzeyinden malzeme kaldırmaya yardımcı olmak için uygun bir solüsyon seçilir. Bu solüsyonun da yüzey kalitesini etkileyebileceği düşünülmektedir. Ancak bu konuda literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Kaynak ve ark. (Şekil 2.8), Seçici Lazer Ergitme yöntemi ile üretilen Inconel 718 süper-alaşım parçalarına uygulanan ikincil işlemleri incelemiş ve karşılaştırmışlardır. Vibrasyon ile yüzey iyileştirme işlem prosesinin yüzey pürüzlülüğünü işlem görmemiş

parçaya göre %82,49 oranında azalttığı, mikrosertlik değerini ise yüzeyde %10 civarında arttırdığı analiz edilmiştir[97].



Şekil 2.8 Seçici Lazer Ergitme yöntemi ile üretilen Inconel 718 süper-alaşım parçalarının işlem görmemiş ve vibrasyonlu yüzey işlem uygulanmış topografileri[97].

Şekilde de görüldüğü üzere vibrasyon ile yüzey iyileştirme işlemi yüzeyde kayda değer bir iyileştirme sağlamıştır. Başka bir çalışmada eklemeli imalat ile üretilen metalik parçalara uygulanan bazı ikincil işlemler ve bunların etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada uygulanan mekanik yüzey bitirme işlemlerinden frezeleme işleminde hem yüzey pürüzlülüğü hem de yorulma ömrü açısından mükemmel sonuçlar elde edilmiştir. Tüm yüzey bitirme işlemleri önemli bir pürüzlülük iyileştirmesi ve dolayısıyla üstün bir yorulma davranışı göstermesine rağmen, pürüzlülük değeri ile yorulma ömrü arasında doğrudan bir ilişki yoktur[68]. Mekanik işlemler eklemeli imalat ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüklerini azaltmak için endüstriyel ölçekte kullanılan standart bir son yüzey işlemler haline geldiler. Lazer ile toz yatağında ergitme yöntemi ile üretilmiş farklı malzemelere uygulanan ikincil işlemlerin yüzey özellikleri üzerindeki etkisi üzerine çok sayıda çalışma mevcuttur[98, 99]. Bu işlemin, metalik eklemeli imalat parçalarının yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde azaltabildiği bildirilmiştir. Lazerle toz yatağında ergitme yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V numunelerin işlem görmede önceki ortalama yüzey pürüzlülük değeri 33.90 µm iken mekanik işlem sonrasında önemli ölçüde düşerek 0.89 µm olmuştur[100]. Eklemeli imalat ile üretilen parçaların yüzey kalitesini iyileştirmek için ara sıra kullanılan makine ile işleme olarak kategorize edilebilecek birkaç mekanik yüzey iyileştirme işlemi vardır. Bunlar öğütme[101-103] ve frezelemedir[68, 101, 104]. Şekil 2.4'te eklemeli imalat ile üretilmiş farklı metalik malzemelerin yüzey pürüzlülük değerlerini azaltmak için yukarıda belirtilen tekniklerin bazılarının etkileri görülmektedir.

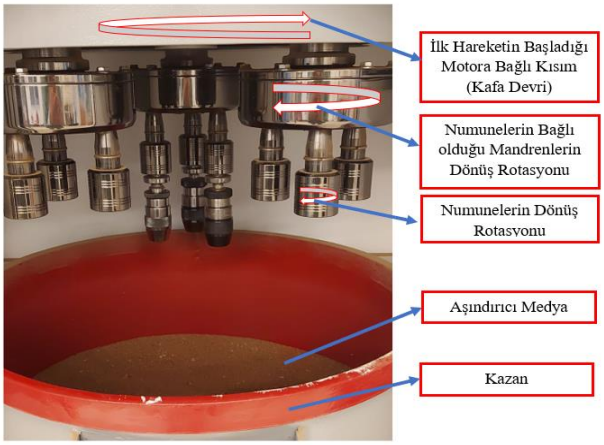


Şekil 2.9 (a) toz yatağında ergitme yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V'nin öğütme(grinding) işlemi öncesindeki hali (Ra=4,13 µm), **(b)** Ra = 130,8 nm'ye götüren 40 µm Nikel bağlı öğütücü, **(c)** Ra = 65,6 nm ile 9 µm Nikel bağlı öğütücü ve **(d)** R'li 3 µm Reçine bağlı öğütücü dahil olmak farklı öğütücüler kullanılarak öğütme işleminden sonra Ra =8,6 nm olan yüzeyden alınmıştır[102]. **(e)**Lazerle toz yatağında ergitme yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V (Ra = 17,9 µm) (f) Lazerle toz yatağında ergitme yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçanın öğütme işlemi sonrasındaki halinin (Ra = 0,3 µm) SEM görüntüleri[68].

2.2.1. Sürükleme İle Yüzey İşlem

Sürüklemeli yüzey iyileştirme bir kütle yüzey işlemi olarak birçok endüstride özellikle yüzey iyileştirme işlemlerinin ciddi maliyetlerini düşürmek için uygulanan yaygın bir toplu bitirme teknolojisi olarak kabul görmüştür [105, 106]. Endüstride yaygın olarak kullanılan bir dizi farklı kütle bitirme işlemi olmasına rağmen, kullanım kolaylığı, otomasyon ve malzeme işleme açısı gibi yönteme özgü avantajlar bu tip ikincil işlemler baskın yöntemler haline gelmiştir. Ayrıca biyomedikal ve havacılık dahil olmak üzere

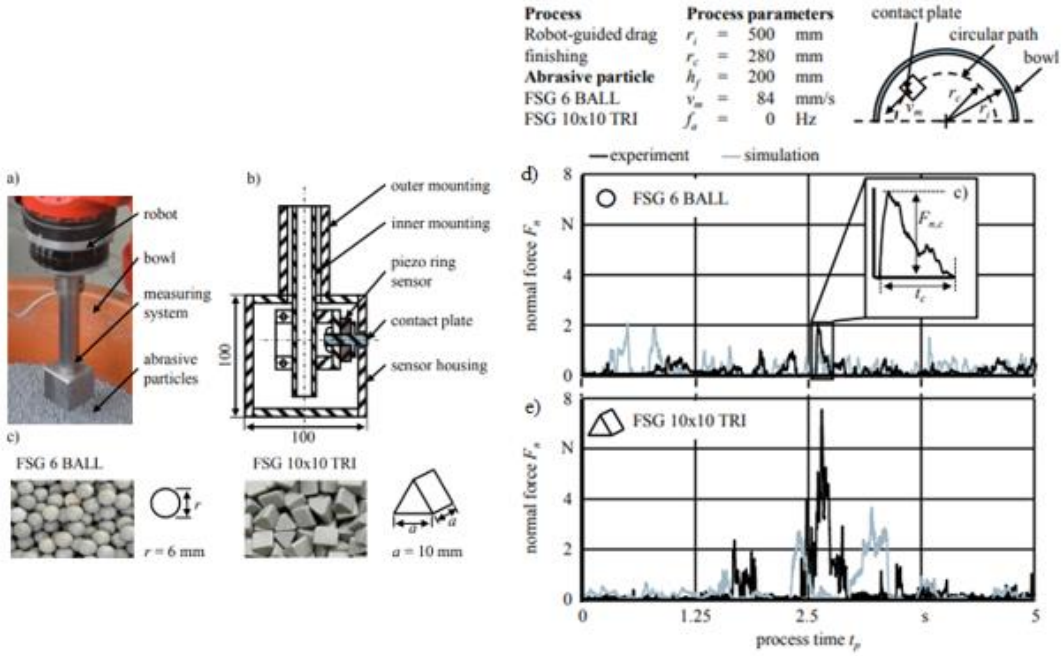
çeşitli endüstrilerdeki birçok büyük ve karmaşık parçanın yüzey iyileştirme işlemleri bu tip uygulamalarla tamamlanmıştır. İş parçası, serbest aşındırıcı taneciklerin bulunduğu bir kaba daldırılır. Aşındırıcı ortam genellikle seramik, plastik bağlı aşındırıcı parçacıklar, silisyum karbür, korundum, kuvars veya ceviz kabuklarından oluşur. Ana kolu ve uydu taşıyıcıları döndürerek, iş parçasını döner namlunun içinde hareket ettirerek, aşındırıcı ortam parçacıkları, malzeme kaldırmaya yol açan takım yüzeyi boyunca sıçrar ve sürüklenir [107]. Şekil 2.10'da sürüklemeli yüzey işlem cihazının temel bileşenleri verilmiştir. İş parçaları mandrenlere sabitlendikten sonra aşındırıcı medya dolu kazana daldırılarak dönmenin başlangıcıyla sürüklenerek yüzey iyileştirmede başlamış olur. İş parçaları sabitlendiği için, parçaların birbirine çarpışması engellenmiş olur. Bu özelliği sürüklemeli yüzey işlemi diğer toplu bitirme proseslerinden ayıran bir özelliktir. Ayrıca tanımlanmış yörüngesinde iş parçasının hızını artırarak yüksek basınç elde edilebilir, bunun sonucunda daha yüksek kaldırma oranları ve daha hızlı işleme yapılabilir [108].



Şekil 2.10. Sürükleyerek yüzey işlem cihazının temel bileşenleri.

Sürüklemeli yüzey işlemin iş parçası üzerindeki etkisi; aşındırıcı ortam, iş parçasının dönüş hızı ve iş parçasını aşındırıcı medyaya daldırma derinliğine bağlı olan basınç farkıyla kontrol edilebilmektedir. Örneğin lazerle toz yatağında ergitme yöntemi ile imal edilmiş 316L paslanmaz çeliği üzerinde yapılan bir araştırmada, iş parçası numuneleri çeşitli şekillerde hareketlendirilen aşındırıcı ortamlar içerisinde işlenmektedir. Dairesel hareket kazandırılan aşındırıcı ortam içindeki silindirik numune 2 ve 4 saat işlenmiştir. Başlangıç yüzey kalitesi Ra=7.4 µm olan iş parçasının yüzey kalitesi 2 saat sonrasında Ra=3.3 µm, 4 saat sonrasında ise Ra=2.7 µm seviyesine düşmüştür [92].

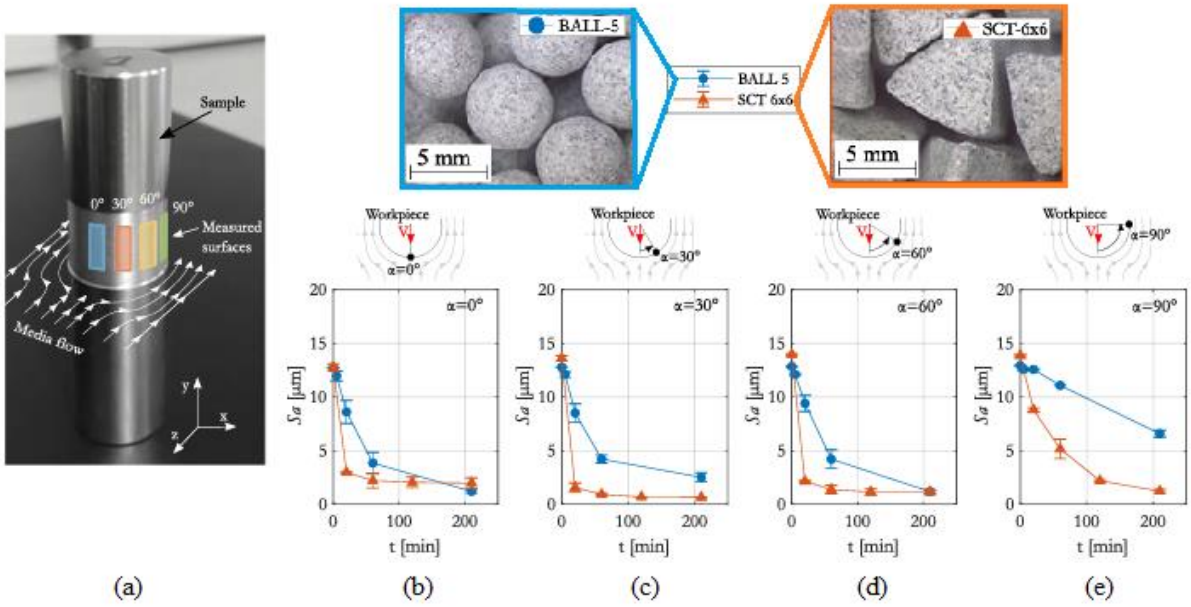
İki farklı aşındırıcı medya (6 mm çaplı küresel ve 10x10 boyutlu üçgen) ile yapılan sürüklemeli yüzey işlem sonucunda parçaya etki eden normal kuvvetler ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre üçgen aşındırıcı medya kullanıldığında teması başına ortalama maksimum normal kuvvet, küresel aşındırıcı medya kullanılarak yapılan deneylerden 4,3 kat daha yüksektir. Bu, üçgen aşındırıcıların küresel aşındırıcılardan daha büyük ve ağır olması ve açısal şekilleri nedeniyle birbirine kenetlenebilmesi ile açıklanmıştır. Şekil 9'da kullanılan sürüklemeli yüzey işlem mekanizması (Şekil 2.11a,b), kullanılan aşındırıcı medyalar(Şekil 2.11c) ve bu medyaların parçaya etki eden normal kuvvetlerinin grafikleri (Şekil 2.11d,e) verilmiştir [109].



Şekil 2.11. Çalışmada kullanılan sürüklemeli yüzey işlem cihazına genel bakış (a), kuvvet ölçüm sisteminin ayrıntılı görünümü (b), aşındırıcı medyanın türleri ve boyutları (c), ölçülen normal kuvvetlerin küresel medya için (d) ve üçgen medya için değerleri [109].

Farklı seramik aşındırıcı medyalar (küresel ve piramit), farklı daldırma derinliklerinde (h=0,12 m ve h= 0,07 m) AISI 1045 imalat çeliği sürüklemeli yüzey işleme tabii tutulmuştur. Aşındırıcıların reolojik davranışları incelendiğinde, medyanın geometrisine bağlı olarak deformasyona karşı daha yüksek bir direnç sağlayarak kendi aralarında kilitlenir. Bu durum piramit aşındırıcı medyanın, küresel aşındırıcı medyadan daha yüksek daha yüksek reolojik davranış sergilediğini ortaya koymaktadır. Aynı şekilde

medya geometrisine bağlı olarak, piramit aşındırıcı medyanın küresel aşındırıcı medyaya göre sürükleme kuvveti %126 daha yüksektir. Ayrıca piramit aşındırıcı iş parçasına, küresel aşındırıcıdan daha düşük yüzey pürüzlülüğü sağlamıştır. Şekil 2.12'de gösterildiği üzere yüzey pürüzlülüğü söz konusu olduğunda, küresel aşındırıcının etkisi yüksek yönlendirme açıları için azalır. Piramit aşındırıcı için ise, maksimum etki α =60◦ için gözlemlenmiştir. Bunlara ek olarak piramit aşındırıcı medya kullanıldığında daldırma derinliği arttıkça parça üzerindeki hidrostatik basıncın artmasına bağlı olarak sürükleme kuvvetini %53 artırmaktadır [110].



Şekil 2.12 Medya akışı (beyaz oklar) ve yönlendirme açıları (a) ve dört yönlendirme açısında 0◦(b), 30◦, (c) 60◦, (d) 90◦, (e) her iki aşındırıcı medya ile 210 dakikalık sürüklemeli yüzey işlem sonrası ölçülen S_a değerleri [110].

3. GEREÇ VE YÖNTEM

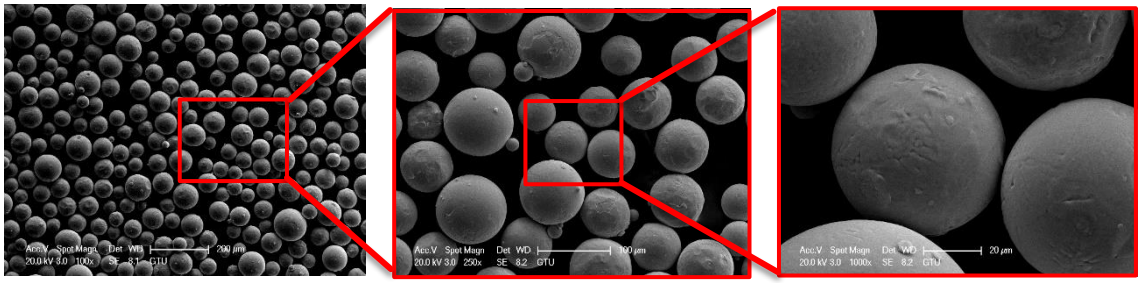
3.1. Deneysel Çalışma ve Düzenekler

Deneysel çalışma kapsamında, ASELSAN A.Ş. tarafından gaz atomize ARCAM Ti-6Al-4V alaşım tozu kullanılarak ARCAM A2X Elektron Işını İle Ergitme cihazıyla numuneler üretilmiştir. Parçaların üretim parametreleri Tablo 2.2'de verilmiştir. Üretilen parçaların geometrisi silindirik olup, boyutu Ø19*30 cm'dir.

Tablo 2.2. Ti-6Al-4V parçalarının üretim parametreleri.

Üretim Parametreleri	**Değer**
Katman Kalınlığı	0.005 mm
Işın Gücü	Max 3 kW
Uygulanan Voltaj	60 kV
Işın Hızı	10 mm/s (ön ısıtma)
	140 mm/s (kontür)
	9 mm/s (tarama)
Odak Ofseti	70 mA(ön ısıtma)
	6 mA(kontür)
	25 mA(tarama)
Hız Fonksiyonu	45 (tarama sırasındaki ışın hızını belirler)

Parçaların üretiminde kullanılan Ti-6Al-4V tozunun SEM görüntüleri Şekil 2.13'te gösterilmiştir. Tozlar düzgün küresel, çapları 40 µm ile 220 µm arasında değişmekte olup, ortalama çapı 75 µm olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte kimyasal bileşimi %5,8 Al, %3,9 V, %0.19 Fe, % 0.15 O, % 0.004 H ve kalanı Ti olarak ölçülmüştür. Bu değerler ASTM F2924-14 standartlarını karşılamaktadır.



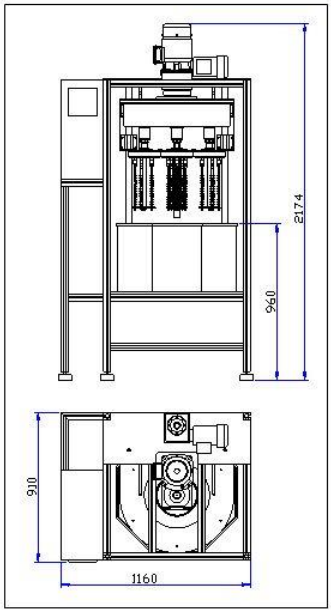
Şekil 2.13. Ti-6Al-4V alaşım tozu morfolojisini gösteren SEM görüntüleri (100x, 250x, 1000x)

Çalışma kapsamında, elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçalar için sürükleme ile yüzey işlem süreçleri geliştirmek amaçlanmıştır. Sürükleme ile yüzey işlemin iş parçası üzerindeki etkisi; aşındırıcı ortam, işlem süresi, iş parçasının dönüş hızı ve iş parçasını aşındırıcı medyaya daldırma derinliğine bağlı olan basınç farkıyla kontrol edilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında 3 farklı hız (30 rpm, 60 rpm, 90 rpm), 3 farklı işlem süresi (40 dk, 120 dk, 360 dk) ve 3 farklı daldırma derinliğinde (1.25 cm, 2.5 cm, 5 cm) çalışılmıştır. Sürükleme ile yüzey işlemde 06x06 Yıldız Üçgen seramik aşındırıcı kullanılmıştır.



Şekil 2.14. Sürükleme ile yüzey işlemde kullanılan 06x06 Yıldız Üçgen seramik aşındırıcı

Yapılan çalışmalar kapsamında ERBA MÜHENDİSLİK MAKİNA SAN. ve TİC. LTD. ŞTİ.'ne ait sürükleme ile yüzey işlem makinesi kullanılmıştır. Makinenin teknik özellikleri ve görseli şekil 2.15' te görülmektedir.



Tip / Type :	EST 420-100
Kazan Hacmi / Work Bowle :	95 lt
Motor Gücü / Power	1.47 kW
Devir / Speed	Ayarlanabilir
Boyutlar / Dimension	1160x910x2175
Ağırlık / Weight :	550 kg
Daldırma Derinliği Vertical Dist	400mm
Kafa / Adaptör Sayısı /	4 / 20
Farklı boyut ve hızlarda üretim yapılır. Diffrent size and speed can be produced.	

Şekil 2.15. Sürükleme ile yüzey işlem makinesi teknik özellikleri

Numunelerin aritmetik ortalama yüzey pürüzlülükleri (Ra) yüzey pürüzlülükleri MITUTOYO SJ210 cihazı ile, ISO 1997 standardına uygun ölçülmüştür. Tüm değerler parçanın farklı bölgelerinden 10 ölçümün ortalaması alınarak hesaplanmıştır. MITUTOYO SJ210 yüzey pürüzlülükleri ölçüm cihazı Şekil 2.16'da görülmektedir.



Şekil 2.16. MITUTOYO SJ210 yüzey pürüzlülükleri ölçüm cihazı

Alansal aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü (Sa) değerleri, yüzey topografileri, aşınma izleri görüntüleri için şekil 2.17'deki KEYENCE dijital mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 2.17. KEYENCE dijital mikroskop

Mikroyapı görüntüleri için, parçalar Şekil 2.18'deki MİKROTEST MULTİCUT SENSE hassas kesme cihazı kullanılarak kesilmiş ve soğuk kalıba alınmıştır. Ardından şekil 2.19'daki MULTİPOL ADVANCED PLUS zımparalama ve parlatma cihazında sırasıyla elmas zımpara, 15-30-60 µm hassasiyetli manyetik zımpara ve son olarak 50 nm elmas partiküllü parlatma solüsyonuyla manyetik parlatma keçesi kullanılarak parlatılmıştır.



Şekil 2.18. MİKROTEST MULTİCUT SENSE hassas kesme cihazı



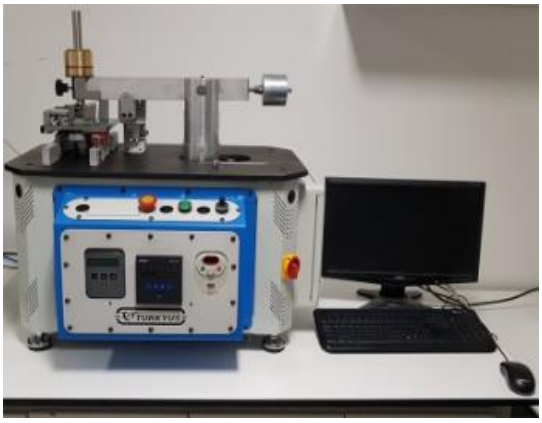
Şekil 2.19. MULTİPOL ADVANCED PLUS zımparalama ve parlatma cihazı

Yüzey ve yüzey altı özelliklerini incelemek için parlatılmış parçalar, 30 saniye süre ile Kroll dağlama solüsyonuna (92 ml saf su, 6 ml HNO_3 ve 2 ml HF [111]) tabii tutulmuştur. Yüzey ve yüzey altı incelemeleri için dijital optik mikroskobun yanı sıra, FEI (PHILIPS) XL30 SFEG SEM taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Hazırlanan numunelerin yüzey ve yüzey altı sertlikleri ISO 6507-2 standardına uygun olarak, şekil 2.20'deki FUTURE-TECH FM-310e Vickers (HV) mikrosertlik cihazıyla ölçülmüştür. Ölçümler 50 gf yük ile 15 saniye uygulanarak beşer kez tekrar edilmiş ortalama değerler alınmıştır. XRD analizleri 2 Theta ölçüm aralığı 10-90° seçilmiş, BRUKER SMART APEX II QUAZAR X-Işını tek kristal kırınım cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dalga boyu 1.54 A, akım 40 mA, voltaj 40 Kv olan Cu Kα katot kullanılmıştır.



Şekil 2.20. FUTURE-TECH FM-310e Vickers (HV) mikrosertlik cihazı

Aşınma testleri ASTM G133 standartlarına göre, TURKYUS RTW lineer aşındırma cihazında gerçekleştirilmiştir. Numuneler, 20°C oda sıcaklığında ve nem düzeyinde, 15N yük altında, 6 mm sürtünme mesafesinde (stroke lenght) ve 30 dakika süreyle aşınma testine tabi tutulmuştur. Aşındırıcı malzeme olarak ise 6 mm çapında tungsten karbür bilye (WC %94, CO %6) kullanılmıştır. Şekil 2.21'de aşınma cihazı gösterilmektedir.

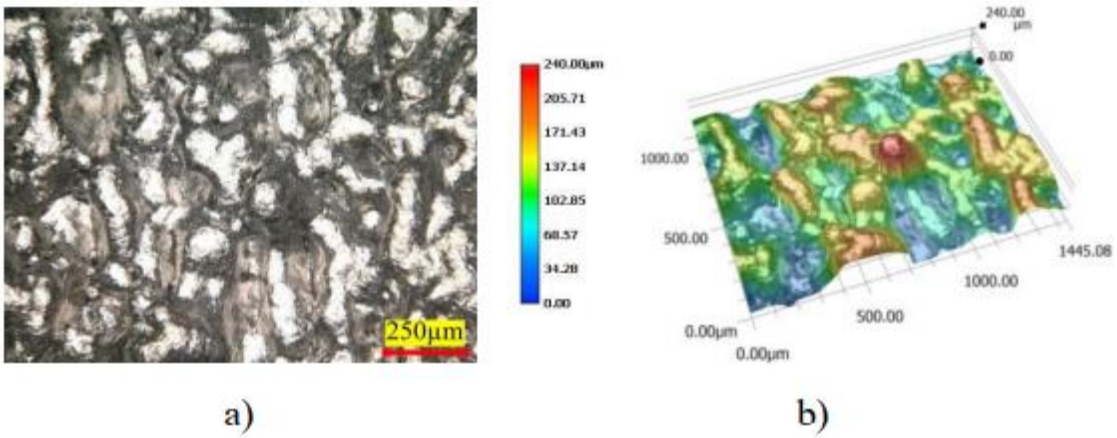


Şekil 2.21. TURKYUS RTW lineer aşındırma cihazı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

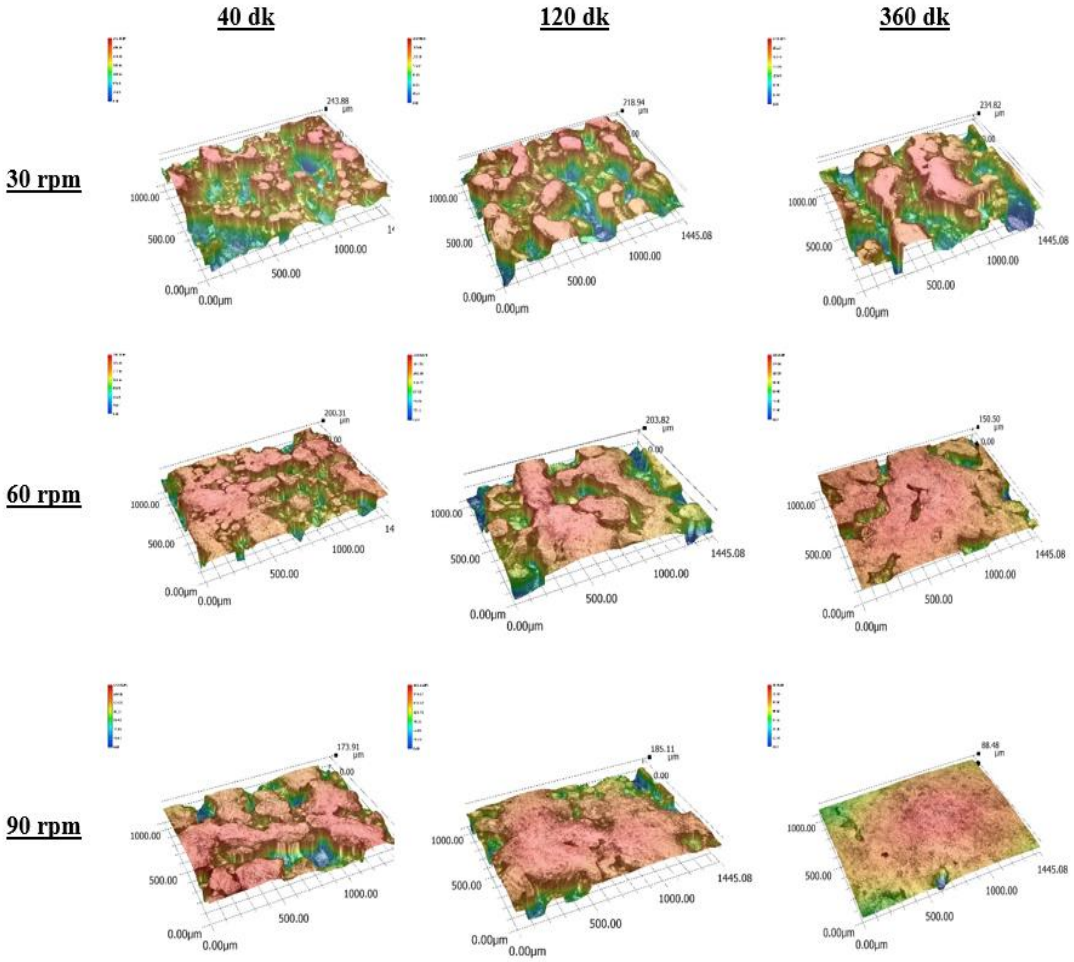
4.1. Yüzey Topografyası ve Pürüzlülük Analizi

Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçaların işlem görmemiş durumdaki topografyası Şekil 2.22'de verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı üzere tepe ve çukurlar arasındaki farkın fazla oluşu yüksek yüzey pürüzlülüğüne sebep olmuştur.



Şekil 2.22. Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçaların a)iki boyutlu ve b) üç boyutlu görüntüleri

Elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V parçaların sürükleme ile yüzey işlem gördükten sonraki topografyaları şekil 22'de gösterilmiştir. Şekil 2.23'de sabit daldırma derinliğinde (1.25 cm), 3 farklı işlem süresi ve 3 farklı hızda sürükleme ile yüzey işlem uygulanmış Ti-6Al-4V parçaların optik mikroskop ile alınmış 3 boyutlu görüntüleri mevcuttur.



Şekil 2.23. Sabit daldırma derinliğinde (1,25 cm), 3 farklı işlem süresi ve 3 farklı hızda sürükleme ile yüzey işlem uygulanmış Ti-6Al-4V parçaların optik mikroskop ile alınmış 3 boyutlu görüntüleri

Sürükleme ile yüzey işlem parametreleri çalışma hızı, İşlem süresi, daldırma derinliği ve aşındırıcı ortamdır. Sürükleme ile yüzey işlemin iş parçası üzerindeki etkisi; aşındırıcı ortam, işlem süresi, iş parçasının dönüş hızı ve iş parçasını aşındırıcı medyaya daldırma derinliğine bağlı olan basınç farkıyla kontrol edilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında 3 farklı hız (30 rpm, 60 rpm, 90 rpm), 3 farklı işlem süresi (40 dk, 120 dk, 360 dk) ve 3 farklı daldırma derinliğinde (1.25 cm, 2.5 cm, 5 cm) çalışılmıştır.

Sürükleme ile yüzey işlem sonrasında elde edilebilecek yüzey pürüzlülüğünü tahmin edebilmek için bir takım ampirik yaklaşımlar bulunmaktadır. Hashimoto ve ark. [1] yaptığı çalışmalar sonucu elde ettikleri yaklaşımlar Denklem 1 ve Denklem 2'te verilmiştir. Bu formüllerde *Ra* yüzey pürüzlülüğünü, I_r ilk pürüzlülük değerini, D_r limit pürüzlülük değerini, *t* işlem zamanını, *T* optimum zamanı ifade etmek üzere;

$$R_a(t) = (I_r - D_r)e^{\frac{-t}{T}} + D_r \quad (1)$$

$$R_a(T) = (I_r - D_r)e^{-l} + D_r \quad (2)$$

olarak gösterilmiştir. Bu formülleri uygularken öncelikle yüzey pürüzlülüğünün inebileceği limit değeri bulunur (D_r). Sonrasında işlem süresinin zaman sabitine eşit olduğu formüle (2) bu limit değer ve diğer değişkenler yazılarak *Ra* değeri bulur. Sonra deneysel olarak bu Ra değerini elde ettiğimiz zaman da ana formüldeki (1) optimum zamanı (T) verir. Böylece elimizdeki formülle işlem süresini değiştirdiğimizde farkı süreler için Ra değerini hesaplayabiliriz. Bu çalışma kapsamında işlem görmemiş numunelerin ilk pürüzlülük değeri (I_r)=40 olarak ölçülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda yüzey pürüzlülüğünün inebileceği limit değer (D_r)=0,1 olarak kabul edilmiştir. Bu sayısal veriler denklem 2' de yerine koyulduğunda *Ra*=14,36 µm olarak bulunur. Deneysel olarak bu *Ra* değerinin bulunduğu süre bize her bir parametre seti için optimum süreyi (T) vermektedir. Deneysel olarak her bir parametre seti için optimum süre (T) ayrı ayrı bulunmuştur. Bulunan optimum süreler ve diğer değişkenler formül 1' de yerine yazılarak her bir işlem süresi için *Ra* değeri hesaplanmış ve bu değerler ölçülen pürüzlülük değerleri ile Tablo 2.3' de verilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda bulunan optimum zamanlar (T) dakika cinsinden Tablo 2.4'te verilmiştir. Deneysel veriler ve hesaplanan verilerin ortalama yüzde uyumu %69,42 olarak bulunmuştur.

Tablo 2.3. Pürüzlülük değerleri

Daldırma Derinliği=1.25 cm									
Hız (rpm)	30			60			90		
Süre (dk)	40	120	360	40	120	360	40	120	360
Ölçülen Pürüzlülük (Ra)	34.709	30.996	24.078	31.235	25.181	13.0141	19.415	12.260	3.172
Hesaplanan Pürüzlülük (Ra)	38.432	35.479	27.913	35.009	26.819	12.0617	25.654	10.558	0.752
Yüzde Uyum	89.274	85.539	84.073	87.918	93.497	92.681	67.863	86.116	23.707

Daldırma Derinliği=2.5 cm									
Hız (rpm)	30			60			90		
Süre (dk)	40	120	360	40	120	360	40	120	360
Ölçülen Pürüzlülük (Ra)	32.737	29.585	23.528	26.969	22.204	11.200	14.789	5.4368	1.830
Hesaplanan Pürüzlülük (Ra)	38.020	34.431	25.512	35.009	26.819	12.061	14.727	2.0104	0.024
Yüzde Uyum	83.770	83.622	91.567	70.186	79.216	92.313	99.580	36.977	1.360
Daldırma Derinliği=5 cm									
Hız (rpm)	30			60			90		
Süre (dk)	40	120	360	40	120	360	40	120	360
Ölçülen Pürüzlülük (Ra)	28.509	23.069	15.881	21.157	12.912	3.2093	12.764	2.7179	0.767
Hesaplanan Pürüzlülük (Ra)	36.005	29.173	15.522	26.819	12.061	1.1124	8.0918	0.3491	0.02
Yüzde Uyum	73.707	73.536	97.738	73.241	93.413	34.6617	63.3954	12.8444	2.6055

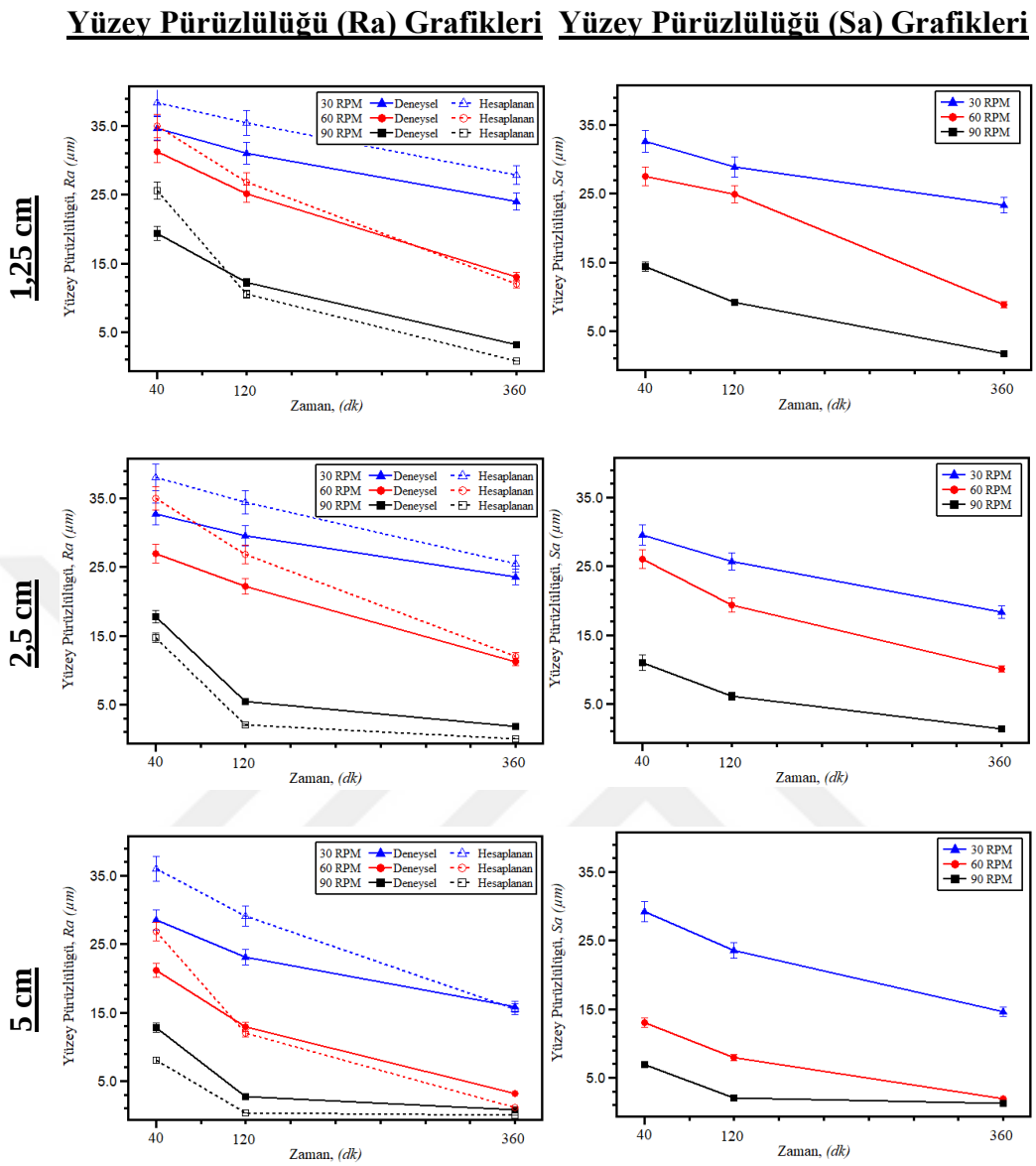
Tablo 2.4. Optimum zaman (T)

	Hız (rpm)		
Daldırma Derinliği (cm)	30	60	90
1.25	1000	320	90
2.5	800	300	40
5	380	100	25

Sürükleme ile yüzey işlem sonrasında elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri literatürdeki çalışmalara paralel olarak oldukça iyi seviyelere gelmiştir. Farklı işlem parametreleri denenerek optimum parametrelerin bulunmaya çalışıldığı birçok makale mevcuttur. Bu parametrelerden işlem hızının artırılması pürüzlülük değerini artırma da son derece önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada da ortaya konulduğu gibi işlem hızının arttırılması pürüzlülük değerlerini oldukça düşürmektedir. Örneğin; 5 cm daldırma derinliğinde 40 dakikalık çalışma süresi sonunda hız 30 rpm iken Ra=28.5095 µm, hız 60 rpm iken Ra=21.1578 µm'dir. Görüldüğü üzere yalnızca hızı iki katına çıkarmak bile yaklaşık %45 daha iyi bir sonuç ortaya çıkarmıştır. Sürükleme ile yüzey işlemin de aşındırıcı ve iş parçası arasındaki darbe hızının artması yüksek kinetik enerjiye sebep olur ve dolayısıyla aşındırma potansiyelini de artırdığı için yüzey pürüzlülüğünü hızla düşürür. Literatürdeki birçok çalışma da bunu destekler biçimdedir [94, 112, 113].

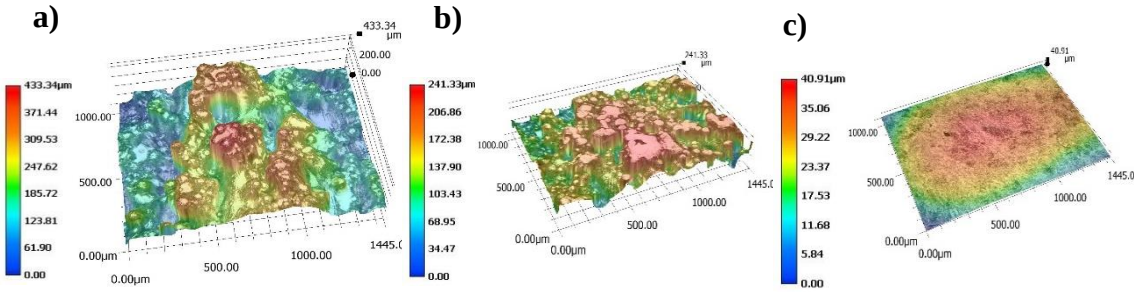
Sürükleme ile yüzey işlemin bir diğer parametresi olan işlem süresinin artması da pürüzlülük değerinin düşürme konusunda olumlu sonuçlar vermiştir. İşlem süresinin artması parçaya uygulana dinamik kuvvetlerin daha uzun süre uygulanması sonucu aşınma potansiyelini arttırarak pürüzlülük değerini düşürmektedir. Örneğin; daldırma derinliği 5 cm, hız 90 rpm iken 40 dakika sonunda Ra=12.764 µm, 120 dakika sonunda Ra=2.7179 µm olarak ölçülmüştür. Sadece sürenin 3 katına çıkarılması bile pürüzlülük değerinde yaklaşık %80'lik bir iyileşmeye sebep olmuştur.

Sürükleme ile yüzey işlem parametrelerinden olan daldırma derinliği üzerine literatürde çalışmalara rastlanmamıştır. Bu yaptığımız çalışmada üç farklı daldırma derinliğinde deneyler yapılarak derinliğin parçanın yüzey ve yüzey altı özellikleri üzerine olan etkileri ortaya konulmuştur. Derinlik artışı parça üzerindeki aşındırıcı kütlesini artırdığından parçaya uygulanan kuvvette artmaktadır. Artan kuvvet etkisiyle parçanın yüzeyin de daha fazla aşınma meydana gelerek pürüzlülük değerlerin de iyileşmeye sebep olmuştur. Tablo 2.3 'de bu sonuç açıkça görünmektedir. Örneğin; hızın 90 rpm, sürenin 360 dk olduğu parçalar için daldırma derinliği 1.25 cm iken Ra= 3.1729 µm iken daldırma derinliği iki katına çıkartılıp 2.5 cm derinlikteyken Ra= 1.8306 µm olarak ölçülmüştür. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere daldırma derinliği oldukça etkili bir parametredir.



Şekil 2.24. Daldırma derinliği 1.25, 2.5 ve 5 cm olacak şekilde uygulanan sürükleme ile yüzey işlem sonrası ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri grafikleri.

Elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve aşınma direnci sonuçları birlikte incelendiğinde; sürükleme ile yüzey işlem parametrelerinde parça üzerinde en etkisiz olan parametre kombinasyonu daldırma derinliği 1.25 cm, işlem hızı 30 rpm, işlem süresi 40 dk olduğundadır. En etkili parametre kombinasyonu ise; daldırma derinliğinin 5 cm, işlem hızının 90 rpm, işlem süresinin ise 360 dk olduğu durumdur. Şekil 2.25'te bu parametrelerde sürükleme ile yüzey işlem uygulandığında elde edilen yüzeyin topografileri verilmiştir. Sürükleme ile yüzey işlem parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, elde edilen yüzeylerin farklılıkları göz önünde bulundurulduğunda oldukça önem taşımaktadır.



Şekil 2.25. İşlem görmemiş (a), en kötü (b) ve en iyi (c) sonuç veren sürükleme ile yüzey işlem sonrası elde edilen yüzey topografileri.

Temel fizik prensiplerinden faydalanarak sürükleme ile yüzey iyileştirme makinesinin parçayı sürüklemek için harcadığı enerjinin miktarı, parçanın aşınma potansiyelini etkilemektedir. Dolayısıyla aşınma davranışı kuvvet, hız ve zamanla ilişkilendirilir. Aşınma potansiyelinin artışı da daha düşük yüzey pürüzlülüklerine sebep olur. Temel fizik prensiplerinden yararlanılan formüller Denklem 3, Denklem 4, Denklem 5, Denklem 6 ve Denklem 7'de verilmiştir. Bu formüllerde *E* enerji, *P* güç, *t* zaman, *W* iş, *F* kuvvet, *x* yol ve *V* hızı ifade etmektedir.

$$E = P.t \tag{3}$$

$$P = W/T \tag{4}$$

$$W = F.x \tag{5}$$

$$x = V.t \tag{6}$$

$$E = F.V.t.t/t = F.V.t \tag{7}$$

Havacılık uygulamaları için yüzey kaliteleri için standart yönergeler, tipik olarak, döküm veya dövme parçalar için *Ra* = 3.2 µm veya daha düşük bir yüzey pürüzlülüğü gerektirir [68]. Tablo 1'deki değerler incelendiğinde bu değere en yakın olan parametreler (optimum parametreler):

Daldırma derinliği =5 cm / Hız=60 rpm / Süre=360 dk, Ra=3.2093 µm

Daldırma derinliği =1.25 cm / Hız=90 rpm / Süre=360 dk, Ra=3.1729 µm

Daldırma derinliği =5 cm / Hız=90 rpm / Süre=120 dk, Ra=2.7179µm

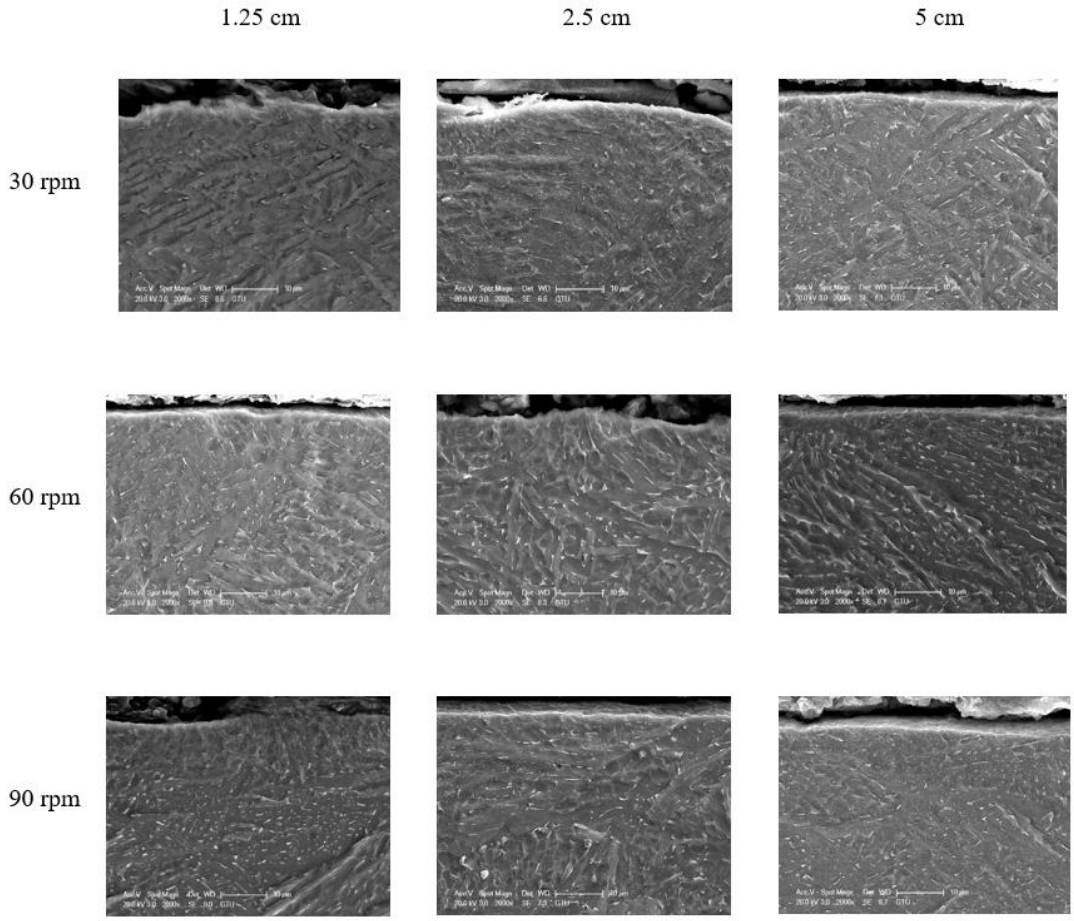
Daldırma derinliği =2.5 cm / Hız=90 rpm / Süre=360 dk, Ra=1.8306 µm

Daha düşük pürüzlülük değerlerinin olduğu parametre setleri mevcuttur. Ancak iş parçası yüzeyinin aşırı finişlenmesi gibi büyük sakıncaları önlemek için aşınma potansiyelinin doğru bir şekilde kontrol edilmesi gerekir [113]. Gerektiğinden daha düşük pürüzlülük değerleri birçok açıdan istenmemektedir. Ayrıca parçanın pürüzlülük değerleri düşerken çapında da değişimler meydana geldiği için boyutsal doğruluktan sapmalarda meydana

gelmektedir. Bu yüzden parçaların üretim aşamasında bu durum göz önünde bulundurularak üretim yapmak daha uygun olacaktır.

4.2. Mikroyapı ve SEM Analizi

Elektron ışını ergitme yöntemi ile üretilmiş olan Ti-6Al-4V parçalara farklı işlem parametrelerinde (daldırma derinliği, işlem hızı, süre) uygulanan sürükleme ile yüzey işlem sonrasında kesilerek bakalite alınan ve dağlama işlemleri gerçekleştirilen parçaların dijital optik mikroskop altında alınan mikroyapı görüntüleri bu başlık altında incelenmiştir.

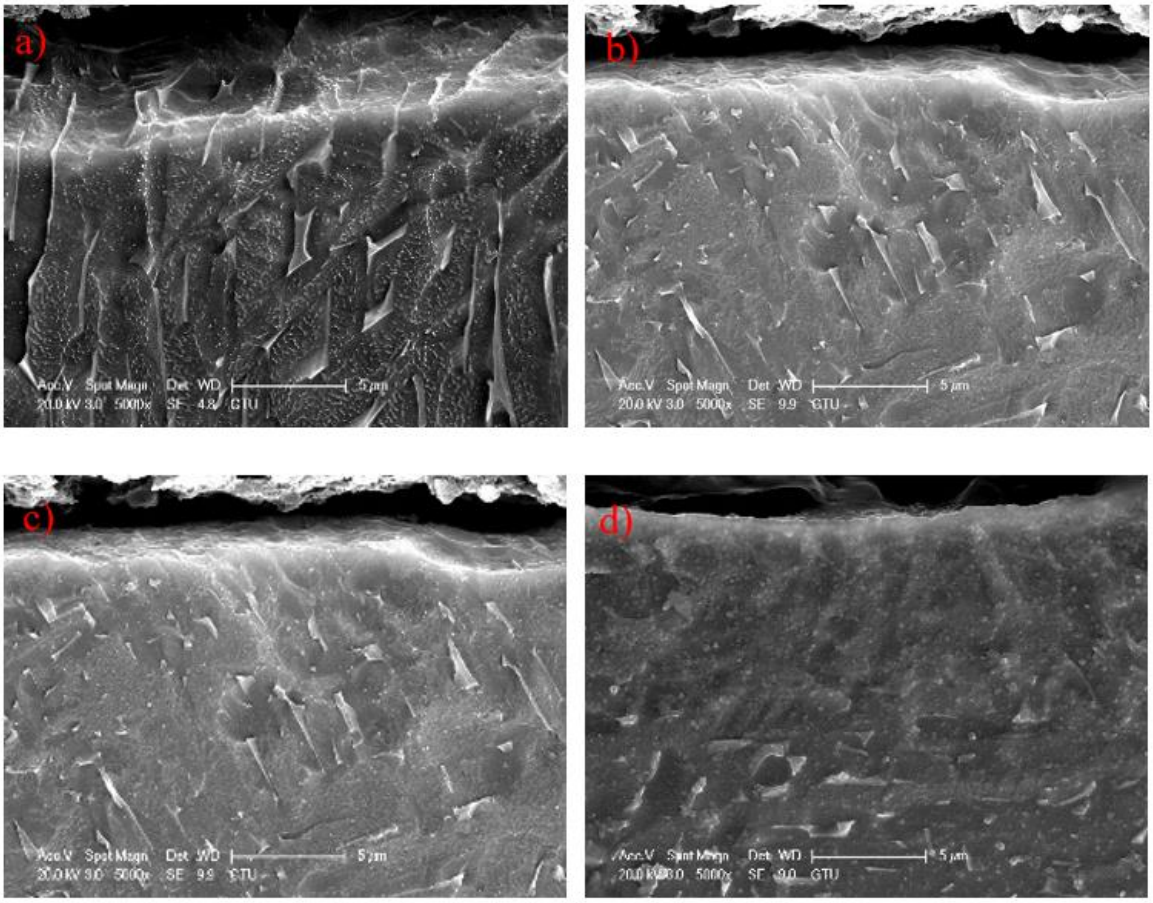


Şekil 2.26. 3 farklı daldırma derinliği ve 3 farklı hız için 360 dakika çalışma süresinde sürükleme ile yüzey işleme tabi tutulmuş olan Ti-6Al-4V parçaların SEM görüntüleri(2000x).

Elektron ışını ergitme yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4 V parçaların yüzey ve yüzey altı incelemeleri için FEI (PHILIPS) XL30 SFEG SEM taramalı elektron mikroskobu

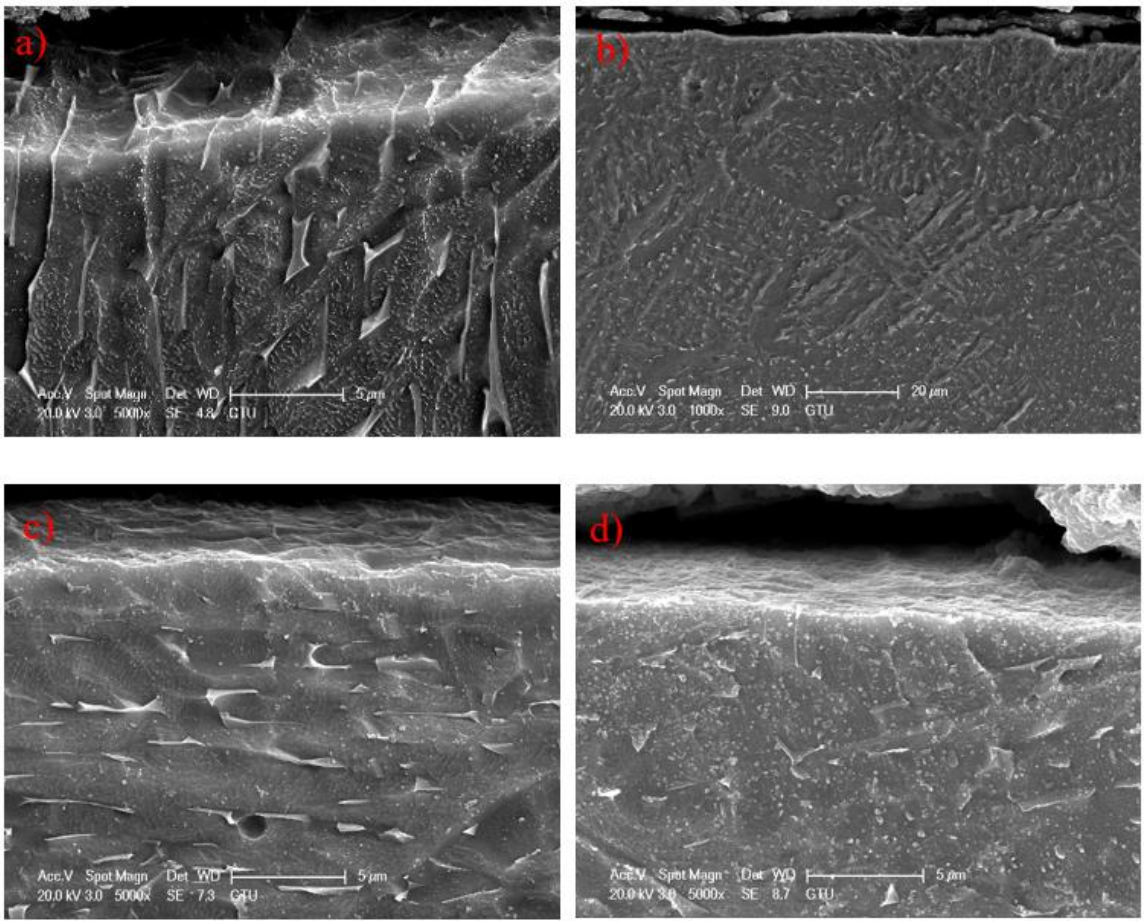
kullanılmıştır. 3 farklı daldırma derinliği ve 3 farklı hız için 360 dakika çalışma süresinde sürükleme ile yüzey işleme tabi tutulmuş olan Ti-6Al-4V parçaların SEM görüntüleri Şekil 2.26'da gösterilmiştir.

Şekil 2.26'da da görüldüğü üzere işlem hızının artması parçaya uygulanan kuvvetlerin artmasına ve daldırma derinliğinin artması sonucu parça üzerindeki basıncın artmasına sebep olarak yüzeyde tane küçülmesine sebep olmaktadır. Şekil 2.27(a), (b), (c) ve (d)'de tane küçülmesi daha net bir şekilde görülmektedir. Şekil 24'te sabit daldırma derinliğinde (1,25) ve sabit işlem sürelerinde (360 dk) 3 farklı hızda sürükleme ile yüzey işlem uygulanmış 5000x büyütülmüş parçalar verilmiştir.



Şekil 2.27 (a) işlem görmemiş EBM ile üretilmiş Ti-6Al-4V parça (5000x), **(b)** sürükleme ile yüzey işlem çalışma hızı 30 rpm olan parça (5000x), **(c)** sürükleme ile yüzey işlem çalışma hızı 60 rpm olan parça (5000x) ve **(d)** sürükleme ile yüzey işlem çalışma hızı 90 rpm olan parça (5000x)

Şekil 2.27'de görüldüğü üzere diğer parametreler sabit tutulup sadece çalışma hızının artması işlem gören parçanın α lamel kalınlığını azaltmakta ve dolayısıyla malzemenin sertliğini artırmaktadır. Yine benzer bir etki daldırma derinliğinin artmasıyla da meydana gelmektedir. Şekil 2.28(a), (b), (c) ve (d)'de de sabit çalışma hızında (90 rpm) ve sabit işlem sürelerinde (360 dk) 3 farklı daldırma derinliğinde sürükleme ile yüzey işlem uygulanmış 5000x büyütülmüş parçalar verilmiştir.



Şekil 2.28 (a) işlem görmemiş EBM ile üretilmiş Ti-6Al-4V parça (5000x), **(b)** 1.25 cm daldırma derinliğinde sürükleme ile yüzey işlem uygulanmış olan parça (5000x), **(c)** 2.5 cm daldırma derinliğinde sürükleme ile yüzey işlem uygulanmış olan parça (5000x), ve **(d)** 5 cm daldırma derinliğinde sürükleme ile yüzey işlem uygulanmış olan parça (5000x)

Diğer parametreler sabit tutularak yalnızca daldırma derinliğini arttırmanın parça üzerinde oluşturduğu basıncı artırarak yüzeyi ezici bir hareket sergilemesine ve dolayısıyla parçaların işlem gören yüzeylerinin kısıtlı bir derinlik için bile olsa daha ince bir yapıya dönüştüğü şekil 2.28'deki görsellerde de açıkça görülmektedir.

Hall–Petch İlişkisi

Hall–Petch ilişkisi, bir malzeme için akma noktası ve tane büyüklüğü arasındaki ilişkiyi tanımlar.

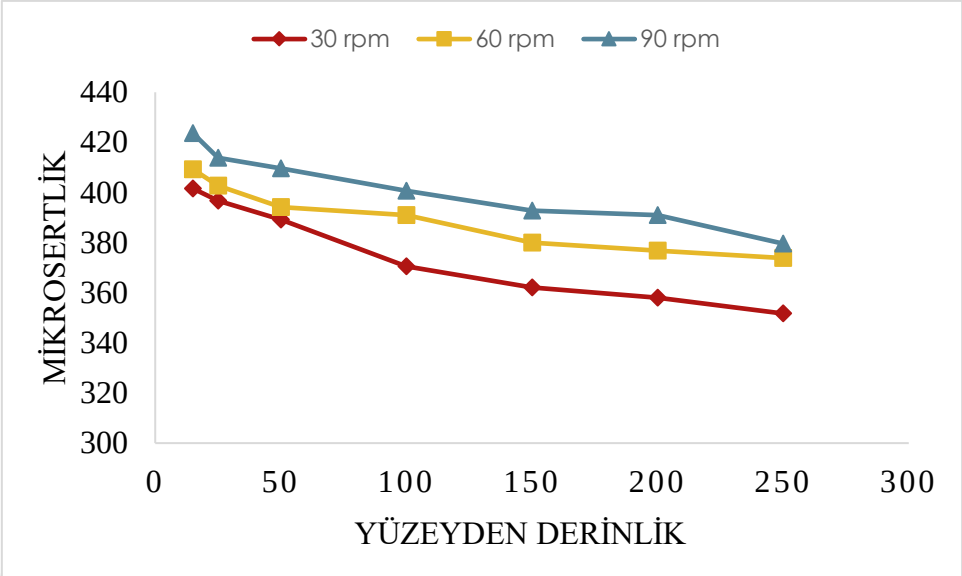
$\sigma_T = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$

σ_0 = monokristalde kayma yer değiştirmeleri (dislokasyon) sağlayacak belirli bir kayma stresi, K=her malzeme için özel bir sabit ve σ_T = akma noktası şeklinde tanımlanmaktadır[114].

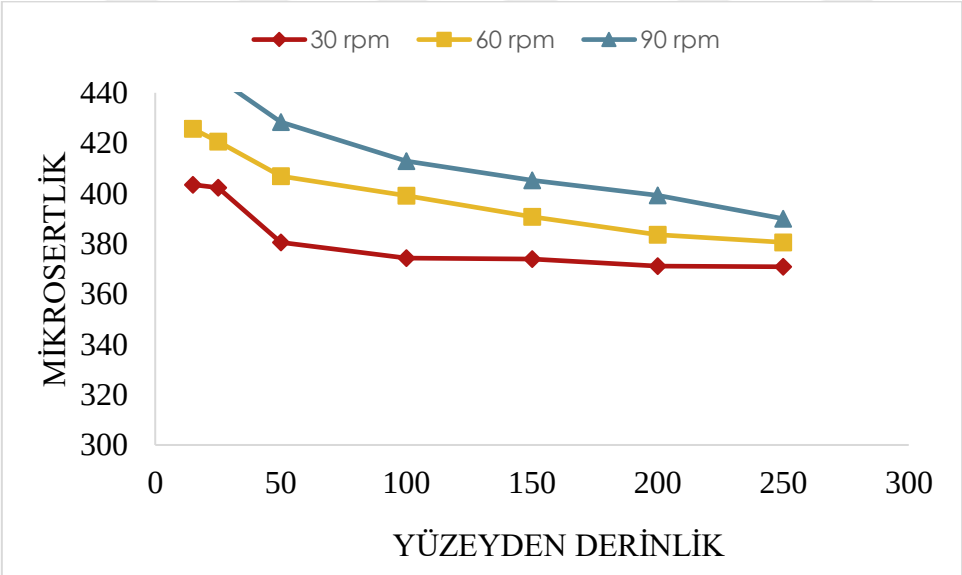
Tane sınırları dislokasyon hareketine bir engel oluşturmaktadır. Dolayısıyla tane boyutu küçüldükçe tane sınırı miktarı da artacağı için dislokasyon hareketine engel sayısı da artmış olacak. α lamel kalınlığı azaldıkça sertlikteki artışı da bu şekilde açıklamış oluruz.

4.3. Mikrosertlik

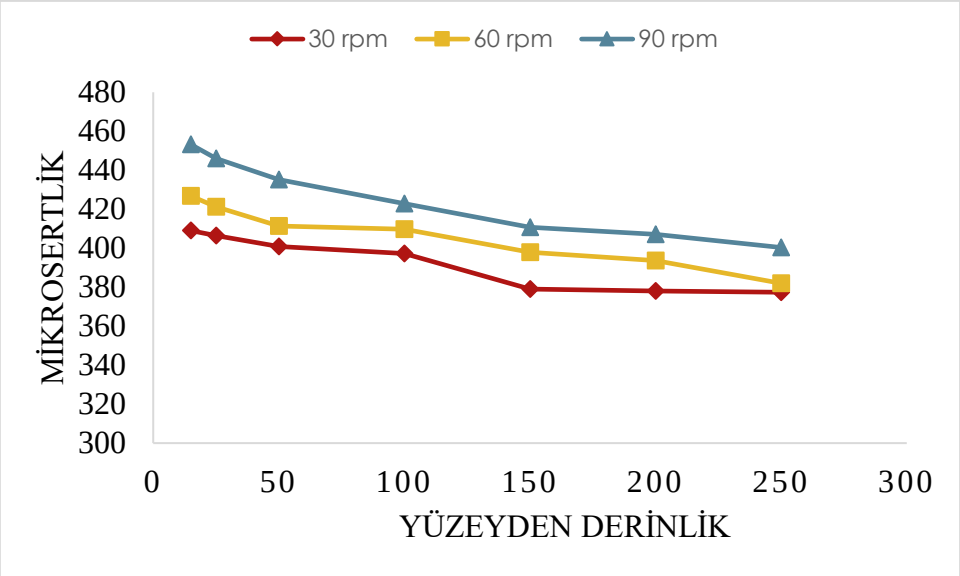
Sürükleme ile yüzey işlemden sonra parçaların sertlik değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. Yüzeyin hemen altından (15µm) itibaren ölçülmeye başlanılan sertlik değerleri 250 µm derinliğe kadar ölçülmüştür. Her derinlik için ölçümler 3 kez tekrarlanmış olup aritmetik ortalaması alınmıştır. Elektron demeti ile ergitme metoduyla üretilen Ti-6Al-4V parçalara uygulanan sürükleme ile yüzey işlem literatürde mevcut olup bu malzemelerin yüzey ve yüzey altı bölgelerde sertleşme eğilimi gösterdiği görülmektedir[50]. Şekillerde görüldüğü üzere işlenmiş yüzeyin hemen altından itibaren sertlik artışı meydana gelmiştir. Üretim sonrası 370 HV sertliğe sahip olan Ti-6Al-4V parçalarının sürükleme ile yüzey iyileştirme işlemi sonrası sertlik değerleri yüzeye yakın kısımlarda ortalama 40 Vickers artmış, yüzeyden derine doğru inildikçe ise sürükleme ile yüzey iyileştirme işleminin etkisinin azalmasından dolayı sertlik değerleri düşmektedir. Yapılan sertlik testleri sonucunda sürükleme ile yüzey iyileştirme işleminin yaklaşık 150 µm'ye kadar etki ettiği görülmüştür. Ayrıca işlem hızı, süresi ve daldırma derinliği gibi faktörler sertliği etkilediği gibi sertlik atışının etki alanını da etkilemektedir[50].



Şekil 2.29. Daldırma derinliği=1.25, işlem süresi=360 dakika olan 3 farklı hızdaki sürükleme ile yüzey iyileştirme işleminin mikrosertlik grafiği

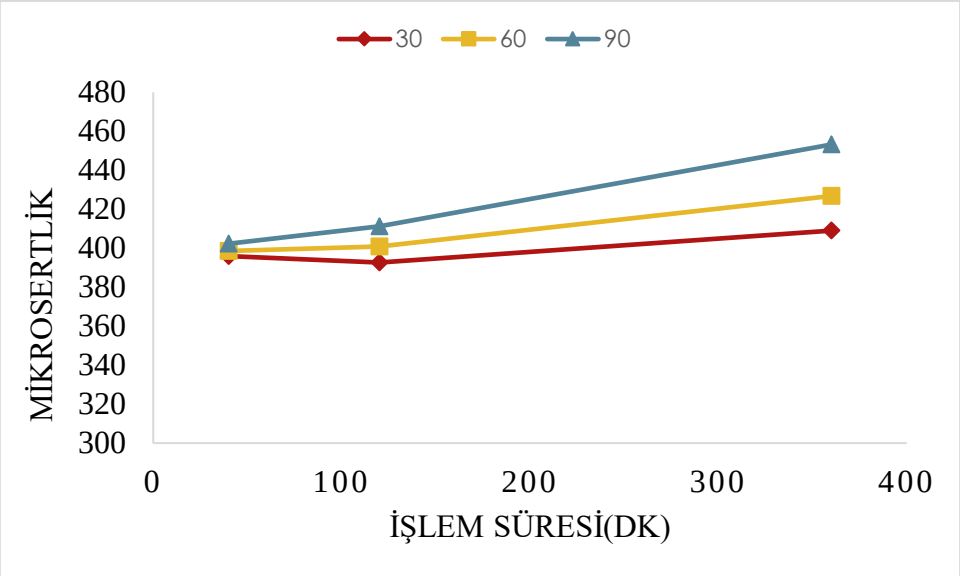


Şekil 2.30. Daldırma derinliği=2.5, işlem süresi=360 dakika olan 3 farklı hızdaki sürükleme ile yüzey iyileştirme işleminin mikrosertlik grafiği



Şekil 2.31. Daldırma derinliği=5, işlem süresi=360 dakika olan 3 farklı hızdaki sürükleme ile yüzey iyileştirme işleminin mikrosertlik grafiği

Şekil 2.29, 2.30 ve 2.31'de de görüldüğü gibi hızın ve derinliğin artışı mikrosertlik değerlerini de arttırmaktadır. Aynı şekilde işlem süresinin artması da mikrosertlik değerini artırmaktadır. Elektron demeti ile ergitme metoduyla üretilen Ti-6Al-4V parçalara daldırma derinliği=5 cm iken 15µm uzaklıktan ölçülen mikrosertlik değerlerinin süre ve hız faktörlerine göre değişimi Şekil 29'da gösterilmiştir. Sabit daldırma derinliğinde hız ve süre artırıldığında her ikisi de mikrosertlik artışını olumlu etkilemiştir. Bu durum şekil 2.32'de açıkça görülmektedir.



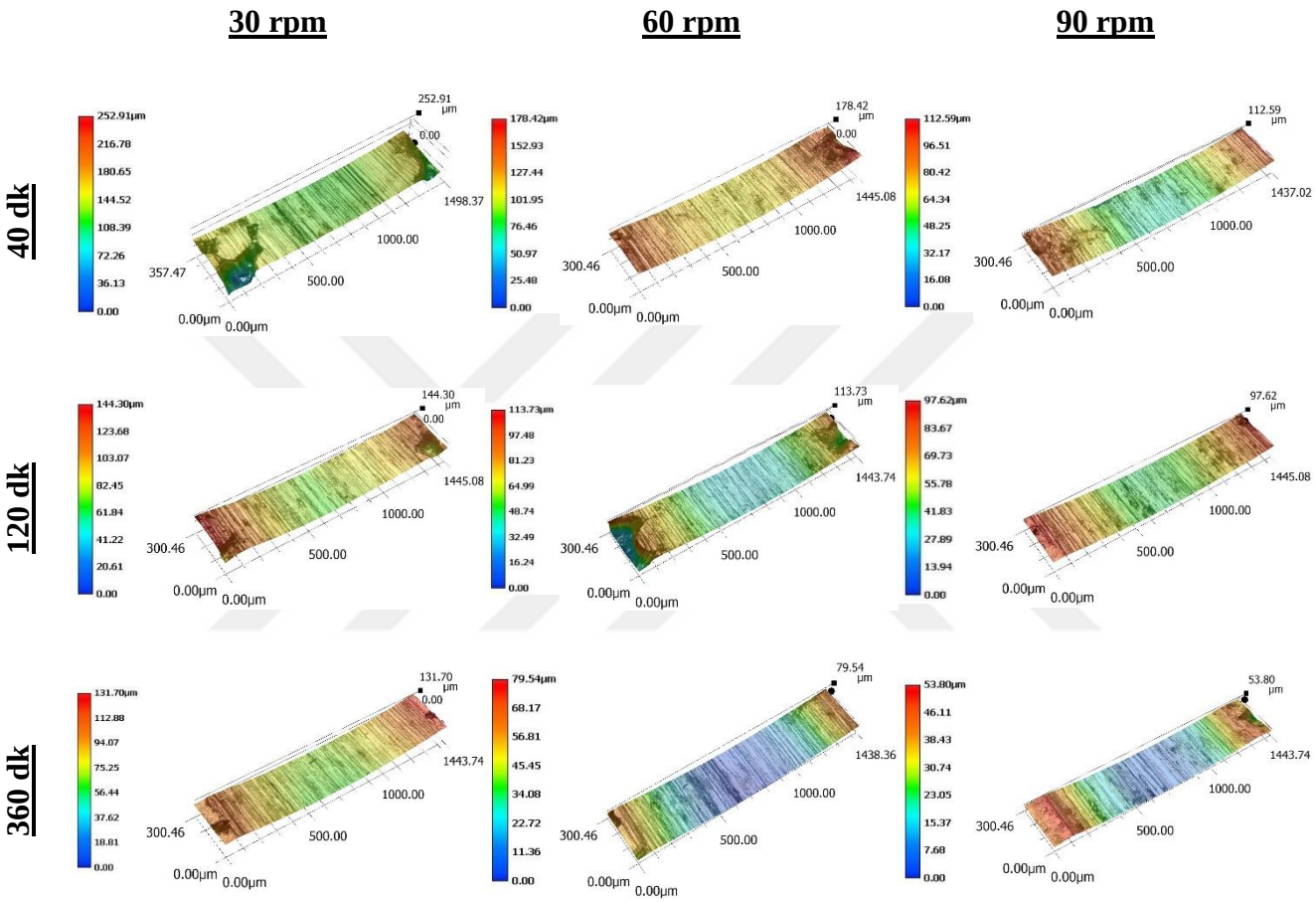
Şekil 2.32. Daldırma derinliği=5 cm, yüzeyden 15µm uzaklıktan ölçülen 3 farklı hızdaki sürükleme ile yüzey iyileştirme işleminin işlem süresine bağlı olan mikrosertlik grafiği

Sonuç olarak parçaya uygulanan kuvvetlerin artışı ki bu gerek hızın veya daldırma derinliğinin artması ya da işlem süresinin artışının parçanın mikrosertliğine olumlu etkisi olmaktadır.

4.4. Aşınma Analizi

Parçaların yüzey ve yüzey altı özellikleri hakkında bilgi veren en kritik testlerden biri de aşınma testidir. Aşınma dayanım testleri için TURKYUS RTW Lineer Aşındırma Cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz "reciprocation" 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.

Tablo 2.5. Elektron ışını ile toz yatağında füzyon yöntemi ile üretilen Ø19x80 mm boyutundaki Ti-6Al-4V parçalara 1.25 cm daldırma derinliğinde, farklı işlem sürelerinde uygulanan sürükleme ile yüzey işlemleri sonrasında yapılan lineer aşındırma testleri sonucu elde edilen aşınma izleri.



Tablo 2.5.'de Elektron ışını ile toz yatağında füzyon yöntemi ile üretilen Ø19x80 mm boyutundaki Ti-6Al-4V parçalara 1.25 cm daldırma derinliğinde, farklı işlem sürelerinde uygulanan sürükleme ile yüzey işlemleri sonrasında yapılan lineer aşındırma testleri sonucu elde edilen aşınma izleri verilmiştir. Tablo 2.5.'de de görüldüğü üzere artan hızlar ve işlem süreleri aşınma direncini artıracağı için daha az aşınma olmuştur ve aşınma derinliği azalmıştır.

Elektron ışını ile toz yatağında füzyon yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V parçalara, çeşitli parametrelerle ikincil işlemler (kumlama, sürükleme ile yüzey işlem, vibrasyonla yüzey

işlem) uygulanmıştır. Yüzey işlemleri kavramsal tasarım raporu kapsamında lineer aşınma testi yapılmıştır. Aşınma parametrelerinin belirlenmesinde ASTM G133 aşınma testi standardından yararlanılmıştır. Numuneler, 20°C oda sıcaklığında ve nem düzeyinde, 15N yük altında, 6 mm sürtünme mesafesinde (stroke lenght) ve 30 dakika süreyle aşınma testine tabi tutulmuştur. Aşındırıcı malzeme olarak ise 6 mm çapında tungsten karbür bilye (WC %94, CO %6) kullanılmıştır.

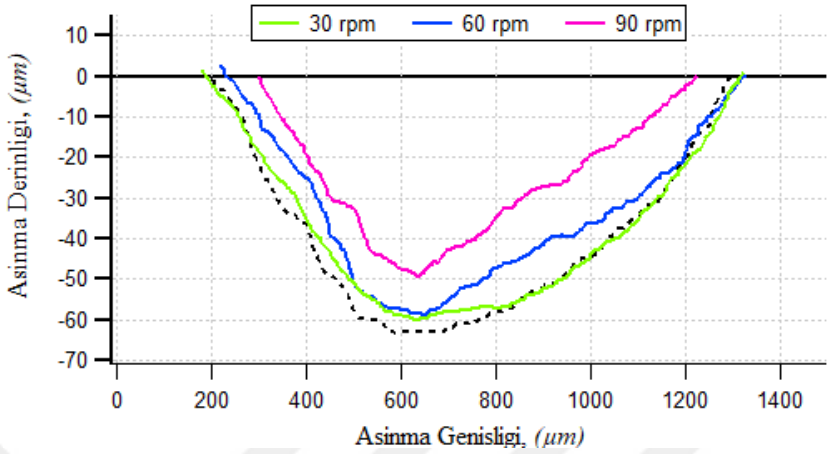
Daha önce de belirtildiği üzere sürükleme ile yüzey işlemin en önemli parametlerinden biri daldırma derinliğidir. Sürükleme ile yüzey işlem uygulanan parçalara uygulanan aşınma testleri, işlemin daldırma derinliği parametresine göre tasniflendirilmiştir. Daldırma derinliği 1.25 cm'de uygulanan sürükleme ile yüzey işlem sonrası uygulanan lineer aşınma testi sonucu elde edilen aşınma izleri Tablo 2.5'te verilmiştir. Sürükleme ile yüzey işlem hızı arttıkça elde edilen aşınma izlerinin derinlik ve genişliklerinde azalma olduğu görülmektedir. Benzer şekilde işlem süresi arttıkça aşınma izlerinin derinlik ve genişliği azalmıştır.

Yapılan lineer aşındırma testleri sonrasında, aşınma izlerine ek olarak aşınma profilleri de ölçülmüştür. Elde edilen veriler aşınma izlerine benzer şekilde, test öncesinde uygulanan sürükleme ile yüzey işlemin daldırma derinliği parametresine göre sınıflandırılmıştır. Şekil 2.33'te 1.25 cm daldırma derinliğinde, farklı işlem sürelerinde sürükleme ile yüzey işlem yapılmış numunelerin aşınma profilleri verilmiştir. Profil grafiklerinde siyah kesikli çizgi ile gösterilen, işlem görmemiş numunenin profilidir. Aşınma derinliği en yüksek olan beklenildiği üzere işlem görmemiş numunedir. Sürükleme ile yüzey işlem hızı ve süresi arttıkça aşınma derinliği azaldığı görülmektedir.

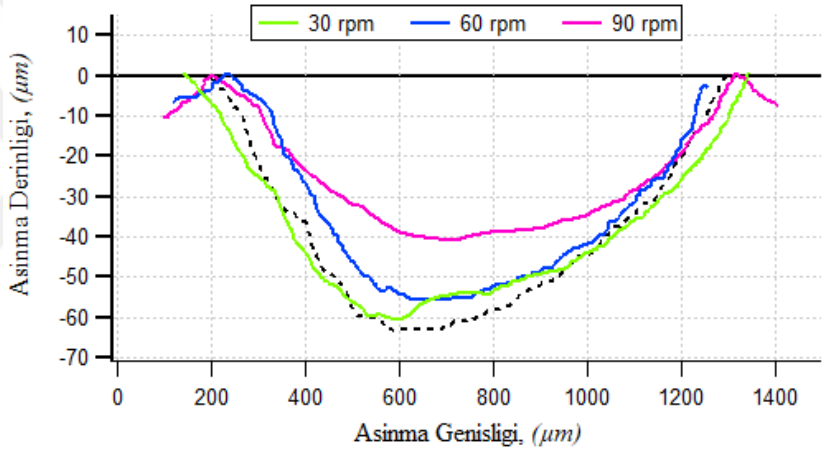
İşlem Süresi

Aşınma Profilleri

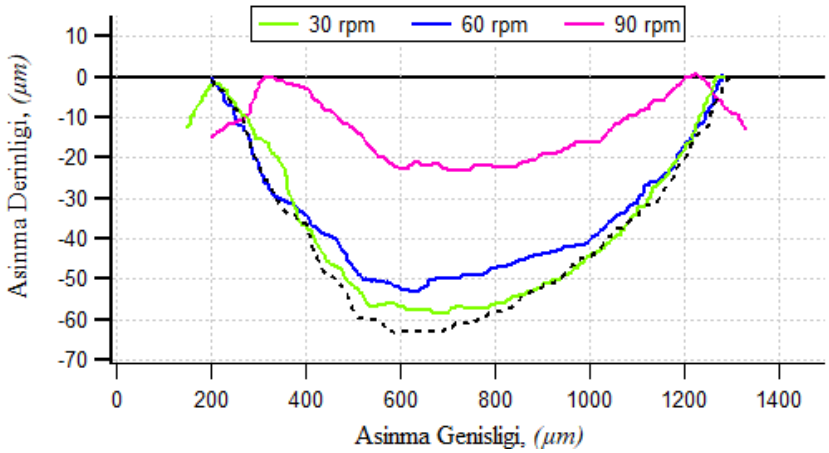
40 dk



120 dk



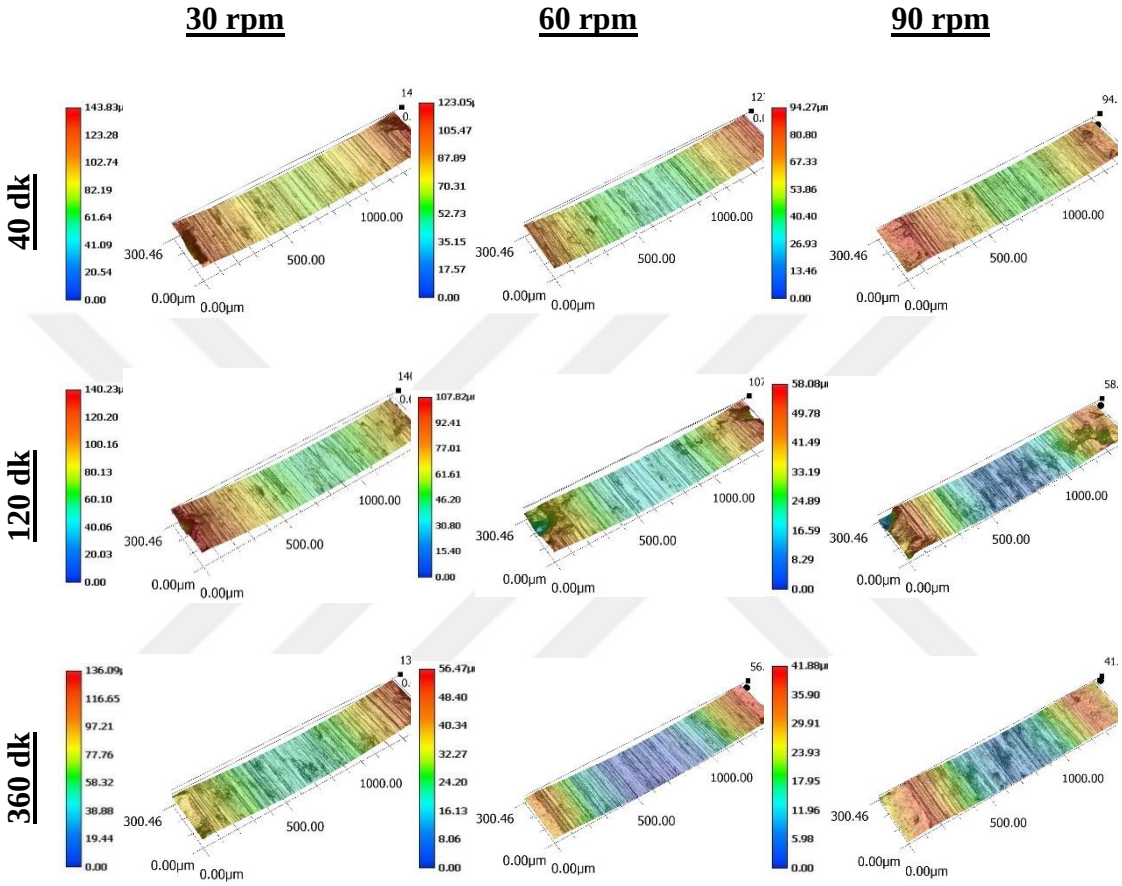
360 dk



Şekil 2.33. 1.25 cm daldırma derinliğinde, farklı işlem sürelerinde sürükleme ile yüzey işlem yapılmış numunelerin aşınma profilleri.

.

Tablo 2.6. Elektron ışını ile toz yatağında füzyon yöntemi ile üretilen Ø19x80 mm boyutundaki Ti-6Al-4V parçalara 2.5 cm daldırma derinliğinde, farklı işlem sürelerinde uygulanan sürükleme ile yüzey işlemleri sonrasında yapılan lineer aşındırma testleri sonucu elde edilen aşınma izleri.

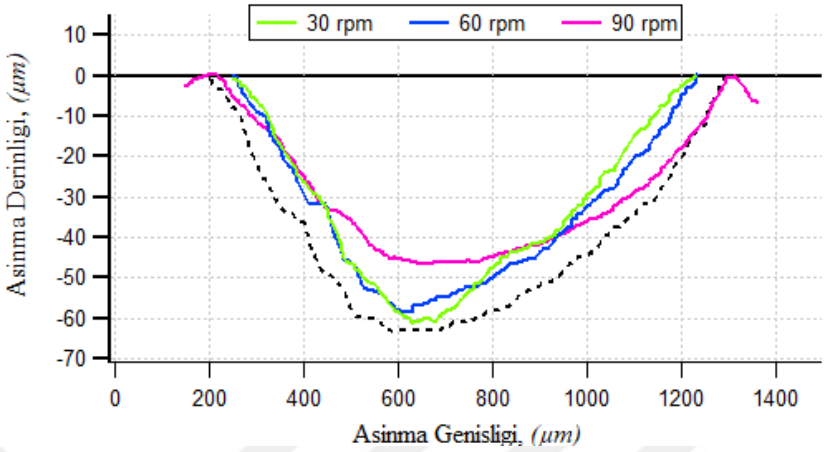


Tablo 2.6'da daldırma derinliği 2.5 cm'de uygulanan sürükleme ile yüzey işlem sonrası uygulanan lineer aşınma testi sonucu elde edilen aşınma izleri verilmiştir. 1.25 cm'de uygulanan sürükleme ile yüzey işlem sonrası yapılan aşınma testlerine benzer şekilde, sürükleme ile yüzey işlem hızı ile süre arttıkça aşınma genişliği ve derinliklerinde azalma olduğu görülmektedir. Aşınma izlerinin genişliği ve derinliğindeki değişimler malzemenin aşınma hacmi hakkında bilgi vermektedir [115]. Tablo 2.5 ve 2.6 kıyaslandığında, aynı sürükleme ile yüzey işlem hızı ve süresi sonrasında elde aşınma oranının azaldığı görülmektedir.

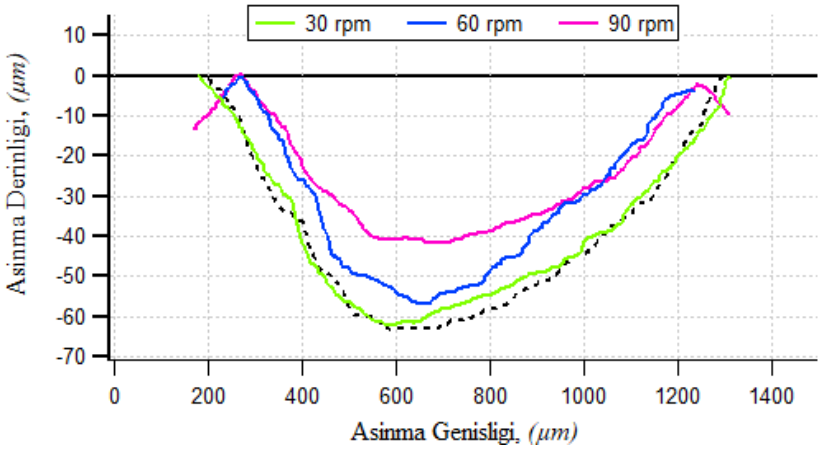
İşlem Süresi

Aşınma Profilleri

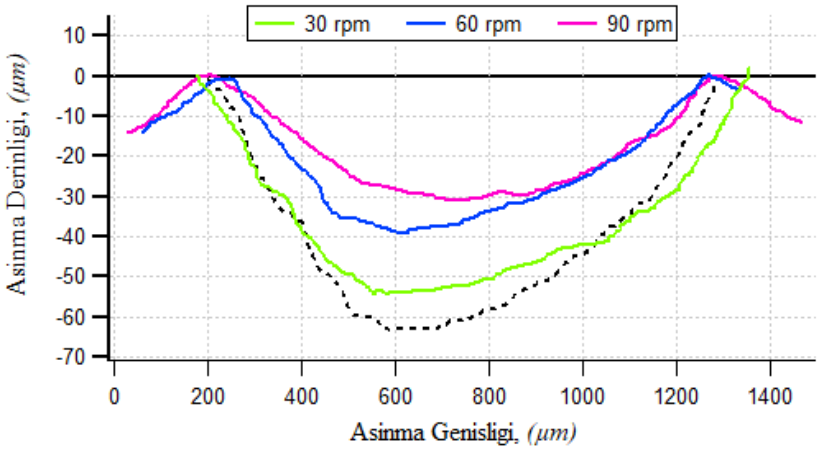
40 dk



120 dk

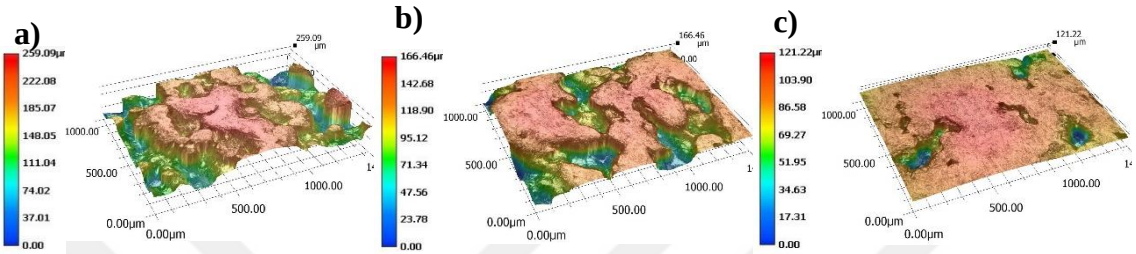


360 dk



Şekil 2.34. 2.5 cm daldırma derinliğinde, farklı işlem sürelerinde sürükleme ile yüzey işlem yapılmış numunelerin aşınma profilleri.

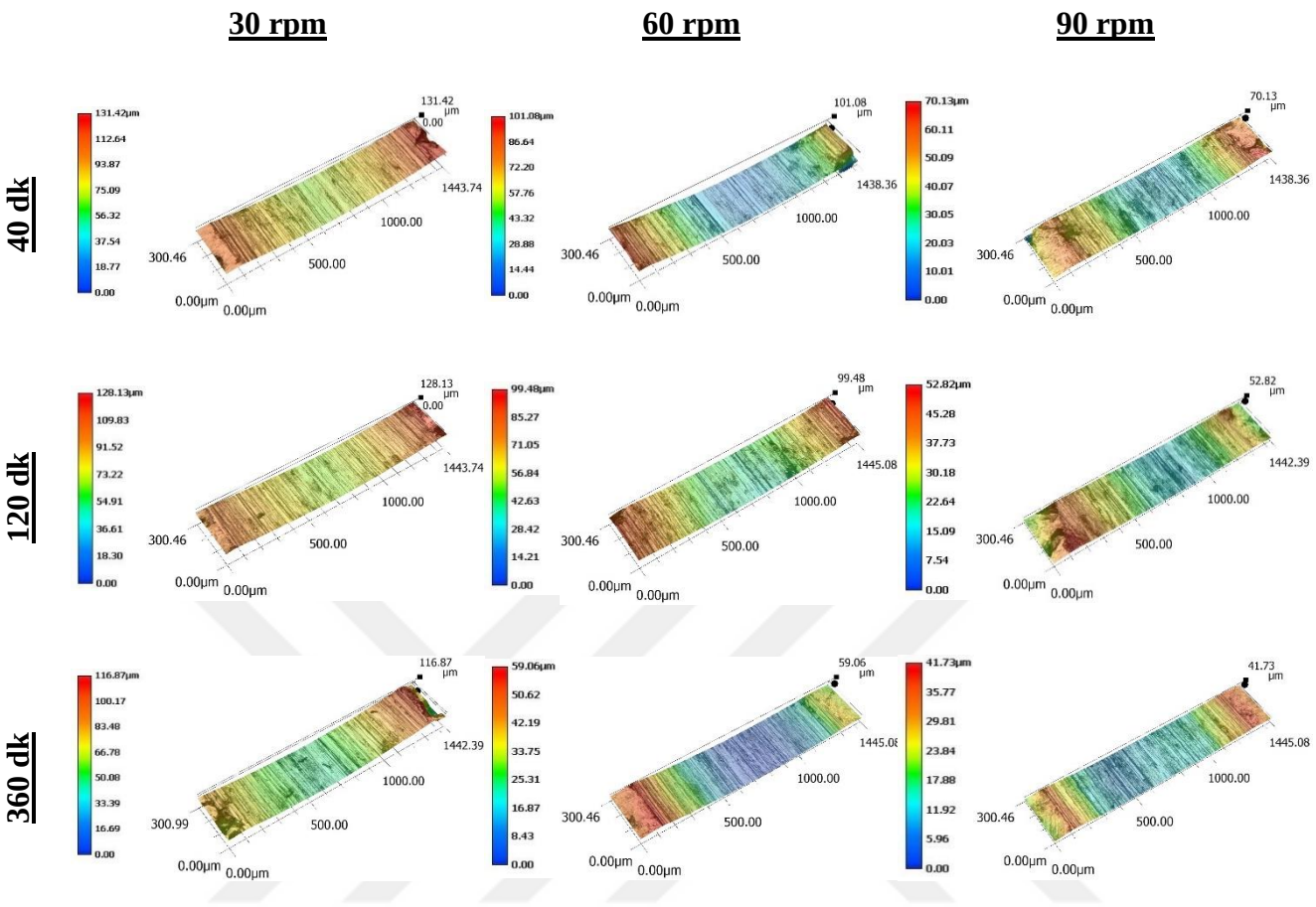
Daldırma derinliğinin artması parça üzerindeki hidrostatik basıncın artmasına ve buna bağlı olarak sürükleme kuvvetini de artırmaktadır [110]. Bu durum parçanın yüzey pürüzlülüğünde azalma, yüzeyde tane küçülmesi ve buna bağlı olarak mikrosertlikte artış, aşınma direncinde artış gibi iyileştirmelerle sonuçlanmaktadır. Şekil 2.34 incelendiğinde daldırma derinliğinin 2.5 cm olduğu durumda, sürükleme ile yüzey işlemin etkisi artmıştır.



Şekil 2.35. İşlem hızı 60 rpm, işlem süresi 120 dk ve daldırma derinliği 1.25 cm (a), 2.5 cm (b) ve 5 cm (c) olan sürükleme ile yüzey işlem sonrası elde edilen yüzey topografileri.

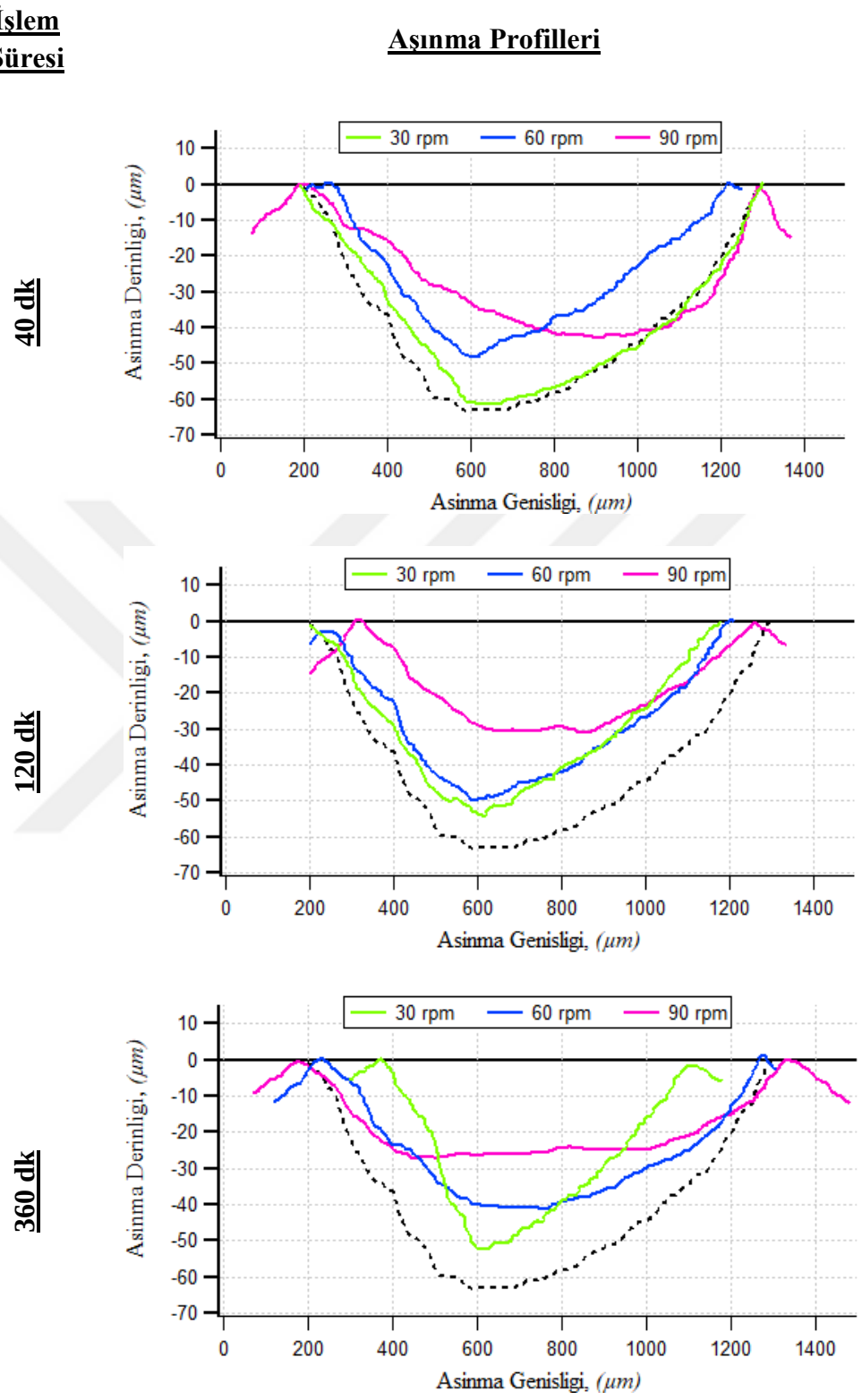
Daldırma derinliğinin etkisini daha açık görebilmek amacıyla diğer işlem parametreleri sabit olmak koşuluyla Şekil 2.35'te farklı daldırma derinliklerindeki numunelerin yüzey topografileri verilmiştir. Sürükleme aynı koşullarda sadece daldırma derinliği değiştiğinde yüzeyde bariz farklar oluşmaktadır. Bu farkların yüzey altı özelliklerini de etkileyeceği ön görülmektedir.

Tablo 2.7'de tez kapsamında, uygulanan en derin daldırma derinliği olan 5 cm'de gerçekleşen sürükleme ile yüzey işlem sonrası uygulanan aşınma testinden elde edilen aşınma izleri verilmiştir. Aşınma izlerinden yola çıkıldığında, daldırma derinliğindeki artışın aşınma hacminde belirgin bir azalmaya sebep olduğu görülmektedir.



Tablo 2.7. Elektron ışını ile toz yatağında füzyon yöntemi ile üretilen Ø19x80 mm boyutundaki Ti-6Al-4V parçalara 5 cm daldırma derinliğinde, farklı işlem sürelerinde uygulanan sürükleme ile yüzey işlemleri sonrasında yapılan lineer aşındırma testleri sonucu elde edilen aşınma izleri.

Şekil 2.36'da 5 cm daldırma derinliğinde gerçekleştirilen sürükleme ile yüzey işlem sonrası yapılan aşınma testlerinden elde edilen aşınma profilleri gösterilmektedir. Tüm sürelerde, en az aşınma derinliğine sahip olan numuneler, 90 rpm işlem hızında sürükleme ile yüzey işleme tabii tutulanlar olmuştur. Buna göre işlem hızı arttıkça numunenin yüzey kalitesi ve bununla birlikte aşınma direnci artmıştır.



Şekil 2.36. 5 cm daldırma derinliğinde, farklı işlem sürelerinde sürükleme ile yüzey işlem yapılmış numunelerin aşınma profilleri.

Uzun çalışma süresi ve yüzey iyileştirme taşlarının birleşmesi sonucu yüzeyde ince parçalı yapı oluşur ve bu da yüzey altı malzemenin sertleşmesine neden olur[94]. Sertlik değeri ne kadar yüksek olursa sürtünme ve aşınma sürecinde ezilen malzemenin derinliği o kadar sığ ve aşınma hacmi o kadar az olur[116]. Sertlik, sert bir girinti altında kırılma olmaksızın plastik deformasyona karşı direnci ölçer[117]. Archard'ın aşınma yasasına göre aşınma hacmi kaybı, aşınmış malzemenin sertlik değerleri ile ters orantılıdır[118]. Sürükleme ile yüzey işlem sonrasında (Örneğin; 06x06 Yıldız Üçgen medya/ 5 cm daldırma derinliği / 90 rpm/360 dakika) artan mikrosertlik değeri alaşımın aşınmaya karşı direnciyle sonuçlandı. Aşınma direncinin artması daha az aşınmaya sebep olarak aşınma derinliğinin daha az olmasıyla sonuçlanmıştır. Bu durum verilen aşınma profillerinde açıkça görülmektedir. Ancak, işlem görmemiş numune üzerinde gerçekleştirilen aşınma testi yüzeyde mikrosertliklerin artmasına sebep olan diğer işlemlerle kıyaslandığında da daha fazla plastik deformasyona uğrayarak daha büyük aşınma derinliğine sebep olduğu görülmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, geleneksel imalat yöntemleriyle üretilmesi zor olan Ti-Al-4V alaşımının Elektron Işını İle Ergitme yöntemiyle üretilmesinden sonra uygulanan ikincil işlemin etkisinin deneysel ve ampirik yaklaşımlarla incelenmesi ve karşılaştırılması yapılmıştır. İkincil işlem olarak; sürükleme ile yüzey işlem uygulanmış ve bir takım matematiksel yaklaşımlarla hesaplamalar yapılmıştır.

Deneysel olarak yapılan ikincil işlemlerden sonra yüzey pürüzlülüğü, yüzey topografisi, mikrosertlik, mikroyapısında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Uygulanan ikincil işlem sonrası mikrosertlik, aşınma, yüzey pürüzlülükleri ve mikroyapılar incelenmiştir. Ayrıca yapılan hesaplamalarla deneysel olarak elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri karşılaştırılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır;

- Elektron Işını İle Ergitme yöntemi ile üretilmiş olan Ti-Al-4V İşlem görmemiş parçaların yüzey topografya görüntüleri ve yüzey pürüzlülük değerleri ele alındığında

kullanım alanları için gerekli olan yüzey özelliklerini karşılamadığı sonucuna varılmıştır.

- Sürükleme ile yüzey işlem sonucu parçaların topografya görüntüleri incelendiğinde yüzeylerin işlem görmemiş Ti-Al-4V parçalara göre daha tutarlı ve kabul edilebilir bir görüntü sergilediği sonucuna varılmıştır. Aynı şekilde farklı parametre setlerin de gerçekleştirilen sürükleme ile yüzey işlem sonrası ölçülen pürüzlülük değerlerinin içerisinde istenen pürüzlülük değerleri hatta çok daha düşük pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.
- İşlem görmemiş parçaların yüzey pürüzlülük değerleri 35-40 μm olarak ölçülmüştür. Sürükleme ile yüzey işlem sonucu ise yüzey pürüzlülük değerleri ciddi miktarda azalmıştır. İkincil işlem sonrası yüzey pürüzlülük değerlerinin 1 μm ’den daha düşük değerlere kadar iyileşebildiği parametre setleri oluşturulmuştur.
- Sürükleme ile yüzey işlem uygulanmış parçaların yüzey pürüzlülük değerleri için ampirik yaklaşımla hesaplanan değerler ile ölçülen değerler %69,42 oranında uyum sağlamıştır. Bazı parametre setlerinde bu oran çok daha yüksektir. İstenen yüzey pürüzlülük değerlerini elde etmek için tahmini bir işlem süresi bu yaklaşımla hesaplanabilmektedir.
- İşlem görmemiş Ti-Al-4V parçaların mikroyapısında sürükleme ile yüzey işlem sonrasında tane küçülmeleri gözlemlenmiştir. Tane küçülmeleri tane sınırlarının artmasına sebep olarak dislokasyon hareketine engel oluşturduğu için parçaların sertliğinin artmasına sebep olmaktadır. Bu tez kapsamında yapılan sürükleme ile yüzey işlemler ve işlem görmemiş parçaların SEM görüntüleri ve sertlik ölçüm sonuçları da bu yargıyla uyumlu olarak bulunmuştur.
- Tane küçülmeleri sonucu sertliğinde artmasıyla birlikte malzemenin aşınma direncinin arttığı aşınma görselleri ve aşınma grafiklerinde sunulmuştur.

6. KAYNAKÇA

1. Hashimoto, F. and D.B. DeBra, *Modelling and optimization of vibratory finishing process.* CIRP annals, 1996. **45**(1): p. 303-306.
2. Jiang, J., *A survey of machine learning in additive manufacturing technologies.* International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2023: p. 1-23.
3. Ramírez, I.S., F.P.G. Márquez, and M. Papaelias, *Review on additive manufacturing and non-destructive testing.* Journal of Manufacturing Systems, 2023. **66**: p. 260-286.
4. Hegab, H., et al., *Design for sustainable additive manufacturing: A review.* Sustainable Materials and Technologies, 2023: p. e00576.
5. Yu, Q., et al., *Future perspective of additive manufacturing of food for children.* Trends in Food Science & Technology, 2023.
6. Ni, J., et al., *Three-dimensional printing of metals for biomedical applications.* Materials Today Bio, 2019. **3**: p. 100024.
7. Wong, K.V. and A. Hernandez, *A review of additive manufacturing.* International scholarly research notices, 2012. **2012**.
8. Francois, M.M., et al., *Modeling of additive manufacturing processes for metals: Challenges and opportunities.* Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2017. **21**(4): p. 198-206.
9. Kavak, R., et al., *A Beam Diagnostics System of Electron Beam Melting for Additive Manufacturing.* 2021.
10. Tofail, S.A., et al., *Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities.* Materials today, 2018. **21**(1): p. 22-37.
11. Redwood, B. *Additive manufacturing technologies: An overview*. Available from: https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/.
12. Larsson, M., U. Lindhe, and O. Harrysson. *Rapid manufacturing with Electron Beam Melting (EBM)-A manufacturing revolution?* in *2003 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2003.
13. Shui, X., et al., *Effects of post-processing on cyclic fatigue response of a titanium alloy additively manufactured by electron beam melting.* Materials Science and Engineering: A, 2017. **680**: p. 239-248.
14. DebRoy, T., et al., *Additive manufacturing of metallic components–process, structure and properties.* Progress in Materials Science, 2018. **92**: p. 112-224.
15. Burgman, O. and C. Lundberg, *Understanding process atmosphere interactions in Electron Beam Powder Bed Fusion (EB-PBF) additive manufacturing.* 2021.
16. Gong, H., et al., *Influence of defects on mechanical properties of Ti–6Al–4 V components produced by selective laser melting and electron beam melting.* Materials & Design, 2015. **86**: p. 545-554.

17. Zhang, L.C., et al., *Additive manufacturing of titanium alloys by electron beam melting: a review.* Advanced Engineering Materials, 2018. **20**(5): p. 1700842.

18. Hryha, E. and D. Riabov, *Metal powder production for additive manufacturing.* 2022.

19. Vock, S., et al., *Powders for powder bed fusion: a review.* Progress in Additive Manufacturing, 2019. **4**: p. 383-397.

20. Strondl, A., et al., *Characterization and control of powder properties for additive manufacturing.* Jom, 2015. **67**: p. 549-554.

21. Cormier, D., O. Harrysson, and H. West, *Characterization of H13 steel produced via electron beam melting.* Rapid prototyping journal, 2004.

22. Facchini, L., et al., *Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V produced by electron beam melting of pre-alloyed powders.* Rapid Prototyping Journal, 2009.

23. Körner, C., *Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting—a review.* International Materials Reviews, 2016. **61**(5): p. 361-377.

24. Parthasarathy, J., et al., *Mechanical evaluation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM).* Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 2010. **3**(3): p. 249-259.

25. Safdar, A., et al., *Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V.* Rapid Prototyping Journal, 2012.

26. Narra, S.P., et al., *Location specific solidification microstructure control in electron beam melting of Ti-6Al-4V.* Additive Manufacturing, 2018. **19**: p. 160-166.

27. Wang, P., et al., *Effects of processing parameters on surface roughness of additive manufactured Ti-6Al-4V via electron beam melting.* Materials, 2017. **10**(10): p. 1121.

28. 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.

29. Pobel, C.R., et al., *Immediate development of processing windows for selective electron beam melting using layerwise monitoring via backscattered electron detection.* Materials Letters, 2019. **249**: p. 70-72.

30. Higashi, M. and K. Yoshimi, *Electron beam surface melting of MoSiBTiC alloys: Effect of preheating on cracking behavior and microstructure evolution.* Materials & Design, 2021. **209**: p. 110010.

31. Shao, M., et al., *The effect of beam scan strategies on microstructural variations in Ti-6Al-4V fabricated by electron beam powder bed fusion.* Materials & Design, 2020. **196**: p. 109165.

32. Karlsson, J., et al., *Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti–6Al–4V powder fractions.* Journal of materials processing technology, 2013. **213**(12): p. 2109-2118.

33. 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.

34. 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.

35. Hou, S., et al., *Optimising the dynamic process parameters in Electron beam melting (EBM) to achieve internal defect quality control.* 2017. **2017**.

36. Guo, C., W. Ge, and F. Lin, *Effects of scanning parameters on material deposition during Electron Beam Selective Melting of Ti-6Al-4V powder.* Journal of Materials Processing Technology, 2015. **217**: p. 148-157.

37. 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.

38. Sun, S., et al., *Microstructure and mechanical properties of Al-Fe-V-Si aluminum alloy produced by electron beam melting.* Materials Science and Engineering: A, 2016. **659**: p. 207-214.

39. Tammas-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.* Materials Characterization, 2015. **102**: p. 47-61.

40. Medina, F., *Reducing metal alloy powder costs for use in powder bed fusion additive manufacturing: Improving the economics for production.* 2013.

41. Jafary-Zadeh, M., et al., *A critical review on metallic glasses as structural materials for cardiovascular stent applications.* 2018. **9**(1): p. 19.

42. 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.

43. Ek, R.K., et al., *The effect of EBM process parameters upon surface roughness.* Rapid Prototyping Journal, 2016. **22**(3): p. 495-503.

44. Gong, H., et al., *Analysis of defect generation in Ti–6Al–4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes.* Additive Manufacturing, 2014. **1**: p. 87-98.

45. Ran, J., et al., *Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Fabricated by Electron Beam Melting.* Crystals, 2020. **10**(11): p. 972.

46. Galarraga, H., et al., *Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM).* 2017. **685**: p. 417-428.

47. Hrabe, N. and T. Quinn, *Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated using electron beam melting (EBM), part 1: Distance from build plate and part size.* Materials Science and Engineering: A, 2013. **573**: p. 264-270.

48. Hrabe, N. and T. Quinn, *Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated using electron beam melting (EBM), Part 2: Energy input, orientation, and location.* Materials Science and Engineering: A, 2013. **573**: p. 271-277.

49. Prisco, U., et al., *Influence of processing parameters on microstructure and roughness of electron beam melted Ti-6Al-4V titanium alloy.* Materials and Manufacturing Processes, 2019. **34**(15): p. 1753-1760.

50. Abdeen, D.H. and B.R. Palmer, *Effect of processing parameters of electron beam melting machine on properties of Ti-6Al-4V parts.* Rapid Prototyping Journal, 2016.

51. de Formanoir, C., et al., *Electron beam melted Ti–6Al–4V: Microstructure, texture and mechanical behavior of the as-built and heat-treated material.* Materials Science and Engineering: A, 2016. **652**: p. 105-119.

52. Kirchner, A., et al., *Process window for electron beam melting of Ti-6Al-4V*. Powder Metallurgy, 2015. **58**(4): p. 246-249.

53. Takezawa, A., et al., *Isotropic Ti–6Al–4V lattice via topology optimization and electron-beam melting.* Additive Manufacturing, 2018. **22**: p. 634-642.

54. Vayre, B., F. Vignat, and F. Villeneuve, *Identification on some design key parameters for additive manufacturing: application on electron beam melting.* Procedia CIRP, 2013. **7**: p. 264-269.

55. Karunakaran, K., et al., *Rapid manufacturing of metallic objects.* Rapid Prototyping Journal, 2012. **18**(4): p. 264-280.

56. Tan, X., et al., *Revealing martensitic transformation and α/β interface evolution in electron beam melting three-dimensional-printed Ti-6Al-4V.* Scientific reports, 2016. **6**(1): p. 26039.

57. de Formanoir, C., et al., *Improving the mechanical efficiency of electron beam melted titanium lattice structures by chemical etching.* Additive Manufacturing, 2016. **11**: p. 71-76.

58. Wang, P., et al., *Spatial and geometrical-based characterization of microstructure and microhardness for an electron beam melted Ti–6Al–4V component.* Materials & Design, 2016. **95**: p. 287-295.

59. Wang, P., et al. *Recent progress of additive manufactured Ti-6Al-4V by electron beam melting*. in *2016 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2016. University of Texas at Austin.

60. Cozzolino, E. and A. Astarita, *Energy saving in milling of electron beam–melted Ti6Al4V parts: influence of process parameters.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023. **127**(1): p. 179-194.

61. Frazier, W.E., *Metal additive manufacturing: a review.* Journal of Materials Engineering and performance, 2014. **23**: p. 1917-1928.

62. Giannatsis, J. and V. Dedoussis, *Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009. **40**: p. 116-127.

63. Edwards, P., A. O'conner, and M. Ramulu, *Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance.* Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2013. **135**(6): p. 061016.

64. Kok, Y., et al., *Fabrication and microstructural characterisation of additive manufactured Ti-6Al-4V parts by electron beam melting: This paper reports that the microstructure and micro-hardness of an EMB part is thickness dependent.* Virtual and Physical Prototyping, 2015. **10**(1): p. 13-21.

65. Biamino, S., et al., *Electron beam melting of Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation.* Intermetallics, 2011. **19**(6): p. 776-781.

66. Franzén, S.F., et al., *Microstructural properties of gamma titanium aluminide manufactured by electron beam melting*. 2011, Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States).

67. Kumbhar, N.N. and A. Mulay, *Post processing methods used to improve surface finish of products which are manufactured by additive manufacturing technologies: a review.* Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 2018. **99**(4): p. 481-487.

68. Bagehorn, S., J. Wehr, and H. Maier, *Application of mechanical surface finishing processes for roughness reduction and fatigue improvement of additively manufactured Ti-6Al-4V parts.* International Journal of Fatigue, 2017. **102**: p. 135-142.

69. Zäh, M.F. and S. Lutzmann, *Modelling and simulation of electron beam melting.* Production Engineering, 2010. **4**(1): p. 15-23.

70. Gusarov, A., et al., *Heat transfer modelling and stability analysis of selective laser melting.* Applied Surface Science, 2007. **254**(4): p. 975-979.

71. Khan, H.M., et al., *Influence of the post-processing operations on surface integrity of metal components produced by laser powder bed fusion additive manufacturing: a review.* Machining Science and Technology, 2020. **25**(1): p. 118-176.

72. Zaeh, M.F. and M. Kahnert, *The effect of scanning strategies on electron beam sintering.* Production Engineering, 2009. **3**(3): p. 217-224.

73. Kahnert, M., S. Lutzmann, and M. Zaeh. *Layer formations in electron beam sintering*. in *2007 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2007.

74. Kong, D., et al., *Bio-functional and anti-corrosive 3D printing 316L stainless steel fabricated by selective laser melting.* Materials & Design, 2018. **152**: p. 88-101.

75. 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.

76. 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**: p. 3349-3361.

77. Liu, Z., et al., *Improved surface integrity of Ti6Al4V fabricated by selective electron beam melting using ultrasonic surface rolling processing.* Journal of Materials Processing Technology, 2021. **297**: p. 117264.

78. Nesli, S., et al., *Influence of laser polishing process parameters on surface integrity and morphology of Ti-6Al-4V parts produced via electron beam melting.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023: p. 1-16.

79. Zhang, L.C. and L.Y. Chen, *A review on biomedical titanium alloys: recent progress and prospect.* Advanced engineering materials, 2019. **21**(4): p. 1801215.

80. Lütjering, G. and J.C. Williams, *Titanium matrix composites*. 2007: Springer.

81. Attanasio, A., et al., *Influence of material microstructures in micromilling of Ti6Al4V alloy.* Materials, 2013. **6**(9): p. 4268-4283.

82. Geetha, M., et al., *Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants–A review.* Progress in materials science, 2009. **54**(3): p. 397-425.

83. Fang, Z.Z. and P. Sun, *Pathways to optimize performance/cost ratio of powder metallurgy titanium–a perspective.* Key Engineering Materials, 2012. **520**: p. 15-23.

84. Gibson, I., et al., *Additive manufacturing technologies*. Vol. 17. 2021: Springer.

85. Gu, D.D., et al., *Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms.* International materials reviews, 2012. **57**(3): p. 133-164.

86. Murr, L.E., et al., *Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies.* Journal of Materials Science & Technology, 2012. **28**(1): p. 1-14.

87. Sun, P., et al., *A novel method for production of spherical Ti-6Al-4V powder for additive manufacturing.* Powder Technology, 2016. **301**: p. 331-335.

88. McCracken, C.G., C. Motchenbacher, and D.P. Barbis, *REVIEW OF TITANIUM-POWDER-PRODUCTION METHODS.* International journal of powder metallurgy, 2010. **46**(5).

89. Qian, M. and F.H. Froes, *Titanium powder metallurgy: science, technology and applications.* 2015.

90. Roberts, P., *The production of PREP titanium powder.* Metal Powder Industries Federation, 1989: p. 427-438.

91. Froes, F., *Titanium Powder Metallurgy: A Review- Part 2.* Advanced Materials & Processes, 2012. **170**(10): p. 26-29.

92. 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.

93. Tascioglu, E., Y. Karabulut, and Y. Kaynak, *Influence of heat treatment temperature on the microstructural, mechanical, and wear behavior of 316L stainless steel fabricated by laser powder bed additive manufacturing.* The

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020. **107**: p. 1947-1956.

94. Güneşsu, E., et al., *Effect of Drag Finish Post-processing on Surface Integrity and Wear Behavior of Ti-6Al-4V Fabricated by Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing.* Journal of Materials Engineering and Performance, 2022. **31**(12): p. 9962-9971.

95. Szymczyk-Ziółkowska, P., et al., *Corrosion resistance characteristics of a Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting after the applied post-process treatment methods.* Biocybernetics and Biomedical Engineering, 2021. **41**(4): p. 1575-1588.

96. Gaggar, S., et al., *Application of smoothed particle hydrodynamics for the simulation and analysis of vibratory finishing process.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020. **108**: p. 183-190.

97. Kaynak, Y. and E. Tascioglu, *Post-processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing.* Progress in Additive Manufacturing, 2020. **5**: p. 221-234.

98. Balachandramurthi, A.R., et al., *Influence of defects and as-built surface roughness on fatigue properties of additively manufactured Alloy 718.* Materials Science and Engineering: A, 2018. **735**: p. 463-474.

99. Nezhadfar, P., et al., *Fatigue behavior of additively manufactured 17-4 PH stainless steel: Synergistic effects of surface roughness and heat treatment.* International Journal of Fatigue, 2019. **124**: p. 188-204.

100. Edwards, P. and M. Ramulu, *Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti–6Al–4V.* Materials Science and Engineering: A, 2014. **598**: p. 327-337.

101. Brinksmeier, E., et al., *Surface integrity of selective-laser-melted components.* CIRP annals, 2010. **59**(1): p. 601-606.

102. Beaucamp, A.T., et al., *Finishing of additively manufactured titanium alloy by shape adaptive grinding (SAG).* Surface Topography: Metrology and Properties, 2015. **3**(2): p. 024001.

103. Huttunen-Saarivirta, E., et al., *Wear of additively manufactured tool steel in contact with aluminium alloy.* Wear, 2019. **432**: p. 202934.

104. Schmidtke, K., et al., *Process and mechanical properties: applicability of a scandium modified Al-alloy for laser additive manufacturing.* Physics Procedia, 2011. **12**: p. 369-374.

105. Davidson, D.A., *Vibratory finishing: versatile, effective, and reliable.* Metal finishing, 2008. **106**(5): p. 30-34.

106. Gillespie, L., *Mass finishing handbook*. 2006: Industrial Press.

107. Denkena, B. and D. Biermann, *Cutting edge geometries.* CIRP annals, 2014. **63**(2): p. 631-653.

108. Uhlmann, E., A. Eulitz, and A. Dethlefs, *Discrete element modelling of drag finishing.* Procedia Cirp, 2015. **31**: p. 369-374.

109. Eckart Uhlmann, M.K., *Measurement and Modeling of Contact Forces During Robot-guided Drag Finishing*, in *18th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations*. 2021.

110. Malkorra, I., et al., *Identification of interaction mechanisms during drag finishing by means of an original macroscopic numerical model.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021. **168**: p. 103779.

111. Walker, P. and W.H. Tarn, *CRC handbook of metal etchants*. 1990: CRC press.

112. Zanger, F., et al., *Optimization of the stream finishing process for mechanical surface treatment by numerical and experimental process analysis.* CIRP Annals, 2019. **68**(1): p. 373-376.

113. Barletta, M., et al., *A comparative evaluation of fluidized bed assisted drag finishing and centrifugal disk dry finishing.* Engineering Science and Technology, an International Journal, 2014. **17**(2): p. 63-72.

114. Zhu, Y., et al., *Grain growth and microstructure evolution based mechanical property predicted by a modified Hall–Petch equation in hot worked Ni76Cr19AlTiCo alloy.* Materials & Design, 2014. **55**: p. 456-462.

115. 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.

116. Ehtemam-Haghighi, S., et al., *Evaluation of mechanical and wear properties of TixNb7Fe alloys designed for biomedical applications.* Materials & Design, 2016. **111**: p. 592-599.

117. Li, H., M. Ramezani, and Z.W. Chen, *Dry sliding wear performance and behaviour of powder bed fusion processed Ti–6Al–4V alloy.* Wear, 2019. **440**: p. 203103.

118. Hutchings, I., *Tribology: Friction and wear of engineering materials, 1992.* Great Britain, 1992: p. 78-84.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Kübra YILMAZ

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans: Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü (2020-2023)

Lisans : Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü (2012-2018)

Lisans : Anadolu Üniversitesi, İşletme Fakültesi, İşletme

(2013-2019)

Ön Lisans: Anadolu Üniversitesi, Açık Öğretim Fakültesi, Web Tasarımı Ve Kodlama

(2019-2021)

PROJELER

“Eklemeli İmalatla Üretilen Parçaların Mekanik-Kimyasal Yüzey İşlemleri”, Destekleyen Kuruluş: ASELSAN, Görev: Proje Bursiyeri

"Eklemeli İmalat Yöntemiyle İmal Edilen Ürünler İçin İkincil İşlem Süreçleri Geliştirme”, Destekleyen Kuruluş: TÜBİTAK TEYDEB (TÜBİTAK-SAYEM Projesi), Görev: Proje Bursiyeri, Proje NO: 121D017

YAYINLAR ve BİLDİRİLER