Döküm ve Eklemeli İmalat Yöntemleriyle Üretilmiş Ti6Al4V Alaşımının Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi

Suzan Sakarya

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2026

Improvement of Surface Properties of Ti6Al4V Alloy Produced by Casting and Additive Manufacturing Methods

Suzan Sakarya

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechaical Engineering

January 2026

Döküm ve Eklemeli İmalat Yöntemleriyle Üretilmiş Ti6Al4V Alaşımının Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi

Suzan Sakarya

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon - İmalat Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Sert

Tez Çalışması Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FHD-2025-3603 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Ocak 2026

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Suzan Sakarya'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Döküm ve Eklemeli İmalat Yöntemleriyle Üretilmiş Ti6Al4V Alaşımının Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Abdullah SERT
İkinci Danışman : Öğr. Gör. Dr. Niyazi ÇAVUŞOĞLU

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Abdullah SERT

Üye: Doç. Dr. Mehmet Alper SOFUOĞLU

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Yalçın ÖZDEMİR

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ……..…….. tarih ve ……..……. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma TÜMSEK

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Abdullah SERT ve Öğr. Gör. Dr. Niyazi ÇAVUŞOĞLU danışmanlığında hazırlamış olduğum "Döküm ve Eklemeli İmalat Yöntemleriyle Üretilmiş Ti6Al4V Alaşımının Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi" başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.05/01/2026

Suzan SAKARYA

İmza

T.C.
ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ KULLANIMI BEYAN FORMU

Bu tezi/projeyi hazırlarken aşağıdaki Üretken Yapay Zekâ (ÜYZ) araçlarından destek aldığımı beyan ederim:

Aşağıdaki ÜYZ araçlarını kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir)

☐ Claude
☒ ChatGPT
☐ DeepSeek
☐ Gemini
☐ Copilot
☐ Diğer (Belirtiniz): .....

ÜYZ araçlarını tezimin/projemin aşağıdaki aşamalarında ilgili amaçlar için kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir):

☐ Metin oluşturma
☐ Literatür tarama
☒ Çeviri
☒ Düzenleme/dil kontrolü
☐ Veri işleme ve analizi
☐ Veri görselleştirme
☐ Görüntü üretme
☐ Kaynakça düzenleme
☐ Diğer (Belirtiniz): .....

Bu çalışmada ÜYZ kullanımı ***Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber***'e ve akademik dürüstlük ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup ÜYZ araçlarından alınan destek etik kurallar ve kaynak gösterme esaslarına uygun biçimde belirtilmiştir.

ÜYZ araçlarının sağladığı bilgilerin doğruluğunu kontrol ettiğimi, yanlış veya eksik bilgi bulunması halinde tüm sorumluluğun tarafıma ait olduğunu; ayrıca çalışmamla ilgili bu beyana aykırı bir durumun herhangi bir zamanda tespit edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek akademik ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi beyan ederim.

503720230028

Suzan SAKARYA

23/02/2026

(İmza)

ÖZET

Gelişmiş mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan Ti6Al4V alaşımı; yüksek özgül mukavemeti, üstün korozyon direnci ve biyouyumluluğu sayesinde havacılık, biyomedikal ve otomotiv endüstrilerinde önemli bir mühendislik malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, nispeten düşük aşınma direnci ve yüksek sürtünme katsayısı gibi zayıf tribolojik özellikleri, bazı uygulamalarda kullanımını sınırlandırmaktadır.

Bu çalışmada, döküm imalat ve metal eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen Ti6Al4V alaşımlarına uygulanan farklı yüzey modifikasyonlarının tribolojik performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda numuneler; işlemsiz, termal oksidasyon uygulanmış, paralel hat ve çukur desen tekstürleme yapılmış yüzey koşullarının yanı sıra lazer yüzey tekstürleme ve termal oksidasyon işlemlerinin ardışık olarak uygulandığı kombinasyonlar şeklinde hazırlanmıştır. Aşınma ve sürtünme deneyleri 2N normal yük altında gerçekleştirilmiş olup numunelerin mikroyapısal özellikleri ve yüzey morfolojik karakteristikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Termal oksidasyonla oluşturulan titanyum dioksit tabakalarının aşınma davranışına etkisi göz önünde bulundurularak, lazer yüzey tekstürleme işleminin termal oksidasyon öncesi ve sonrası uygulanmasının tribolojik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneyler sonucunda aşınma oranları, ortalama sürtünme katsayıları ve yüzey morfolojileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, yüzey modifikasyonlarının Ti6Al4V alaşımının aşınma ve sürtünme davranışı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Tribolojik performansın hem üretim yöntemine hem de uygulanan yüzey işlemine bağlı olarak değişiklik gösterebildiği belirlenmiştir. Genel olarak, yüzey modifikasyonlarının aşınma direncini artırma ve sürtünme davranışını iyileştirme potansiyeline sahip olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle lazer yüzey tekstürleme ve termal oksidasyonun birlikte uygulanmasının, tekil yüzey işlemlerine kıyasla daha olumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ti6Al4V, lazer yüzey tekstürleme, oksitleme, triboloji, aşınma, eklemeli imalat, döküm.

SUMMARY

Ti6Al4V alloy, which is widely used in advanced engineering applications, stands out as an important engineering material in the aerospace, biomedical and automotive industries due to its high specific strength, superior corrosion resistance and biocompatibility. However, its relatively poor tribological properties, such as low wear resistance and high coefficient of friction, limit its use in some applications.

In this study, the effects of different surface modifications applied to Ti6Al4V alloys produced by casting and metal additive manufacturing methods on tribological performance were investigated. In this context, specimens were prepared in various surface conditions including as-received, thermally oxidized, parallel line and dimple textured surfaces, as well as combinations where laser surface texturing and thermal oxidation were applied sequentially. Wear and friction tests were carried out under a normal load of 2N, and the microstructural properties and surface morphological characteristics of the specimens were examined in detail. Considering the effect of titanium dioxide layers formed by thermal oxidation on wear behavior, the influence of applying laser surface texturing before and after thermal oxidation on tribological properties was also evaluated. As a result of the experiments, wear rates, average coefficients of friction and surface morphologies were comparatively analyzed.

The obtained results demonstrate that surface modifications have a significant effect on the wear and friction behavior of Ti6Al4V alloy. It was determined that the tribological performance may vary depending on both the manufacturing method and the applied surface treatment. In general, surface modifications were observed to have the potential to improve wear resistance and enhance friction behavior. In particular, the combined application of laser surface texturing and thermal oxidation was found to yield more favorable results compared to individual surface treatments.

Keywords: Ti6Al4V, laser surface texturing, oxidation, tribology, wear, additive manufacturing, casting.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, bu süreçte destek ve yardımlarını esirgemeyen kıymetli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Abdullah SERT'e ve deneyler sırasında sağladığı yardımlar ile değerli katkılarından dolayı ikinci danışman hocam Öğr. Gör. Dr. Niyazi ÇAVUŞOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamı FHD-2025-3603 no'lu proje kapsamında destekleyen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

Hayatım boyunca emeği, desteği ve koşulsuz sevgisiyle her zaman yanımda olan kıymetli annem Zübeyde VAROL'a; yaşamım boyunca emeği ve desteğini her daim hissettiren kıymetli babam Aydın VAROL'a; sevgi ve destekleriyle her an yanımda olan sevgili kız kardeşlerime; ayrıca, hayatımın her aşamasında anlayışı, desteği ve sevgisiyle yanımda olan, varlığıyla bana güç veren sevgili eşim Zeki SAKARYA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **vii**

SUMMARY ..... **viii**

TEŞEKKÜR ..... **ix**

İÇİNDEKİLER ..... **x**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xiv**

ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xviii**

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xix**

1. GİRİŞ VE AMAÇ **1**

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **5**

2.1. Titanyum ve Alaşımları 5

2.1.1. Titanyumun mikroyapısı 6

2.1.2. Alaşım elementlerinin etkisi 9

2.1.3. Titanyum alaşımlarının sınıflandırılması 12

2.1.3.1. Alfa alaşımları 13

2.1.3.2. Yakın alfa alaşımları 14

2.1.3.3. Alfa + Beta alaşımları 14

2.1.3.4. Yakın beta alaşımları 16

2.1.3.5. Beta alaşımları 16

2.1.4. Titanyum ve alaşımlarının termal oksidasyonu 17

2.1.5. Titanyumun korozyon ve aşınma davranışı 19

2.1.5.1. Korozyon davranışı 19

2.1.5.2. Aşınma davranışı 20

2.1.6. Ti6Al4V alaşımı 21

2.1.6.1. Ti6Al4V alaşımının ısıl işlem ve mikroyapısı 22

2.1.7. Titanyumun uygulanma alanları 24

İÇİNDEKİLER

Sayfa

2.2. Eklemeli İmalat 26
2.2.1. Toz yatağı füzyon yöntemi 28
2.2.1.1. Seçici lazer sinterleme 28
2.2.1.2. Seçici lazer ergitme 29
2.2.1.3.Elektron ışını ile ergitme 29
2.3. Eklemeli İmalat ile Üretilen Ti6Al4V Alaşımı 32
2.3.1. EBM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımı 33
2.3.2. EBM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımının faz dönüşümü 34
2.3.3. EBM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımının tribolojik özellikleri 35
2.4. Döküm Yöntemi ile Üretilen Ti6Al4V Alaşımı 36
2.5. Yüzey Tekstürleme Yöntemleri 38
2.5.1. Lazer yüzey tekstürleme 39
2.5.1.1. Lazer ablasyon 39
2.5.1.2. Lazer girişimi 40
2.5.1.3. Lazer şok işleme 41
2.6. Lazer Parametrelerinin Yüzey Tekstürüne Etkisi 42
2.7. LST ile Malzemelerin Tribolojik Performansının İyileştirilmesi 42
2.7.1.Tekstür dizaynı 43
2.7.1.1. Tekstür yoğunluğu 45
2.7.1.2. Tekstür boyut ve derinliği 46
2.7.1.3. Tekstür şekli 47
2.7.1.4. Tekstür hizalama 47
2.7.2. LST ile sürtünme katsayısını ve aşınma direncini değiştirme 48
2.7.2.1. Kuru koşullar 49
2.7.2.2. Yağlanmış koşullar 49

İÇİNDEKİLER

Sayfa

2.8. Lazer Yüzey Tekstürleme Uygulamaları 50
2.9. Diğer Yüzey Tekstürleme Teknikleri 52
2.9.1. Aşındırıcı jet işleme/ kumlama 52
2.9.2. Ultrasonik destekli taşlama 53
2.9.3. Kimyasal aşındırma 53
2.9.4. Metal enjeksiyon kalıplama 54
2.9.5. Mikro frezeleme 54
2.9.6. Mikro elektro erozyon yöntemi 55
2.9.7. İyonize fiziksel buhar biriktirme 55
2.9.8. Kimyasal destekli taşlama 55
3. MATERYAL VE YÖNTEM 56
3.1. Kimyasal Bileşim 58
3.2. Numune Hazırlama 59
3.2.1. Kalıplama işlemi 59
3.2.2. Numuneleri zımparalama ve parlatma 60
3.2.3. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı 62
3.2.4. Lazer teskstürleme işlemleri 63
3.2.5. Oksitleme işlemi 64
3.2.6. Aşınma cihazı 66
3.2.7. Mikroyapı karakterizasyonu 67
3.2.8. Taramalı elektron mikroskobu 68
3.2.9. XRD cihazı 68
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 70
4.1. Mikroyapısal İncelemeler 70

İÇİNDEKİLER

Sayfa

4.2. Triboloji Deney İncelemeleri 75
4.2.1. Aşınma analizleri 75
4.2.2. SEM analizleri 81
4.2.3. Sürtünme analizleri 100
4.2.4. XRD Analizleri 107
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 110
KAYNAKLAR DİZİNİ 113

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2.1. Titanyumun HCP ile HMK kafes yapıları (Leyens ve Peters, 2003). 7

2.2. Widmanstätten yapısı, alfa tabakaları ve beta plakaları (Lütjering, 1999; Güden, 2015). 8

2.3. Bazı alaşım elementlerinin titanyum faz diyagramına etkileri (Leyens ve Peters,2003; Balaban, 2007). 9

2.4. Al ve V elementleri ile alaşımlandırılan titanyum faz diyagramı (Leyens ve Peters,2003; Akdaş, 2006). 10

2.5. Ti-O Faz diyagramı (Okamoto, 2011). 18

2.6. Ti6Al4V alaşımının faz diyagramı (Demirel ve Karaağaç, 2021). 22

2.7. 1100 °C sıcaklıktan soğutma sonrasında α lamelleri ve tutulmuş β fazından oluşan Ti6Al4V mikroyapısı (Sankaran ve Mishra, 2017). 23

2.8. Rolls Roys Trent motorlarının ön fanları ile Eurocopter BO105 ve BK117 helikopterlerinin rotor kafaları (Leyens ve Peters, 2003). 25

2.9. Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş yakıt nozulu ve roket parçası (Metal, 2014; Harbaugh, 2015). 27

2.10. SLS tekniğinin şema ile gösterimi. 28

2.11. SLE tekniğinin şema ile gösterimi (Spears ve Gold, 2016). 29

2.12. EBM tezgahının şematik gösterimi (Dai vd., 2018). 31

2.13. Eklemeli imalat yöntemleriyle üretilmiş Ti6Al4V alaşımlarının çekme dayanımı uzama grafiği ve ilgili mikroyapıları (Dutta ve Froes, 2017). 33

2.14. a) EBM yöntemi ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımının mikroyapısı; ok işaretleri tane sınırı boyunca oluşan α fazı b) Kolonsal öncül β taneleri içerisinde gözlenen lamelli α+β faz düzeni (Xu, 2021). 34

2.15. a) Ti6Al4V faz diyagramı, b) Ti6Al4V soğuma diyagramı (Liu ve Shin, 2019). 35

2.16. Döküm sonrası Ti6Al4V alaşımının mikroyapısı (Nastac vd., 2006). 37

2.17. LST sürecinin şematik diyagramı (Liu vd., 2017). 40

2.18. Lazer şok işleme şeması (Li vd., 2014). 41

2.19. (a) Farklı tekstür şekilleri, (b) tekstür parametreleri ve (c) tekstür tasarımının kayma sırasında kuru ve yağlanmış ortamda temas durumuna etkisi (Mao vd., 2020). 44

2.20. LST uygulanmış Ti6Al4V alaşımının yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri: (a) doğrusal tekstür geometrisi ve (b) çukur (dimple) tekstür geometrisi; (c) LST uygulanmamış yüzey (çizgi 1), doğrusal tekstürlü yüzey (çizgi 2) ve çukur tekstürlü yüzey (çizgi 3) için kayma süresine bağlı COF değişimi (Kumari vd., 2015). 45

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2.21. LST uygulanmış AISI52100 rulman çeliklerinin yüzey morfolojisine ait SEM görüntüleri: (a) %5, (b) %15 ve (c) %35 tekstür yoğunluğu. Kayma frekansının aşınma oranlarına etkisi: (d) 10 Hz ve (e) 2 Hz frekansta, tekstür uygulanmamış ve farklı tekstür yoğunluklarına sahip yüzeylerle temas eden bilyaların aşınma oranları (Li vd., 2019). 46

2.22. Tekstürlü numunelerin optik fotoğrafları: (a) Tekstürlü seramik disk, (b) Doğrusal oluklar, (c) dalgalı oluklar, (d) Farklı aralıklara sahip pürüzsüz ve tekstürlü numunelerin ortalama sürtünme katsayısı (kayma hızı = 80 m/dak, yük = 15 N) (Xing vd., 2017)..... 48

2.23. Lazer yüzey tekstürleme örnekleri (Mao vd., 2020)..... 50

2.24. Aşındırıcı jet işleme yöntemi şeması (Vishnoi vd., 2021)..... 52

2.25. Ultrasonik destekli taşlama (Lauwers vd., 2010). 53

2.26. Metal Enjeksiyon Kalıplama (Ammosova vd., 2020). 54

3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılacak iş akış şeması. 58

3.2. (a) Struers CitoPress-1 sıcak kalıplama cihazı, (b) Bakalit tozu, (c) Numunenin kalıplanması, (d) Kalıplanmış numuneler. 60

3.3. (a) Struers UniForce manuel numune tutucu sistemi, (b) Struers TegraForce-5 zımparalama ve parlatma cihazı. 61

3.4. (a) P120 zımpara kâğıdı, (b) P1200 zımpara kâğıdı, (c) Struers marka, 250 mm çaplı zımparalama–parlatma tablası. 62

3.5. Mekanik yüzey hazırlığı tamamlanan numunelerin parlatma sonrası görünümü. 62

3.6. Mitutoyo Surf Test SJ-400 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı. 63

3.7. FiberJet markalı fiber lazer markalama cihazı. 64

3.8. Oksitleme işlemi sırasında protherm marka laboratuvar fırınının görünümü. 65

3.9. Döküm yöntemi ve EBM eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş Ti6Al4V numunelerine ait görseller. 66

3.10. Aşınma deney cihazı (CSM Instruments-Tribometer). 67

3.11. Nikon Eclipse L150 optik mikroskobu ve aşınma testi sonrası numunenin incelenmesi. 67

3.12. Hitachi Markasının Regulus 8230 taramalı elektron mikroskobu. 68

3.13. Panalytical Empyrean marka XRD cihazı. 69

4.1. Döküm yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımlarının 200x büyüklükte mikroskop görüntüleri. 72

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

4.2. EBM eklemeli imalat yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımlarının 200x büyüklükte mikroskop görüntüleri. 74
4.3. Döküm yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımı numunelerin aşınma testi sonrasında elde edilen mikroskobik görüntüleri. 77
4.4. EBM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımı numunelerin aşınma testi sonrasında elde edilen mikroskobik görüntüleri. 80
4.5. Döküm ile üretilen Ti6Al4V numunelerin aşınma öncesi SEM görüntüleri 82
4.6. Döküm ile üretilmiş R numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri 83
4.7. Döküm ile üretilmiş O numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri 84
4.8. Döküm ile üretilmiş L1 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri 85
4.9. Döküm ile üretilmiş L2 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri 86
4.10. Döküm ile üretilmiş L1O numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri 87
4.11. Döküm ile üretilmiş L2O numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri 88
4.12. Döküm ile üretilmiş OL1 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri 89
4.13. Döküm ile üretilmiş OL2 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri 90
4.14. EBM ile üretilen Ti6Al4V numunelerin aşınma öncesi SEM görüntüleri 91
4.15. EBM ile üretilmiş R numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri 92
4.16. EBM ile üretilmiş O numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri 93
4.17. EBM ile üretilmiş L1 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri 94
4.18. EBM ile üretilmiş L2 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri 95
4.19. EBM ile üretilmiş L1O numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri 96
4.20. EBM ile üretilmiş L2O numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri 97
4.21. EBM ile üretilmiş OL1 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri 98
4.22. EBM ile üretilmiş OL2 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri 99
4.23. Farklı yüzey modifikasyonlarına sahip döküm ve EBM numunelerin sürtünme katsayı değerleri. 100
4.24. Döküm yöntemi ile üretilmiş numunelerin sürtünme katsayısının mesafeye bağlı değişimi. 103
4.25. EBM yöntemi ile üretilmiş numunelerin sürtünme katsayısının mesafeye bağlı değişimi. 104
4.26. Farklı yüzey modifikasyonlarına sahip EBM ve döküm numunelerin aşınma hacimlerinin karşılaştırmalı olarak gösterimi. 106

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

4.27. Döküm yöntemi ile üretilen Ti6Al4V numunelerine ait XRD analizi 107
4.28. EBM eklemeli imalat yöntemi ile üretilen Ti6Al4V numunelerine ait XRD analizi 108

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

2.1. Titanyumun temel özelliklerinin diğer metaller ile karşılaştırılması. 5
2.2. Titanyum alaşımlarının temel özellikleri ve başlıca kullanım alanları (Yalçın ve Varol, 2009). 11
2.3. Titanyum alaşım gruplarının karşılaştırılması (Pushp vd., 2022). 12
2.4. Alaşımsız titanyumun farklı ara yer oranlarına sahip tipleri ve mekanik özellikleri (Kurt ve Orhan, 2005). 13
2.5. α-Ti alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri (Kurt ve Orhan, 2005). 13
2.6. α+ β Ti alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri (Kurt ve Orhan, 2005). 15
2.7. β Ti alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri (Kurt ve Orhan, 2005). 17
2.8. Grade 5 ve Grade 23 alaşımlarının kimyasal bileşimi (Polmear vd, 2017). 21
2.9. STA koşullarında işlemli ve tavlanmış Ti6Al4V'nin alaşımının mekanik özellikleri (Polmear vd., 2017). 22
2.10. Lazer yüzey tekstürlemenin farklı mekanik bileşenler üzerindeki uygulamaları. 51
3.1. Farklı üretim yöntemleriyle üretilen Ti6Al4V numuneleri ve yüzey işlemleri. 57
3.2. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi (ağırlıkça, %). 59
4.1. Döküm ve EBM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V numunelerin aşınma davranışlarının karşılaştırılması. 81
4.2. Farklı yüzey işlemlerine ait numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma hacmi değerleri. 106

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
°C	Santigrat derece (Celsius)
Å	Angström
λ	Dalga boyu
α	Alfa
β	Beta
θ	Kırınım açısı
g	Gram
m	Metre
cm	Santimetre
mm	Milimetre
cm^3	Santimetre Küp
O	Oksijen
N	Azot
C	Karbon
Cr	Krom
Si	Silisyum
Ti	Titanyum
Al	Alüminyum
Fe	Demir
Ni	Nikel
V	Vanadyum
Sn	Kalay
Zr	Zirkonyum
Mo	Molibden
Nb	Niyobyum
Ta	Tantal
Re	Renyum
k	Isıl İletkenlik Katsayısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
TiO_2	Titanyum dioksit
Ti_3Al	Titanyum–alüminyum intermetalik fazı
µm	Mikrometre
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü (µm)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
HCP	Sıkı Paketli Hekzagonal
HMK	Hacim Merkezli Kübik
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
STA	Çözeltiye Alma ve Yaşlandırma
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kuruluşu
AM	Eklemeli İmalat
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
SLE	Seçici Lazer Ergitme
EBM	Elektron Işını ile Ergitme
LST	Lazer Yüzey Tekstürleme
DLIP	Doğrudan Lazer Girişimi ile Desenleme
COF	Sürtünme Katsayısı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X-Işını Kırınımı
CSM	Sürekli Rijitlik Ölçümü
EDS	Enerji Dağılımlı X-Işınları Analizi

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Titanyum ve titanyum esaslı alaşımlar, yüksek özgül mukavemetleri, düşük yoğunlukları ve üstün korozyon dirençleri sayesinde ileri mühendisliğin kritik gereksinimlerini karşılayan önemli malzeme sınıfları arasındadır (Çevirme, 2025). Bu alaşımlar, özellikle yüksek sıcaklıklarda mekanik kararlılıklarını büyük ölçüde koruyabilmeleri nedeniyle modern endüstride performans açısından üst düzey uygulamalarda tercih edilmektedir. Nitekim literatürde titanyum alaşımlarının sürekli çalışma sıcaklık aralığının yaklaşık 550 °C ile 700 °C arasında değiştiği ifade edilmekte olup, bu sıcaklık seviyelerinde dahi yapısal bütünlüğünü muhafaza edebilen malzeme sayısı oldukça sınırlıdır (İçdem, 2007). Bu nedenle titanyum ve alaşımları, sahip oldukları termal ve mekanik özellikler sayesinde kritik görevlerde geniş bir mühendislik uygulama alanı bulmaktadır.

Metalik malzemelerin kullanım yaygınlığı açısından incelendiğinde titanyumun, alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra dördüncü sırada yer aldığı görülmektedir. Bununla birlikte Ti6Al4V alaşımı Ti64 olarak bilinen α+β titanyum alaşımı olup, tüm titanyum alaşımlarının yaklaşık %75–85 gibi önemli bir bölümünü oluşturmasıyla dikkat çekmektedir (İçdem, 2007). Bu olağanüstü kullanım oranı, söz konusu alaşımın çok yönlü mühendislik gereksinimlerine cevap verebilen bir yapıya sahip olmasıyla ilişkilendirilmektedir. Ti6Al4V alaşımı, 4,5 g/cm³ gibi düşük bir yoğunluk sunarken aynı zamanda yaklaşık 1660 °C'lik yüksek ergime sıcaklığına sahiptir. Bir başka önemli nokta ise, titanyum alaşımlarının mukavemet değerlerinin alüminyum alaşımlarının yaklaşık 2,5 katına ulaşmasıdır (Yıldırım A. , 2022). Bu durum, malzemenin hafiflik ve dayanıklılığı aynı anda gerektiren uygulamalarda vazgeçilmez hâle gelmesine neden olmaktadır.

Ti6Al4V alaşımı, yüksek yük taşıma kapasitesi ile hafiflik avantajını bir arada sunması nedeniyle jet motorları, gaz türbinleri ve çeşitli hava aracı bileşenlerinde yaygın olarak kullanılan önemli mühendislik malzemesidir. Alaşımın yüksek sıcaklık dayanımı, biyouyumluluk ve korozyon direnci gibi üstün özellikleri ise onu havacılık ve uzay sanayii, otomotiv teknolojileri, biyomedikal implant üretimi, savunma sistemleri ve kimyasal proses

ekipmanları gibi yüksek performans gerektiren farklı endüstriyel alanlarda geniş bir kullanım yelpazesine sahip kılmaktadır (Ayday, 2018).

Bu olumlu özelliklerine karşın titanyum ve özellikle Ti6Al4V alaşımı, sahip olduğu malzeme özellikleri ve üretim süreçleri nedeniyle belirli zorluklar içermektedir. Alaşımın düşük termal iletkenliği, kesme bölgesinde oluşan ısının hızla dağılmasını engellemekte ve bu durum yüksek sıcaklık birikimine yol açmaktadır. Kesme sırasında oluşan bu yerel ısı artışı, talaş oluşum mekanizmasını olumsuz etkilemekte, talaşın kesici takıma yapışmasını kolaylaştırmakta ve yüzey kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır (Çiftçi ve Gökçe, 2019). Ayrıca yüksek sıcaklıklarda titanyumun kesici takımla kimyasal reaksiyona girmesi sonucu takım ucunda sıcaklığın yaklaşık 1100°C seviyelerine kadar yükselmesi, takım aşınmasını hızlandıran ve proses verimliliğini düşüren etki oluşturmaktadır (Akıllılar, 2020).

Geleneksel imalat yöntemleri incelendiğinde, Ti6Al4V parçalarının genellikle dövme, döküm ve haddeleme gibi kütlesel şekillendirme işlemlerinden geçirildiği, ardından nihai boyut ve toleranslara ulaşmak için kapsamlı talaşlı imalat operasyonlarına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bu süreçler hem büyük miktarda malzeme kaybına neden olmakta hem de uzun hazırlık ve üretim süreleri gerektirmektedir. Buna karşın son yıllarda hızla gelişen eklemeli imalat teknolojileri; malzemenin katmanlı olarak biriktirilmesi esasına dayanarak minimum atık üretimi, geometrik özgürlük ve yüksek boyutsal hassasiyet gibi önemli avantajlar sunmaktadır (Donachie, 2000). Eklemeli imalatın sağladığı katmanlı yapı sayesinde karmaşık geometrilerin kolaylıkla üretilebilmesi, malzeme tüketiminin azaltılması, üretim sürecinin esnekliği ve yenilikçi tasarımlara imkân tanıması gibi avantajlar, Ti6Al4V kullanımını önemli ölçüde artırmaktadır (Gökdemir, 2005). Ancak bu üretim süreçlerinde, malzeme yüzeyine uygulanan yüksek enerji yoğunluğu ile kısa etkileşim süreleri sonucunda keskin sıcaklık gradyanları ve yüksek soğuma hızları meydana gelmektedir. Bu durum alaşımın termal davranışını ve mikroyapı evrimini önemli ölçüde etkileyerek yüksek düzeyde kalıntı gerilmelerin oluşmasına zemin hazırlamaktadır. Oluşan bu kalıntı gerilmeler ise Ti6Al4V alaşımının mekanik dayanımını ve özellikle yorulma performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Liu ve Shin, 2019). Bu nedenle, eklemeli imalat her ne kadar geometrik karmaşıklık ve malzeme verimliliği açısından önemli avantajlar sunsa da üretim sonrası ısıl işlem veya yüzey modifikasyon işlemlerinin uygulanması çoğu durumda gereklilik hâline gelmektedir.

Titanyumun yüksek korozyon direnci, metal yüzeyinde ortam sıcaklığında kendiliğinden oluşan ve pasif karakterde olan titanyum dioksit (TiO_2) tabakasından kaynaklanmaktadır. Kimyasal açıdan oldukça kararlı olan bu oksit tabakası, agresif ortamlara karşı etkin bir koruma sağlayarak titanyumun geniş bir kullanım alanı bulmasına olanak tanımaktadır (Ayday, 2018). Bununla birlikte, oksit tabakasının kalınlığı, bütünlüğü ve yapısal kararlılığı çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterebildiğinden, titanyumun farklı çalışma ortamlarında güvenilir ve etkin biçimde kullanılabilmesi için yüzey modifikasyon işlemleri önemli bir gereklilik hâline gelmektedir (Ashrafizadeh ve Ashrafizadeh, 2009). Özellikle yüksek sıcaklık, aşındırıcı ortamlar, biyolojik temas koşulları ve tekrarlı mekanik zorlanmaların söz konusu olduğu uygulamalarda yüzey özelliklerinin optimize edilmesi zorunlu olmaktadır.

Termal oksidasyon işleminin etkinliği, uygulanan sıcaklık ve süre parametrelerine doğrudan bağlıdır. Bu parametreler, oluşan oksit tabakasının morfolojisini, kimyasal bileşimini ve yapısal kararlılığını belirleyen temel faktörlerdir. Yüksek sıcaklık ve uzun süreli oksidasyon koşullarında, yüzey ile alt tabaka arasındaki bağların zayıflaması ve oksit tabakasının pullanması gibi istenmeyen etkiler ortaya çıkabilmektedir. Buna karşılık, düşük sıcaklık ve kısa süreli oksidasyon uygulamaları ise süreksiz, heterojen ve yeterli koruyuculuk sağlamayan oksit tabakalarının oluşmasına neden olabilmektedir (Ezugwu ve Wang, 1997). Bu nedenle, optimum termal oksidasyon koşullarının belirlenmesi, titanyum alaşımlarının uzun ömürlü, güvenilir ve performansı yüksek bir şekilde kullanılabilmesi açısından önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır.

Bu bağlamda, titanyumun yüzey özelliklerini iyileştirmeye yönelik olarak çeşitli termokimyasal işlemler, ısıl işlemler ve kaplama teknikleri yaygın şekilde uygulanmaktadır. Bu yöntemler arasında termal oksidasyon, yüzeydeki oksit tabakasının kontrollü biçimde kalınlaştırılmasını sağlayarak malzemenin yüzey sertliğini ve aşınma performansını artırması bakımından öne çıkan etkili bir yöntemdir (García-Rueda vd., 2022). Termal oksidasyon işlemi, belirli bir sıcaklık ve süre boyunca oksijenin yüzeye difüzyonu ile ilerleyen kontrollü bir süreç olup, yüzeyde mekanik ve kimyasal dayanımı artıran titanyum oksit tabakasının oluşumunu sağlamaktadır.

Titanyum ve alaşımlarının aşınma performansını geliştirmeye yönelik araştırmalarda mikro bilyeli dövme, ısıl işlem, kaplama teknikleri ve yüzey tekstürleme gibi çeşitli yüzey iyileştirme yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Yüzey tekstürleme özelinde, temas yüzeyinin belirli bölgelerinde mikro geometrilerin oluşturulması ile gerçek temas alanının azaltılması amaçlanmakta; bu sayede sürtünme davranışı düzenlenmekte ve aşınma mekanizmaları daha kararlı hâle getirilmektedir. Bu mikroyapılar, yüzey direncinin artırılmasına ve malzemenin çalışma ömrünün uzatılmasına önemli katkı sağlamaktadır (Huang vd., 2025).

Yüzey tekstürleme, malzeme yüzeyine belirli mikro veya nano ölçekli desenlerin kontrollü biçimde uygulanması yoluyla yüzeyin işlevsel özelliklerini geliştirmeyi amaçlayan bir yöntemdir. Bu yaklaşım; yorulma ömrünün uzatılması, aşınma ve korozyon direncinin artırılması, biyolojik kirlenmenin önlenmesi, hidrofobik yüzey davranışının güçlendirilmesi ve yük taşıma kapasitesinin iyileştirilmesi gibi çok çeşitli performans kriterlerinin optimize edilmesinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Vishnoi vd., 2021). Son yıllarda özellikle lazer tabanlı yüzey tekstürleme tekniklerine yönelik çalışmalar büyük bir ivme kazanmıştır. Bu yöntemde yüzey üzerinde mikro ve nano ölçekte yapılar oluşturularak yüzey enerjisi, pürüzlülük ve ıslanabilirlik özellikleri istenen yönde değiştirilebilmekte; böylece malzemenin tribolojik ve korozyon davranışlarında önemli iyileşmeler sağlanabilmektedir. Lazerle tekstürleme uygulamalarında genellikle pikosaniye, femtosaniye ve nanosaniye darbeli lazerler tercih edilmekte olup, yüksek hassasiyetli ve tekrarlanabilir yüzey morfolojileri üretilebilmektedir (Liu vd., 2004).

Ti6Al4V, yüksek biyouyumluluğu, düşük yoğunluğu ve üstün korozyon direnci nedeniyle birçok ileri mühendislik uygulamasında tercih edilen bir malzeme olmakla birlikte, zayıf aşınma direnci sebebiyle benzer malzemelere kıyasla daha kısa kullanım ömrüne sahip olması titanyumun işlenebilirliğinin iyileştirilmesi, literatürde hâlen yoğun bir şekilde araştırılan konular arasındadır (García-Rueda vd., 2022). Bu çalışmada, Ti6Al4V titanyum alaşımının döküm ve eklemeli imalat yöntemleri birbirinden farklı üretim süreçleri kapsamında gerçekleştirilmiş; ardından uygulanan termal oksidasyon ve lazer tabanlı yüzey işlem teknikleriyle yüzey özelliklerinde sağlanan iyileştirmeler kapsamlı olarak incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Titanyum ve Alaşımları

Titanyum, yer kabuğunda yaklaşık %6'lık bir oranla bulunan yaygın elementlerden biri olmasına karşın, üretim süreçlerinin karmaşıklığı ve dönemin sınırlı teknolojik olanakları nedeniyle 1940'lı yıllara kadar endüstriyel ölçekte değerlendirilememiştir. Titanyumun ekonomik olarak işlenebilmesine imkân tanıyan gelişme, Wilhelm Kroll tarafından bu dönemde geliştirilen ve literatürde *Kroll Prosesi* olarak adlandırılan yöntemle sağlanmıştır. Söz konusu yöntemin ticari olarak uygulanabilir hâle gelmesinin ardından, 1947 yılında Amerika Birleşik Devletleri Silahlı Kuvvetleri titanyumu stratejik bir malzeme olarak ele almaya başlamış; malzemenin ilk mühendislik uygulamaları ise 1952 yılında DC-7 model uçağın motor yanma haznesi ile kanatlarındaki motor bağlantı elemanlarının üretiminde gerçekleştirilmiştir (Çakar, 2006; İçdem, 2007).

Titanyum alaşımlarının endüstriyel ölçekte giderek artan bir öneme sahip olmasının temelinde ise düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci, düşük ısıl iletkenlik, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek mekanik mukavemet, düşük elastik modül ve uzun hizmet ömrü gibi bir dizi üstün malzeme özelliği bulunmaktadır. Bu kapsamlı avantajlar, titanyum ve alaşımlarının havacılık ve uzay mühendisliğinden denizcilik ve otomotive; kimya ve petrokimya endüstrisinden biyomedikal implant üretimine ve spor malzemelerine kadar geniş bir yelpazede kullanılmasını mümkün kılmaktadır (Nouari ve Makich, 2013; Ramesh vd., 2008).

Saf titanyum, 4,51 g/cm³ yoğunluğu ile alüminyum ve çelik arasında konumlanan bir özgül ağırlığa sahip olup, 1668 °C civarındaki yüksek ergime sıcaklığı sayesinde demirden daha yüksek bir termal kararlılık sergileyen hafif metal sınıfında yer almaktadır. Yüksek korozyon direnci, saf titanyumu özellikle kimyasal açıdan zorlayıcı ortamlar için uygun bir seçenek hâline getirmekte; mekanik dayanımın belirleyici olmadığı uygulamalarda güvenilir bir biçimde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Çizelge 2.1' de titanyumun temel özelliklerinin diğer metaller ile karşılaştırılması gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Titanyumun temel özelliklerinin diğer metaller ile karşılaştırılması.

Özellik	Ti	Al	Fe	Ni
Yoğunluk (g/cm³)	4.51	2.70	7.87	8.90
Ergime Sıcaklığı (°C)	1668	660	1538	1455
Elastik Modül (GPa)	105–120	70	210	200
Çekme Mukavemeti (MPa)	350–1100 (alaşıma bağlı)	90–570	250–550	370–850
Korozyon Direnci	Çok yüksek	Orta	Düşük–orta (korozyona hassas)	Çok yüksek
Termal İletkenlik (k) (W/m·K)	~22	~237	~80	~90
Yoğunluk / Mukavemet Oranı	Çok yüksek	Yüksek	Orta	Orta
Oksijen ve diğer elementlere reaktivite	Yüksek (özellikle yüksek sıcaklıkta)	Düşük	Düşük–orta	Düşük
Başlıca Kullanım Alanları	Havacılık, savunma, biyomedikal	Taşımacılık, paketleme, inşaat	Yapısal uygulamalar, makine imalatı	Kimya endüstrisi, kaplamalar

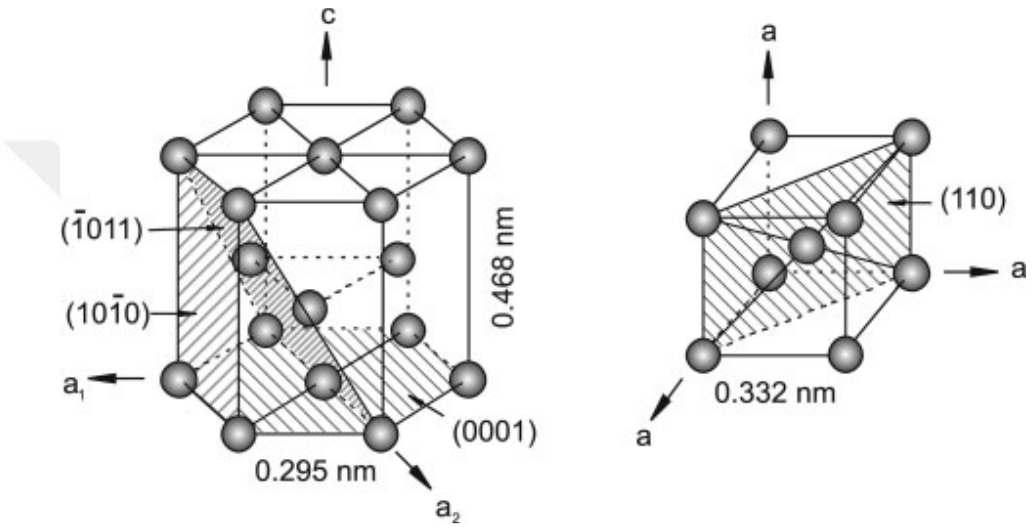
2.1.1. Titanyumun mikroyapısı

Titanyum, atom numarası 22 ve atomik kütlesi 47,90 olan, allotropik davranış sergileyen bir geçiş metali olarak sınıflandırılmaktadır. Bu element, 885 °C'nin altındaki sıcaklıklarda Sıkı Paketli Hekzagonal (HCP) kristal yapıda bulunmakta ve α fazı olarak adlandırılan bu yapı içerisinde kararlı hâlini sürdürmektedir. 885 °C ile 1668 °C arasındaki sıcaklıklarda, yani erime sıcaklığına kadar olan bölgede ise titanyum, Hacim Merkezli Kübik (HMK) kristal yapıya dönüşmekte ve β fazı hâlinde kararlılık göstermektedir (Akdaş, 2006).

Metal malzemelerin kristal örgü yapıları, sahip oldukları mekanik özellikler üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Örneğin, plastik deformasyon kabiliyeti kristal yapıya göre değişmekte olup, bu özellik HCP yapılarda en düşük, Yüzey Merkezli Kübik (YMK) yapılarda ise en yüksek seviyede gözlenmektedir. Bu bağlamda titanyum ve alaşımlarında, HCP kristal örgüsüne sahip α fazı, HMK kristal yapısındaki β fazına kıyasla plastik şekil değiştirmeye daha dirençli olup daha sınırlı deformasyon gösterebilmektedir (Akdaş, 2006). Ayrıca titanyumun kristal yapısındaki bu farklılıklar, malzemenin deformasyon davranışı ve atomik difüzyon süreçleri üzerinde de önemli rol oynamaktadır. Örneğin, HCP yapıda

bulunan α titanyum fazı, doğası gereği anizotropik mekanik özellikler sergilemektedir (Leyens ve Peters, 2003; Aktaş, 2006).

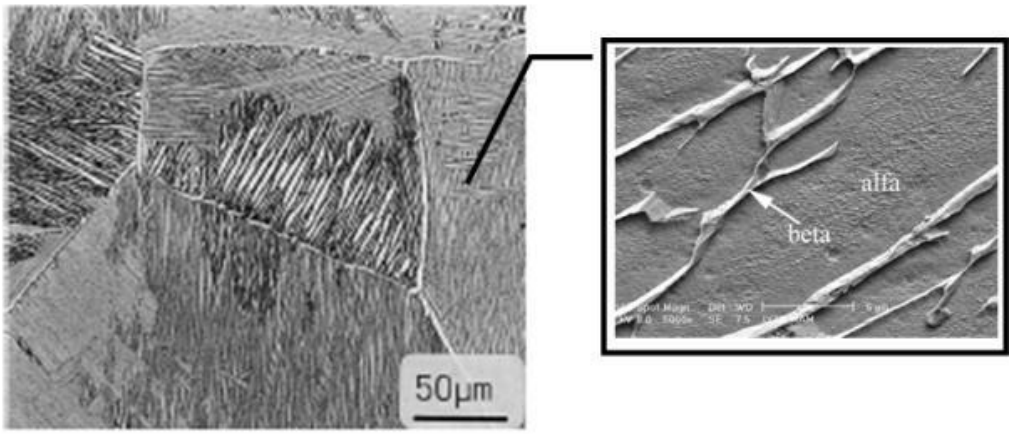
Allotropik karakteri nedeniyle titanyumun, farklı sıcaklık aralıklarında aldığı kristal yapılar Şekil 2.1'de şematik olarak sunulmakta olup, HCP ve HMK kafes yapılarına ait atom dizilimlerinin belirli düzlemler üzerindeki yönlenmeleri ayrıntılı biçimde gösterilmektedir (Leyens ve Peters, 2003; Güçlü, 2004).



Şekil 2.1. Titanyumun HCP ile HMK kafes yapıları (Leyens ve Peters, 2003).

Difüzyon olgusu, titanyumun kristal örgü yapısına doğrudan bağlı olarak değişim göstermektedir. HCP kafes yapısına sahip α fazında atomların yoğun şekilde istiflenmiş olması, atomik hareketliliği önemli ölçüde sınırlandırmakta olup bu nedenle difüzyonun gerçekleşmesi HMK düzenindeki β fazına kıyasla daha güç hâle gelmektedir. Bu yapısal fark, α fazının difüzyon kontrollü deformasyon mekanizmalarına karşı daha yüksek direnç göstermesine neden olmakta ve böylece sürünme dayanımı, HMK yapıdaki β fazına göre belirgin şekilde üstün olmaktadır (Akdaş, 2006). Titanyum ve alaşımları mikroyapısal açıdan genellikle α, yakın-α, α+β, yakın-β ve β olmak üzere beş temel faz sınıfı altında değerlendirilmektedir (Chen ve Thouas, 2015). Bu alaşımlarda gözlenen iki karakteristik mikroyapı tipi lamelli (widmanstätten) ve eşeksenli tane yapılarıdır. Lamelli mikroyapı, yüksek sıcaklıklarda kararlı olan β fazının soğutulması sırasında oluşurken; eşeksenli tane yapısı ise çoğunlukla rekristalizasyon süreçlerinin bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Mikroyapının ince veya kaba olması büyük ölçüde soğuma hızına bağlıdır. Hızlı soğutma,

ince lamelli yapıların oluşumunu teşvik ederken; nispeten yavaş soğutma koşulları kaba lamelli bir mikroyapının gelişmesine neden olur. Çok ani ve yüksek hızdaki soğutma ise β fazının martenzitik dönüşümünü tetikleyerek iğnemsi, çok ince bir mikroyapı oluşmasına yol açmaktadır (Akdaş, 2006). Bunun yanında, ani soğumanın faz ayrışmasına fırsat tanımaması nedeniyle β fazı, α fazı içerisinde yönlenmiş çökeltiler hâlinde dağılım gösterir ve bu karakteristik morfoloji literatürde widmanstätten yapısı olarak tanımlanmaktadır (Lütjering, 1999; Güden, 2015). Söz konusu mikroyapı Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Widmanstätten yapısı, alfa tabakaları ve beta plakaları (Lütjering, 1999; Güden, 2015).

Titanyum ve alaşımlarında gözlenen mikroyapısal özellikler ister ince veya kaba taneli ister lamelli ya da eşeksenli formda olsun, malzemenin mekanik performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. İnce taneli mikroyapılar, tane sınırı yoğunluğunun artmasına bağlı olarak hem mukavemeti hem de sünekliği yükseltmekte, ayrıca çatlak ilerlemesini zorlaştırdığı için plastik deformasyon kapasitesini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Buna karşılık kaba taneli mikroyapılar, daha düşük tane sınırı yoğunluğu sayesinde özellikle yorulma çatlağı oluşumuna ve sürünme hasarına karşı daha yüksek direnç göstermektedir.

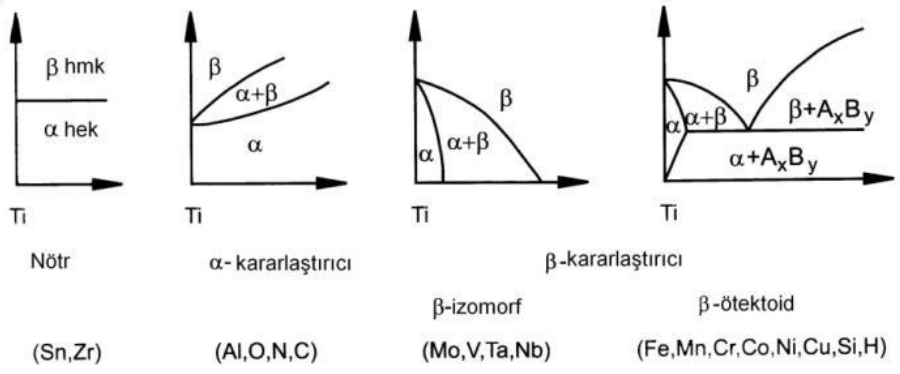
Eşeksenli mikroyapılar, izotropik mekanik davranış sergilediklerinden süneklik, yorulma dayanımı ve plastik deformasyon kabiliyetini artıran bir karaktere sahiptir. Lamelli mikroyapılar ise, yönlenmiş faz morfolojisi sayesinde kırılma tokluğunu iyileştirmekte, yorulma çatlaklarının oluşumunu geciktirmekte ve malzemenin sürünme dayanımını artırmaktadır. Ayrıca bimodal mikroyapılar hem eşeksenli hem de lamelli fazların bir arada

bulunduğu yapısal düzenleri nedeniyle her iki mikroyapının avantajlarını bünyesinde toplamaktadır (Leyens ve Peters, 2003; Aktaş, 2006).

2.1.2. Alaşım elementlerinin etkisi

Titanyumun 885 °C'de gerçekleşen α→β faz dönüşüm sıcaklığı, alaşım elementlerinin ilavesiyle artırılabilmekte ya da azaltılabilmektedir. Bu nedenle titanyum, faz dönüşüm davranışı üzerinde kontrol sağlamak amacıyla farklı elementlerle alaşımlandırılmakta, eklenen elementler ise faz kararlılığına etkilerine bağlı olarak α veya β fazını stabilize eden gruplar hâlinde sınıflandırılmaktadır (Balaban, 2007; Chen ve Thouas, 2015). Literatürde bu alaşım elementleri genel olarak nötr, α-stabilizatörü ve β-stabilizatörü olmak üzere üç ana kategori altında değerlendirilmektedir (Akdaş, 2006).

Şekil 2.3'te, çeşitli alaşımlandırma elementlerinin titanyumun faz diyagramı üzerindeki etkileri gösterilmekte olup, bu elementlerin α ve β faz bölgelerinin konumunu nasıl değiştirdiği açık biçimde ortaya konmaktadır.



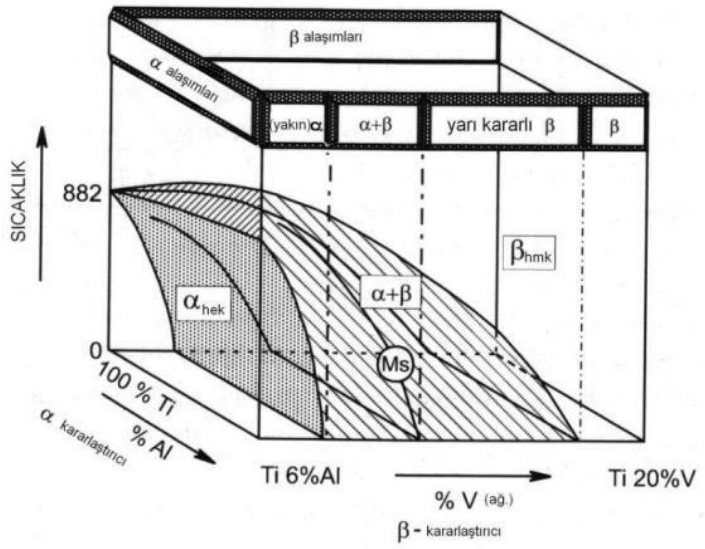
Şekil 2.3. Bazı alaşım elementlerinin titanyum faz diyagramına etkileri (Leyens ve Peters,2003; Balaban, 2007).

α-fazını kararlı hâle getiren alaşım elementleri, titanyumun α fazı bölgesinin sıcaklık aralığını genişletirken; β-fazı stabilizatörleri, β fazının daha düşük sıcaklıklarda kararlılık kazanmasına neden olmaktadır. Titanyumda α fazını stabilize eden başlıca elementler Al, O, N ve C olup, bunlar arasında alüminyum, etkisi ve alaşım sistemlerinde yaygın kullanımı nedeniyle en önemli α-stabilizatörü olarak kabul edilmektedir. Literatürde, alaşım içeriğinde Ti_3Al çökeltilerinin oluşmasını engellemek amacıyla alüminyum miktarının yaklaşık %6 ile

sınırlandırılması gerektiği belirtilmektedir (Leyens ve Peters, 2003; Balaban, 2007). Bunun yanında oksijen ilavesi, alaşımın mukavemetini artırmakta ve aynı zamanda imalat kabiliyetini olumlu yönde etkilemektedir (Akdaş, 2006; Pushp vd.,2022).

β fazını stabilize eden elementler ise β-izomorfik ve β-ötektik stabilizatörler olmak üzere iki alt grupta incelenmektedir. V, Mo ve Nb, titanyum alaşımlarında en yaygın kullanılan β-izomorfik stabilizatörler olup, Ta ve Re de bu gruba dahil edilmektedir. Öte yandan Cr, Fe ve Si, β-ötektik stabilizatörler arasında en sık tercih edilen elementlerdir. Buna karşılık Sn ve Zr, α veya β faz sınırı üzerinde belirgin bir değişime yol açmadıkları için nötr alaşım elementleri olarak değerlendirilmektedir (Lütjering ve Williams, 2003; Akdaş, 2006).

Titanyum ve alaşımlarının faz gruplarının oluşumu ve kararlılık aralıkları, özellikle Al ve V gibi α ve β fazını stabilize eden elementlerin alaşıma ilavesiyle belirgin şekilde değişmektedir. Söz konusu elementlerin faz dengesi üzerindeki etkileri ve titanyum alaşımlarında oluşturdukları faz alanları Şekil 2.4'te sunulan faz diyagramında ayrıntılı olarak gösterilmektedir (Akdaş, 2006).



Şekil 2.4. Al ve V elementleri ile alaşımlandırılan titanyum faz diyagramı (Leyens ve Peters,2003; Akdaş, 2006).

Alaşıma yalnızca sınırlı miktarda β-fazı kararlaştırıcı elementlerin eklenmesi, yakın-α titanyum alaşımlarının oluşumuna neden olmaktadır. Bununla birlikte, endüstride en yaygın kullanılan alaşım grubu α+β titanyum alaşımlarıdır. Bu alaşımlar oda sıcaklığında

genellikle %5 ile %40 arasında değişen hacim oranlarında β fazı içermekte ve bu faz dağılımı, malzemenin mekanik özelliklerinin ayarlanmasında önemli rol oynamaktadır. Faz diyagramında yer alan son grup ise, yüksek sıcaklıklarda kararlı hâlde bulunan tek fazlı β-titanyum alaşımlarıdır (Akdaş, 2006). Tek fazlı α-titanyum alaşımları, mühendislik uygulamaları için yeterli düzeyde kabul edilebilecek mukavemet değerlerine sahiptir. Buna karşılık α+β ve yakın-β alaşımlarının sertliği, uygulanan ısıl işlemler ve termomekanik süreçlerle artırılabilmektedir. β-titanyum alaşımları, yarı kararlı faz yapıları ve yüksek sertlik seviyeleri nedeniyle görece düşük süneklik göstermektedir. Yorulma davranışında ise faz yapısından ziyade, mikroyapının morfolojisi belirleyici olmaktadır. Nitekim literatür, kaba taneli veya lamelli mikroyapıya sahip titanyum alaşımlarının daha yüksek yorulma tokluğu sergilediğini ortaya koymaktadır. Korozyon direnci ise büyük ölçüde alaşım yüzeyinde oluşan oksit tabakasının kalınlığı ve yoğunluğu ile ilişkilidir (Leyens ve Peters, 2003; İçdem 2007). Çizelge 2.2' de titanyum alaşımlarının temel özellikleri ve başlıca kullanım alanları gösterilmektedir.

Çizelge 2.2. Titanyum alaşımlarının temel özellikleri ve başlıca kullanım alanları (Yalçın ve Varol, 2009).

Alaşım	**Karakteristik Özellikler**	**Başlıca Endüstriyel Kullanım Alanları**
Saf Ti (α alaşımı)	Yüksek biçimlendirme kabiliyeti ve iyi kaynaklanabilirlik	Isı eşanjörleri, kimyasal proses ekipmanları
Ti5Al2.5Sn (α alaşımı)	Üstün kaynaklanabilirlik ve kararlı mekanik performans	Jet motoru ve türbin motor sistemleri
Ti6Al2Sn4Cr2Mo (α'ya yakın alaşım)	Üstün sürünme dayanımı, yüksek tokluk ve gelişmiş mukavemet	Gaz türbini motorlarında dövme ürünleri, uçak dış yüzey kaplamaları
Ti6Al4V (α/β alaşımı)	Yüksek yorulma dayanımı, biyouyumluluk ve 300°C'ye kadar ısıl kararlılık	Ortopedik implantlar, gaz türbin diskleri, uçak iniş takımı bileşenleri
Ti6Al7Nb (α/β alaşımı)	Üst düzey biyouyumluluk ve yüksek mekanik dayanım	İmplant ve tıbbi cihaz uygulamaları
Ti35Nb5Ta7Zr (Metastabil β alaşımı)	Düşük elastik modül ve yüksek biyouyumluluk	İmplant uygulamaları
Ti13V11Cr3Al (β alaşımı)	İyi kaynaklanabilirlik ve yüksek dayanım özellikleri	Yüksek mukavemet gerektiren yapısal konstrüksiyonlar

2.1.3. Titanyum alaşımlarının sınıflandırılması

Titanyum ve alaşımlarının üstün mekanik ve fiziksel özellikleri, bu malzemelerin sınıflandırılmasında belirleyici unsurların başında yer almaktadır. Literatürde titanyum esaslı alaşımlar, faz bileşimleri ve termomekanik davranışları temel alınarak genel olarak α alaşımları, yakın-α alaşımları, α + β alaşımları, yakın-β alaşımları ve β alaşımları şeklinde beş ana grupta incelenmektedir (Pushp vd., 2022). Bu titanyum alaşım gruplarının karşılaştırılması Çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Titanyum alaşım gruplarının karşılaştırılması (Pushp vd., 2022).

Alaşım Grubu	Mikroyapısal Özellikler	Mekanik Performans	Diğer Özellikler
α Alaşımları	Eşeksenli veya lamelli α taneleri; difüzyon sınırlı	Orta mukavemet; yüksek süneklik ve üstün sürünme dayanımı	Yüksek sıcaklık ve korozyon direnci; iyi kaynak kabiliyeti
Yakın α Alaşımları	Çoğunlukla α taneleri; ince β bölgeleri	İyi sürünme dayanımı; orta–yüksek mukavemet	Yüksek sıcaklık uygulamalarına uygun; iyi oksidasyon direnci
α + β Alaşımları	Eşeksenli, lamelli veya bimodal yapı; kontrollü faz dağılımı	Mukavemet–süneklik dengesi en iyi olan grup	En yaygın kullanılan alaşım sınıfı; iyi işlenebilirlik
Yakın β Alaşımları	İnce lamelli veya martenzitik yapı; hızlı soğumaya duyarlı	Çok yüksek mukavemet; sınırlı süneklik	Isıl işlemle geniş özellik aralığı sağlanabilir
β Alaşımları	Yarı kararlı β yapısı; hızlı soğumada martenzitik dönüşüm	Yüksek sertlik; düşük süneklik	Mükemmel şekillendirilebilirlik; ısıl işlemle faz kontrolü mümkün

Alaşım elementi içermeyen ve yaklaşık %98–99,5 oranında titanyumdan oluşan ticari saflıktaki titanyum sınıfları, yüksek mekanik dayanımın kritik olmadığı uygulamalarda özellikle üstün korozyon dirençleri nedeniyle tercih edilmektedir. Bu malzemelerin geniş kullanım alanına sahip olmasının bir diğer nedeni ise iyi şekillendirilebilirlikleri ve yüksek kaynak yapılabilirlikleridir. Ticari saflıktaki titanyumun akma dayanımı, yapıda bulunan ara yer atomlarının ve diğer safsızlıkların miktarına bağlı olarak 170–480 MPa aralığında değişiklik göstermektedir. Çizelge 2.4'te, farklı ara yer element konsantrasyonlarına sahip

alaşımsız titanyum sınıfları ile bunların mekanik özellikleri ayrıntılı biçimde sunulmuştur (Kurt ve Orhan, 2005).

Çizelge 2.4. Alaşımsız titanyumun farklı ara yer oranlarına sahip tipleri ve mekanik özellikleri (Kurt ve Orhan, 2005).

Alaşım Tipi	Bileşim (%)									Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)
	Al	Sn	Zr	Mo	N	C	H	Fe	O		
Tip 1	-	-	-	-	0.03	0.10	0.015	0.20	0.18	240	170
Tip 2	-	-	-	-	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25	340	280
Tip 3	-	-	-	-	0.05	0.10	0.015	0.30	0.35	450	380
Tip 4	-	-	-	-	0.05	0.10	0.015	0.50	0.40	580	480
Tip 7	-	-	-	-	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25	340	280
Tip 11	-	-	-	-	0.03	0.10	0.015	0.20	0.18	240	170
Tip 12	-	-	0.30	-	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25	480	380

2.1.3.1. Alfa alaşımları

Al, Sn ve Zr ilavesiyle elde edilen α-titanyum alaşımları hem kriyojenik sıcaklık aralıklarında hem de yüksek sıcaklıklı uygulamalarda gösterdikleri kararlı mekanik davranış nedeniyle mühendislik açısından önemli bir malzeme grubunu oluşturmaktadır. Bu alaşımların özellikle yüksek sıcaklıklarda sergilediği sürünme dayanımının, β-titanyum alaşımlarına kıyasla daha üstün olduğu bilinmektedir. Ayrıca α-Ti alaşımlarında ara yer elementlerinin oldukça düşük seviyelerde bulunması, malzemenin sıfırın altındaki sıcaklıklarda dahi süneklik ve tokluk özelliklerini korumasına imkân tanımaktadır (Baeslack vd., 1993). Çizelge 2.5'te, α-titanyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri ile bunlara karşılık gelen mekanik özellikler gösterilmektedir (Semiatin vd., 1998).

Çizelge 2.5. α-Ti alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri (Kurt ve Orhan, 2005).

Alaşım Tipi	Bileşim (%)					Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)
	Al	Sn	Zr	Mo	Diğer		
Ti–5Al–2.5Sn	5	2.5	–	–	–	790	760
Ti–5Al–2.5Sn–EU	5	2.5	–	–	–	690	620

α fazı esaslı titanyum alaşımları; yüksek dayanım, iyi tokluk ve başarılı kaynaklanabilirlik gibi avantajlı özellikleriyle dikkat çekmekte olup, bu yönleriyle birçok

endüstriyel uygulama için uygun aday malzemeler arasında yer almaktadır. Bununla birlikte söz konusu alaşımlar, β-titanyum sistemlerine göre daha sınırlı işlenebilirlik sunmakta ve ısıl işlem yoluyla sertleştirilememektedir. Bu nedenle α alaşımlarında mikroyapısal iyileştirmeler genellikle tane boyutunun kontrol edilmesi yoluyla gerçekleştirilmektedir.

2.1.3.2. Yakın alfa alaşımları

Yakın alfa titanyum alaşımları, büyük oranda kararlı α fazı ile bunun yanında sınırlı miktarda β fazı içeren mikroyapı karakteristiğine sahiptir. Bu alaşımlara ağırlıkça yalnızca %1–2 düzeyinde β fazını dengeleyici elementlerin ilave edilmesi, söz konusu malzemelerin hem α+β alaşımlarına özgü yüksek mukavemet özelliklerini hem de saf α alaşımlarının sağladığı üstün sürünme dayanımını kazanmasına olanak sağlamaktadır (Joshi, 2006). Bu sınıftaki alaşımlar genellikle 500–550 °C sıcaklık aralığına kadar güvenle kullanılabilmekte olup literatürde yüksek sıcaklık titanyum alaşımları olarak tanımlanmaktadır. Özellikle havacılık sektöründe, yüksek sıcaklık ve gerilme altındaki kritik bileşenlerde yaygın bir kullanım alanı bulunmaktadır. Bununla birlikte yakın alfa titanyum alaşımlarının korozyon davranışları nispeten sınırlıdır. Özellikle Al içeriğinin alaşımda %6'nın üzerine çıkması, korozyon dayanımında belirgin bir düşüşe yol açmaktadır (Leyens ve Peters, 2003). Bu alaşım grubuna örnek olarak Ti–8Al–1Mo–1V ile Ti–6Al–5Zr–0.5Mo–0.25Si verilebilir. Söz konusu alaşımlar, özellikle 400–520 °C sıcaklık aralığında çalışan uygulamalarda yüksek performans göstermektedir (Ezugwu ve Wang, 1997).

2.1.3.3. Alfa + Beta alaşımları

α+β titanyum alaşımları hem α hem de β fazlarının birlikte bulunduğu iki fazlı mikroyapıya sahip sistemlerdir. Bu alaşımlar oda sıcaklığında genellikle %10 ile %50 arasında değişen oranlarda β fazı içerirler (Semiatin vd, 1998). İki fazlı yapılarının sağladığı bu denge sayesinde, α+β alaşımları ısıl işlem ve yaşlandırma uygulamalarıyla sertleştirilebilen en önemli titanyum alaşım gruplarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu alaşımların ısıl işlem süreci, çoğunlukla α+β çift faz bölgesinde belirlenen yüksek bir sıcaklığa ısıtılmalarının ardından su, yağ veya uygun bir ortamda hızlı bir şekilde soğutulmasıyla gerçekleştirilir. Hızlı soğutma sonucunda β fazı, yapıda dönüşmeden korunmuş halde kalabilir veya kısmen martenzitik faza dönüşerek mikroyapıda

farklılaşmaya yol açabilir. Bu işlem sonrasında, genellikle 480–600 °C aralığında uygulanan yaşlandırma işlemi ile hem α fazının çökelmesi sağlanmakta hem de korunmuş ya da kısmen dönüşmüş β fazının içerisinde ince α plakalarının oluşması hedeflenmektedir. Bu ısıl işlem ve yaşlandırma döngüsü sonucunda α+β alaşımlarının dayanımında %30–50 aralığında bir artış meydana gelebilmektedir.

Alaşımların ısıl işleme ve yaşlandırmaya verdiği tepki, büyük ölçüde soğutma hızına ve buna bağlı olarak parça kalınlığına bağlıdır. Örneğin Ti6Al4V alaşımında, 25 mm'den daha kalın parçaların tam sertleşme sağlayabilmesi için su verme işlemi tek başına yeterli olmamaktadır. Ayrıca α+β alaşımlarında mikroyapıdaki β fazı oranı arttıkça sertleşebilirlik potansiyeli de yükselmektedir (Baeslack vd, 1993). Bu alaşım grubunun bileşimlerine ve mekanik özelliklerine ilişkin detaylı bilgiler Çizelge 2.6'da sunulmuştur.

Çizelge 2.6. α+ β Ti alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri (Kurt ve Orhan, 2005).

Alaşım Tipi	**Bileşim (%)**					**Çekme Dayanımı (MPa)**	**Akma Dayanımı (MPa)**
	Al	**Sn**	**Zr**	**Mo**	**Diğer**		
Ti-6Al-4V	6	-		-	4V	900	830
Ti-6Al-6V-2Sn	6	2		-	0.75Cu,6V	1030	970
Ti-8Mn	-	-		-	8Mn	860	760
Ti-7Al-4Mo	7	-		4	-	1030	970
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	6	2		6	-	1170	1100
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	5	2		4	4Cr	1125	1055
Ti-6Al-2Sn-2Zr-4Mo-2Cr	5.7	2		2	2Cr,0.25Si	1030	970
Ti-3Al-2.5V	3	-		-	2.5V	620	520
Ti 1100	6	4		0.4	0.45Si	1000	900
Ti-5Al-5Mo-1.5Cr	4.5	-		5	1.5Cr	900	830

Çift fazlı titanyum alaşımlarının işlevsel performansını belirleyen temel unsur, ısıl işlem süreci sırasında gerçekleşen kontrollü difüzyon ve difüzyonsuz faz dönüşümleridir. Titanyum alaşımlarının mekanik davranışı; havacılık, uzay teknolojileri ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda güvenilirlik açısından kritik bir role sahiptir. Bu alaşımların mikroyapısı, çekme dayanımı, yorulma ömrü ve kırılma tokluğu gibi temel mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde doğrudan etkili olmaktadır.

Ti alaşımlarının yapısal özellikleri, uygulanan ısıl işlem ve termomekanik işlemler aracılığıyla geniş bir aralıkta değiştirilebilmektedir. Örneğin, tamamen lamelli bir

mikroyapı, yüksek yorulma çatlağı ilerleme direnci ve kırılma tokluğu ile karakterize edilmektedir (Yıldırım ve Çakan, 2011).

2.1.3.4. Yakın beta alaşımları

Bu alaşımlar, kontrollü ısıl işlem süreçleriyle 1400 MPa'nın üzerinde çekme dayanımlarına ulaşabilecek şekilde sertleştirilebilmekte olup, sahip oldukları kompleks mikroyapı sayesinde tasarımcıya hem yüksek mukavemet hem de yüksek tokluk performansını aynı anda optimize etme imkânı sunmaktadır. Bununla birlikte, yarı kararlı β alaşımlarının görece yüksek yoğunluğu, sınırlı kaynaklanabilirliği, düşük oksidasyon direnci ve mikroyapılarının karmaşıklığı, endüstriyel uygulama alanlarını belirli ölçüde kısıtlayan başlıca dezavantajlar olarak belirtilmektedir (Leyens ve Peters, 2003). Son otuz yıl içerisinde, yarı kararlı β-titanyum alaşımları malzeme mühendisliği literatüründe giderek daha fazla önem kazanmıştır.

Betaya yakın alaşımlar olarak da adlandırılan bu metastabil β-titanyum alaşımları, bileşimlerinde genellikle %10–15 oranında β-fazını kararlı hâle getiren elementler içermektedir. Bu β stabilizatörleri, oda sıcaklığında β fazının metastabil olarak korunmasını mümkün kılmakta ve böylece alaşımların yaşlandırma işlemleriyle sertleştirilebilmesine olanak tanımaktadır. Literatüre göre Ti6Al2Sn4Zr6Mo, Ti8Mo8V2Fe3Al, Ti10V2Fe3Al ve Ti8Mn alaşımları, yarı kararlı β-titanyum sınıfında yer alan önemli örnekler arasında sayılmaktadır (Veiga vd., 2012).

2.1.3.5. Beta alaşımları

β-titanyum alaşımları, bileşimlerinde yeterli miktarda β kararlaştırıcı element içermeleri ve uygun bir soğutma hızı uygulanması durumunda β fazının oda sıcaklığına kadar tamamen korunabildiği malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Bu alaşımlar metastabil karakterdedir ve metastabil β matrisinde α fazının kontrollü çökeltilmesi, alaşımın mukavemetini artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılan bir sertleştirme mekanizmasıdır (Baeslack vd., 1993). β alaşımlarının yüksek kırılma tokluğu sergilemesi, özellikle son yıllarda uzay araçları ve benzeri ileri mühendislik uygulamalarında kullanım potansiyelini önemli ölçüde yükseltmiştir. Buna ek olarak, özellikle Mo içeren bazı β alaşımlarının üstün

korozyon direncine sahiptir (Semiatin vd., 1998). Metastabil β-titanyum alaşımları, yalnızca yüksek dayanım sağlamalarıyla değil, aynı zamanda α+β alaşımlarına kıyasla daha iyi soğuk şekillendirilebilirlik, akma dayanımının kritik olduğu sıcaklıklarda daha yüksek mukavemet değerleri ve kalın kesitli parçaların ısıl işleme daha etkin yanıt verebilmesi gibi avantajlarıyla da dikkat çekmektedir. Bu özellikler, söz konusu alaşımları endüstriyel tasarım açısından son derece işlevsel hâle getirmektedir. β alaşımlarının kimyasal bileşimlerine ve mekanik performans özelliklerine ilişkin veriler Çizelge 2.7'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.7. β Ti alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri (Kurt ve Orhan, 2005).

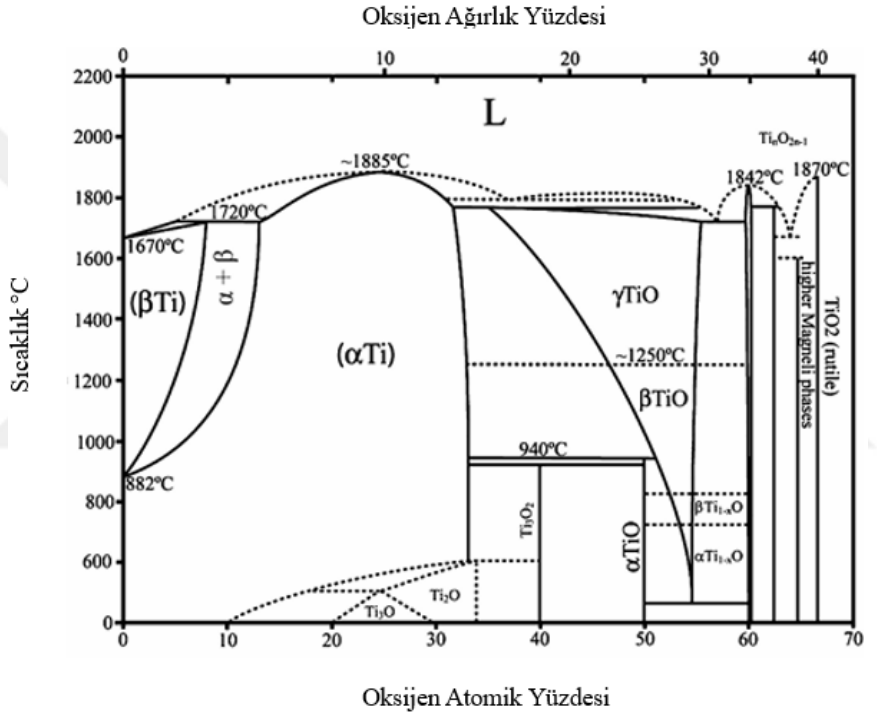
AlaşımTipi	**Bileşim (%)**					**Çekme Dayanımı (MPa)**	**Akma Dayanımı (MPa)**
	Al	**Sn**	**Zr**	**Mo**	**Diğer**		
Ti–10V–2Fe–3Al	3	-	-	-	10V, 2Fe	1170	1100
Ti–13V–11Cr–3Al	3	-	-	-	13V, 11Cr	1170	1100
Ti–15V–3Al–3Sn–3Cr	3	3	-	-	15V, 3Cr	790	775

2.1.4. Titanyum ve alaşımlarının termal oksidasyonu

Titanyum ve titanyum alaşımlarına ilişkin yapılan araştırmalar, bu malzemelerin pek çok fonksiyonel özelliğinin yüzeylerinde oluşan oksit tabakasından kaynaklandığını ortaya koymuştur. Titanyum, atmosferle temas ettiği anda yüzeyinde kendiliğinden ince bir oksit filmi meydana getirmekte olup, bu doğal film tabakasının kimyasal kararlılığı; titanyumun yüksek korozyon direnci, kimyasal inertliği, pasifleşme kabiliyeti ve biyouyumluluğunun temel nedeni olarak gösterilmektedir (Liu vd., 2004).

Saf titanyum oldukça reaktif bir metal olmasına karşın, esas olarak TiO_2 içeren kararlı ve kendi kendini yenileyebilen bir pasif tabaka sayesinde çevresel etkilerden korunmaktadır (Komotori vd., 2001). Titanyumun oksijenle anında reaksiyona girmesi sonucunda yüzeyde düşük sıcaklıklarda bile daha ileri oksidasyonu ve oksijen difüzyonunu sınırlayan ince bir TiO_2 tabakası oluşur (Kumar vd, 2010). Pasif oksit tabakasının amorf yapıda olduğu ve üç farklı alt tabakadan oluştuğu literatürde belirtilmektedir. Metal yüzeye en yakın bölgede TiO tabakası bulunmakta, bunun üzerinde Ti_2O_3'ten oluşan ara katman yer almakta ve çevre koşullarıyla doğrudan etkileşimde olan en dış tabaka ise TiO_2 fazından oluşmaktadır (Gemelli ve Camargo, 2007).

Şekil 2.5'te gösterilen Ti–O ikili faz diyagramı, titanyumun oksidasyon davranışının oldukça karmaşık bir dönüşüm dizisi içerdiğini ortaya koymaktadır. Diyagrama göre titanyum; Ti_2O, TiO, Ti_3O_3, Ti_3O_5 ve TiO_2 gibi çeşitli kararlı oksit fazları oluşturabilmektedir. Termodinamik olarak oksit tabakasının bu farklı oksitlerin bir arada bulunduğu çok katmanlı bir yapı sergilemesi beklenmesine rağmen, atmosfer basıncına yakın koşullarda ve yaklaşık 1000 °C'nin altında gerçekleşen oksidasyon süreçlerinde yalnızca TiO_2'nin oluştuğu rapor edilmiştir. Bununla birlikte, daha yüksek sıcaklıklarda ve özellikle düşük oksijen kısmi basınçlarında alt oksit fazlarının meydana gelmesi mümkündür (Khanna, 2002).



Şekil 2.5. Ti-O Faz diyagramı (Okamoto, 2011).

Titanyumun allotropik yapısı nedeniyle 882 °C'de α fazından β fazına dönüşüm gerçekleşmektedir ve oksijenin α fazında çözünürlüğü β fazına kıyasla çok daha yüksektir. Bu nedenle oksijen, düşük sıcaklıklardaki α-titanyumu kararlı hale getiren bir element olarak davranmaktadır. Ayrıca düşük sıcaklıklarda α yapı içinde Ti_2O, Ti_3O ve Ti_6O gibi düzenli ara katı çözeltilerin oluştuğu bilinmektedir (Murray ve Wriedt, 1987).

2.1.5. Titanyumun korozyon ve aşınma davranışı

2.1.5.1. Korozyon davranışı

Korozyon, sulu ortamlarda oksitleyici ya da indirgeme potansiyeline sahip kimyasal türlerin etkisiyle malzemenin zamanla bozulması ve kütle kaybetmesi şeklinde tanımlanır. Korozyon olgusu; genel korozyon, galvanik korozyon, oyuklanma korozyonu, yarık korozyonu, tane sınırı korozyonu ve erozyon korozyonu gibi çeşitli mekanizmalarla ortaya çıkabilmektedir (Majumdar ve Manna, 2015). Titanyumun çok çeşitli ortamlarda gösterdiği üstün korozyon direnci, yüzeyinde kendiliğinden oluşan ve büyük oranda TiO_2'den meydana gelen kararlı bir pasif film tabakasına bağlanmaktadır. Bu ince oksit tabakası bütünlüğünü koruduğu sürece titanyumu pasif durumda tutmakta ve özellikle oksitleyici kimyasal ortamlarda yüksek direnç sağlamaktadır. Klorür, sülfat, hipoklorit içeren tuz çözeltileri ile nitrik veya kromik asit gibi ortamlarda titanyumun bu pasif yapısını koruyabildiği bilinmektedir. Buna karşılık, indirgeme karakterli ortamlarda oksit tabakasının kararlılığı bozulduğunda titanyum hızlı biçimde korozyona uğrayabilmektedir. Örneğin hidroflorik asit, pasif filmi hızla çözerek metalik titanyumun doğrudan ortamla temas etmesine neden olur ve malzeme çok kısa sürede çözünür. Endüstride kullanılan bazı indirgeme ortamlarında ise oksitleyici inhibitörlerin eklenmesiyle TiO_2 tabakasının stabilitesi artırılabilmekte ve malzemenin dayanımı iyileştirilebilmektedir (Lütjering ve Williams, 2003).

Titanyumun oksidasyona dayanımı yüksek sıcaklıklarda sınırlı olmakla birlikte yaklaşık 650 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda havayla temas eden titanyum oksitlenme eğilimi gösterir. Ayrıca, 427 °C gibi daha düşük sıcaklıklarda dahi oksijenle reaksiyona girerek onu katı çözelti hâlinde bünyesine alabilmektedir. Yüzeyde biriken klorür veya hidroksit türleri bu oksidasyon kinetiğini hızlandırmaktadır. Titanyum ve alaşımları, H_2S ve CO_2 gibi ortamlara 260°C sıcaklığa kadar direnç gösterebilmektedir. Saf titanyum, deniz suyu, vücut sıvıları ve çeşitli doğal çözeltilerde yüksek korozyon direnci göstermektedir. Deneysel çalışmalar, yaklaşık 18 yıl boyunca deniz suyuna sürekli maruz kalan titanyumun yalnızca yüzeysel renk değişimi gösterdiğini bildirmektedir. Buna karşın, inhibitör içermeyen indirgeme özelliğine sahip tüm asidik çözeltilerin titanyumu aşındırdığı bilinmektedir (Donachie, 2000).

Daha yüksek dayanım seviyelerine sahip α+β ve β tipi titanyum alaşımlarının indirgeme karakterli asit ortamlardaki korozyon dayanımının alaşım bileşimine güçlü biçimde bağlı olduğu bilinmektedir. Yapılan araştırmalarda, bileşimde %3'ten fazla Mo veya %8'in üzerinde Zr bulunmasının korozyon direncini belirgin biçimde artırdığı; vanadyumun ise bu bağlamda sınırlı etkisinin olduğu rapor edilmiştir. Buna karşın, alaşımda %3'ün üzerindeki Al miktarının korozyon direncini olumsuz etkilediği görülmüştür. Özellikle %15 Mo içeren Beta-21S alaşımının indirgeme ortamlarında en yüksek korozyon direncini gösterdiği, ancak bu avantajın yüksek mukavemet için yaşlandırılmış koşullarda kısmen azaldığı bildirilmektedir (Lütjering ve Williams, 2003).

2.1.5.2. Aşınma davranışı

Aşınma, iki yüzeyin birbiri üzerinde göreli hareket etmesi sonucu, temas eden yüzeylerden kademeli olarak malzeme uzaklaşması şeklinde tanımlanır. Literatürde adhezif aşınma, abrazif aşınma, yorulma kaynaklı aşınma, oksidatif aşınma, korozyonla eşzamanlı gerçekleşen aşınma ve erozyon aşınması gibi çeşitli aşınma mekanizmaları rapor edilmektedir. Bu mekanizmalar arasında adhezif ve abrazif aşınma, mühendislik uygulamalarında en sık karşılaşılan ve davranışı en çok belirleyen türlerdir (Majumdar ve Manna, 2015). Her ne kadar titanyum ve titanyum alaşımları yüksek özgül mukavemet, düşük yoğunluk ve iyi korozyon dayanımı gibi cazip mühendislik özelliklerine sahip olsa da tribolojik performanslarının zayıf olması bu alaşımların birçok endüstriyel uygulamada sınırlı kullanılmasına yol açmaktadır (Borgioli vd., 2005). Ti ve alaşımlarının düşük aşınma direncinin iki temel nedeni bulunmaktadır. İlk olarak, malzemenin düşük iş sertleşmesi ve kolay plastik deformasyon eğilimi, adhezif aşınma, delaminasyon ve yüzey yıpranması gibi mekanizmalara karşı direncini azaltmaktadır. İkinci olarak, kuru kayma sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar yüzeydeki oksit tabakasının gevrekleşmesine ve kolayca parçalanmasına neden olmakta olup, bu durum yüzey altı bölgelerin aşınmaya karşı korumasız kalmasına yol açmaktadır. Ayrıca ortamdan difüze olan oksijen, titanyum matrisini gevrekleştirerek malzemenin mekanik dayanımını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenlerle, aşınma direncinin kritik önem taşıdığı uygulamalarda titanyum ve alaşımlarının kullanılması için yüzey modifikasyonu veya kaplama işlemleri ile tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir (Molinari vd., 1997).

2.1.6. Ti6Al4V alaşımı

Ti6Al4V, α+β titanyum alaşımları içerisinde en yaygın olarak bilinen ve endüstride en fazla kullanılan alaşımdır. Bu alaşım, 1950'li yıllarda havacılık ve savunma sanayinde paslanmaz çeliğin daha hafif bir alternatifle değiştirilmesine yönelik araştırmalar sonucunda Amerika Birleşik Devletleri'nde geliştirilmiş ilk α+β titanyum alaşımı olma özelliğini taşımaktadır. Ti6Al4V alaşımı, hem α-Ti hem de β-Ti fazlarını bünyesinde bulundurması sayesinde, α fazının sağladığı yüksek sürünme dayanımı ve tokluk ile β fazının katkıda bulunduğu yüksek çekme dayanımı ve yorulma direncini bir arada sunmaktadır. (Chaturvedi, 2020).

Ti6Al4V alaşımı, üstün mekanik ve termal özellikleri nedeniyle başta uçak motorları ve hava aracı yapısal bileşenleri olmak üzere pek çok kritik uygulamada tercih edilmektedir. Bu alaşımın endüstride Grade 5 ve Grade 23 (ELI) olmak üzere kullanılan iki ticari sınıfı bulunmaktadır. Söz konusu sınıfların temel mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 2.8'de sunulmuştur (Polmear vd., 2017).

Çizelge 2.8. Grade 5 ve Grade 23 alaşımlarının kimyasal bileşimi (Polmear vd, 2017).

Grade	Al (%)	V (%)	O (%)	Fe (%)	C (%)	H (%)	N (%)
5	5.5 – 6.75	3.5 – 4.5	≤ 0.20	≤ 0.30	≤ 0.08	≤ 0.015	≤ 0.05
23 (ELI)	5.5 – 6.5	3.5 – 4.5	≤ 0.13	≤ 0.25	≤ 0.08	≤ 0.0125	≤ 0.03

Ti6Al4V, geniş bir ısıl işlem aralığına sahip olmakla birlikte pratik uygulamalarda çoğunlukla tavlanmış durumda kullanılmaktadır. Büyük jet motorlarının fan kanatları bu duruma örnek olarak verilebilir. Bunun yanı sıra, 25,4 mm kalınlığa kadar olan kesitlerde sertleşme özelliği gösterebildiği için, özellikle havacılık sektöründe kullanılan bağlantı elemanlarında olduğu gibi, çözeltide çözdürme ve yaşlandırma (STA) şartında da yaygın şekilde uygulanmaktadır.

STA koşulundaki Ti6Al4V, yüksek yorulma dayanımı ve yüksek çekme mukavemeti ile karakterizedir. Çizelge 2.9'da STA koşullarında işlemli ve tavlanmış Ti6Al4V'nin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

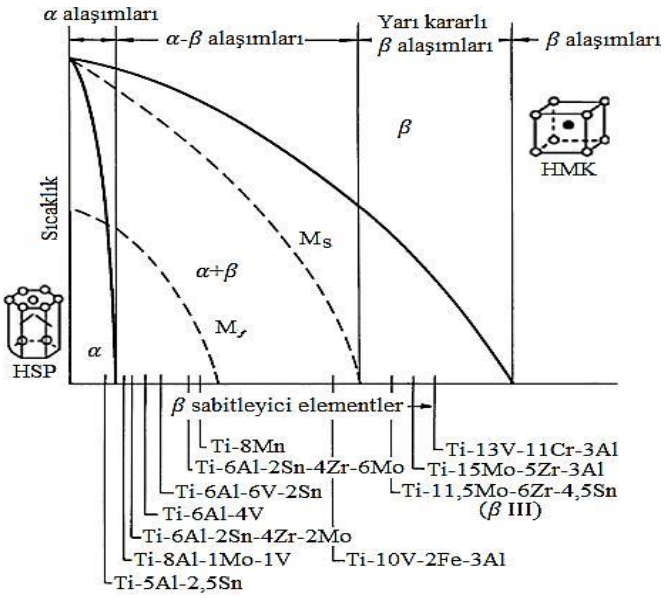
Çizelge 2.9. STA koşullarında işlemli ve tavlanmış Ti6Al4V'nin alaşımının mekanik özellikleri (Polmear vd., 2017).

Çubuk / Kütük Çapı (mm)	Durum	UTS (MPa)	YS (MPa)	El. (%)	RA (%)	Yorulma Dayanımı (MPa)
Genel	Tavlanmış	895	828	10	25	400–680
< 12.7	STA	1137	1068	10	20	700
12.7–25.4	STA	1103	1034	10	20	700

Grade 5, daha yüksek mukavemete sahip olmakla birlikte, Grade 23 alaşımı daha yüksek süneklik göstermektedir. Bu nedenle Grade 23, özellikle biyomedikal implantlar ve diş hekimliği uygulamaları gibi yüksek biyouyumluluk ve şekillendirilebilirlik gerektiren alanlarda en uygun titanyum alaşımlarından biri olarak değerlendirilmektedir.

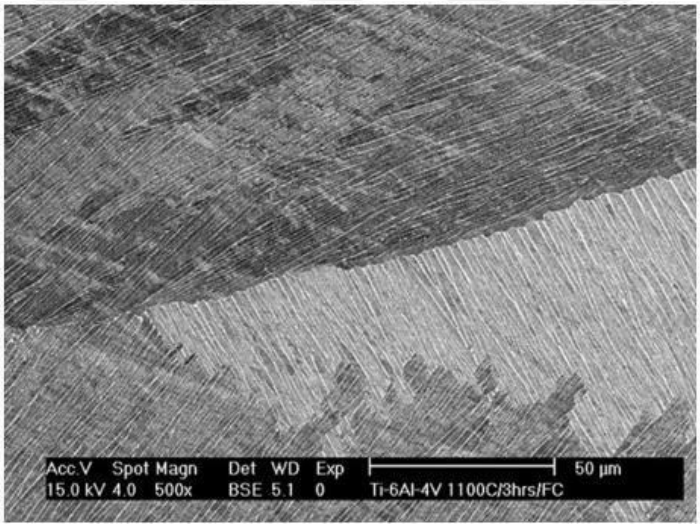
2.1.6.1. Ti6Al4V alaşımının ısıl işlem ve mikroyapısı

Ti6Al4V alaşımının mikroyapısı, malzemenin performansını belirleyen temel unsurlardan biri olup özellikle mekanik özellikler üzerinde doğrudan etkilidir. Bu alaşımın mikroyapısal karakteri; α ve β fazlarının morfolojisi, hacimsel oranları ve her bir fazın kendine özgü özellikleri tarafından şekillendirilmektedir. Özellikle α fazının biçimsel özellikleri, alaşımın tokluk, çekme dayanımı, sürünme dayanımı ve yorulma direnci gibi kritik mekanik davranışlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Ti6Al4V alaşımına ait faz diyagramı Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Ti6Al4V alaşımının faz diyagramı (Demirel ve Karaağaç, 2021).

β transüs sıcaklığının üzerinde homojen bir β fazı elde edilen Ti6Al4V alaşımının kontrollü ve yavaş bir soğutmaya tabi tutulması, karakteristik lamelli mikroyapının oluşumuna yol açmaktadır. Bu soğuma süreci boyunca, öncelikle önceki β tanelerinin sınırlarında α fazının çekirdeklenmesi gerçekleşir. Ardından, belirli kristalografik yönelimlere sahip paralel α levhalarının oluşturduğu koloniler, Şekil 2.7' de görüldüğü gibi farklı yönelimli bir koloni ile karşılaşıncaya kadar β tanelerinin içine doğru büyümeye devam eder. Lamelli mikroyapının morfolojik özelliklerini belirleyen temel parametre soğutma hızıdır. Soğutma hızındaki değişim, α levhalarının kalınlığını, koloni boyutunu ve β tane sınırlarında oluşan α tabakalarının genişliğini doğrudan etkilemektedir. Soğutma hızının artması, mikroyapının çok daha ince, iğnemsi bir α fazı morfolojisine evrilmesine neden olmaktadır (Sankaran ve Mishra, 2017).



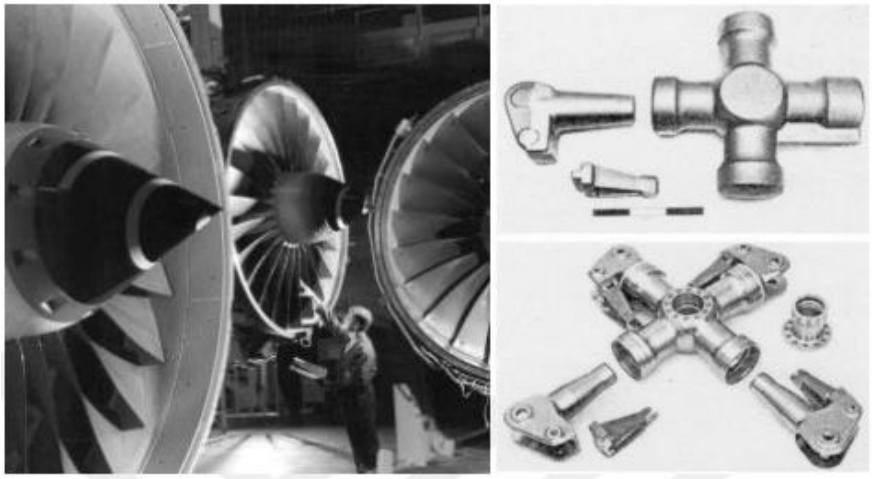
Şekil 2.7. 1100 °C sıcaklıktan soğutma sonrasında α lamelleri ve tutulmuş β fazından oluşan Ti6Al4V mikroyapısı (Sankaran ve Mishra, 2017).

Eşeksenli mikroyapı, esas olarak yeniden kristalleşme sürecinin bir ürünüdür. Bu mikroyapının oluşabilmesi için alaşımın önce α+β bölgesinde yüksek plastik deformasyona maruz bırakılması gerekmektedir. Ardından aynı bölgede gerçekleştirilen çözeltileme ısıl işlemi ile yeniden kristalleşmiş ve eşeksenli tanelerden oluşan bir yapı meydana gelir. Tavlama sıcaklığının artmasına bağlı olarak eşeksenli tanelerin daha iri bir morfoloji kazandığı bilinmektedir (Leyens ve Peters, 2006). Sonuç olarak, β bölgesinden kontrollü soğutma lamelli mikroyapının oluşumuna yol açarken; α+β bölgesinde gerçekleşen yeniden kristalleşme süreçleri eşeksenli mikroyapının gelişmesini sağlamaktadır. Her iki mikroyapı türü de soğutma hızına bağlı olarak ince veya kaba faz dağılımı sergileyebilmektedir.

2.1.7. Titanyumun uygulanma alanları

Titanyum ve titanyum alaşımları, düşük yoğunlukları, yüksek mukavemet/ağırlık oranları, üstün korozyon ve erozyon dirençleri ile 300–600 °C aralığında yüksek sıcaklıklarda çalışma yetenekleri sayesinde günümüzde birçok endüstride önemli mühendislik malzemeleri arasında yer almaktadır. Bu üstün özellikler, titanyum ve titanyum alaşımlarını hem havacılık hem de biyomedikal uygulamalarda stratejik bir malzeme haline getirmiştir; ancak her iki alanda tercih edilme gerekçeleri uygulama ihtiyaçlarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Biyomedikal uygulamalarda titanyum esaslı malzemeler esas olarak yüksek biyouyumlulukları, korozyon dirençleri ve kemik dokusuna uyum sağlayabilmeleri nedeniyle tercih edilmektedir. Özellikle Ti6Al4V gibi alaşımlar, vücut sıvıları içinde kimyasal olarak kararlı olmaları ve osteointegrasyonu destekleyen yüzey özellikleri sayesinde dental ve ortopedik implantlarda yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Buna karşın, havacılık uygulamalarında titanyumun tercih edilmesinde yüksek özgül dayanımı, düşük yoğunluğu ve yüksek sıcaklıklara dayanımı ön plana çıkmaktadır (Wozniak vd.,2024). Uçak gövdesi, motor bileşenleri ve yapısal parçalar gibi kritik uygulamalarda titanyum, alüminyuma göre daha yüksek mukavemet sunarken çelikten daha hafif olması sayesinde yakıt verimliliğine katkı sağlamaktadır (Leyens ve Peters, 2003). Bu nedenle, biyomedikal alanda titanyumun biyolojik uyumu ve korozyon direnci öne çıkarken, havacılıkta mekanik dayanım, hafiflik ve yüksek sıcaklık performansı belirleyici özellikler olarak öne çıkmaktadır.

Havacılık sektöründe son altmış yıldır daha hafif ve dayanıklı malzemelere duyulan gereksinim, titanyum alaşımlarının geliştirilmesinde önemli etken olmuştur (Murr vd., 2012). Ti6Al4V alaşımı, sahip olduğu üstün mekanik ve fiziksel özellikler nedeniyle havacılık sektöründe, özellikle uçak motorları ve gövde bileşenlerinde geniş kullanım alanı bulmaktadır. Gaz türbinli motorlarda düşük sıcaklıklarda çalışan fan panelleri ve diskler sıklıkla bu alaşımdan imal edilmektedir. Alaşımın yaklaşık 315°C olan maksimum servis sıcaklığı, söz konusu kullanımını motor kompresörünün düşük basınç bölgeleriyle sınırlamaktadır. Rolls-Royce Trent motorlarında kullanılan Ti6Al4V alaşımı ile üretilmiş ön fan yapıları ile üretiminde Ti6Al4V malzemesi kullanılan Eurocopter BO105 ve BK117 helikopterlerinin rotor kafalarının görselleri Şekil 2.8'de gösterilmektedir (Leyens ve Peters, 2003).



Şekil 2.8. Rolls Roys Trent motorlarının ön fanları ile Eurocopter BO105 ve BK117 helikopterlerinin rotor kafaları (Leyens ve Peters, 2003).

Yüksek mukavemet ağırlık oranı sayesinde Ti6Al4V alaşımı, Boeing 757, 767 ve 777 modellerinde kuş çarpmasına dayanım gerektiren pencere çerçevelerinde ve bu çerçevelerin üzerinde yer alan çatı panellerinde de tercih edilmektedir. Boeing 777'nin yatay ve dikey stabilizatörlerinin gövdeye bağlantısında kullanılan bağlama elemanları, termal genleşme katsayısı ve korozyon davranışının polimer matrisli kompozitlerle uyum sağlaması amacıyla, dövme Ti6Al4V alaşımından üretilmektedir. Ayrıca Ti6Al4V alaşımının süper plastik şekillendirilebilirlik özelliği, 777 uçaklarında kullanılan kuyruk konilerinin bu yöntemle üretilmesine olanak tanımaktadır (Boyer, 1996).

Biyomedikal uygulamalarda ise titanyum ve alaşımlarının tercih edilmesinin temel nedenleri arasında yüksek biyouyumluluk, stabil oksit tabakası sayesinde sağlanan korozyon direnci, kemik dokusuna yakın elastik modül ve iyi yorulma dayanımı bulunmaktadır. CP titanyum, Ti6Al4V ve Ti6Al7Nb gibi alaşımlar; eklem protezleri, dental implantlar ve kalp kapakçıkları gibi birçok tıbbi cihazın üretiminde kullanılmaktadır (Lütjering ve Williams, 2003). Vanadyumun toksik etkileri nedeniyle modern biyomedikal araştırmalar, Fe, Nb, Ta ve Mo gibi elementi içeren yeni nesil V-içermeyen alaşımların geliştirilmesine yönelmiştir. Ayrıca yarı kararlı β alaşımlarının, Ti6Al4V'e kıyasla kemiğe daha yakın elastik modül sunması nedeniyle ortopedik implantlarda kullanım eğilimi artmaktadır (Leyens ve Peters, 2003).

2.2. Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat; dövme, döküm, talaşlı imalat ve kaynak gibi klasik üretim yöntemlerine alternatif olarak geliştirilen ve malzemenin tabaka tabaka biriktirilmesi prensibine dayanan modern bir üretim teknolojisidir. Bu yöntemde üretilecek parçanın üç boyutlu dijital modeli temel alınarak geometrik veriler elde edilmekte ve bu veriler doğrultusunda yapı, belirlenen kalınlıklarda tabakaların ardışık olarak birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Süreç boyunca seçilen ham malzeme, uygun bir enerji kaynağı ile ergitilerek ya da bağlanarak nihai geometrinin oluşmasını sağlayacak şekilde katmanlar hâlinde yığılır. Oldukça karmaşık geometrilere sahip bileşenlerin hızlı, verimli ve minimum malzeme kaybıyla üretilebilmesine imkân tanıması nedeniyle katmanlı imalat yöntemleri, metal, seramik, polimer ve kompozitler dahil geniş bir malzeme çeşitliliğinde uygulanabilmektedir. Üretilecek parçanın ihtiyaç duyduğu mekanik ve fiziksel özelliklere bağlı olarak, uygulamaya özel optimize edilmiş ham malzemeler de tercih edilebilmektedir.

Eklemeli imalat teknolojilerinin temel avantajları; karmaşık tasarımların kolaylıkla üretilebilmesi, prototipleme ve imalat sürelerinin önemli ölçüde kısaltılması, yatırım maliyetlerinin azaltılması ve düşük adetli ya da özel tasarımlı parçaların ekonomik olarak üretilebilmesidir. Bu alandaki teknolojik gelişmeler zamanla çeşitliliği artırmış ve yöntemleri daha güvenilir ve daha yüksek performanslı hâle getirmiştir. Buna paralel olarak, kullanılabilir malzeme türlerinin sayısında da önemli artışlar yaşanmaktadır. Şekil 2.9'da eklemeli imalat teknolojisinin havacılık ve uzay endüstrisindeki yenilikçi uygulamalarına iki önemli örnek sunulmaktadır.

General Electric tarafından LEAP motorları için üretilen yakıt nozulü, geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi mümkün olmayan karmaşık soğutma kanalları ve iç destek yapıları sayesinde önceki tasarıma kıyasla çok daha yüksek performans sergilemektedir. Eklemeli imalatın sağladığı tasarım serbestliği sayesinde parçayı oluşturan bileşen sayısı 18'den 1'e düşürülmüş olup, kaynak ve lehim işlemi gereksinimi 25'ten 5'e indirilmiş ve bu sayede hem üretim süreci sadeleştirilmiş hem de servis ömrü beş kat artırılmıştır. Ayrıca yeni nozul tasarımı önceki versiyona göre yaklaşık %25 daha hafiftir (Metal, 2014). Benzer şekilde NASA tarafından Mars araştırmalarında kullanılmak üzere geliştirilen tam ölçekli roket parçası da eklemeli imalatın sağladığı bu avantajların çarpıcı bir örneğidir. Bakır

alaşımından toz yataklı lazer ergitme yöntemi ile üretilen bu bileşen, yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışmaya uygun olarak tasarlanmış olup içinde 200'den fazla karmaşık iç kanal barındırmaktadır. Bu tür bir geometri klasik üretim yöntemleriyle gerçekleştirilemez niteliktedir (Harbaugh, 2015). Her iki örnek de eklemeli imalatın yalnızca parçaları hafifletmekle kalmayıp çok daha dayanıklı, verimli ve fonksiyonel mühendislik çözümleri geliştirmeye olanak sunduğunu açıkça göstermektedir.



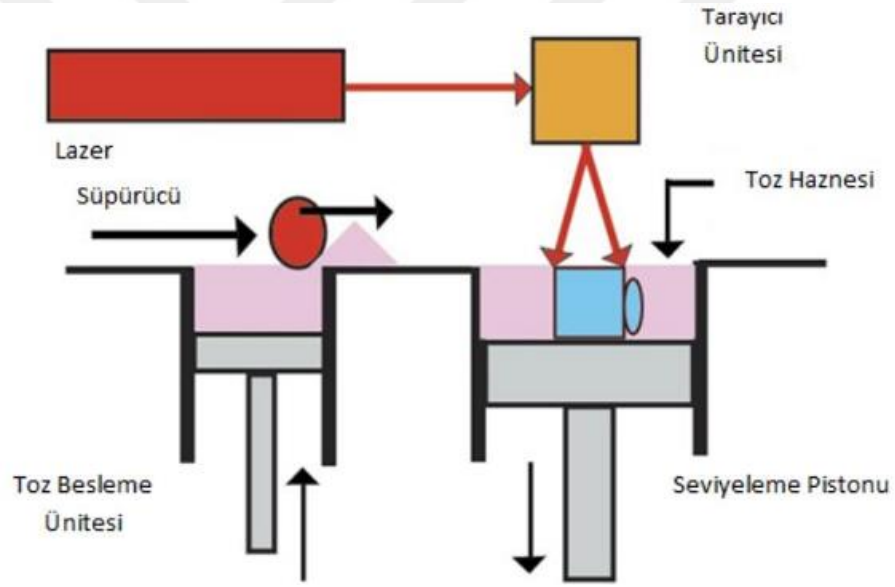
Şekil 2.9. Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş yakıt nozulu ve roket parçası (Metal, 2014; Harbaugh, 2015).

ISO/ASTM 52900 Standardı, eklemeli imalat teknolojilerini çalışma prensipleri ve malzeme işleme mekanizmalarına göre yedi temel sınıfta tanımlamaktadır. Bu sınıflandırma; foto-polimerizasyon, malzeme ekstrüzyonu, malzeme püskürtme, sac laminasyon teknikleri, bağlayıcı püskürtme tabanlı süreçler, yönlendirilmiş enerji biriktirme yöntemleri ve toz yataklı ergitme teknolojilerinden oluşmaktadır (ASTM International, 2015). Bu standart, eklemeli imalat yöntemlerinin terminolojik ve teknolojik açıdan standartlaştırılmasını sağlayarak araştırma ve endüstri uygulamalarında ortak bir referans çerçevesi oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu çalışmada, eklemeli imalatın alt başlıklarından biri olan toz yatağı füzyon yöntemi kapsamında yer alan elektron ışını ile ergitme (EBM) tekniği kullanıldığından, bu yönteme ilişkin açıklamalara yer verilmiştir.

2.2.1. Toz yatağı füzyon yöntemi

2.2.1.1. Seçici lazer sinterleme

Seçici Lazer Sinterleme (SLS), toz formundaki bir malzemenin yüksek sıcaklık ve enerji girdileriyle bir araya getirilerek daha büyük ve bütünleşik taneler oluşturulmasını sağlayan bir ısıl işlem yöntemidir. Bu işlemde kullanılan sıcaklık, her malzemenin kendine özgü ergime noktasının altında tutulur ve bu sayede malzemenin yapısal bütünlüğü korunarak dayanımı artırılır. Sinterlemenin temel amacı, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmek ve parçaya yeterli mukavemet kazandırmaktır. Şekil 2.10'da SLS prosesi şematik olarak gösterilmektedir.

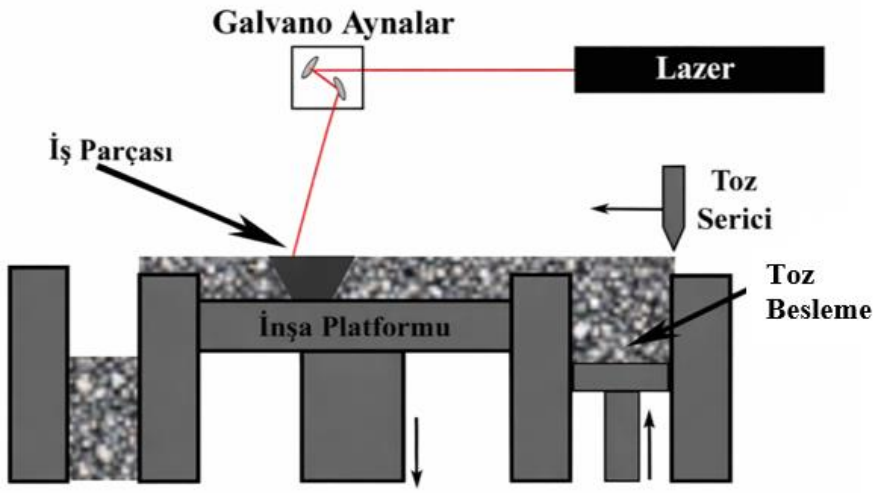


Şekil 2.10. SLS tekniğinin şema ile gösterimi.

Toz yataklı bir katmanlı imalat yöntemi olan SLS'de, toz malzeme üretim platformu üzerine ince bir katman halinde serilir ve bu katman, üç boyutlu modelin ilgili bölümlerine uygun şekilde lazer ışını ile taranarak seçici olarak birleştirilir. Tarama işlemi tamamlandığında üretim platformu belirli bir miktar aşağı hareket eder ve üstüne yeni bir toz tabakası yayılır. Bu serme ve lazerle tarama döngüsü, parça tamamen oluşuncaya kadar ardışık biçimde tekrarlanır.

2.2.1.2. Seçici lazer ergitme

Lazer sinterleme yönteminden türetilerek geliştirilen bu teknikte, Şekil 2.11'de gösterildiği üzere toz malzeme tabakasının üzerine atmosferi kontrol edilen bir ortamda lazer ışını yönlendirilerek lokal ergitme gerçekleştirilir. Ergiyik bölgenin katılaşmasının ardından süreç, hedeflenen üç boyutlu geometrinin tamamı oluşuncaya kadar katmanlar hâlinde tekrarlanır. Seçici Lazer Ergitme (SLE) yöntemi, lazer sinterlemeye kıyasla daha yüksek yüzey kalitesi sunmakta ve üretilen parçaların mekanik özelliklerinin iyileşmesine katkı sağlamaktadır. Bu nedenle hem yüzey pürüzlülüğünün düşük tutulması hem de malzeme dayanımının artırılması gereken uygulamalarda tercih edilen bir yöntemdir.



Şekil 2.11. SLE tekniğinin şema ile gösterimi (Spears ve Gold, 2016).

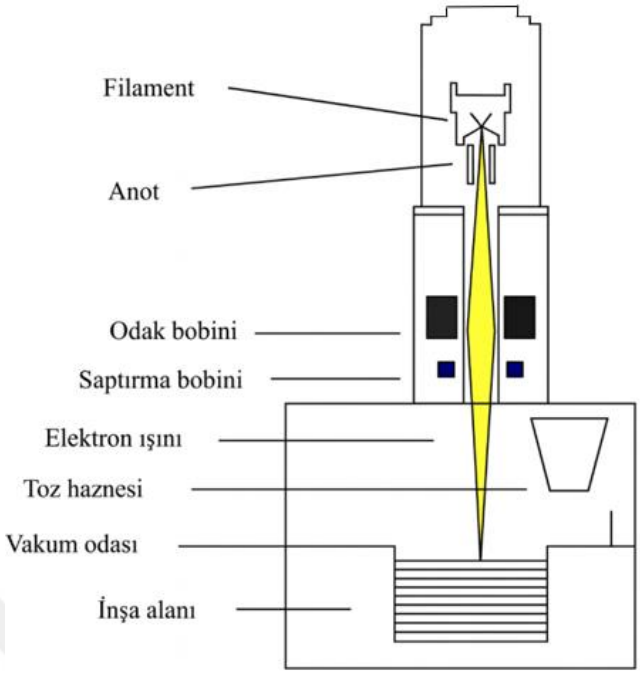
2.2.1.3. Elektron ışını ile ergitme

Elektron ışını ile ergitme (EBM) yöntemi, temel prensipleri bakımından SLE' ye benzerlik göstermesine karşın, süreçte kullanılan enerji kaynağı açısından önemli farklılıklar içerir. SLE'de lazer ışını ile gerçekleştirilen seçici tarama işlemi, EBM'de elektron ışını tarafından yürütülmekte; toz yatağı her bir katmanda tasarım verilerine uygun şekilde elektron ışını ile ergitilerek parça üretimi tamamlanıncaya kadar tekrarlanmaktadır. Her iki yöntemin ortak yönleri bulunsa da EBM'nin karakteristik yapısı bazı kritik ayrımlar yaratır. Elektron ışını, elektromanyetik bobinlerle yönlendirilebilen yüksek enerjili elektronlardan oluştuğu için, lazer sistemlerine kıyasla çok daha yüksek tarama hızlarına ulaşılmasına

olanak tanır. Lazerle ergitme inert gaz atmosferi gerektirirken, EBM'nin mutlaka vakum ortamında yürütülmesi zorunludur. Bunun yanında, EBM'de işlenecek malzemelerin elektriksel iletkenlik özelliği göstermesi gerekir (Körner, 2016). Elektron ışınının lazerden birkaç kat daha yüksek enerji yoğunluğu, özellikle yüksek yansıtıcılığa sahip metallerde daha derin nüfuziyet ve daha homojen bir ergitme davranışı sağlar. Artan tarama hızları, EBM ile daha yüksek üretim hızlarına ulaşılmasına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca yöntemin 1100°C'ye kadar ön ısıtma yapabilmesi, parçalarda çarpılma ve çatlama gibi artık gerilmelerin yol açtığı olumsuzlukları önemli ölçüde azaltır ve bu açıdan EBM, SLE'ye göre avantaj sunar.

Diğer taraftan EBM'nin bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Yöntemde daha yüksek toz boyutu ve katman kalınlığı kullanılmasından dolayı yüzey pürüzlülüğü SLE'ye göre daha yüksektir. Elektron ışınının çapının lazer ışınından daha geniş olması, üretilebilir minimum detay kalınlığını artırmakta ve boyutsal doğruluk ile çözünürlüğün düşmesine neden olmaktadır. Ayrıca vakum ortamında çalışma zorunluluğu, düşük kaynama sıcaklığına sahip alaşım elementlerinin işlem sırasında buharlaşma riskini beraberinde getirir. EBM sistemlerinin genel ekipman maliyetleri SLE'ye göre daha yüksektir ve ticari ölçekte hem makine hem de malzeme çeşitliliği daha sınırlıdır (Zhou ve Han, 2023).

Şekil 2.12'de Arcam EBM sistemine ait şematik gösterim sunulmaktadır. Bu süreç genel olarak dört temel aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalardan ilki olan toz serme işleminde, ince metal tozları tezgâh içerisinde yer alan ve genellikle paslanmaz çelikten imal edilen bir tırmık yardımıyla, çoğunlukla paslanmaz çelik bir alttaş yüzeyi üzerine düzgün ve homojen bir tabaka hâlinde yayılmaktadır. Toz tabakasının serilmesini takiben ön ısıtma aşamasına geçilmektedir. Bu aşamanın temel amacı, yapı alanının sıcaklığını artırarak toz partikülleri arasında kısmi bir sinterleme sağlamak ve böylece süreç sırasında ortaya çıkabilecek dumanlanma etkisini engellemektir. Ön ısıtma ile toz partiküllerinin birbirine bağlanması, elektriksel olarak yüklenmiş tozların yapı alanı içerisinde kontrolsüz şekilde dağılmasının önüne geçmektedir (Körner, 2016).



Şekil 2.12. EBM tezgahının şematik gösterimi (Dai vd., 2018).

Dumanlanma etkisi; nem varlığı, elektronların taşıdığı momentum ve elektrostatik yüklenme gibi farklı fiziksel mekanizmalar sonucu ortaya çıkabilmektedir. Toz bünyesinde nem bulunması durumunda, elektron ışınının toz partikülleriyle etkileşimi sırasında ani buharlaşma meydana gelerek dumanlanmaya yol açabilmektedir. Ayrıca, elektronların toz partiküllerine çarpması sonucu momentum transferi gerçekleşmekte ve bu durum partiküller arasındaki kohezyon kuvvetlerinin zayıflamasına neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra, elektron ışını etkisiyle toz partiküllerinin elektrostatik olarak yüklenmesi, partiküller arasında itici kuvvetlerin oluşmasına sebep olmakta ve toz tabakasının dağılmasına yol açabilmektedir (Zhou ve Han, 2023).

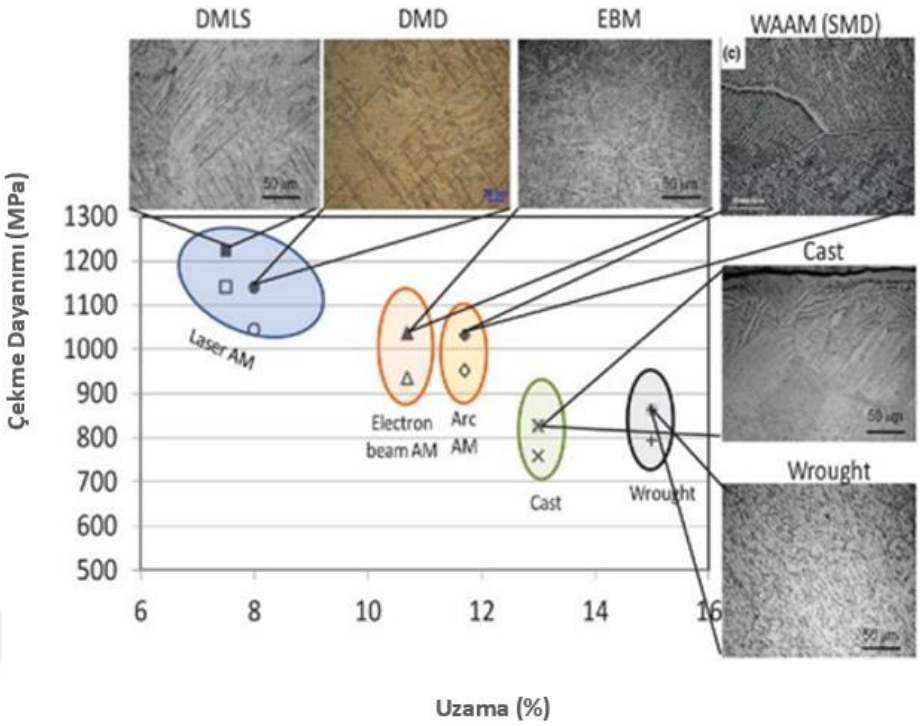
EBM sürecinde üretilen parçanın kalitesini belirleyen çok sayıda proses parametresi bulunmaktadır ve hatasız, yüksek performanslı parçaların elde edilebilmesi için bu parametrelerin uygun şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Proses parametreleri; termal dağılım, ergiyik havuz geometrisi, ulaşılan maksimum sıcaklık ve soğuma hızı gibi temel termal davranışları doğrudan etkileyerek parçanın katılaşma mekanizmasını, kristalografik yönlenmesini, mikroyapısını ve morfolojik özelliklerini belirlemektedir. Buna bağlı olarak, elde edilen parçaların mekanik özellikleri de büyük ölçüde proses parametrelerine bağlıdır (Dai vd., 2018).

2.3. Eklemeli İmalat ile Üretilen Ti6Al4V Alaşımı

Titanyum, üstün performans gerektiren uygulamalarda giderek daha fazla kullanılan ve eklemeli imalat (AM) teknolojileriyle üretimi mümkün hâle gelen ileri mühendislik malzemeleri arasında yer almaktadır. Özellikle Ti6Al4V gibi titanyum alaşımlarının havacılık ve biyomedikal sektörlerinde yüksek talep görmesinin temel nedenleri; yüksek özgül dayanım sunmaları, geniş bir sıcaklık aralığında güvenle çalışabilmeleri ve mükemmel korozyon direnci sergilemeleridir (Froes ve Boyer, 2019). Eklemeli imalatın geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla en belirgin avantajı, karmaşık geometrilerin hammadde üzerinden doğrudan, şekillendirme veya talaş kaldırma aşamalarına ihtiyaç duyulmaksızın üretilebilmesidir. Bu yöntem, malzemenin yalnızca gerekli olan bölgelerde biriktirilmesine olanak sağladığı için hem üretim sürecini sadeleştirmekte hem de malzeme kaybını en aza indirmektedir. Neredeyse net şekil üretimi kabiliyeti sayesinde AM, maliyet etkin ve verimliliği yüksek bir üretim alternatifi sunmaktadır.

Metallerin yoğun ve yüksek mekanik özelliklere sahip yapılara dönüştürülebilmesi açısından en yaygın kullanılan AM yöntemleri; SLE ve EBM yöntemleridir. Bu tekniklerin endüstriyel ölçekte bir üretim yöntemi olarak kabul görmesinde, elde edilen nihai parçaların malzeme özellikleri belirleyici rol oynamaktadır. Bu nedenle, eklemeli imalat ile üretilen titanyum alaşımlarının servis performansı ve uzun ömürlülüğü, kullanılan yöntemin mikroyapı üzerinde oluşturduğu etkilerle doğrudan ilişkilidir (Liu ve Shin, 2019). AM ile üretilen titanyum alaşımlarının mikroyapısı, dövme (wrought) ürünlerde gözlenen yapıdan belirgin biçimde farklıdır (Dutta ve Froes, 2017). Malzeme sistemi ne olursa olsun, AM süreçlerinin ortak özelliği hızlı katılaşmanın gerçekleşmesi ve buna bağlı olarak tipik bir hızlı solidifikasyon mikroyapısının oluşmasıdır. Bu nedenle AM ile üretilen bileşenlerde genellikle sütunsal ya da eşeksenli tane morfolojileri ortaya çıkmaktadır.

Şekil 2.13'te çeşitli AM yöntemleriyle üretilmiş Ti6Al4V alaşımına ait tipik mikroyapılar gösterilmiştir. Mekanik özellikler üzerindeki mikroyapısal etkinin daha açık biçimde anlaşılabilmesi için şekle uzama değerine bağlı çekme davranışını gösteren bir grafik de eklenmiştir. Grafikten görülebileceği üzere, lazer tabanlı yöntemlerde soğuma hızının son derece yüksek olması nedeniyle α martenzitik faz oluşmakta; bu durum çekme dayanımında artışa, uzama değerlerinde ise azalmaya yol açmaktadır.



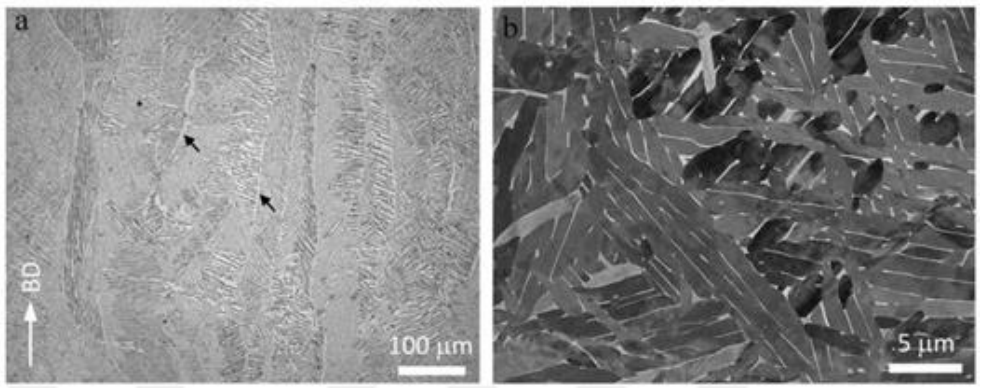
Şekil 2.13. Eklemeli imalat yöntemleriyle üretilmiş Ti6Al4V alaşımlarının çekme dayanımı uzama grafiği ve ilgili mikroyapıları (Dutta ve Froes, 2017).

Buna karşılık EBM yöntemi, vakum atmosferinde daha yavaş bir soğuma süreci içerdiğinden malzemede α+β iki fazlı mikroyapı gelişmektedir. Sonuç olarak EBM ile elde edilen numunelerde daha düşük çekme dayanımı fakat daha yüksek süneklik gözlenmektedir. Döküm Ti6Al4V ile dövme Ti6Al4V karşılaştırıldığında ise döküm malzemede belirgin olarak daha iri taneler bulunurken, dövme üründe eşeksenli α+β yapı hâkimdir (Liu ve Shin, 2019).

2.3.1. EBM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımı

EBM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımı, geleneksel dövme (wrought) Ti6Al4V malzemeye kıyasla daha ince taneli bir mikroyapı sergilemektedir. İşlem sırasında hâkim olan yüksek sıcaklıklar ve görece yavaş soğuma hızları, SLE yöntemine göre dengeye daha yakın bir mikroyapının oluşmasına olanak sağlamaktadır. EBM yöntemi ile imal edilen Ti6Al4V alaşımında, inşa yönüne paralel doğrultuda uzanan öncül β taneleri ile bu taneler içerisinde gelişen widmanstätten tipi α lamelli yapıların oluştuğu gözlemlenmekte olup, söz konusu mikroyapısal karakteristikler eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen Ti6Al4V alaşımlarına özgü tipik bir morfoloji sergilemektedir.

EBM mikroyapısını SLE ile üretilen yapılardan ayıran iki temel özellik bulunmaktadır. Bunlardan ilki, SLE'de hızlı soğuma sonucu oluşan iğnemsi α martenzit fazı yerine, EBM'de lamelli α+β fazlarının ve belirgin widmanstätten yapıların oluşmasıdır. İkinci ayırt edici özellik ise, öncül β tane sınırları boyunca süreklilik gösteren bir α faz tabakasının bulunmasıdır. Bu özellikler sonucunda EBM ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımları, SLE ile elde edilenlere kıyasla daha düşük mukavemet; ancak daha yüksek süneklik ve tokluk değerleri sergilemektedir. Makro ölçekte incelendiğinde, EBM ve SLE yöntemleriyle üretilen Ti6Al4V numunelerinde, birincil β fazının katman büyüme yönüne paralel uzanan kolonsal bir morfoloji gösterdiği görülmektedir. Bu yapı, biriktirme yönü boyunca oluşan belirgin sıcaklık gradyanının bir sonucudur (Şekil 2.14).

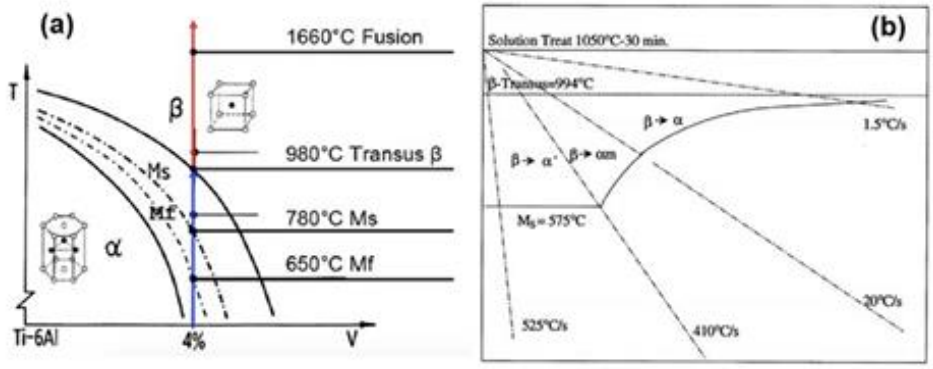


Şekil 2.14. a) EBM yöntemi ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımının mikroyapısı; ok işaretleri tane sınırı boyunca oluşan α fazı b) Kolonsal öncül β taneleri içerisinde gözlenen lamelli α+β faz düzeni (Xu, 2021).

2.3.2. EBM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımının faz dönüşümü

EBM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımında mikroyapının oluşumu, Şekil 2.15'te gösterildiği üzere üç aşamalı bir süreç ile tamamlanmaktadır:

1. Hızlı soğutma (1900 °C'den 700 °C'ye),
2. Bekletme (700 °C sıcaklıkta),
3. Yavaş soğutma (700 °C'den oda sıcaklığına)



Şekil 2.15. a) Ti6Al4V faz diyagramı, b) Ti6Al4V soğuma diyagramı (Liu ve Shin, 2019).

Ti6Al4V, yaklaşık 995 ± 20 °C β transus sıcaklığına sahiptir. Ti6Al4V de, işleme bağlı olarak, α′ (martensit) ve α″ (ortorombik) fazlarla α ve β fazları üretilebilir. Sıvı β fazından oda sıcaklığı mikroyapılarına faz dönüşümü iki şekilde gerçekleşebilir: Bunlardan ilki difüzyon kontrollü dönüşüm olup, sıcaklık β transus sıcaklığının altına düştüğünde, önceki β fazı α+β mikroyapısına dönüşür. İlk olarak, tane sınırlarında bulunan α fazı , önceki β fazı üzerinde heterojen bir şekilde çekirdeklenmeye başlar, tane sınırına dik olarak büyür ve α tabakasını oluşturur. Tane sınırlarında bulunan α fazının oluşumundan sonra, widmanstätten yapısı sütunlu önceki β taneleri içerisinde büyümeye başlar, bu süreçte α-kararlı elementler α fazına, β-kararlı elementler ise β fazına difüze olur. İkincisi ise martenzit dönüşümüdür. Ti6Al4V alaşımı β fazından α+β bölgesine 410°C /s' den daha yüksek bir hızda soğutulursa tamamen martenzitik bir faz oluşur. 1900°C 'den 700°C 'ye hızlı soğutma yapıldığında yapıda tamamen martenzitik bir faz oluşur, ancak 700°C 'de tutma sırasında iki dönüşüm mümkündür. İlk olası dönüşüm martenzit fazının α+β, α′→α+β şeklinde dönüşümüdür. İkinci olası dönüşüm α′→α″+β'dir. α′ fazının α″ fazına dönüşümü büyük kafes farkından dolayı termodinamik olarak elverişsizdir (Safdar vd., 2012).

2.3.3. EBM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımının tribolojik özellikleri

Ti6Al4V alaşımı yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, biyouyumluluk ve iyi korozyon direnci gibi üstün özelliklere sahip olmasına rağmen, yüzey oksit tabakasının yetersiz koruyuculuğu ve zayıf tribolojik davranışı nedeniyle kullanım alanları belirli ölçüde sınırlanmaktadır. Bu nedenle, havacılık, otomotiv ve biyomedikal endüstrileri de dâhil olmak üzere pek çok sektörde Ti6Al4V alaşımlarının tribolojik performansını iyileştirmeye

yönelik kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır (Kan vd., 2023). Katmanlı imalatla üretilen parçalar, işlemlerin termomekanik doğası nedeniyle geleneksel yöntemlerle üretilen Ti6Al4V parçalarına kıyasla farklı mikroyapısal, mekanik ve tribolojik özellikler göstermektedir. Ti6Al4V çoğunlukla eşeksenli bir mikroyapıya sahipken, EBM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımı belirgin şekilde sütunsal bir tanelenme morfolojisi göstermektedir. EBM ile üretilmiş malzemelerde α koloni boyutunun ve α lamel kalınlığının küçülmesi malzemenin mukavemetini artırmaktadır. Dolayısıyla EBM ile üretilen Ti6Al4V alaşımının dayanımı, işlem parametrelerine bağlı olduğu kadar, sertlik ve aşındırıcı aşınma davranışları ile de yakından ilişkilidir (Herrera vd., 2023).

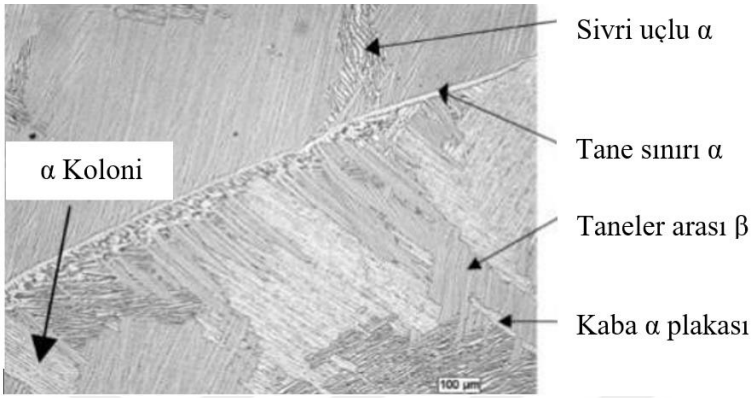
Aşınma direnci, bu alaşımın en kritik performans göstergelerinden biri olarak değerlendirilmekte olup, zayıf tribolojik özellikler bileşenlerin daha hızlı aşınmasına yol açabilmektedir. As-built koşulunda EBM yöntemi ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımı, döküm malzemeye kıyasla daha düşük aşınma direnci sergilese de benzer bir sürtünme katsayısı göstermektedir (Sharma vd., 2021). Katmanlı imalatla üretilmiş bileşenlerde birleşme yetersizliğinden kaynaklanabilecek kusurların tespiti büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, EBM yöntemi ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımlarının aşınma davranışının doğru şekilde değerlendirilebilmesi için numunelerin gözenekli yapılarının ayrıntılı olarak karakterize edilmesi gerekmektedir (Herrera vd., 2023).

2.4. Döküm Yöntemi ile Üretilen Ti6Al4V Alaşımı

Ti6Al4V alaşımı, α+β sınıfının karakteristik bir örneği olup, yapısında baskın olarak α fazı ve daha düşük oranlarda β fazı bulundurmaktadır. Bununla birlikte, bu fazların miktarı, morfolojisi ve malzeme içerisindeki dağılımı, alaşımın mekanik davranışını belirleyen temel unsurlardır (Sun vd., 2011). Söz konusu mikroyapısal özellikler, alaşımın üretim geçmişi ile uygulanan ısıl işlemlere duyarlı olup, bu işlemlerdeki farklılıklar performans üzerinde önemli değişiklikler yaratmaktadır (Donachie, 2000).

Dövme Ti6Al4V alaşımlarında, genellikle α+β sıcaklık aralığında gerçekleştirilen prosesler sonucunda ince taneli ve iki fazlı bir yapı elde edilmekte, buna bağlı olarak özellikle yüksek yorulma dayanımı sağlanmaktadır. Buna karşılık, β bölgesinden yavaş soğutulan döküm alaşımlar daha kaba taneli bir mikroyapı göstermektedir. Şekil 2.16'da

tipik bir döküm Ti6Al4V alaşımının mikroyapısı sunulmakta olup, yapıda α ve β fazlarının bulunduğu, ancak martenzitik dönüşüm ürünlerinin görülmediği raporlanmıştır. Bu alaşımlarda birincil β tanelerinin boyutu soğutma hızına bağlı olarak yaklaşık 0.5–5 mm aralığında değişmektedir (Nastac vd., 2006).



Şekil 2.16. Döküm sonrası Ti6Al4V alaşımının mikroyapısı (Nastac vd., 2006).

Soğuma sırasında β tane sınırlarında tane sınırı α fazı gelişmekte ve bu faz mekanik özellikleri olumsuz etkilediğinden istenmeyen bir oluşum olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, birincil β taneleri içinde soğuma devam ettikçe koloni yapıda α plakaları meydana gelmektedir. Aynı kristalografik yönelime sahip bu plakalar, 1–5 µm kalınlıklarında olup, koloni boyutları soğuma hızına bağlı olarak 50–500 µm arasında değişmektedir. Bu nedenle soğutma hızı, nihai mikroyapının belirleyici parametrelerinden biridir (Nastac vd., 2006).

Ti6Al4V alaşımında mekanik özelliklerin geliştirilmesi amacıyla uygulanan ısıl işlemler, temel olarak β veya α+β bölgesinden kontrollü soğutma ile tane inceltme ve bunu izleyen yaşlandırma işlemiyle martenzitik yapının dönüşümünü gerçekleştirmeye yöneliktir. Alaşım β sıcaklık bölgesinden hızla soğutulduğunda, β fazı martenzitik dönüşüm geçirerek widmanstätten tipi bir yapı oluşturur. Bu yapı çoğunlukla martenzitten, küçük bir kısmı ise artık β fazından meydana gelmektedir. Vanadyumun (yaklaşık %4) martenzitik dönüşümün bitiş sıcaklığını oda sıcaklığının altına düşürmesi nedeniyle yapıda bir miktar β fazının korunması olağandır (Donachie, 2000). Isıl işlem parametrelerindeki değişiklikler farklı mikroyapıların elde edilmesine olanak sağlar.

2.5. Yüzey Tekstürleme Yöntemleri

Son yıllarda mühendislikte yüzey tekstürleme tekniklerine yönelik artan ilgi, çeşitli endüstriyel ve bilimsel uygulamalarda malzeme performansını ve özelliklerini geliştirme amacını taşımaktadır. Bu teknikler, özellikle tribolojik performans, aşınma, sürtünme, korozyon ve ıslanabilirlik gibi yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi için büyük önem taşımaktadır. Yüzey tekstürleme, malzeme yüzeyinin mikroskobik düzeyde değiştirilmesi yoluyla malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin optimize edilmesine olanak tanır (Ammosova vd., 2020). Yüzey tekstürleme, yağlama koşullarını optimize etmek, sürtünmeyi kontrol altında tutmak ve mühendislik malzemelerinin aşınma ömrünü artırmak için etkili ve yaygın kullanılan bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Yöntemin başarılı ilk uygulamalarından biri 1940'lı yıllarda dizel motor piston segmanı–silindir yüzeyinde kullanılan kesintili yüzey finisajı olup, yüksek sıcaklıkta oluşan sıkışmayı engellemek amacıyla geliştirilmiştir (Martz, 1949). 1960'larda Anno vd. (1968), mikro çıkıntıların yağlama performansını artırabileceğini öne sürmüş; 1990'ların sonlarına gelindiğinde Etsion ve Burstein (1996), mekanik salmastra yüzeylerine açılan mikro çukurların sürtünmeyi azaltabildiğini ve aşınma dayanımını artırdığını ortaya koymuştur.

Birçok çalışmada, yüzey tekstürleme işleminin farklı tribolojik ortamlarda, özellikle yapışma aşınması, kavitasyon aşınması ve yağlama ile aşınma gibi koşullarda malzemeler üzerinde iyileştirmeler sağladığı gösterilmiştir. Bu nedenle, tribolojik özelliklerin geliştirilmesi amacıyla malzeme yüzeylerinde yapılan tekstür işlemleri, son derece önemli bir araştırma konusu olmuştur (Conradi vd., 2019). Yüzey tekstürleme işlemleri, mikro oluklar, mikro çukurlar ve mikro kanallar gibi yüzey değişikliklerini içerir. Bu değişiklikler lazer, mikro işleme veya benzeri teknolojilerle elde edilebilir. Yüzey tekstürleme, malzemenin üretim sürecinde de gerçekleştirilebilir ve metal enjeksiyon kalıplama gibi yöntemlerle üretilebilir (Ammosova vd., 2020). Çalışmalar, mikro çukurlar, mikro oluklar, nano noktalar, mikro sütunlar ve ters piramitler gibi çeşitli yüzey yapılarını inceleyerek tribolojik performansı iyileştirmeye yönelik farklı tekstürleme tekniklerini analiz etmiştir (Basher vd., 2019). Yüzey doku parametrelerinin tribolojik özellikler üzerindeki etkileri ise, geometriler, aralıklar, boyutlar, şekiller ve derinlik gibi faktörler üzerinden incelenmiştir.

Bir diğer önemli konu ise, yüzey dokularının sürtünme aşınması ve sürtünme özellikleri üzerindeki etkileridir. Sürtünme, tribolojinin temel alanlarından biri olup, yüzeyler arasındaki bağıl hareketin farklı uygulamalara göre değişiklik göstermesidir. Sürtünmenin azaltılması, mekanik bileşenlerin ömrünü uzatmak için kritik bir faktör iken, bazı özel durumlarda, örneğin frenleme ve debriyaj uygulamalarında yüksek sürtünme gereklidir. Bu tür durumlarda, yağlama sağlamak ve sürtünmeyi kontrol altında tutmak yaygın bir çözüm olarak kullanılır.

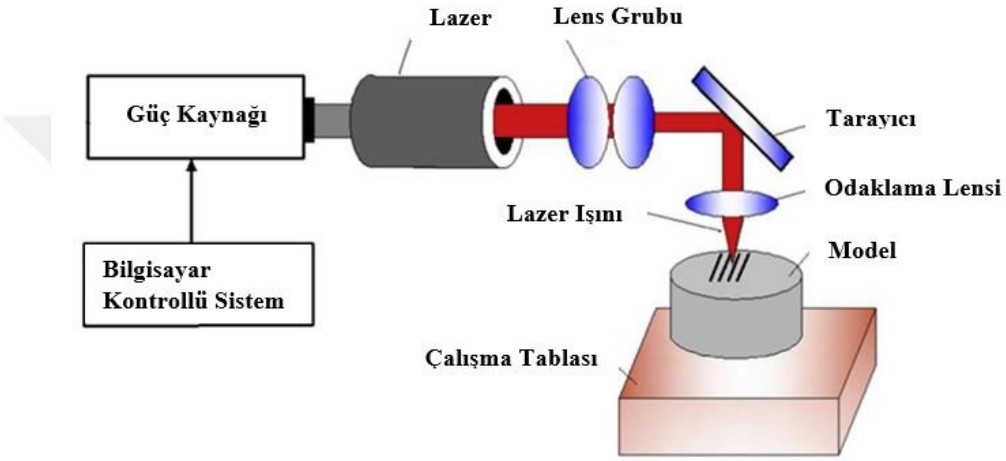
2.5.1. Lazer yüzey tekstürleme

Lazer yüzey tekstürleme, mühendislik malzemelerinin yüzey dayanımı, sürtünme davranışı, pürüzlülük düzeyi, sertliği, kimyasal direnç özellikleri ve korozyon performansı gibi birçok tribolojik ve yüzeysel niteliğini iyileştirmeye imkân tanıyan etkili bir yüzey modifikasyon tekniğidir. Bu yöntem yalnızca yüzey özelliklerini geliştirmekle kalmamakta, aynı zamanda yüzeyde bulunan mikro çatlakların kapatılmasına katkı sağlayarak malzemenin hizmet ömrünün korunmasına veya uzatılmasına da olanak vermektedir (Lawrence ve Waugh, 2015). Lazer tabanlı tekstürleme; yüksek işlem hızı, yüksek verimlilik, temassız çalışma prensibi, otomasyona uygunluk, karmaşık geometrilerin hassasiyetle üretilebilmesi ve yüksek tekrarlanabilirlik gibi belirgin üstünlükleri sayesinde mevcut yüzey tekstürleme teknolojileri arasında öne çıkan bir yöntemdir (Singh ve Harimkar, 2012).

2.5.1.1. Lazer ablasyon

Lazer ablasyon, yoğunlaştırılmış bir lazer ışınının katı yüzeye uygulanmasıyla malzemenin yüzeyden uzaklaştırıldığı bir işlemdir. Yüzey lazer enerjisini absorbe ettiğinde, lazer–malzeme etkileşimi sonucu yüzey tabakasının buharlaşması ve yüksek enerji yoğunluğunda plazma oluşumu gerçekleşmektedir (Chichkov vd., 1996). Ablasyon süreci sırasında lokal malzeme kaybı meydana gelir ve bunun sonucunda mikro çukurlar, oluklar veya önceden tasarlanmış diğer geometrilerde yüzey dokuları elde edilir. Bu yöntem, farklı mühendislik malzemelerinde başarılı bir biçimde uygulanmıştır. Örneğin Baumgart vd. (1995) aşırı düz bir silikon disk üzerinde yaklaşık 20 μm çapında mikro tümsek yapılarını lazer ablasyonu ile üretmiştir. Wang ve Zhou (2017) konik tepeciklerden oluşan ve sivri uç

derinliği 8 µm'ye ulaşabilen mikroyapılardan oluşan bir doku elde edilebildiğini göstermiştir. Hu ve Xu (2016) paslanmaz çelik üzerinde su altı lazer ablasyonu gerçekleştirmiş ve 200–1000 µm çapında mikro çukurları başarıyla oluşturmuştur. Liu vd. (2017) ise alumina seramikler üzerinde krater dizilimlerinden oluşan yüzey yapıları elde etmiştir. Lazer ablasyonuna dayalı LST düzeneklerinin şematik gösterimi Şekil 2.17'de sunulmakta olup, burada ZrO_2 seramik yüzeyinde lazerle oluşturulmuş bir oluğun yapısı örnek olarak verilmektedir (Liu vd., 2017).



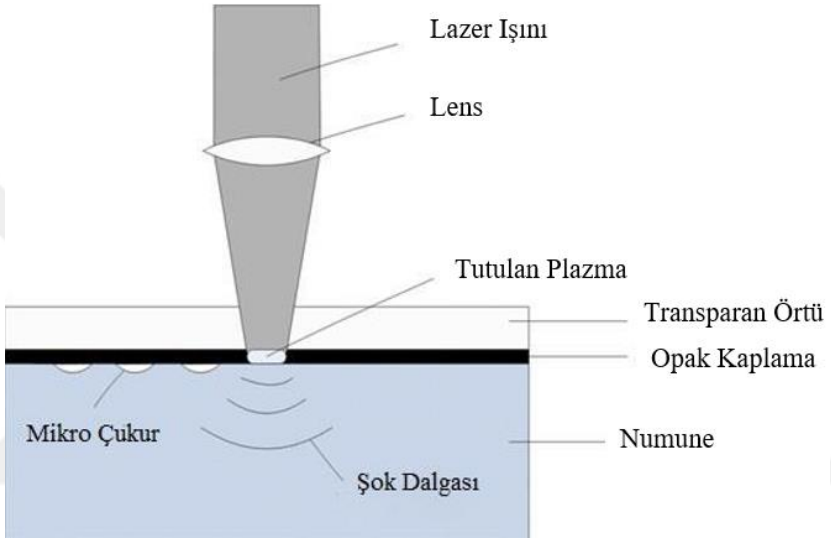
Şekil 2.17. LST sürecinin şematik diyagramı (Liu vd., 2017).

2.5.1.2. Lazer girişimi

Lazer interferansı ya da literatürde sıkça kullanılan adıyla doğrudan lazer girişimi ile desenleme (DLIP), koherent lazer ışınlarının girişimiyle malzeme yüzeyinde periyodik mikroyapılar oluşturan etkili bir LST yöntemidir. Bu teknikte, girişimin maksimum olduğu bölgelerde lazer yoğunluğu en yüksek seviyeye ulaşmakta ve numune yüzeyi lokal olarak ergimektedir. Oluşan sıcaklık farkına bağlı yüzey gerilmesi gradyanı nedeniyle, ergimiş malzeme maksimum girişim bölgelerinden minimum girişim noktalarına doğru hareket etmektedir. Böylece hat, nokta veya çapraz biçimli periyodik desenler farklı malzemeler üzerinde başarıyla üretilebilmektedir. Lazer interferansı, lazer ablasyonuna kıyasla daha yüksek çözünürlük, daha sınırlı ısıdan etkilenmiş bölge ve daha karmaşık geometrilerin üretilebilmesi gibi önemli avantajlara sahiptir. DLIP'in en belirgin üstünlüğü, çok yüksek çözünürlüklü yüzey desenleri üretme yeteneğidir (Mücklich vd., 2005).

2.5.1.3. Lazer şok işleme

Lazer ablasyonu ve lazer girişimi yöntemlerinde karşılaşılan sınırlamaları aşmak amacıyla, son dönemde lazer şok işlemine dayalı yeni yüzey tekstürleme yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu teknik, Şekil 2.18'de de görüldüğü üzere, hedef malzeme üzerinde hem yüzey sertleşmesi oluşturmakta hem de lazer tarafından tetiklenen şok dalgaları aracılığıyla basma yönünde artık gerilmeler meydana getirmektedir (Mao vd., 2018).



Şekil 2.18. Lazer şok işleme şeması (Li vd., 2014).

Bu teknikte yüzeyde oluşan tekstürler, herhangi bir termal hasar oluşturmadan, lazer şokunun tetiklediği plastik deformasyon mekanizması ile meydana gelmektedir. İşlemden önce, lazer enerjisinin etkin biçimde soğurulabilmesi amacıyla malzeme yüzeyi opak bir kaplama ile örtülmekte ve bunun üzerine şeffaf bir sınırlayıcı tabaka yerleştirilmektedir. Lazer darbesi uygulandığında enerji doğrudan malzemeye değil, opak kaplama tabakasına etki ederek lazer kaynaklı bir plazma oluşumuna yol açmaktadır. Şeffaf sınırlayıcı, bu plazmanın ani genişlemesini engelleyerek yüksek basınçlı bir lazer kaynaklı şok dalgasının malzeme içerisine yönlenmesini sağlamaktadır. Şok dalgasının basıncı, malzemenin dinamik akma dayanımını aştığında yüzeyde plastik şekil değişimi meydana gelir ve bunun sonucunda mikro veya mini boyutta çukurcuklar oluşur (Gujba ve Medraj, 2014).

2.6. Lazer Parametrelerinin Yüzey Tekstürüne Etkisi

Lazer yüzey tekstürleme süreçlerinde, kullanılan lazer tipinin yanı sıra lazer parametrelerinin uygun şekilde seçilmesi, yüzey morfolojisinin ve tekstür boyutlarının kontrol edilebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Lazer güç yoğunluğu, odak noktasının boyutu ve darbe tekrar frekansı gibi işlem parametreleri, oluşturulan yüzey desenlerinin geometrisini ve malzemenin tribolojik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, lazer parametrelerinin yüzey tekstürü üzerindeki etkilerinin anlaşılması hem işlemin optimize edilmesi hem de elde edilen malzemelerin tribolojik performansının değerlendirilmesi için gereklidir (Mao vd., 2020). Lazer türleri darbe sürelerine göre milisaniye, nanosaniye, pikosaniye ve femtosaniye olarak sınıflandırılmakta olup, darbe süresi hem ablasyon hem de lazer şok işlemede oluşan termal girdiyi belirleyerek işlem kalitesini etkilemektedir. Femtosaniye lazerler, ısıdan etkilenen bölgenin oldukça sınırlı olması nedeniyle nanosaniye ve pikosaniye lazerlere kıyasla daha yüksek yüzey kalitesi sunarken, daha yüksek maliyet dezavantajına sahiptir (Bathe vd., 2014).

Lazer güç yoğunluğu, yüzeyde oluşacak tekstürlerin temel belirleyicilerinden biridir. Şok işleme uygulamalarında güç yoğunluğu şok dalgasının basıncını ve buna bağlı plastik deformasyon miktarını belirlerken, ablasyon ve lazer girişimi temelli işlemlerde çukur ve olukların genişliği, derinliği ve geometrisi ile ısıdan etkilenen bölgenin büyüklüğü üzerinde belirleyici olmaktadır. Artan lazer yoğunluğu ile birlikte daha derin ve daha geniş çukurların oluştuğu ve yüzey pürüzlülüğünün belirgin şekilde arttığı rapor edilmiştir (Mao vd., 2020). Lazer atım sayısı da yüzey geometrisinin şekillenmesinde önemli bir parametredir. Uygulanan darbe sayısı arttıkça yüzeyde oluşan kraterlerin derinlik, çap ve yükseklik gibi karakteristiklerinin önemli ölçüde değiştiği, özellikle 100Cr6 çeliği üzerinde yapılan çalışmada lazer ablasyonuyla oluşturulan mikro çukurların morfolojisinin atım sayısından güçlü biçimde etkilendiği gösterilmiştir (Vilhena vd., 2009).

2.7. LST ile Malzemelerin Tribolojik Performansının İyileştirilmesi

LST ile elde edilen tekstür geometrilerinin tribolojik davranış üzerindeki belirleyici rolünü anlamak, iyileştirilmiş sürtünme ve aşınma performansının temel mekanizmalarını açıklamak açısından önemlidir. LST ile oluşturulan yüzey özelliklerinin hem kuru hem de

yağlanmış koşullarda sürtünme katsayısını (COF) kontrol edebildiği ve aşınma direncini artırabildiği gösterilmiştir. Literatürde sunulan çalışmalar, tekstür tasarım parametrelerinin tribolojik özelliklerle ilişkisini ortaya koyarak, LST'nin malzeme performansını artırmadaki etkinliğini bilimsel bir temele oturtmaktadır.

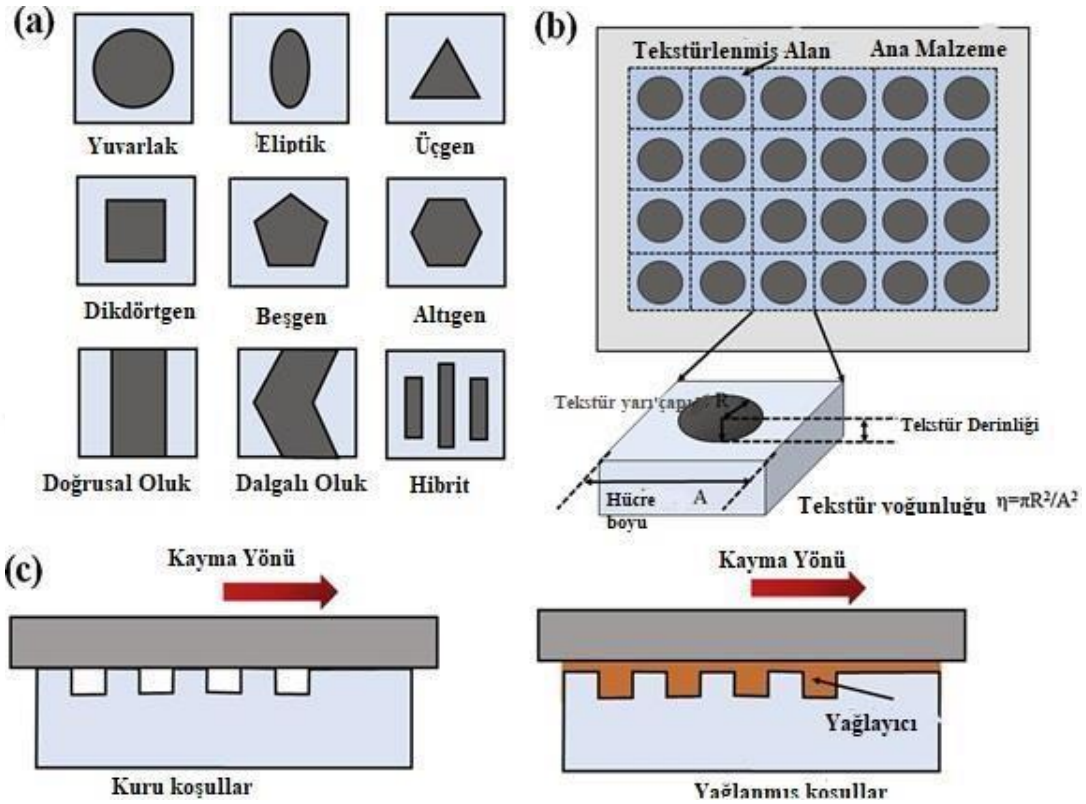
2.7.1.Tekstür dizaynı

LST işlemi sırasında, işlenen malzemelerin yüzeyinde iki temel biçimde tekstür yapıları meydana gelmektedir. Bu yüzey modifikasyonlarının başlıca türleri, mikro ölçekte çukur yapıları ile kanal benzeri oluk oluşumlarıdır. Şekil 2.19 (a)'da yüzeylere uygulanabilen çeşitli mikro-tekstür geometrileri sunulmaktadır. Bu geometriler; yuvarlak, eliptik, üçgen, dikdörtgen, beşgen ve altıgen çukurlar ile doğrusal ve dalgalı oluklardan meydana gelmektedir. Geometri seçimi, yüzeydeki gerilme dağılımını, temas alanını ve akışkan taşınımını doğrudan etkileyerek, malzemenin sürtünme ve aşınma davranışını belirleyici bir rol oynamaktadır. Özellikle yuvarlak çukurlar yük altındaki gerilme birikimini minimize ederken, oluk tipi tekstürler kayma yönüne bağlı olarak yağlayıcı filmin taşınmasını kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle şekil, tekstür tasarımının yalnızca geometrik bir seçimi olmayıp; aynı zamanda tribolojik işlevselliği doğrudan kontrol eden bir mühendislik parametresidir (Mao vd., 2020).

Şekil 2.19 (b)'de ise tekstürlü bir yüzeyin temel tasarım parametreleri şematik olarak sunulmaktadır. Bunlar arasında, tekstür yarıçapı, tekstür derinliği, hücre boyutu, tekstür yoğunluğu yer almaktadır. Bu parametreler; yüzeyde gerçek temas alanının azalması, yağlayıcı rezervuarlarının oluşturulması ve mikro-basınç bölgelerinin düzenlenmesi gibi tribolojik mekanizmaları doğrudan etkilemektedir. Örneğin yüksek tekstür yoğunluğu, yağ tutma kapasitesini artırırken aşırı yoğunluk ise yüzeyin taşıma kapasitesini zayıflatabilir. Bu nedenle optimum tekstür tasarımı hem geometrik hem de fonksiyonel parametrelerin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir (Mao vd., 2020).

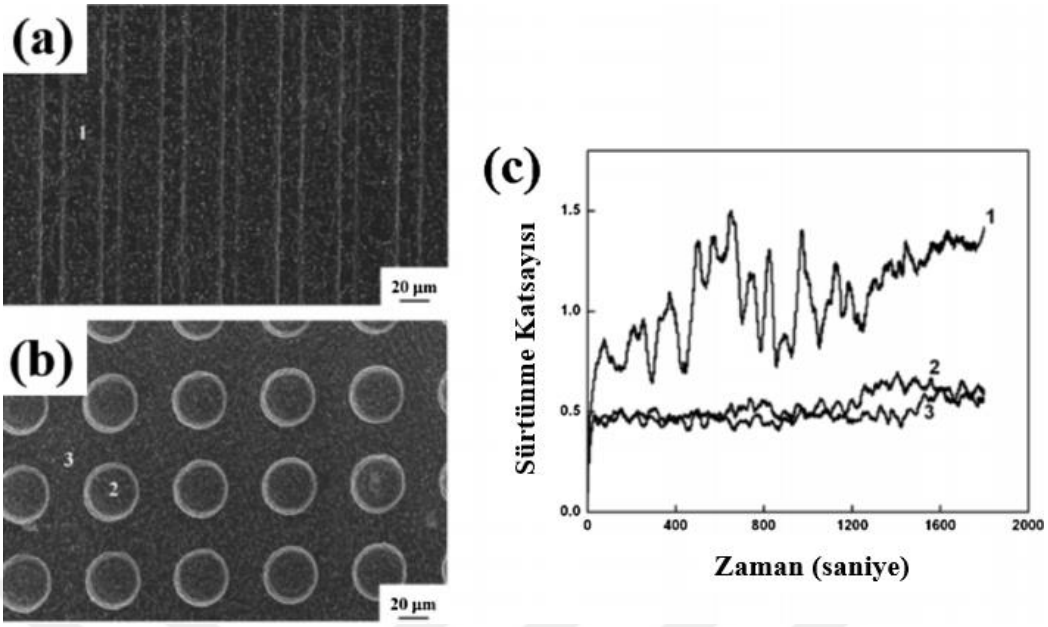
Kayma hareketi sırasında tekstürlerin temas koşullarını nasıl değiştirdiğini gösteren Şekil 2.19 (c)'de kuru koşullarda, mikro-çukurların varlığı temas alanını azaltarak sürtünme katsayısının düşmesine katkı sağlar. Bu tekstürler aşınma sırasında oluşan döküntüleri hapsederek yüzeyde üçüncü cisim aşınmasını sınırlar. Şekil, lazer yüzey tekstürlemede

geometrik tasarımın ortam koşullarına bağlı olarak sürtünme ve aşınma davranışının iyileştirilmesinde temel etkiye sahip olduğunu vurgulamaktadır (Mao vd., 2020).



Şekil 2.19. (a) Farklı tekstür şekilleri, (b) tekstür parametreleri ve (c) tekstür tasarımının kayma sırasında kuru ve yağlanmış ortamda temas durumuna etkisi (Mao vd., 2020).

Kumari vd. (2015) Ti6Al4V alaşımının tribolojik performansını iyileştirmek amacıyla lazer ablasyonu ile oluşturulan doğrusal oluk ve dairesel çukur geometrilerinin sürtünme davranışı üzerindeki etkisini kapsamlı biçimde incelemiştir. Çalışmada elde edilen yüzey morfolojileri Şekil 2.20 (a) ve Şekil 2.20 (b)'de sunulmuş olup, LST uygulanmamış yüzey ile farklı tekstürlere sahip yüzeylerin kayma süresine bağlı COF değişimleri Şekil 2.20 (c)'de karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, işlem görmemiş yüzeyin sürtünme katsayısının kısa süre içinde 1,0 seviyesine yükseldiğini ve zamanla 1,0–1,4 aralığında dalgalandığını göstermektedir. Buna karşılık, lazerle tekstüre edilmiş yüzeylerde COF değerinin yaklaşık 1500 saniye boyunca 0,4 seviyesinde sabit kaldığı, sonrasında ise hafif bir artışla 0,5–0,66 aralığına yükseldiği belirlenmiştir. Bu bulgular, lazerle yüzey tekstürlemenin Ti6Al4V alaşımında sürtünme katsayısını önemli ölçüde düşürdüğünü ve bu sayede alaşımın biyomedikal implant uygulamalarında daha üstün tribolojik performans sergilemesini mümkün kıldığını ortaya koymaktadır

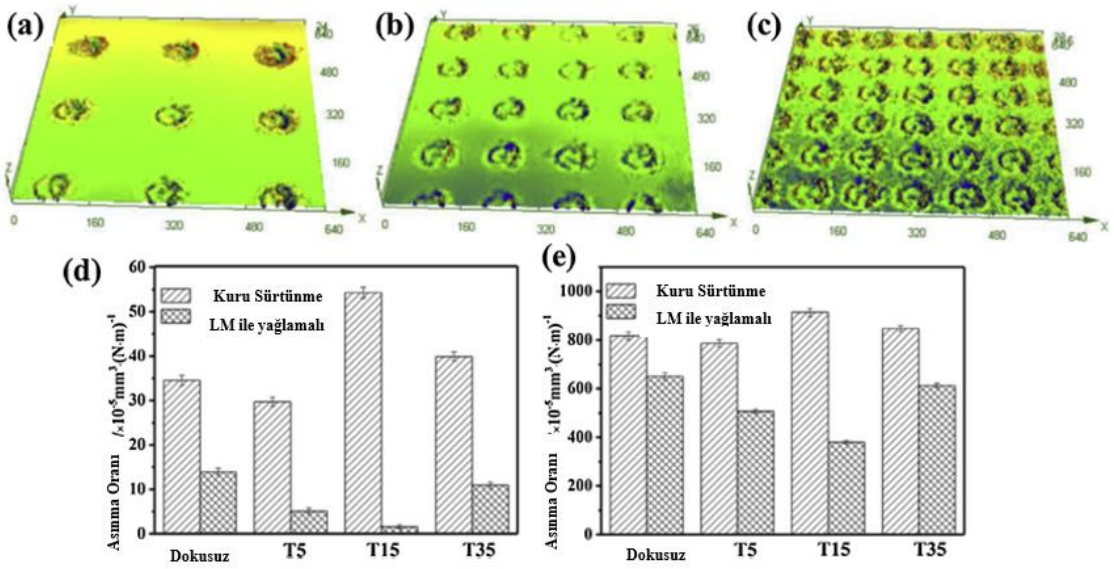


Şekil 2.20. LST uygulanmış Ti6Al4V alaşımının yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri: (a) doğrusal tekstür geometrisi ve (b) çukur (dimple) tekstür geometrisi; (c) LST uygulanmamış yüzey (çizgi 1), doğrusal tekstürlü yüzey (çizgi 2) ve çukur tekstürlü yüzey (çizgi 3) için kayma süresine bağlı COF değişimi (Kumari vd., 2015).

2.7.1.1. Tekstür yoğunluğu

LST uygulanmış yüzeylerde tekstür özellik oranı ya da tekstür yoğunluğu, tribolojik performansı belirleyen temel parametrelerden biridir. Kuru kayma koşullarında tekstür yoğunluğu; gerçek temas alanını, dolayısıyla temas bölgesindeki gerilme dağılımını ve aşınma artıkları için hapsedici mikro haznelerin etkinliğini doğrudan etkilemektedir (Hsu vd., 2014). Yağlanmış temas durumlarında ise tekstür yoğunluğu, temas basıncı dağılımının şekillenmesinde ve buna bağlı olarak yağlama rejiminin oluşmasında belirleyici bir değişken olup, yüzeyin yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilemektedir (Rosenkranz vd., 2017). C85 çeliği üzerinde yapılan çalışmada Schneider vd. (2017), sürtünme kuvvetini en fazla düşüren optimum çukur yoğunluğunun %10 olduğunu bildirmiştir. Ti alaşımlarında çukurlar arası mesafenin, yani efektif tekstür yoğunluğunun hem COF hem de aşınma oranları üzerinde kritik etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Çukurlar arası mesafenin azalmasıyla yani yoğunluğun artması ile, özellikle katı yağlayıcı ilavesi yapılan sistemlerde sürtünme ve aşınma davranışının belirgin biçimde iyileştiği rapor edilmiştir (Wu vd., 2017).

AISI52100 rulman çeliklerinde tekstür yoğunluğunun tribolojik davranış üzerindeki etkisini incelemiş ve %5, %15 ve %35 tekstür yoğunluğuna sahip numuneleri (sırasıyla T5, T15 ve T35) LST yöntemi ile üretmiştir. Şekil 2.21 (a)–(c)'de bu yüzeylere ait SEM görüntüleri sunulmuş, ardından bilye-disk düzenekli tribolojik testler hem kuru kayma koşullarında hem de sıvı metal yağlayıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.21 (d) ve Şekil 2.21 (e) incelendiğinde, tekstür yoğunluğunun aşınma davranışını belirgin biçimde etkilediği; özellikle T15 örneğinin yağlanmış koşullarda en yüksek aşınma direncini gösterdiği anlaşılmaktadır (Li vd., 2019).



Şekil 2.21. LST uygulanmış AISI52100 rulman çeliklerinin yüzey morfolojisine ait SEM görüntüleri: (a) %5, (b) %15 ve (c) %35 tekstür yoğunluğu. Kayma frekansının aşınma oranlarına etkisi: (d) 10 Hz ve (e) 2 Hz frekansta, tekstür uygulanmamış ve farklı tekstür yoğunluklarına sahip yüzeylerle temas eden bilyaların aşınma oranları (Li vd., 2019).

2.7.1.2. Tekstür boyut ve derinliği

Lazer yüzey tekstürlemede tekstür yoğunluğunun yanı sıra, tekstür elemanlarının boyutu ve derinliği de mühendislik bileşenlerinin tribolojik performansını belirleyen kritik tasarım parametrelerindendir. Örneğin, Boidi vd. (2020) yağlanmış koşullar altında LST uygulanmış AISI52100 çeliğinde tekstür derinliğinin etkisini incelemiş ve sığ tekstürlerin sürtünme katsayısını belirgin biçimde azaltırken, daha derin çukurların tribolojik performansı olumsuz etkilediğini rapor etmiştir. Benzer şekilde Greiner vd. (2014) LST

uygulanmış pirinç alaşımı üzerinde çukur çapı ve derinliğinin sistematik olarak değiştirildiği bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu kapsamda, belirli örneklerde çukur derinliği sabit tutulup çap 20–200 μm arasında değiştirilmiş; diğer örneklerde ise çukur çapı sabit 50 μm tutulup derinlik 10–65 μm arasında ayarlanmıştır. Bulgular, çukur çapı arttıkça statik sürtünme kuvvetinin azaldığını, ancak çukur derinliğinin artışına bağlı olarak sürtünme kuvvetinin önce yükselip ardından azaldığını göstermektedir. Bu sonuçlar, sürtünme davranışı ile tekstür geometrisi arasında karmaşık bir ilişki bulunduğuna işaret etmektedir.

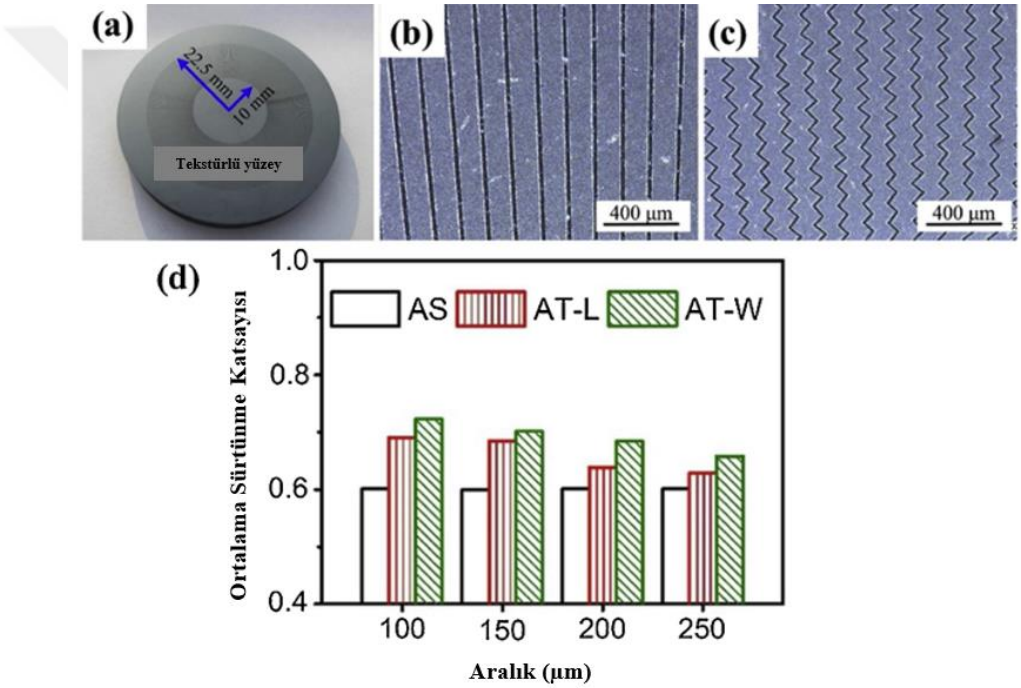
2.7.1.3. Tekstür şekli

LST teknolojisindeki ilerlemeler, dairesel, eliptik, küresel, üçgensel ve biyomimetik desenler gibi çok çeşitli yüzey geometrilerinin elde edilmesine imkân tanımıştır. Yapılan araştırmalar, tekstür şeklinin, LST uygulanmış malzemelerin tribolojik davranışı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Yu vd. (2010) benzer boyut ve derinliğe sahip eliptik ve üçgensel tekstürlerin, dairesel çukur geometrisine kıyasla daha düşük yük taşıma kapasitesi sunduğunu rapor etmiş, böylece geometrik şeklin hidrodinamik film oluşumu ve temas koşulları üzerindeki kritikliğini ortaya koymuştur. Sedlacek vd. (2017) ise toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş takım çeliklerinde farklı tekstür şekillerinin etkisini incelemiş ve piramit biçimindeki yüzey desenlerinin, pürüzsüz yüzeylerden bile daha yüksek sürtünme katsayısı oluşturduğunu belirlemiştir. Bu sonuç, tekstür şeklinin yalnızca sürtünme mekanizmalarını değil, aynı zamanda yüzeydeki mikro temas karakteristiğini de derinden etkilediğini göstermektedir. Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, tekstür şeklinin, tribolojik performansın iyileştirilmesi amacıyla yapılan LST tasarım süreçlerinde dikkatle optimize edilmesi gereken temel bir parametre olduğu anlaşılmaktadır.

2.7.1.4. Tekstür hizalama

LST ile üretilen yüzeylerde tekstür elemanlarının kayma yönüne göre hizalanması, tribolojik performans üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Tekstür desenlerinin kayma yönü ile olan göreceli konumu sürtünme sırasında temas koşullarını değiştirdiğinden, oluşan sürtünme kuvvetleri de bu hizalanmaya bağlı olarak farklılık göstermektedir (Gachot vd., 2013). Özellikle doğrusal tekstürlü yüzeylerde, kayma yönüne paralel veya dik yapılacak

hareketlerde çıkıntıların etkileşim biçimi değiştiğinden, literatürde sürtünme anizotropisi olarak ifade edilen yön bağımlı sürtünme davranışı ortaya çıkabilmektedir (Ito vd., 2020). Xing vd. (2017) kuru kayma koşullarında LST uygulanmış seramik yüzeylerde tekstür hizalanmasının etkisini incelemiş ve pürüzsüz yüzey, doğrusal oluklara sahip yüzey Şekil 2.22 (b) ve dalgalı oluklara sahip yüzey Şekil 2.22 (c) olmak üzere üç farklı yüzey üretmiştir. Yapılan pin-on-disk testlerinde, tekstür hizalanmasına bağlı sürtünme katsayısındaki değişimler Şekil 2.22 (d)'de sunulmuştur. Bulgular, pürüzsüz yüzeyin tüm yükleme koşullarında en düşük sürtünme katsayısını sergilediğini, dalgalı oluklara sahip yüzeyin ise en yüksek sürtünme katsayısına ulaştığını göstermiştir.



Şekil 2.22. Tekstürlü numunelerin optik fotoğrafları: (a) Tekstürlü seramik disk, (b) Doğrusal oluklar, (c) dalgalı oluklar, (d) Farklı aralıklara sahip pürüzsüz ve tekstürlü numunelerin ortalama sürtünme katsayısı (kayma hızı = 80 m/dak, yük = 15 N) (Xing vd., 2017).

2.7.2. LST ile sürtünme katsayısını ve aşınma direncini değiştirme

Tribolojik sistemlerde sürtünme katsayısının kontrol altına alınması, mekanik bileşenlerin performansının ve enerji verimliliğinin artırılmasında kritik bir rol üstlenmektedir. Literatürde sürtünme katsayısı; temas eden yüzeyler arasındaki yapışma etkisi ile yüzey pürüzlerinin neden olduğu oyma (plowing) bileşeninin toplamı olarak

tanımlanmaktadır. Yapışma bileşeni; yüzeylerin gerçek temas alanı, malzeme çiftinin özellikleri ve yağlama koşulları tarafından belirlenirken, oyma bileşeni pürüz tepelerinin maruz kaldığı plastik deformasyon seviyesine bağlıdır. LST, yüzeyde oluşturulan mikro-ölçekli desenler aracılığıyla bu iki mekanizmayı doğrudan etkileyebilmekte ve böylece sürtünme katsayısının istenen aralıkta düzenlenmesine olanak tanımaktadır. Bunun yanında, aşınma direncinin artırılması mühendislik uygulamalarında servis ömrünü ve bileşen güvenilirliğini belirleyen temel bir gerekliliktir. Lazer tekstürleme, hem kuru hem de yağlanmış çalışma şartlarında malzemelerin aşınma performansını geliştirebilen etkili bir yüzey mühendisliği yöntemi olarak öne çıkmaktadır (Mao vd., 2020).

2.7.2.1. Kuru koşullar

Kuru kayma altında lazerle tekstüre edilmiş yüzeylerin davranışını inceleyen çalışmalar, bu yöntemin temas alanını azaltarak sürtünme katsayısında belirgin düşüşler sağlayabildiğini göstermiştir. Örneğin, Rosenkranz vd. (2014) lazer işleminden geçen çelik yüzeylerde sürtünme katsayısının yaklaşık yarı yarıya azaltılabildiğini rapor etmiştir. Lazer yüzey tekstürleme ayrıca yüzey sertliğini artırmakta ve aşınma sırasında oluşan gerilme birikimini sınırlayarak metalik malzemelerde daha dirençli bir yüzey tabakası oluşturabilmektedir. Çukur tekstürlü Ti alaşımlarında aşınma izlerinin hem genişlik hem de derinlik açısından işlenmemiş numunelere göre kayda değer ölçüde küçüldüğünü belirlemiş; bu durum lazer tekstürleme uygulamasının aşınma dayanımını artırdığını doğrulamaktadır. Ek olarak, yağlayıcı kullanımının mümkün olmadığı yüksek sıcaklıklı uygulamalarda da lazerle oluşturulan mikroyapılar, temas yüzeyinin kararlılığını artırarak aşınmayı azaltmakta ve zorlu koşullarda çalışan bileşenlere önemli tribolojik avantajlar sağlamaktadır.

2.7.2.2. Yağlanmış koşullar

Yağlayıcı varlığında gerçekleştirilen tribolojik testler, lazerle tekstüre edilmiş yüzeylerin sürtünme katsayısını önemli ölçüde düşürdüğünü göstermektedir (Lu vd., 2017). Bazı araştırmalar, lazer yüzey tekstürünün sürtünme katsayısını daha kararlı bir seviyede tuttuğunu ve çalışma ortamındaki yağlayıcıların türüne olan bağımlılığı azalttığını bildirmektedir. Yağlanmış temaslarda sürtünmenin azalmasını sağlayan mekanizmalar arasında; mikroyapılar sayesinde hidrodinamik yağlama rejimine erken geçiş, kavitasyonel

kaldırma kuvvetinin oluşturduğu dengeleyici etki ve çukurların neden olduğu yapay kama (wedge) mekanizması yer almaktadır (Hsu vd., 2014). Lazerle oluşturulan çukurlar ve oluklar, yağlayıcıyı yüzeyde tutarak mikro ölçekte yük taşıyıcı rezervuarlar gibi davranmakta; böylece mekanik bileşenlerin servis ömrünü uzatmaktadır. Ayrıca bu mikroyapılar aşınma kalıntılarını yakalayarak üçüncü cisim aşınmasının önüne geçebilmekte ve temasın daha stabil sürmesini sağlamaktadır (Mao vd., 2020).

2.8. Lazer Yüzey Tekstürleme Uygulamaları

LST, mühendislik malzemelerinin tribolojik performansını artırmak amacıyla farklı uygulama alanlarında geniş ölçekte benimsenen bir tekniktir. Şekil 2.23'te gösterildiği üzere LST; dişliler ve kesici takımlar gibi mekanik elemanlarda, dental implantlar ve diz protezleri gibi biyomedikal ürünlerde, ayrıca manyetik diskler gibi elektronik sistemlerde başarıyla uygulanmaktadır. LST teknolojisinin gelişimi, öncelikle motor ve makine sistemlerindeki tribolojik performansı iyileştirme ihtiyacına dayanmaktadır. Bu doğrultuda mekanik salmastralar, itme yatakları ve piston segmanları gibi çok sayıda makine elemanı üzerinde LST'nin etkilerini inceleyen kapsamlı araştırmalar yapılmıştır.



Şekil 2.23. Lazer yüzey tekstürleme örnekleri (Mao vd., 2020).

LST, havacılık uygulamalarında kullanılan kritik bileşenlerin tribolojik performansını iyileştirmek için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Uçak motorları, türbinler ve hareketli mekanik parçalar yüksek sürtünme ve aşınmaya maruz kaldığından, yüzey özelliklerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle titanyum ve nikel esaslı alaşımlarda uygulanan LST, sürtünmeyi azaltarak aşınma direncini artırmakta ve bileşen ömrünü uzatmaktadır. Benzer şekilde, biyomalzemeler üzerine uygulanan lazer yüzey tekstürleme, mekanik bileşenlerde olduğu gibi, biyomedikal implantların tribolojik performansını iyileştirmek amacıyla da yaygın biçimde kullanılmaktadır. Yapay eklemler ve dental implantlar gibi biyolojik implantlarda zamanla artan sürtünme ve aşınma, implantların işlevselliğini olumsuz etkileyerek erken arızalara yol açabilmektedir. Bu nedenle, yüzey özelliklerinin geliştirilmesine yönelik LST uygulamaları özellikle titanyum ve alaşımlarında başarılı sonuçlar vermektedir. Yüksek özgül dayanımları, üstün korozyon dirençleri ve biyouyumluluk özellikleri sayesinde titanyum esaslı malzemeler biyomedikal implantlarda en çok tercih edilen malzeme gruplarından biridir. Son yıllarda LST'nin bu malzemelerin tribolojik performansını artırmada etkili olduğu çeşitli çalışmalarla ortaya konulmuştur. Çizelge 2.10'da bu uygulama alanlarına ilişkin örnekler sunulmakta olup, lazerle tekstürlemenin sürtünme katsayısını düşürme ve aşınma dayanımını artırma konusunda oldukça etkili olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.10. Lazer yüzey tekstürlemenin farklı mekanik bileşenler üzerindeki uygulamaları.

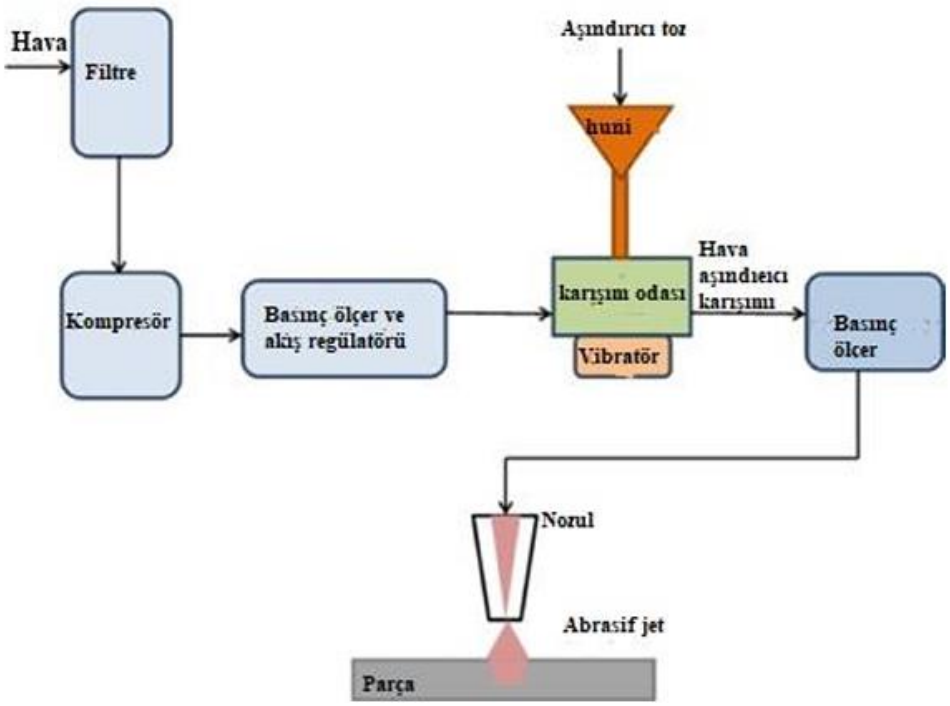
Mekanik Bileşenler	**Malzemeler**	**LST Yöntemi**	**Sürtünme Katsayısına Etkisi**	**Kaynaklar**
Piston segmanları	Dökme demir	Lazer ablasyonu	%35 azaltılmış	(Ryk & Etsion, 2006)
Piston segmanları	Molibden-krom kaplama	Lazer ablasyonu	%76 azaltılmış	(Ezhilmaran, 2022)
Mekanik salmastralar	Tungsten karbür	Lazer ablasyonu	%60 azaltılmış	(Etsion, I., 2004)
Rulmanlar	Silisyum karbür	Lazer ablasyonu	%30 azaltılmış	(Murzin & Balyakin, 2017)
Rulmanlar	Al-Sn-Si alaşımı	Lazer ablasyonu	%20 azaltılmış	(HoudkováŠ vd., 2017)
Enjeksiyon kamı	Çelikler	Lazer ablasyonu	%10 azaltılmış	(Kang vd., 2017)
Kesici takım	Al_2O_3/TiC seramik	Lazer ablasyonu	%18 azaltılmış	(Wang vd., 2016)
İmplant yüzeyi	Ti6Al4V	Lazer ablasyonu	%26 azaltılmış	(Wozniak vd., 2024)

2.9. Diğer Yüzey Tekstürleme Teknikleri

2.9.1. Aşındırıcı jet işleme/ kumlama

Kumlama işleminde, yüzeye yüksek hızla gönderilen sert aşındırıcı partiküller aracılığıyla düzensiz bir yüzey tekstürü elde edilir. Bu partiküllerin yüzeye çarpması sonucu lokal ve kalıcı plastik deformasyon oluşur. Ancak parçacıkların hız, boyut, şekil ve sertlik gibi özelliklerinin sürekli değişkenlik göstermesi, ortaya çıkan yüzey tekstürünün hassas bir şekilde kontrol edilmesini güçleştirir.

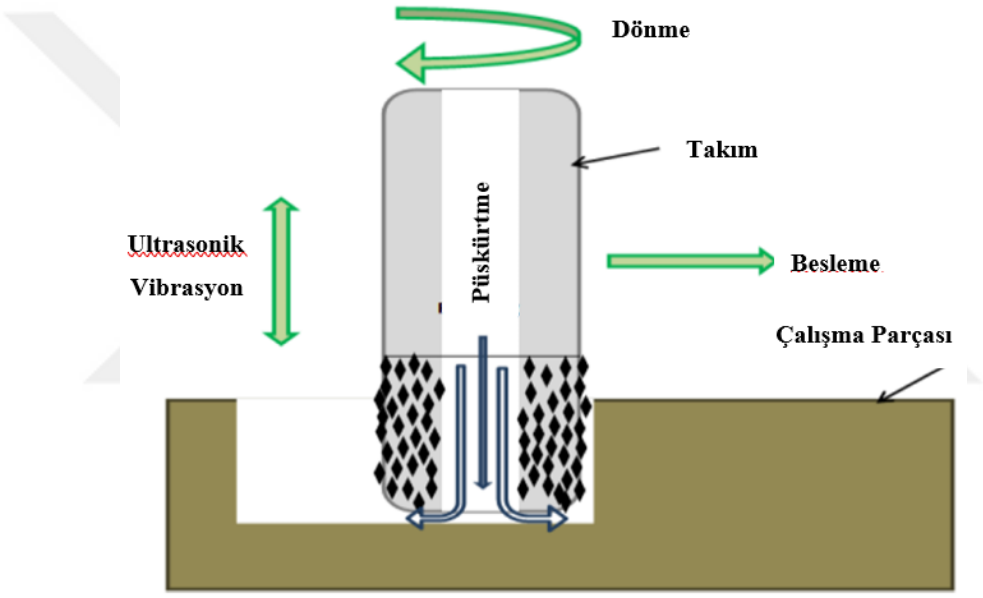
Bu yöntemde aşındırıcı partiküller, gaz akımı ile hızlandırılarak yüzeye yönlendirilir ve böylece istenen yüzey topografyası oluşturulur. Tekstür tasarımı sırasında yüzeyin seçili bölgelerini korumak veya yönlendirmek adına maskeleme teknikleri veya özel tasarlanmış nozullar kullanılabilmektedir (Arslan vd., 2016). Şekil 2.24'te aşındırıcı jet işleme yönteminin şeması gösterilmekte olup, bu yöntem kumlama prensibinin basınçlı gaz akışıyla desteklendiği daha kontrollü bir uygulama olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.24. Aşındırıcı jet işleme yöntemi şeması (Vishnoi vd., 2021).

2.9.2. Ultrasonik destekli taşlama

Ultrasonik destekli taşlama yönteminde, klasik taşlama işlemi ultrasonik titreşimlerin eklenmesiyle geliştirilmiştir. Parçaya uygulanan bu yüksek frekanslı titreşimler sayesinde, konvansiyonel taşlamaya kıyasla taşlama kuvvetlerinin ve işlem sırasında oluşan ısının belirgin şekilde azaldığı rapor edilmektedir. Bu durum, işlenen yüzeyin daha düzgün bir topografiye sahip olmasını sağlayarak yüzey kalitesinde önemli bir iyileşme meydana getirir (Zhou vd., 2020). Şekil 2.25'te ultrasonik destekli taşlama yöntemine ilişkin görsel gösterilmektedir.



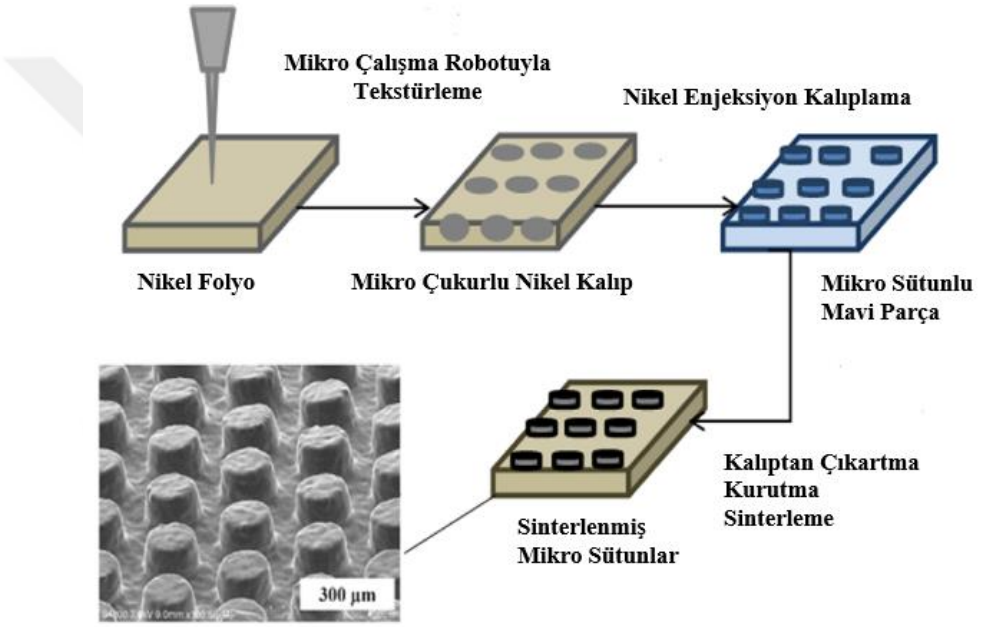
Şekil 2.25. Ultrasonik destekli taşlama (Lauwers vd., 2010).

2.9.3. Kimyasal aşındırma

Bu yöntemde yüzeydeki malzeme, uygulanan kimyasal etkileşim sonucunda kontrollü biçimde uzaklaştırılmaktadır. Kimyasal aşındırma işlemi, sıcak daldırma yöntemleri ya da elektrokimyasal aşındırma teknikleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Ekonomik bir yüzey işleme yaklaşımı olması ve malzemenin mekanik özelliklerinde değişime yol açmaması önemli avantajları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, kimyasal aşındırmanın en belirgin olumsuz yönleri; işlem hızının düşük olması, yüzeyde yorulma dayanımının azalması ve nispeten yüksek bir yüzey pürüzlülüğünün oluşmasıdır (Vishnoi vd., 2021).

2.9.4. Metal enjeksiyon kalıplama

Bu yöntemde, istenen yüzey tekstürüne sahip kalıplar hazırlanmakta ve bu kalıplara malzeme enjekte edilerek tekstürlü yüzeyler elde edilmektedir (Şekil 2.26). Bilgisayar kontrollü sistemlerle üretilebilen bu özel kalıplar, yüksek düzeyde hassasiyet sağlamaktadır. Yöntem, düşük maliyetli ve kendi kendini yağlayabilen parçaların üretimine imkân tanımaktadır. Ancak uygulama alanı tüm malzemeleri kapsamamakta olup yalnızca enjeksiyonla şekillendirilebilen malzemelere uygunluk göstermektedir (Ammosova vd., 2020).



Şekil 2.26. Metal Enjeksiyon Kalıplama (Ammosova vd., 2020).

2.9.5. Mikro frezeleme

Mekanik mikro frezeleme sistemi; pnömatik takım tutucu, kesici takım, fikstürle sabitlenmiş iş parçası, hava akışı regülatörü, dijital mikroskop ve mil kontrol ünitesinden oluşan bir düzenektir. Bu yöntem, özellikle titanyum yüzeylerde kontrollü yüzey tekstürlerinin oluşturulması açısından etkili bir imalat tekniği olarak kabul edilmektedir. Mikro frezeleme ile yüzeyde mikro çukur yapılar oluşturularak yüzeyin serbest enerjisinin önemli ölçüde artırılması sağlanmaktadır. Bunun sonucunda yüksek hidrofiliklik özellikleri kazandırılmış ve yüzey performansı iyileştirilmiş malzemeler üretilebilmektedir (Jain ve Bajpai, 2019).

2.9.6. Mikro elektro erozyon yöntemi

Elektro erozyon yönteminde malzeme, termal esaslı bir çıkarma mekanizmasıyla uzaklaştırılır. Alet elektrodu ile iş parçası elektrodu arasında gerçekleşen yüksek frekanslı elektriksel deşarjlar, her iki elektrottaki malzemenin ergimesine ve buharlaşmasına yol açar. İşleme bölgesinin etkinliğini artırmak amacıyla, elektrotlar arasındaki boşluk iletken olmayan dielektrik bir sıvı ile doldurulur. Mikro delme gibi mekanik süreçlerle karşılaştırıldığında, elektro erozyon yönteminin; düşük kesme kuvveti gerektirmesi, karmaşık geometrilerin üretimine imkân tanıması, daha pürüzsüz yüzeyler sağlaması, mekanik yükleme olmadığı için iş parçasında gerilme oluşturmaması, yüksek hassasiyet ve geniş takım malzemesi seçeneği sunması gibi önemli avantajları bulunmaktadır. Bununla birlikte bu yöntemin; düşük malzeme kaldırma oranı sebebiyle parça boyutunun kısıtlanması, küçük pürüzlülük değerlerine ulaşmak için uzun işlem sürelerine ihtiyaç duyulması ve ısıdan etkilenen bölgelerde eriyen malzemenin yeniden katılaşarak yüzeyde istenmeyen tabakalar oluşturması gibi bazı sınırlamaları da vardır (Arslan vd., 2016).

2.9.7. İyonize fiziksel buhar biriktirme

Bu teknikte metal atomları iyonize edilmekte ve yoğun plazma ortamının etkisiyle, ayrıca malzeme yüzeyine dik doğrultuda uygulanan elektrik alanları sayesinde yönlendirilmiş bir akı hâline getirilmektedir. Bu yönlendirilmiş iyon akışı, alt katman üzerine kaplama malzemesinin kontrollü biçimde birikmesini sağlar (Vishnoi vd., 2021).

2.9.8. Kimyasal destekli taşlama

Yüksek hızlı oksijen yakıtı gibi kaplamaların şekle uyumlu taşlanması, literatürde kimyasal destekli şekil uyarlamalı taşlama olarak tanımlanmaktadır. Nano ölçekli bir yüzey işleme yöntemi olan bu teknik, elastik uyum kabiliyetine sahip bir ortam ve uygun bir parlatma pedi kullanan özel bir taşlama düzeneğine sahiptir. Ortamın yüksek elastik deformasyon kapasitesi nedeniyle yüzeyin belirli bölgeleri işleme esnasında şekle duyarlı biçimde aşındırılabilmektedir (Vishnoi vd., 2021).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, döküm yöntemi ve eklemeli imalat tekniklerinden EBM yöntemi kullanılarak üretilmiş, her biri 10 × 10 × 10 mm boyutlarında toplam 16 adet Ti6Al4V numunenin tribolojik davranışları sistematik olarak incelenmiştir. Numunelerin yüzey özelliklerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmesi amacıyla; işlemsiz yüzeyler, paralel hat ve çukur (dimple) tekstürlü yüzeyler ile oksitlenmiş yüzeyler hazırlanmıştır. Ayrıca lazer yüzey tekstürleme ve termal oksidasyon işlemlerinin farklı sıralarla birlikte uygulandığı yüzey modifikasyonları da gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler, ilgili standartlara uygun olarak metalografik hazırlık işlemlerine tabi tutulmuş; yüzey modifikasyonları öncesinde başlangıç mikroyapı ve yüzey karakterizasyonları yapılmıştır.

Sürtünme ve aşınma deneyleri 2N sabit yük altında ball-on-disk yöntemi ile gerçekleştirilmiş olup, deneyler sonrasında numunelerin mikroyapıları ve yüzey morfolojileri ayrıntılı olarak karakterize edilerek uygulanan yüzey modifikasyonlarının tribolojik performans üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında izlenen tüm işlem basamakları Şekil 3.1'de şematik olarak sunulmuştur.

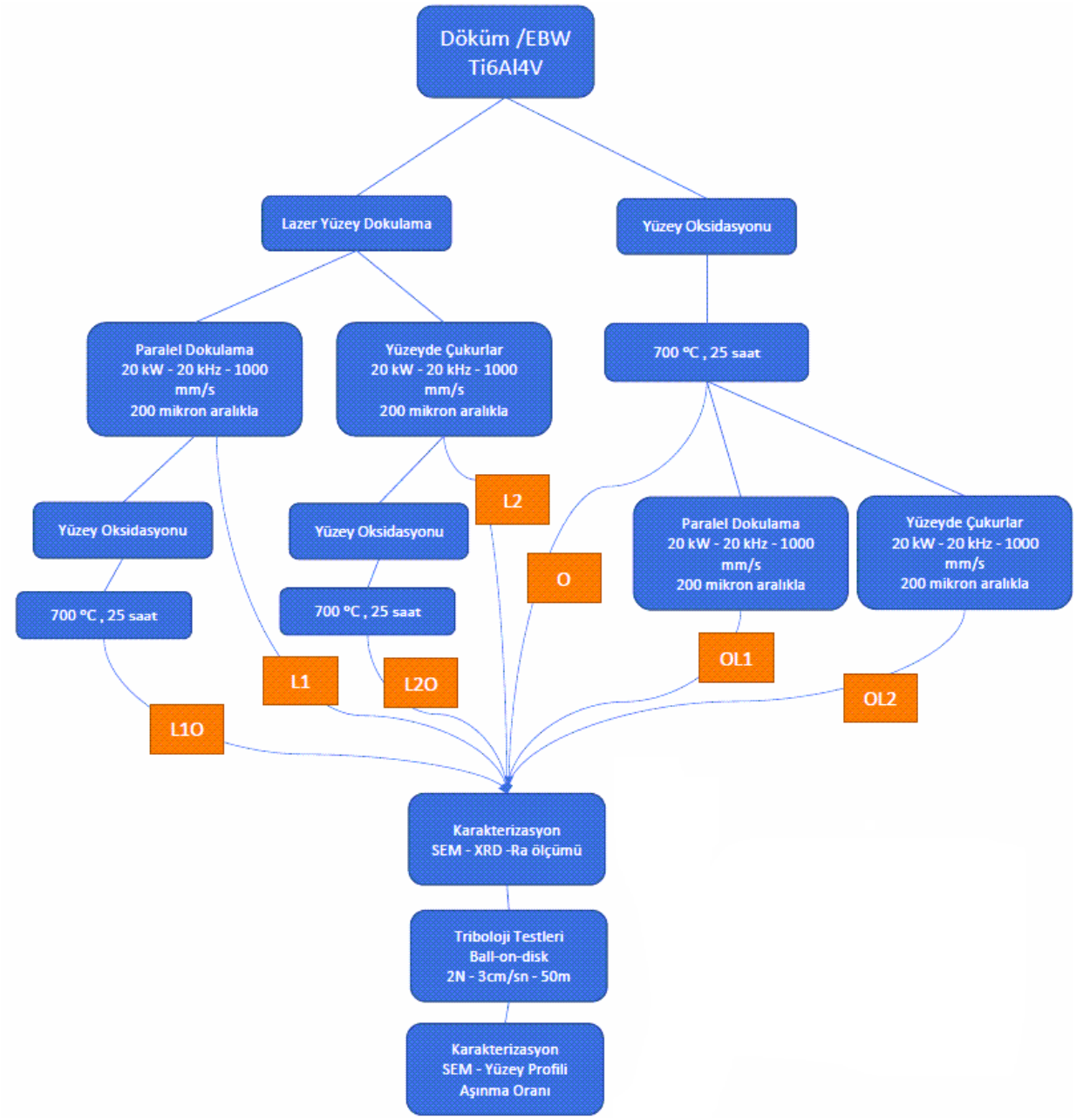
Belirlenen parametrelerin etkilerini ortaya koymak amacıyla uygulanacak deneysel yöntemler ile gerçekleştirilecek ölçümler aşağıda özetlenmiştir.

- Öncelikle, iki farklı üretim yöntemi ile elde edilen tüm numunelerin yüzeyleri, yüzey özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik işlemler öncesinde parlatılarak ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) yaklaşık 0,03 µm seviyelerine düşürülmüştür. Yüzeyine herhangi bir işlem uygulanmamış numuneler, referans numune (**R**) olarak tanımlanmıştır.
- Yüzey modifikasyon işlemleri kapsamında numuneler, lazer yüzey tekstürleme ve yüzey oksidasyonu olmak üzere iki ana gruba ayrılmıştır. Lazer yüzey tekstürleme işlemi ise paralel hat ve çukur desen tekstürleme olmak üzere iki farklı alt grupta uygulanmıştır. Bu doğrultuda numuneler; lazer ile paralel hat oluşturulan (**L1**), lazer ile çukur desen oluşturulan (**L2**) ve yalnızca yüzey oksidasyonuna tabi tutulan (**O**) olarak adlandırılmıştır.

- Ayrıca, farklı yüzey modifikasyonlarının birlikte etkilerini incelemek amacıyla, L1 ve L2 numunelerine ek olarak yüzey oksidasyonu uygulanarak sırasıyla **L1O** ve **L2O** numuneleri elde edilmiştir. Benzer şekilde, yüzey oksidasyonuna tabi tutulan O numunesi üzerine lazer ile paralel hat ve çukur desen oluşturma işlemleri uygulanarak **OL1** ve **OL2** numuneleri hazırlanmıştır.
- Numunelerin mikroyapısal özellikleri, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak detaylı biçimde incelenmiş ve X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi ile faz analizleri gerçekleştirilmiştir. Yüzey morfolojisi, SEM görüntüleri ve iki boyutlu optik profilometre ölçümleri yardımıyla karakterize edilmiş; yüzey pürüzlülük parametresi (Ra) belirlenerek değerlendirilmiştir.
- Tribolojik performans değerlendirmeleri ball-on-disk aşınma test cihazı kullanılarak, belirlenen yük, hız ve aşınma mesafesi koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri sonrasında oluşan yüzey hasarları SEM yardımıyla analiz edilmiştir.
- Son olarak, lazer yüzey tekstürleme işlemleri kapsamında farklı lazer parametre kombinasyonları kullanılarak çeşitli yüzey dokuları oluşturulmuş olan numunelerin mekanik ve tribolojik performans üzerindeki etkileri sistematik bir yaklaşımla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Çizelge 3.1. Farklı üretim yöntemleriyle üretilen Ti6Al4V numuneleri ve yüzey işlemleri.

Numune No	Döküm Yöntemi ile Üretilen Ti6Al4V	Numune No	Eklemeli İmalat ile Üretilen Ti6Al4V
R	İşlemsiz yüzey	**R**	İşlemsiz yüzey
O	Oksitlenmiş yüzey	**O**	Oksitlenmiş yüzey
L1	Paralel hat uygulanmış yüzey	**L1**	Paralel hat uygulanmış yüzey
L2	Çukur desen uygulanmış yüzey	**L2**	Çukur desen uygulanmış yüzey
L1O	Önce paralel hat uygulanmış yüzey, ardından yüzey oksitlenmesi	**L1O**	Önce paralel hat uygulanmış yüzey, ardından yüzey oksitlenmesi
L2O	Önce çukur desen uygulanmış yüzey, ardından yüzey oksitlenmesi	**L2O**	Önce çukur desen uygulanmış yüzey, ardından yüzey oksitlenmesi
OL1	Önce yüzey oksitlenmesi, ardından paralel hat uygulanması	**OL1**	Önce yüzey oksitlenmesi, ardından paralel hat uygulanması
OL2	Önce yüzey oksitlenmesi, ardından çukur desen uygulanması	**OL2**	Önce yüzey oksitlenmesi, ardından çukur desen uygulanması



Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılacak iş akış şeması.

3.1. Kimyasal Bileşim

Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi, alaşımın mekanik, tribolojik ve fiziksel özelliklerini belirleyen temel unsurlardan biridir. Alaşımın ana matrisi titanyumdan oluşmakta olup, alüminyum ve vanadyum başlıca alaşım elementleri olarak yer almaktadır. Alüminyum, alaşımın özgül mukavemetini ve yüksek sıcaklık dayanımını artırırken, vanadyum β-fazını stabilize ederek süneklik ve tokluk özelliklerine katkı sağlamaktadır. Bu

elementlerin birlikte kullanımı, Ti6Al4V alaşımının α+β faz yapısına sahip olmasını mümkün kılmaktadır. Demir, oksijen, karbon, azot ve hidrojen gibi elementler ise safsızlık veya interstisyel elementler olarak düşük oranlarda bulunmakta ve standartlar kapsamında belirli sınır değerlerle kontrol edilmektedir. Özellikle oksijen ve azot gibi interstisyel elementler, malzemenin sertliğini artırırken sünekliğini olumsuz yönde etkileyebildiğinden, miktarlarının dikkatle sınırlandırılması gerekmektedir. Çizelge 3.2'de görüldüğü üzere Ti6Al4V alaşımında titanyum ana matris elementi olup, alüminyum α-fazı stabilize ederken vanadyum β-faz dengeleyici olarak görev yapmaktadır. Düşük oranlarda bulunan Fe, O, C, N ve H gibi elementler ise alaşımın mekanik özelliklerini ve sünekliğini etkileyen kontrol altındaki safsızlıklar olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 3.2. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi (ağırlıkça, %).

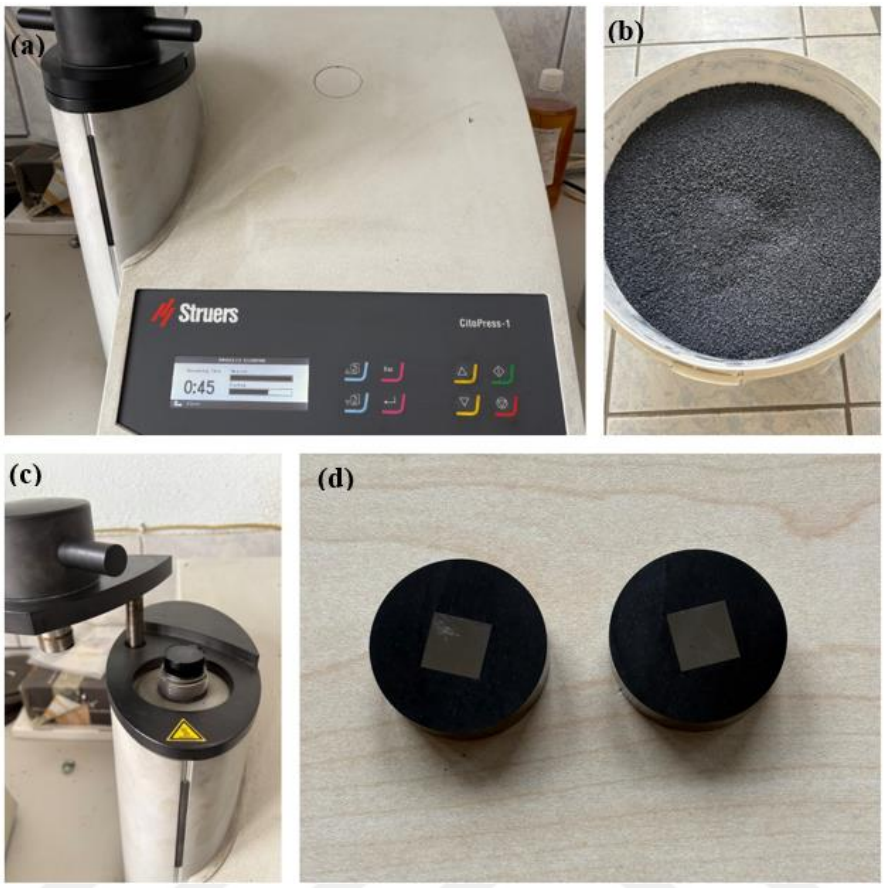
Element	**Ti**	**Al**	**V**	**Fe**	**O**	**C**	**N**	**H**
Ağırlıkça (%)	Kalan	5.5–6.75	3.5–4.5	≤0.30	≤0.20	≤0.08	≤0.05	≤0.015

3.2. Numune Hazırlama

3.2.1. Kalıplama işlemi

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere, Ti6Al4V alaşımından her biri 10×10×10 mm boyutlarında olacak şekilde, 8 adedi döküm yöntemi ile ve 8 adedi katmanlı imalat kapsamında EBM yöntemi ile üretilmiş toplam 16 numune hazırlanmıştır. Numunelerin metalografik hazırlık sürecinde, yüzey incelemelerine uygun ve düzgün bir numune geometrisi elde edebilmek amacıyla tüm numuneler, bakalit tozu kullanılarak Şekil 3.2 (a)'de gösterilen Struers CitoPress-1 sıcak kalıplama cihazında 180℃, 150 bar basınçta 3 dk ısıtma işleminin ardından 2 dk soğutma işlemi yapılarak kalıplanmıştır.

Bu cihaz sayesinde metalografik numune hazırlama sürecinde sıcaklık, basınç ve süre parametreleri hassas bir şekilde kontrol edilmiş, numunelerin kenar bütünlüğü korunarak mekanik hazırlık aşamalarında oluşabilecek deformasyonlar en aza indirilmiş ve böylece mikroyapı incelemeleri ile sertlik ölçümleri için tekrarlanabilir, güvenilir ve homojen numune hazırlığı sağlanmıştır.



Şekil 3.2. (a) Struers CitoPress-1 sıcak kalıplama cihazı, (b) Bakalit tozu, (c) Numunenin kalıplanması, (d) Kalıplanmış numuneler.

3.2.2. Numuneleri zımparalama ve parlatma

Numunelerin zımparalama ve parlatma işlemleri, metalografik incelemeye uygun düzgün ve hasarsız yüzeyler elde edebilmek amacıyla Struers TegraForce-5 otomatik zımparalama-parlatma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihazın kontrollü hız, basınç ve süre ayarları sayesinde yüzey hazırlık işlemleri tekrarlanabilir koşullarda yapılmış ve mikroyapı incelemeleri ile sertlik ölçümleri için uygun yüzey kalitesi sağlanmıştır.

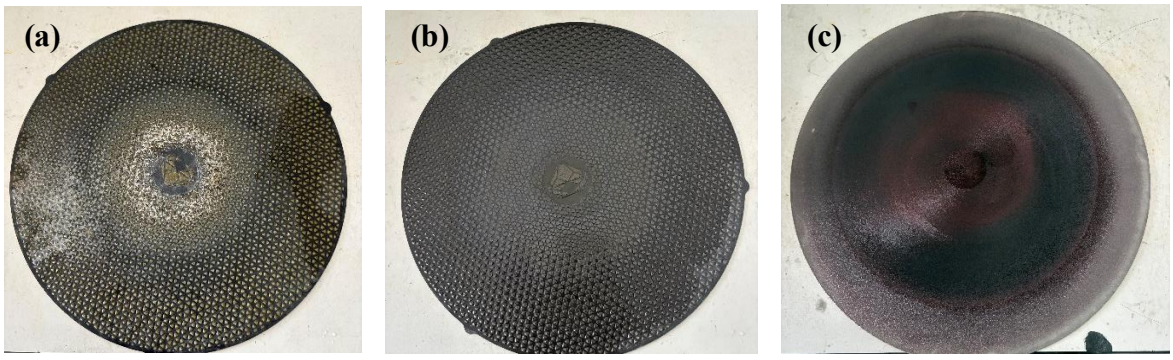
Kalıplama işlemi sonrasında elde edilen numuneler, zımparalama ve parlatma aşamalarında eşit basınç altında ve kontrollü bir şekilde hazırlanabilmeleri amacıyla, Şekil 3.3 (a)' da gösterilen Struers UniForce manuel numune tutucu sistemi kullanılarak altılı gruplar hâlinde yerleştirilmiştir. Daha sonra, Şekil 3.3 (b)'te gösterildiği üzere, zımparalama işlemine 120 numara zımpara kâğıdı ile başlanmış; parlatma tablası 150 RPM hızda ayarlanarak, zımpara diski ile numunelerin birbirine zıt dönüş yönünde, 100 N baskı kuvveti

altında 6 dakika süreyle kaba zımparalama gerçekleştirilmiştir. Ardından, yüzey kalitesinin artırılması amacıyla 1200 numara zımpara kâğıdı kullanılarak, aynı işlem parametreleri altında 6 dakika süreyle ince zımparalama işlemi uygulanmıştır.



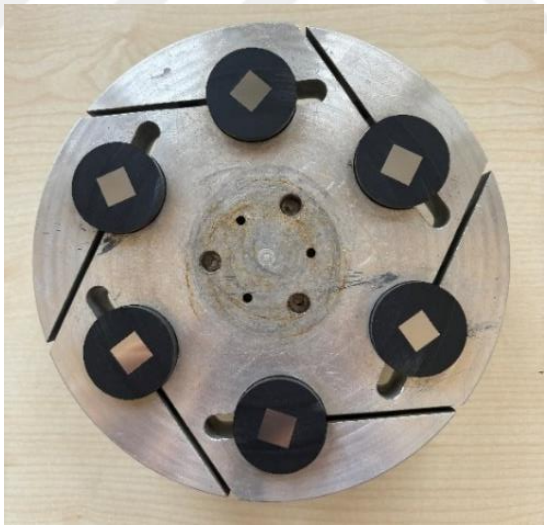
Şekil 3.3. (a) Struers UniForce manuel numune tutucu sistemi, (b) Struers TegraForce-5 zımparalama ve parlatma cihazı.

Zımparalama aşamalarının tamamlanmasının ardından, Şekil 3.4 (c)'te gösterildiği üzere, Struers marka çuha (parlatma bezi) kullanılarak parlatma işlemine geçilmiş; bu aşamada yüzey elmas tozu içeren su ile sürekli olarak ıslatılmış ve 30N uygulanan kuvvet altında 1 dakika süreyle parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ince parlatma işlemi, yüzeydeki mikroskobik çiziklerin giderilmesi ve mikroyapı incelemelerine uygun düzgün ve homojen bir yüzey elde edilmesi amacıyla, 1 µm tane boyutuna sahip CT DiaTwin Max Mono elmas süspansiyonu kullanılarak tamamlanmıştır.



Şekil 3.4. (a) P120 zımpara kâğıdı, (b) P1200 zımpara kâğıdı, (c) Struers marka, 250 mm çaplı zımparalama–parlatma tablası.

Şekil 3.5'te yapılan zımparalama ve parlatma işlemleri sonrasında numunelerin yüzeylerinin homojen, düzgün ve çiziksiz bir görünüm kazandığı gözlemlenmiştir. Numuneler arasında belirgin bir yüzey farklılığının bulunmaması, uygulanan mekanik hazırlık parametrelerinin tekrarlanabilir ve kontrollü olduğunu göstermekte olup, elde edilen yüzey kalitesi mikroyapı incelemeleri öncesinde yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla numuneler ölçüm cihazında incelenmeye başlanmıştır.



Şekil 3.5. Mekanik yüzey hazırlığı tamamlanan numunelerin parlatma sonrası görünümü.

3.2.3. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

Numunelerin yüzeyleri, ölçüm öncesinde saf etil alkol ile temizlenmiş ve ardından Şekil 3.6'da gösterilen yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Mitutoyo Surf Test SJ-400 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.

Yapılan ölçümler sonucunda numunelerin Ra yüzey pürüzlülüğü değerlerinin 0,02–0,05 µm aralığında olduğu belirlenmiştir. Belirlenen hedef pürüzlülük değerlerine ulaşıldığı tespit edilen numuneler, sonraki deneysel aşamalarda kullanılmak üzere kalıplarından çıkarılmıştır. Kalıplarından çıkarılan 16 adet numunenin bir kısmı lazer yüzey tekstürleme işlemi, bir kısmı oksitleme işlemi ve bir kısmı ise her iki işlemin birlikte uygulanması amacıyla bir sonraki deneysel aşamaya alınmıştır. İlerleyen aşamalarda, aşınma testlerinin tamamlanmasının ardından her bir numune için sürtünme katsayıları kaydedilip, aşınmış yüzeylerin kesit alanları hesaplanarak buna bağlı olarak aşınma oranları belirlenmiştir.

3.2.4. Lazer teskstürleme işlemleri

Yüzey modifikasyon yöntemlerinden biri olan lazer tekstürleme işlemi için, 50W çıkış gücü, 200 ns darbe süresi ve 20 kHz frekans değerine sahip bir fiber sistemi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar Şekil 3.7' de gösterilen FiberJet markalı fiber lazer markalama cihazı ile 20 W lazer gücü ve 1000 mm/s tarama hızı ile gerçekleştirilmiştir. Toplam yüzey alanı 10 × 10 mm olan numunelerin 8 × 8 mm'lik bölgesi lazer ile tekstürlenmiştir. Tekstürleme işlemi, birbirine paralel doğrultuda ve 200 µm hat aralığı ile uygulanmıştır.



Şekil 3.7. FiberJet markalı fiber lazer markalama cihazı.

3.2.5. Oksitleme işlemi

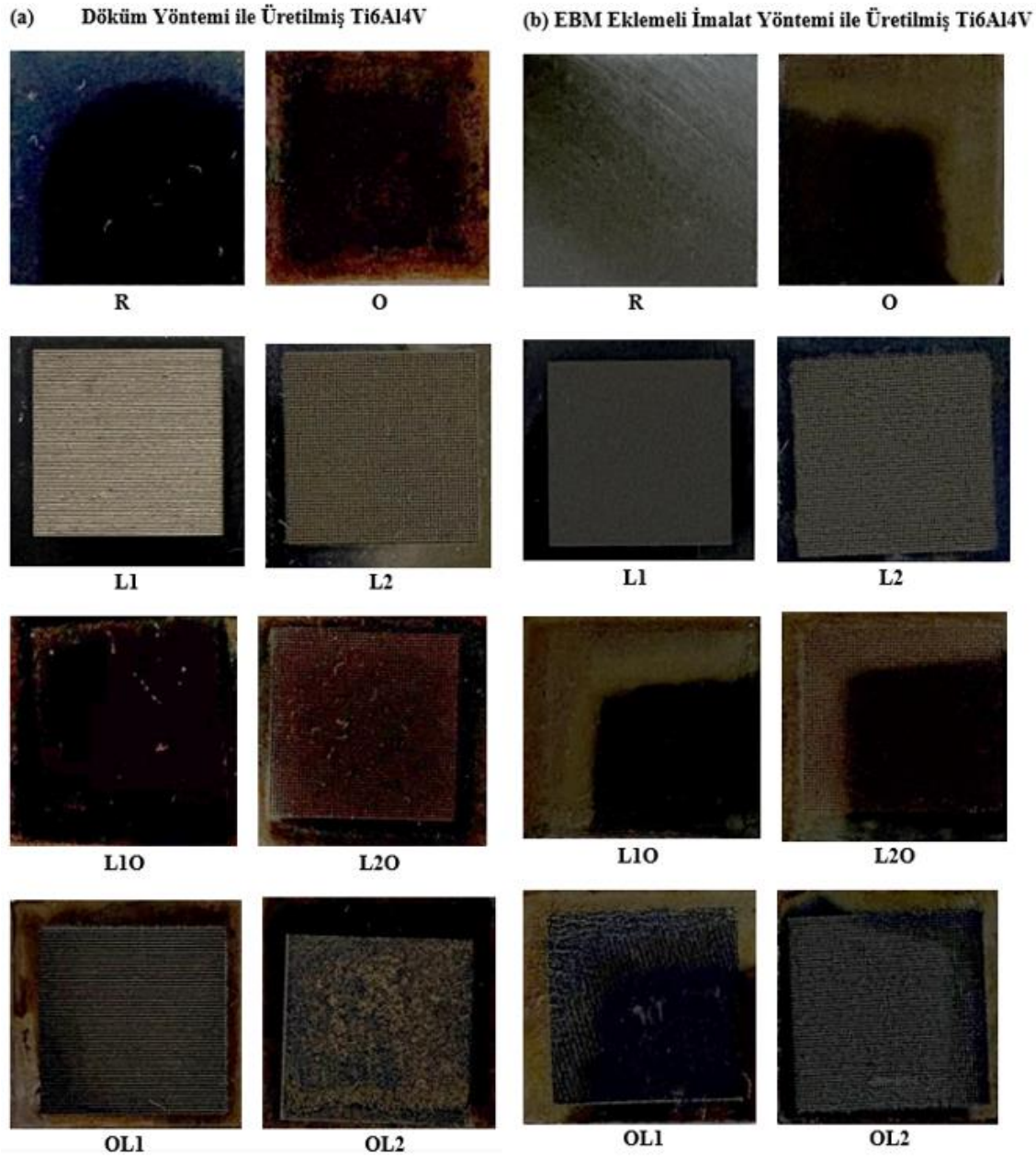
Yüzeyde kontrollü oksidasyon oluşturmak amacıyla, açık atmosfer koşullarında çalışan Protherm marka ısıl işlem fırını kullanılarak termal oksidasyon prosesleri gerçekleştirilmiştir. Literatürde, titanyum esaslı malzemelerin 800 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda termal oksidasyona tabi tutulması durumunda oksit tabakasında ciddi deformasyonlar ve yapısal bozulmalar meydana geldiği rapor edilmiştir (Ayday, 2020). Bu nedenle, yüksek sıcaklıklarda oluşabilecek düzensiz ve çatlaklı oksit tabakalarının önüne geçmek amacıyla, bu çalışmada oksidasyon sıcaklığı literatürde kritik eşik olarak belirtilen değerin altında seçilmiştir. Bu doğrultuda, söz konusu olumsuz etkilerden kaçınarak daha kontrollü ve kararlı bir oksit tabakası elde etmek amacıyla numuneler, Şekil 3.7'de gösterilen Protherm marka fırında 700 °C sıcaklıkta ve 25 saat süreyle oksidasyon işlemine tabi tutulmuştur. Uygulanan ısıl işlem sonucunda numune yüzeylerinde homojen ve kontrollü bir oksit tabakası oluşturulmuştur. Böylece lazer yüzey tekstürleme ve diğer yüzey modifikasyon yöntemleri ile oksit tabakası arasındaki etkileşimin incelenmesine uygun bir yüzey yapısı elde edilmiştir.



Şekil 3.8. Oksitleme işlemi sırasında protherm marka laboratuvar fırınının görünümü.

Yüzey modifikasyonu ve oksidasyon işleminin tamamlanmasının ardından numuneler, uygulanan işlem türlerine göre sınıflandırılmıştır. Bu kapsamda, lazer yüzey tekstürleme ve yüzey oksidasyonu olmak üzere iki temel modifikasyon yaklaşımı esas alınmıştır. Lazer yüzey tekstürleme işlemleri, paralel hat tekstürleme ve çukur desen tekstürleme şeklinde iki farklı geometri ile gerçekleştirilmiştir.

Buna bağlı olarak lazerle paralel hat tekstürleme uygulanmış numuneler (L1), lazerle çukur desen oluşturulmuş numuneler (L2) ve yalnızca termal oksidasyona tabi tutulmuş numuneler (O) olarak tanımlanmıştır. Bunun yanı sıra, yüzey modifikasyonlarının birlikte etkilerini değerlendirebilmek amacıyla lazerle tekstürleme işlemi yapılan L1 ve L2 numunelerine ilave olarak yüzey oksidasyonu uygulanarak (L1O) ve (L2O) numuneleri elde edilmiştir. Benzer şekilde, önceden oksitlenen O numuneleri üzerine lazerle paralel hat tekstürleme ve çukur desen oluşturma işlemleri uygulanarak sırasıyla (OL1) ve (OL2) numuneleri hazırlanmıştır. Bu numunelere ait görseller Şekil 3.8'de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

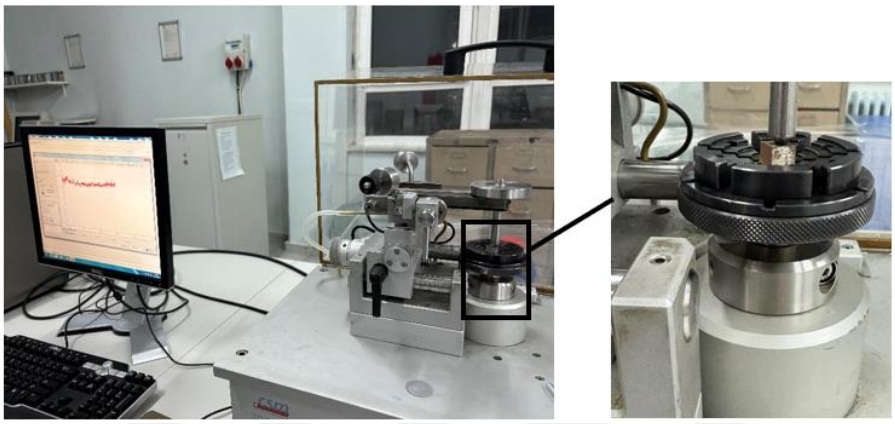


Şekil 3.9. Döküm yöntemi ve EBM eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş Ti6Al4V numunelerine ait görseller.

3.2.6. Aşınma cihazı

Numunelerin aşınma davranışları, ASTM G99 standardına uygun küre-disk geometrisinde çalışan CSM Tribometer cihazı kullanılarak incelenmiş olup, deney düzeneği Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Deneylerde aşındırıcı eleman olarak 3 mm çapında 100Cr6 küreler tercih edilmiştir. Testler, 20°C sıcaklıkta ve %25 bağıl nem koşullarında, atmosferik ortamda gerçekleştirilmiştir.

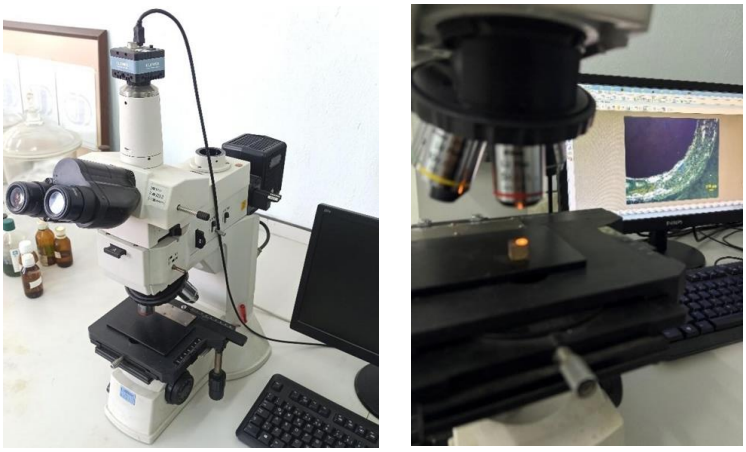
Deney süresince sürtünme kuvveti ve normal yük eş zamanlı olarak ölçülmüş; bu verilerden her bir numune için sürtünme katsayısı değeri ve aşınma mesafesi sürekli olarak kaydedilmiştir. Deney parametreleri 1,5 mm yarıçap, 3 cm/s çevresel hız, 2N normal yük ve toplam 50 m aşınma mesafesi olacak şekilde sabit tutulmuştur. Deneyler sonucunda oluşan aşınma izleri profilometre yardımıyla ölçülmüş ve elde edilen veriler değerlendirilerek numunelerin aşınma performansı analiz edilmiştir.



Şekil 3.10. Aşınma deney cihazı (CSM Instruments-Tribometer).

3.2.7. Mikroyapı karakterizasyonu

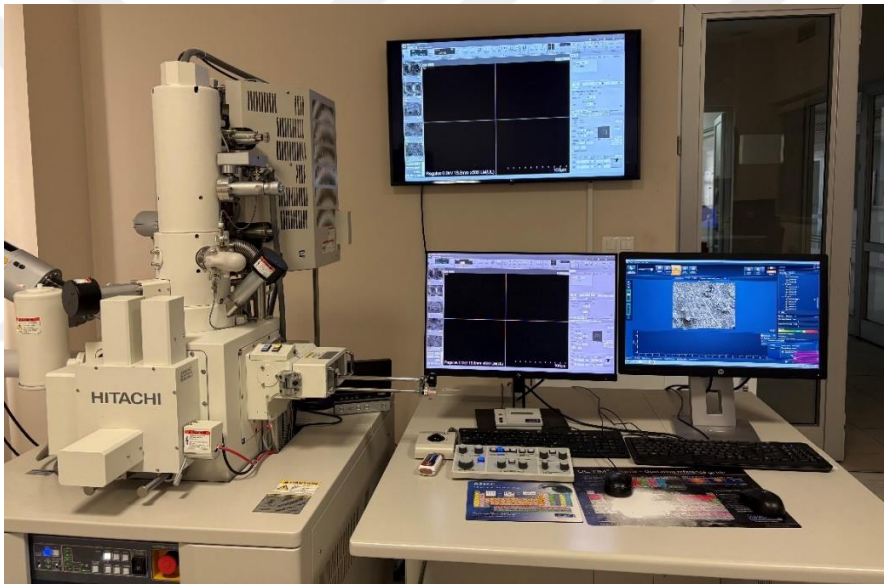
Aşınma testlerinin ardından numuneler, Şekil 3.10'da gösterilen Nikon Eclipse L150 optik mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Bu incelemelerde, numunelerin mikroyapı özelliklerini değerlendirmek amacıyla farklı büyütme oranlarında görüntüler elde edilmiştir.



Şekil 3.11. Nikon Eclipse L150 optik mikroskobu ve aşınma testi sonrası numunenin incelenmesi.

3.2.8. Taramalı elektron mikroskobu

Optik mikroyapı incelemelerinin ardından numuneler, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı ve Uygulama Merkezi bünyesinde bulunan Hitachi Regulus 8230 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak, Şekil 3.11'de gösterildiği üzere ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Bu cihaz aracılığıyla numunelerin yüksek büyütmeli mikroyapı görüntüleri elde edilerek detaylı morfolojik bilgiler sağlanmıştır. Özellikle 500× büyütme oranında mikroyapının karakteristik özellikleri incelenmiş; buna ek olarak enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılarak elementel analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.12. Hitachi Markasının Regulus 8230 taramalı elektron mikroskobu.

3.2.9. XRD cihazı

Numunelerde oluşan faz yapılarının belirlenmesi amacıyla Şekil 3.12'de XRD analizleri yapılmıştır. Bu deneyler, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Panalytical Empyrean marka cihaz kullanılarak, monokromatize X-ışını kırınım düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri, λ = 1,54060 Å dalga boyuna sahip Cu Kα radyasyon kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, ölçümler 20°–80° 2θ aralığında, 0,02° adım aralığı ile yürütülmüştür.



Şekil 3.13. Panalytical Empyrean marka XRD cihazı.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular, ilgili başlıklar altında ayrıntılı olarak sunulmuş ve değerlendirilmiştir.

4.1. Mikroyapısal İncelemeler

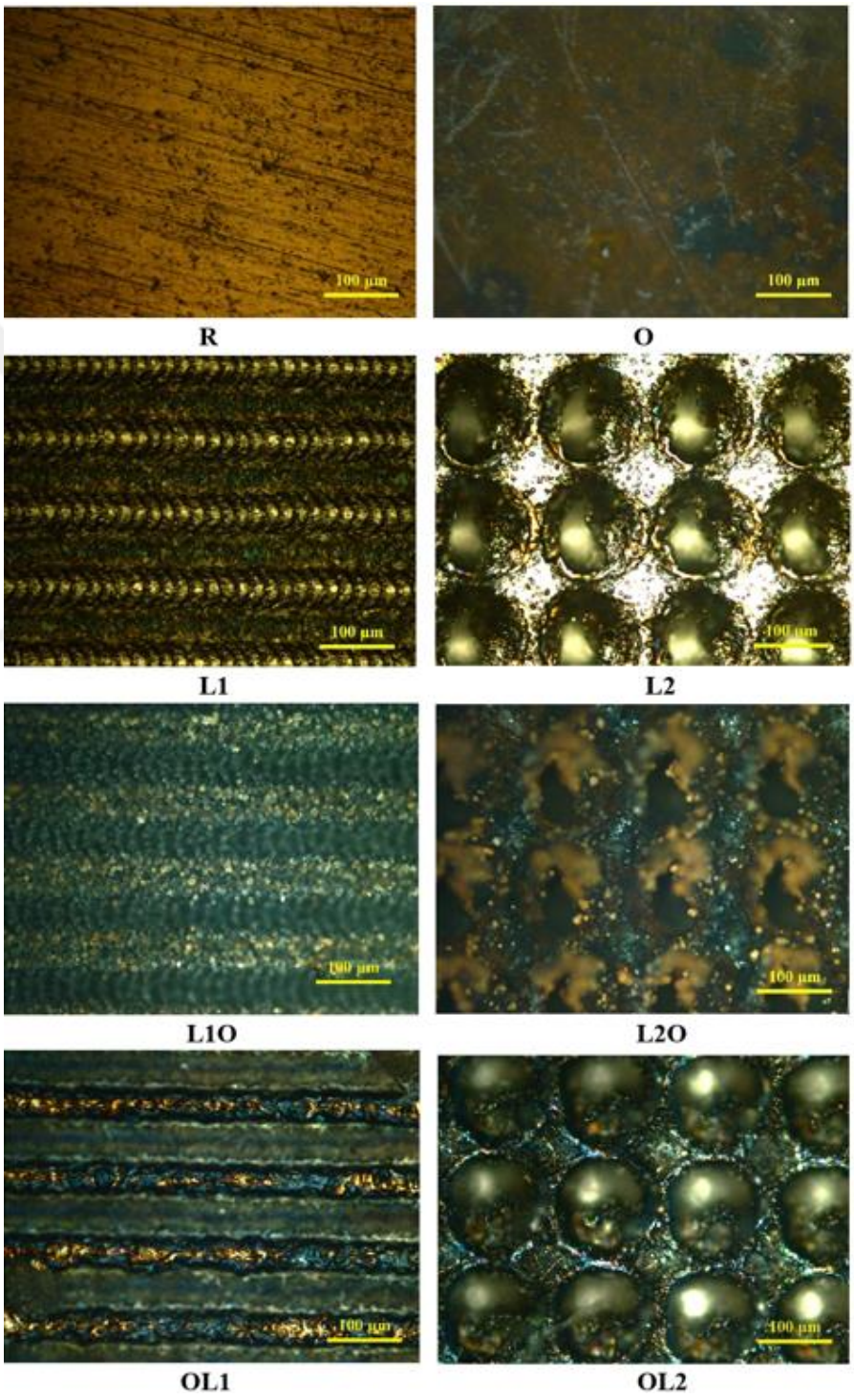
Optik mikroyapı incelemeleri, uygulanan farklı yüzey modifikasyonlarının Ti6Al4V numunelerin yüzey morfolojisi üzerindeki etkilerini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Şekil 4.1' de görüldüğü üzere döküm yöntemi ile üretilmiş Ti6Al4V numunelerinden; işlem görmemiş olan R numunesi yüzeyinde, metalografik hazırlık ve aşınma sonrası oluşan doğrusal çiziklerin hâkim olduğu, nispeten düzgün ve yönlü bir yüzey yapısı gözlenmiştir. Termal oksidasyona tabi tutulan O numunesinde ise yüzey rengindeki koyulaşma ve homojen olmayan kontrast dağılımı, yüzeyde süreklilik gösteren bir oksit tabakasının oluştuğuna işaret etmekte olup, bu durumda yüzey pürüzlülüğünde artış meydana geldiği düşünülmektedir. Bu oksit tabakasının, aşınma sırasında yüzeyin yük taşıma kapasitesini artırarak farklı bir temas mekanizması oluşturabileceği değerlendirilmektedir. Benzer nitelikteki bir çalışmada, Grade 2 titanyumun 700 °C sıcaklıkta 72 saat termal oksidasyona tabi tutulması sonucunda oluşan oksit tabakasının kalınlığında belirgin bir artış meydana geldiği ve buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün yükseldiği rapor edilmiştir. Söz konusu çalışmada, gözlenen pürüzlülük artışının, oksit tabakasının büyümesi ve gelişimi sırasında yüzey morfolojisinde meydana gelen değişimlerden kaynaklandığı ifade edilmiştir (Aniołek, 2017).

Lazer ile paralel hat tekstürleme uygulanan L1 numunesinde, yüzey boyunca düzenli ve yönlü kanalların oluştuğu açıkça görülmekte; bu yapıların temas sırasında aşınma partiküllerinin yüzeyden uzaklaştırılmasına ve sürtünme davranışının yönlenmesine katkı sağlayabileceği öngörülmektedir. Lazerle oluşturulan paralel hat tekstürlerinin tribolojik performans üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışmada, yüzey boyunca oluşturulan düzenli ve yönlü olukların temas sırasında meydana gelen aşınma partiküllerinin yüzeyden uzaklaştırılmasına katkı sağladığı bildirilmiştir. Araştırmacılar ayrıca, bu yapıların sürtünme davranışının yönlenmesine olanak tanıdığını ve sürtünme katsayısında %68'e varan azalma

sağladığını rapor etmiştir (García-Fernández vd., 2025). Çukur tekstürleme uygulanan L2 numunesinde ise periyodik ve homojen şekilde dağılmış çukurların varlığı dikkat çekmekte olup, bu yapıların temas bölgesinde artıkların hapsolmasını sağlayarak üçüncü cisim aşınmasını azaltma potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir. Lazerle mikro çukur tekstürleme uygulamalarını ele alan bir çalışmada ise, yüzeyde periyodik ve homojen şekilde dağıtılmış çukurların temas bölgesinde aşınma artıklarının hapsolmasını sağlayarak üçüncü cisim aşınmasını azaltma potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir. Çalışmada buna ek olarak, bu tür tekstürlerin özellikle yağlama koşullarında sürtünme katsayısını düşürerek tribolojik performansı iyileştirdiği ifade edilmiştir (Zhan vd., 2013). Lazer tekstürleme sonrasında termal oksidasyon uygulanan L1O ve L2O numunelerinde, lazerle oluşturulan geometrilerin oksit tabakası ile daha karmaşık bir yüzey topografisine dönüştüğü görülmektedir. Oksit tabakasının, lazer kanalları ve çukurlar içerisinde birikmesi, yüzeyin efektif pürüzlülüğünü artırmakla birlikte, oksit filminin mekanik olarak daha iyi tutunmasına katkı sağlamış olabilir. Bu durumun, aşınma direncini olumlu yönde etkileyebileceği değerlendirilmektedir. Benzer parametrelerin ele alındığı bir çalışmada, lazerle oluşturulan yüzey geometrilerinin termal oksidasyon sırasında gelişen oksit tabakası ile etkileşime girerek daha karmaşık bir yüzey topografyasına dönüştüğü rapor edilmiştir. Araştırmacılar, bu kombinasyonun yüzey morfolojisinde belirgin değişikliklere yol açtığını ve bunun tribolojik davranışı etkileyebileceğini belirtmiştir (İnce vd., 2025).

Buna karşılık, oksidasyon işlemi sonrasında lazer tekstürleme uygulanan OL1 ve OL2 numunelerinde, lazerin mevcut oksit tabakasını yer yer yeniden şekillendirdiği ve yüzeyde heterojen bir morfoloji oluşturduğu gözlenmiştir. Bu durum, oksit tabakasının sürekliliğinin kısmen bozulmasına ve tribolojik davranışta farklılıklar ortaya çıkmasına neden olabilecek bir etken olarak değerlendirilmektedir. Benzer şekilde, Chang vd. (2018) TiV alaşımı üzerine uygulanan lazer tekstürleme ve yüksek sıcaklıkta oksidasyon işlemlerinin sıralamasının yüzey morfolojisi ve tribolojik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmada, lazer tekstürleme sonrası uygulanan oksidasyon işleminin yüzeyde daha homojen bir oksit tabakası oluşturduğu, ancak oksidasyon sonrası uygulanan lazer işleminin mevcut oksit tabakasını bozarak yüzeyde heterojen bir yapı oluşturduğu ve bu durumun tribolojik performansı olumsuz etkilediği belirtilmiştir.

Genel olarak elde edilen optik mikroyapı bulguları, yüzey modifikasyon türü kadar uygulama sırasının da yüzey morfolojisi üzerinde belirleyici olduğunu ve bu morfolojik farklılıkların sürtünme ve aşınma davranışları üzerinde doğrudan etkili olabileceğini göstermektedir.



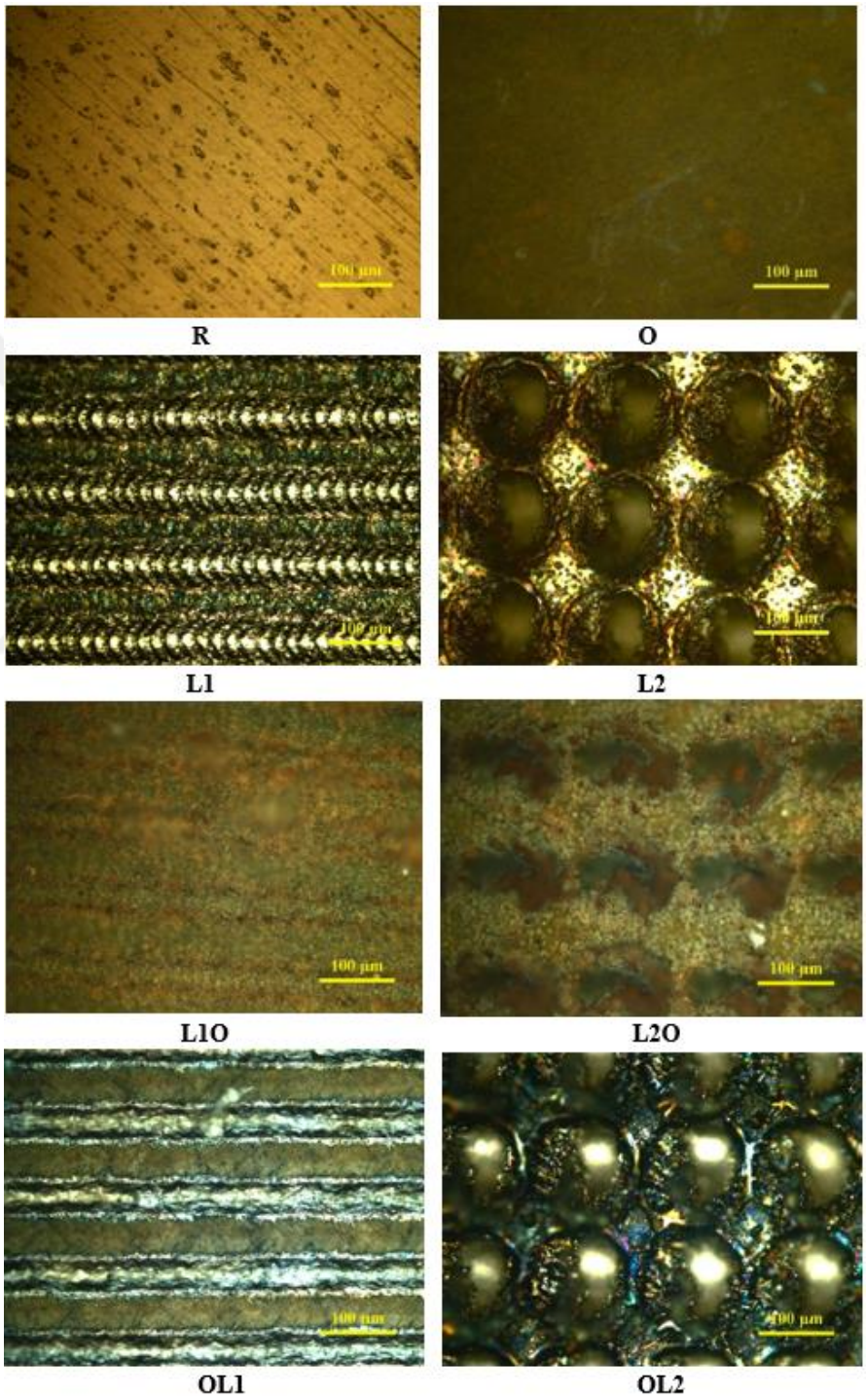
Şekil 4.1. Döküm yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımlarının 200x büyüklükte mikroskop görüntüleri.

Şekil 4.2' de ise, EBM yöntemi ile üretilmiş Ti6Al4V numunelere uygulanan yüzey modifikasyonlarının yüzey morfolojisi üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Referans numune (R) yüzeyinde gözlenen tabakalı imalat izleri ve düzensiz topografi, EBM üretim sürecinin doğal bir sonucu olup, temas sırasında gerçek temas alanının homojen dağılmamasına ve yerel gerilme yoğunlaşmalarına yol açabilecek bir yapı sergilemektedir. Bu durumun aşınma eğiliminin artmasına neden olabileceği değerlendirilmektedir. Yalnızca termal oksidasyona tabi tutulan O numunesinde, oksit tabakasının yüzeyi daha bütüncül bir hale getirdiği ve EBM'ye özgü yüzey düzensizliklerini kısmen maskelediği görülmektedir. Bu yapı, yüzey sertliğinin artmasıyla birlikte temas koşullarının daha dengeli hale gelmesine katkı sağlayabilir. Bununla birlikte, oksit tabakasının alttaki tabakalı yapıdan etkilenerek yer yer homojenliğini kaybetmesi, yüksek yükler altında oksit filminin lokal olarak hasar görme riskini de beraberinde getirmektedir.

Lazer ile paralel hat tekstürleme uygulanan L1 ve çukur desen tekstürleme uygulanan L2 numunelerinde, lazer işleminin EBM kaynaklı yüzey düzensizliklerini büyük ölçüde yeniden düzenlediği ve daha kontrollü bir yüzey topografisi oluşturduğu açıkça görülmektedir. Bu bağlamda lazer tekstürleme, EBM üretimli yüzeylerde yalnızca sürtünme ve aşınmayı iyileştirmeye yönelik bir yöntem değil, aynı zamanda yüzey homojenliğini artıran etkili bir modifikasyon olarak değerlendirilebilir. Özellikle L2 numunesinde gözlenen düzenli çukur yapılarının, aşınma sırasında oluşan artıkların hapsedilmesine olanak sağlayarak üçüncü cisim aşınmasını sınırlandırabileceği ve sürtünme katsayısını düşürücü bir rol oynayabileceği öngörülmektedir. Lazer tekstürleme sonrasında termal oksidasyon uygulanan L1O ve L2O numunelerinde, oksit tabakasının lazerle oluşturulan kanallar ve çukurlar içerisinde birikmesi, oksit filminin yüzeye daha iyi tutunmasına katkı sağlamaktadır. Bu durumun, özellikle EBM üretimli yüzeylerde oksit tabakasının soyulma ve kopma eğilimini azaltarak aşınma direncini artırabileceği düşünülmektedir.

Buna karşılık, oksidasyon işlemi sonrasında lazer tekstürleme uygulanan OL1 ve OL2 numunelerinde, lazerin oksit tabakasını yer yer kaldırarak daha keskin ve belirgin geometriler oluşturduğu gözlenmiştir. Bu durum, yüzey geometrisinin netleşmesini sağlarken, oksit tabakasının sürekliliğinin bozulmasına bağlı olarak farklı aşınma mekanizmalarının devreye girmesine zemin hazırlayabilir. Genel olarak, EBM yöntemiyle üretilmiş Ti6Al4V numunelerde başlangıç yüzey morfolojisinin, uygulanan yüzey

modifikasyonlarının etkinliğini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Optik mikroyapı bulguları, lazer yüzey tekstürlemenin tribolojik performansı iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu ve uygun bir termal oksidasyon işlem sırası ile birlikte daha dengeli ve kararlı bir yüzey davranışı elde edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.2. EBM eklemeli imalat yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımlarının 200x büyüklükte mikroskop görüntüleri.

4.2. Triboloji Deney İncelemeleri

Bu bölümde, çalışmada üretilen ve farklı yüzey modifikasyonlarına tabi tutulan numunelerin tribolojik davranışları detaylı olarak incelenmiştir. Tribolojik performans; sürtünme katsayısı ve aşınma özellikleri temel alınarak değerlendirilmiş, elde edilen sonuçlar yüzey işlem türü ve uygulanma sırasının etkileri dikkate alınarak karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen triboloji deneyleri sonucunda elde edilen veriler; sürtünme katsayısının mesafeye bağlı değişimi, aşınma alanı ve özgül aşınma oranı gibi parametreler üzerinden yorumlanmıştır.

4.2.1. Aşınma analizleri

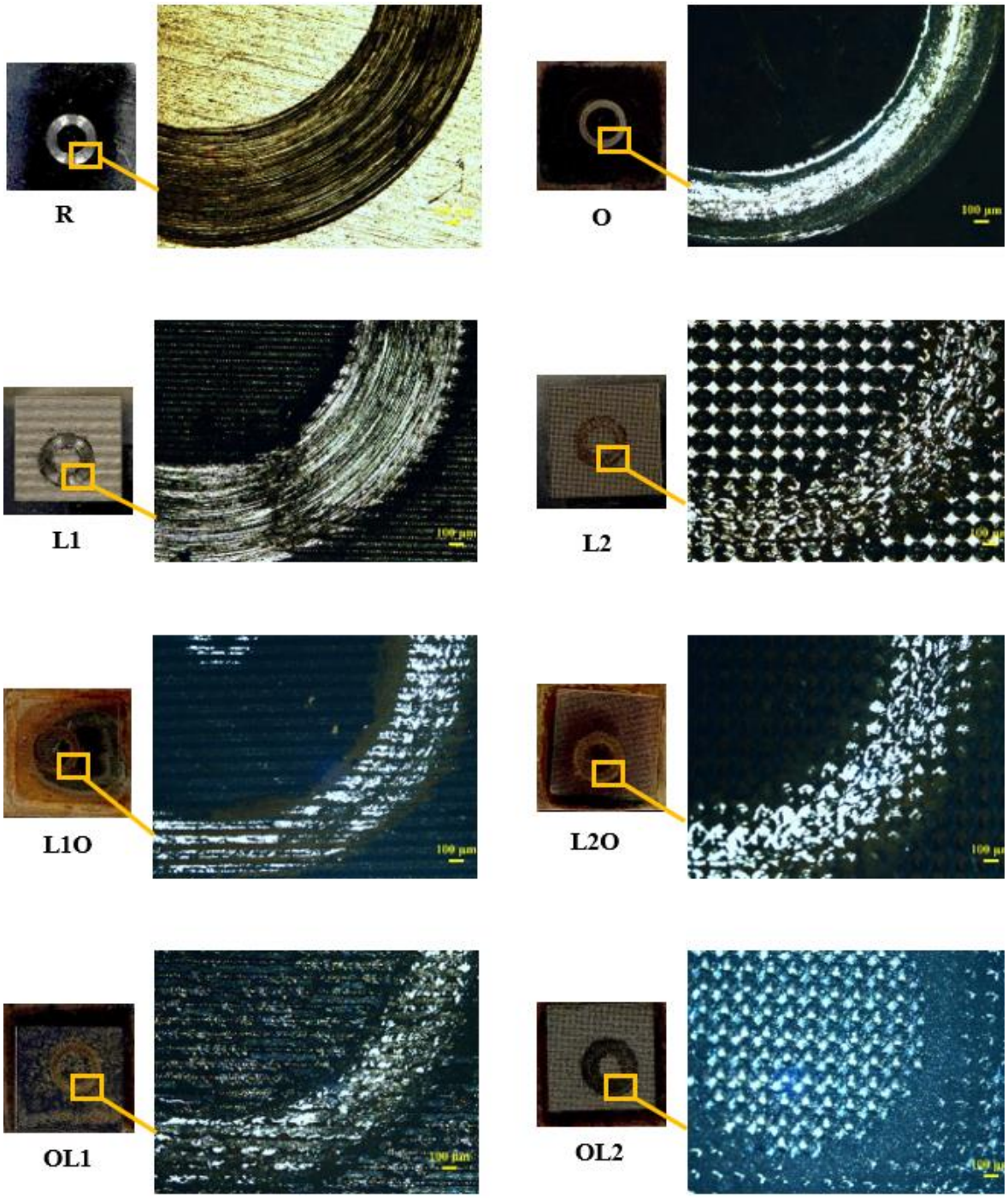
Döküm yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımı numunelerin aşınma testi sonrasında elde edilen mikroskobik görüntüler Şekil 4.3'te sunulmaktadır. Görüntüler incelendiğinde, uygulanan yüzey modifikasyon yöntemlerinin aşınma mekanizmaları ve aşınma izlerinin morfolojisi üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu görülmektedir. Referans numune (R) için elde edilen aşınma izi, kayma yönüne paralel belirgin oluklar ve plastik deformasyon izleri içermektedir. Bu durum, döküm Ti6Al4V alaşımında baskın aşınma mekanizmasının adezif ve abrasif aşınmanın birlikte gerçekleştiğini göstermektedir. Aşınma izinin genişliği ve sürekliliği, yüzeyin karşıt malzemeye karşı sınırlı direnç sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu duruma benzer bir çalışmada, Ti6Al4V alaşımı ile Si_3N_4 seramik bilye arasındaki temas ve aşınma davranışı incelenmiş; Ti6Al4V alaşımının plastik deformasyona ve adezyona yatkın olduğu, yüzeyde belirgin oluklar ve plastik deformasyon izlerinin oluştuğu rapor edilmiştir. Elde edilen bulgular, adezif aşınmanın plastik deformasyon ile kolaylaştığını ve aşınma sürecinin ilerlemesine katkıda bulunduğunu göstermektedir (Chen vd., 2021).

Yalnızca yüzey oksidasyonuna tabi tutulan O numunesinde, aşınma izinin daha homojen bir yapıya sahip olduğu ve iz derinliğinin referans numuneye kıyasla azaldığı gözlemlenmiştir. Oksit tabakanın yüzey sertliğini artırmasıyla birlikte, temas sırasında oluşan plastik deformasyonun sınırlandığı ve aşınma direncinin iyileştiği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, yer yer oksit tabakanın koparak aşınma bölgesinde birikinti oluşturduğu da dikkat çekmektedir. Wang vd. (2025) tarafından yapılan bir çalışmada, Ti6Al4V alaşımına uygulanan termal oksidasyon işlemi sonucunda oluşan oksit

tabakasının yüzey sertliğini artırdığı ve plastik deformasyonu sınırladığı gözlemlenmiştir. Ancak, aşınma sırasında oksit tabakasının yer yer koparak aşınma bölgesinde birikinti oluşturduğu ve bu durumun tribolojik performansı etkileyebileceği belirtilmiştir.

Lazer ile paralel hat tekstürleme uygulanan L1 numunesinde, aşınma izlerinin tekstürleme yönü boyunca yönlendiği ve aşınma hattının belirli bölgelerde daraldığı görülmektedir. Paralel hat yüzey dokularının, aşınma sırasında oluşan artıkların uzaklaştırılmasına katkı sağladığı ve gerçek temas alanını azalttığı düşünülmektedir. Ancak dokular arası bölgelerde lokal deformasyon izleri de tespit edilmiştir. Çukur desen tekstürleme uygulanan L2 numunesinde ise aşınma izinin daha düzensiz bir dağılım gösterdiği ve çukur yapıların aşınma artıklarını tutarak üçüncü cisim aşınmasını sınırladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, L2 numunesinde aşınma mekanizmasının daha kontrollü ilerlediğini ve aşınma izinin kesintili bir morfoloji sergilediğini ortaya koymaktadır. Birleşik yüzey modifikasyonlarının uygulandığı L1O ve L2O numunelerinde, aşınma izlerinin belirgin şekilde azaldığı ve yüzey hasarının daha sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle L2O numunesinde, oksit tabaka ile çukur desen dokuların birlikte etkisi sayesinde aşınma izinin daha sığ ve süreksiz olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, oksit tabakanın sağladığı sertlik artışı ile lazer dokuların yük taşıma ve artık tutma kabiliyetinin sinerjik bir etki oluşturduğunu göstermektedir.

Benzer şekilde, oksitlenmiş yüzey üzerine lazer tekstürleme uygulanan OL1 ve OL2 numunelerinde, aşınma izlerinin düzenli ve homojen bir dağılım sergilediği görülmektedir. Özellikle OL2 numunesinde, çukur dokuların aşınma sırasında yüzey hasarını lokalize ettiği ve aşınma izinin çevresel olarak sınırlandığı tespit edilmiştir. Bu durum, tribolojik performans açısından en avantajlı yüzey yapılarından birinin OL2 numunesi olduğunu göstermektedir. Genel değerlendirme kapsamında, döküm yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımına uygulanan farklı yüzey modifikasyonlarının aşınma davranışını belirgin biçimde etkilediği gözlemlenmiştir. Lazer yüzey tekstürleme ve yüzey oksidasyon işlemlerinin birlikte uygulanması, tekil yüzey işlemlerine kıyasla daha sınırlı aşınma izleri oluşmasına neden olmuş ve yüzey bütünlüğünün korunmasına katkı sağlamıştır. Elde edilen bulgular, yüzey geometrisinin ve yüzeyde oluşan kimyasal tabakaların tribolojik davranış üzerinde etkin rol oynadığını göstermektedir.



Şekil 4.3. Döküm yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımı numunelerin aşınma testi sonrasında elde edilen mikroskobik görüntüleri.

EBM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımı numunelerin aşınma testi sonrasında elde edilen mikroskobik görüntüleri Şekil 4.4' te sunulmaktadır. Görüntüler, döküm yöntemi ile üretilen numunelere ait sonuçlarla karşılaştırıldığında, üretim yöntemine bağlı mikroyapı farklılıklarının aşınma mekanizmaları üzerinde farklı etkiler oluşturduğu görülmektedir. Referans EBM numunesinde (R), aşınma izlerinin döküm numunelere kıyasla daha dar ve

daha homojen bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Kayma yönüne paralel oluklar belirgin olmakla birlikte, plastik deformasyon izlerinin daha sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, EBM yöntemi ile elde edilen daha ince ve yönlenmiş mikroyapının aşınma sırasında yüzey dayanımını artırdığına işaret etmektedir. Bu duruma benzer bir çalışmada, EBM yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçalarının mikroyapısı ve aşınma özellikleri geleneksel döküm Ti6Al4V numuneleriyle karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar, EBM ile üretilen numunelerin daha yüksek mikrosertlik değerlerine sahip olduğunu ve daha düşük spesifik aşınma hacmi sergilediğini rapor etmiştir. Elde edilen bulgular, EBM yöntemiyle elde edilen daha ince ve yönlenmiş mikroyapının aşınma sırasında yüzey dayanımını artırdığını ve plastik deformasyonu sınırladığını göstermektedir (Toh vd., 2016).

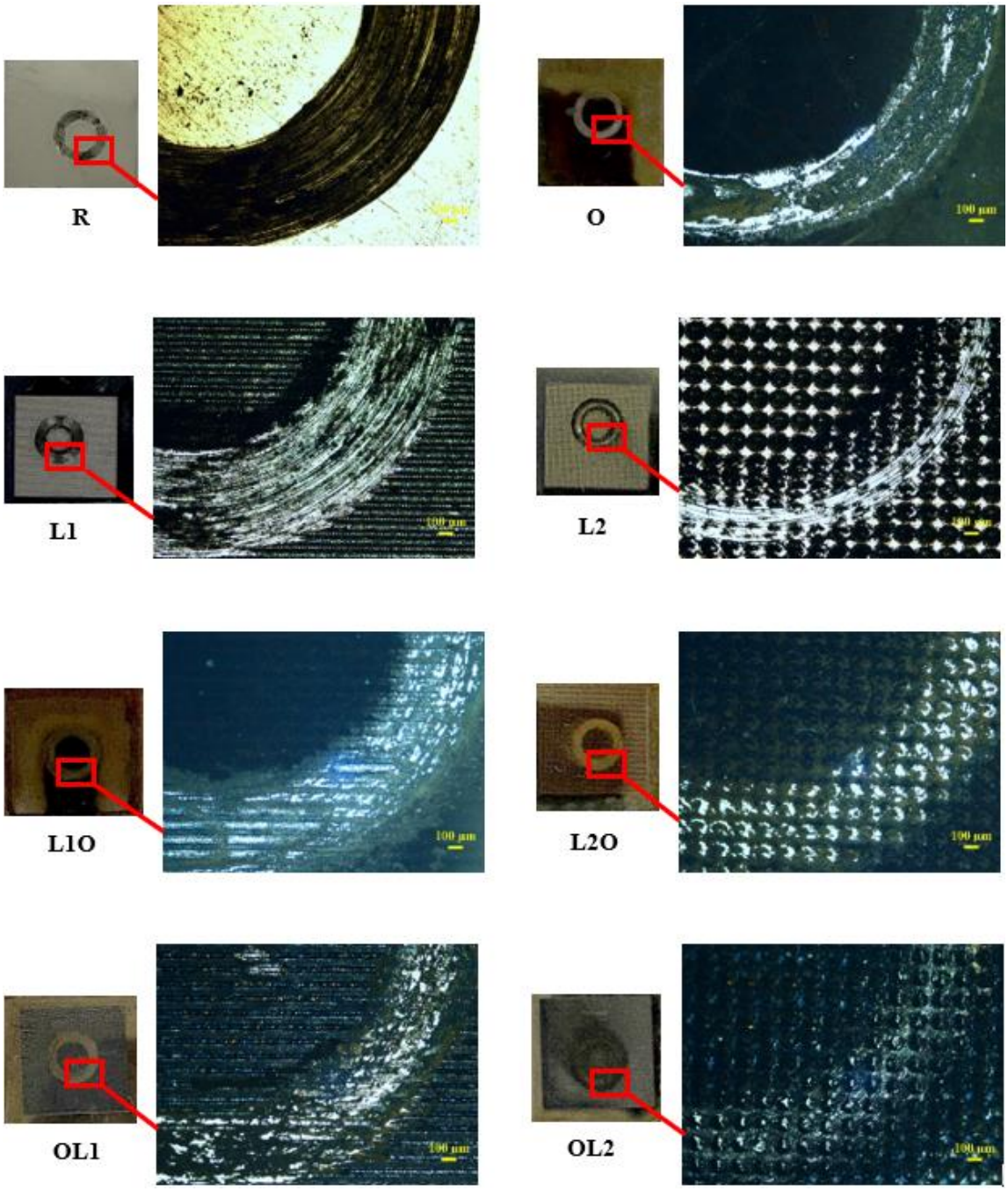
Yalnızca yüzey oksidasyonu uygulanan O numunesinde, EBM üretimli yüzeylerde oksit tabakanın aşınma boyunca daha kararlı bir davranış sergilediği görülmektedir. Döküm numunelerde gözlenen yerel tabaka kopmaları, EBM numunelerde daha sınırlı olup aşınma izinin sürekliliği azalmıştır. Bu durum, EBM numunelerde oksit tabakanın alt mikroyapı ile daha iyi uyum sağladığını göstermektedir. Benzer şekilde, Estupinán-López vd. (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, EBM ve konvansiyonel yöntemlerle üretilen Ti6Al4V alaşımlarının oksidasyon davranışları karşılaştırılmıştır. Çalışmada, EBM ile üretilen numunelerin daha yüksek aktivasyon enerjisine sahip olduğu ve yüzeylerinde daha homojen ve daha iyi tutunan bir oksit tabakası oluştuğu bildirilmiştir. Araştırmacılar, bunun EBM yöntemiyle elde edilen daha ince ve yönlü mikroyapıdan kaynaklandığını ve bu durumun oksit tabakasının yüzeyle daha uyumlu olmasına katkı sağladığını belirtmiştir.

Lazer ile paralel hat tekstürleme uygulanan L1 numunesinde, EBM üretimli yüzeylerde tekstürleme izlerinin daha düzenli kaldığı ve aşınma hattının belirli bölgelerde sınırlandığı gözlemlenmiştir. Döküm numunelere kıyasla, EBM numunelerde paralel dokuların aşınma sırasında daha etkin bir yönlendirme sağladığı ve yüzey hasarını kontrol altına aldığı değerlendirilmektedir. Çukur desen tekstürleme uygulanan L2 numunesinde ise, EBM üretimli yüzeylerde çukur yapıların geometrik bütünlüğünü büyük ölçüde koruduğu ve aşınma artıklarının bu bölgelerde tutulduğu görülmektedir. Döküm numunelerde yer yer gözlenen çukur deformasyonları, EBM numunelerde daha sınırlı olup aşınma izleri daha kesintili bir yapı sergilemiştir Lazer yüzey tekstürleme ile ilişkili olarak, Genna vd. (2019) tarafından yürütülen bir çalışmada, EBM yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçalarının lazerle

yüzey işleme sonrası yüzey özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, lazer işleminin yüzey pürüzlülüğünü yaklaşık %70 oranında azalttığı, ayrıca mikrosertlik, çizilme direnci ve aşınma direncini artırdığı rapor edilmiştir. Elde edilen bulgular, EBM üretimli yüzeylerin lazerle yüzey işleme sonrasında daha düzenli bir topografya kazandığını ve aşınma sırasında daha kararlı izler sergilediğini göstermektedir.

Birleşik yüzey modifikasyonlarının uygulandığı L1O ve L2O numunelerinde, EBM yöntemi ile üretilen numunelerin aşınma direncinin döküm numunelere kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle L2O numunesinde, oksit tabaka ile çukur dokuların birlikte etkisi sayesinde aşınma izinin daha sığ ve homojen olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, EBM mikroyapısı ile birleşik yüzey modifikasyonlarının sinerjik bir etki oluşturduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, oksitlenmiş yüzey üzerine lazer tekstürleme uygulanan OL1 ve OL2 numunelerinde, EBM üretimli yüzeylerin aşınma sonrası daha düzenli bir morfoloji sergilediği görülmektedir. Özellikle OL2 numunesinde, çukur dokuların aşınma bölgesini lokalize ettiği ve yüzey hasarını sınırlandırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum, EBM yöntemi ile üretilen numunelerde lazer tekstürleme ve yüzey oksidasyonunun birlikte uygulanmasının tribolojik performansı olumlu yönde etkilediğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, üretim yöntemine bağlı mikroyapısal farklılıkların tribolojik davranış üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Döküm yöntemi ile üretilen numunelerde aşınma izlerinin daha geniş ve süreklilik arz ettiği gözlemlenirken, EBM yöntemi ile üretilen numunelerde aşınma izlerinin daha dar, homojen ve kontrollü bir morfoloji sergilediği belirlenmiştir. Her iki üretim yönteminde de lazer yüzey tekstürleme ve yüzey oksidasyonu uygulamalarının aşınma direncini artırdığı tespit edilmiş; ancak bu iyileşmenin EBM numunelerde daha belirgin olduğu görülmüştür. Özellikle lazer yüzey tekstürleme ile yüzey oksidasyonunun birlikte uygulandığı numunelerde, aşınma izlerinin en sınırlı seviyede kaldığı ve yüzey bütünlüğünün daha etkin biçimde korunduğu ortaya konmuştur. Bu bulgular, EBM üretim sürecinin yüzey modifikasyonlarının etkinliğini artırarak Ti6Al4V alaşımının aşınma performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.



Şekil 4.4. EBM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımı numunelerin aşınma testi sonrasında elde edilen mikroskobik görüntüleri.

Çizelge 4.1'de sunulan karşılaştırmalı değerlendirme de bu sonucu desteklemekte olup, EBM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V numunelerin, döküm yöntemi ile üretilen numunelere kıyasla aşınma sonrası daha homojen ve kontrollü bir yüzey morfolojisi sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu davranışın, EBM üretim sürecine özgü ince ve yönlenmiş mikroyapının, uygulanan yüzey modifikasyonlarının tribolojik etkinliğini artırmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

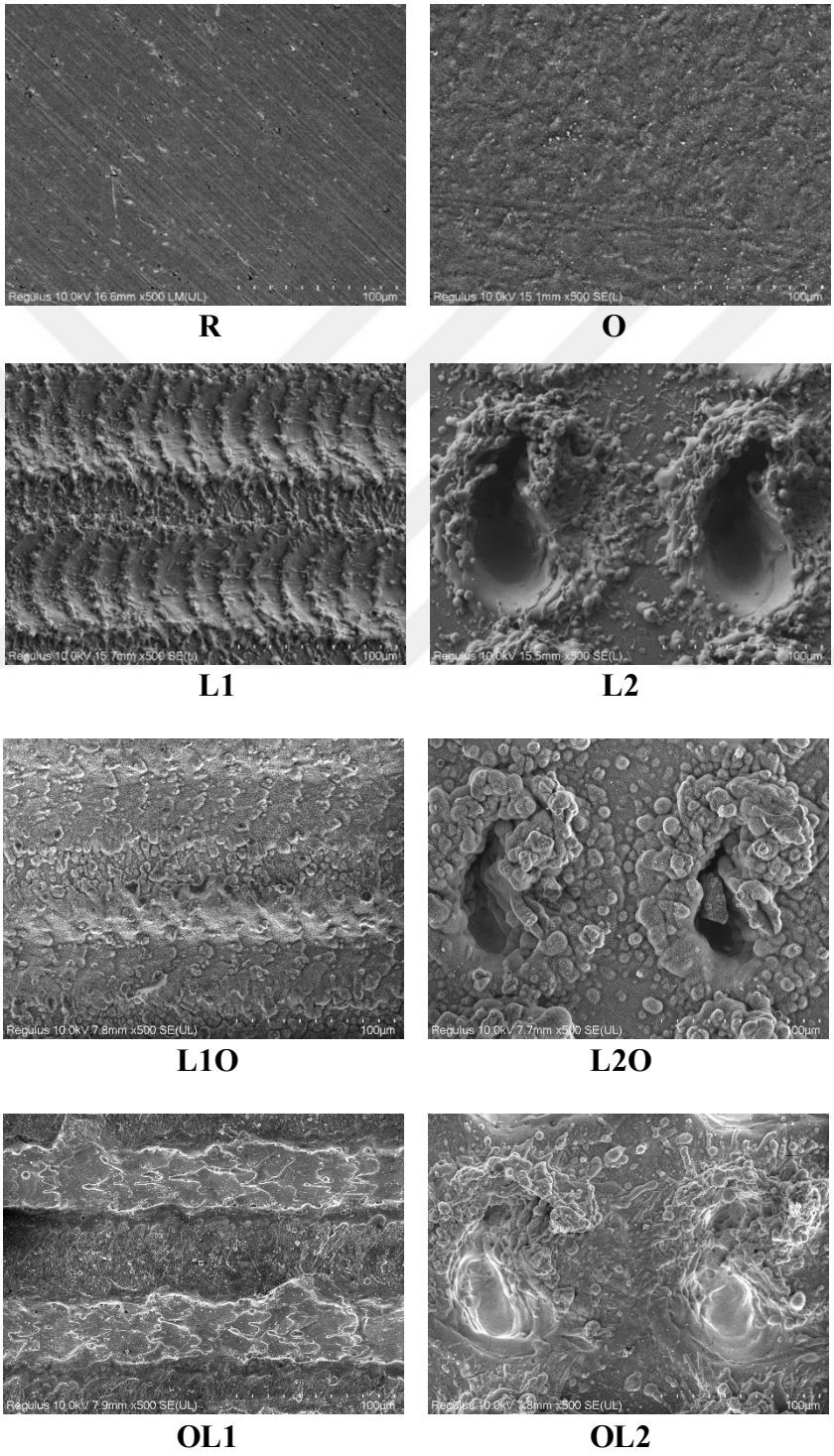
Çizelge 4.1. Döküm ve EBM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V numunelerin aşınma davranışlarının karşılaştırılması.

Numune	Döküm Yöntemi	EBM Yöntemi
R	Geniş ve süreklilik gösteren aşınma izi, belirgin plastik deformasyon	Daha dar ve homojen aşınma izi
O	Oksit tabakada yerel kopmalar, düzensiz aşınma morfolojisi	Daha kararlı oksit tabaka, sınırlı aşınma
L1	Dokular boyunca yönlenmiş aşınma, lokal hasar	Dokular korunmuş, kontrollü aşınma
L2	Çukur yapılarda kısmi deformasyon	Çukur dokular etkin, artık tutma belirgin
L1O	Aşınma izleri azalmış ancak yer yer süreklilik mevcut	Daha sığ ve homojen aşınma izi
L2O	Aşınma sınırlı; çukur deformasyonları yer yer gözlenmiştir	En düşük aşınma hasarlarından biri; sinerjik etki
OL1	Aşınma dokular boyunca yönlenmiş, yüzey hasarı kısmen lokalizedir	Düzenli ve kontrollü aşınma izi
OL2	Aşınma lokalize ancak düzensiz morfoloji mevcuttur	En sınırlı ve süreksiz aşınma izi

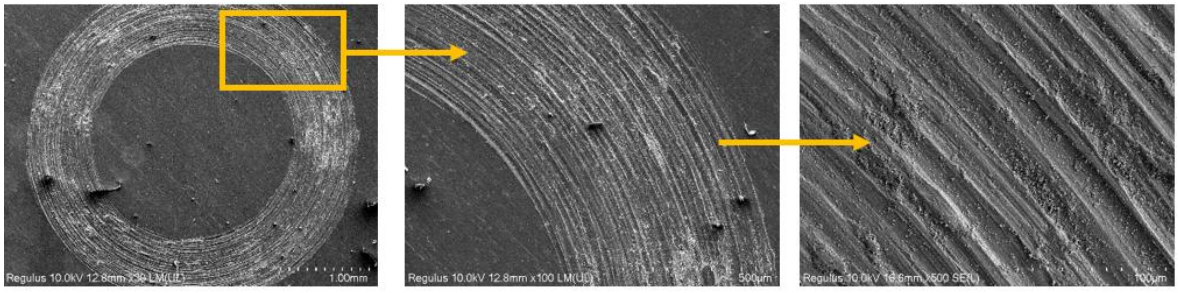
4.2.2. SEM analizleri

Bu bölümde, çalışmada üretilen ve farklı yüzey modifikasyonlarına tabi tutulan numunelerin yüzey morfolojileri ve aşınma izleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. SEM analizleri, lazer yüzey tekstürleme ve oksitleme işlemlerinin numune yüzeyinde oluşturduğu mikro-ölçekli yapıları ortaya koymak ve tribolojik deneyler sonrasında meydana gelen aşınma mekanizmalarını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyler öncesinde alınan SEM görüntüleri, paralel hat ve çukur desen tekstürleme işlemleri sonucunda yüzeyde oluşan düzenli mikroyapıların, oksitleme işlemi ile yüzey morfolojisinde belirgin değişimlere yol açtığını göstermektedir. Bu değişimlerin sürtünme ve aşınma davranışını doğrudan etkileyebileceği değerlendirilmektedir. SEM görüntüleri, Regulus model taramalı elektron mikroskobu kullanılarak 10,0 kV ivme voltajında ve ×500 büyütme oranında, ikincil elektron dedektörü ile elde edilmiştir. Görüntülerde yer alan 100 μm'lik ölçek çubuğu, yüzeydeki mikro ölçekli yapıların boyutsal olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 4.5'te döküm yöntemiyle üretilen numunelerin işlem öncesi SEM görüntülerinde, imalat sürecine bağlı taşlama izleri ve döküm boşlukları gözlenmektedir. Lazer tekstürleme sonrası yüzeyde belirgin kanal ve

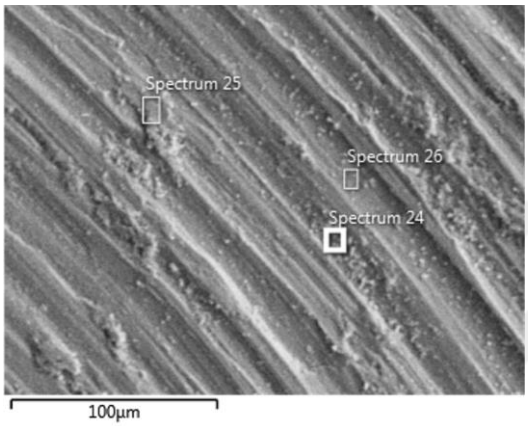
krater yapıları oluşurken, oksidasyon işlemiyle yüzeyin homojen ve granüler karakterde bir oksit tabakasıyla kaplandığı tespit edilmiştir. İşlem sırasına bağlı olarak değişen oksit sürekliliği ve tekstür morfolojisi, tribolojik performansı doğrudan etkileyebilecek niteliktedir.



Şekil 4.5. Döküm ile üretilen Ti6Al4V numunelerin aşınma öncesi SEM görüntüleri



Aşınma Genel Aşınma Detay Aşınma Kanalı Detay



Spectrum 24	
Element	Ağırlık%
O	5.13
Al	2.73
Ti	83.80
V	3.89
Cr	0.73
Fe	3.72
Toplam	100

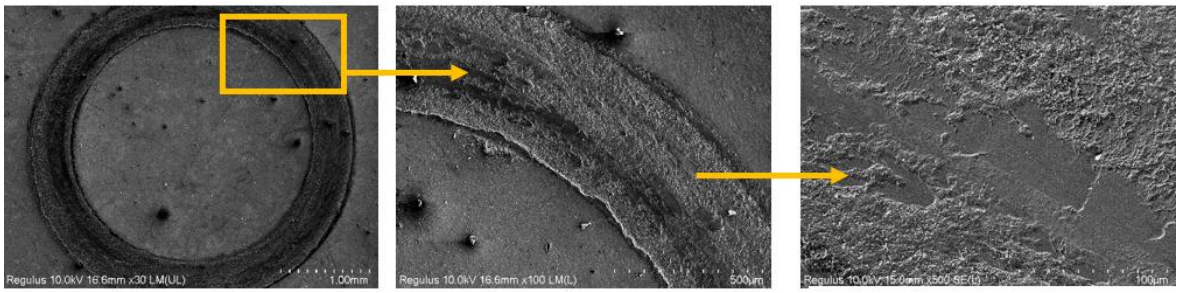
Spectrum 25	
Element	Ağırlık%
O	10.02
Al	2.92
Ti	65.94
V	2.84
Cr	3.77
Fe	14.51
Toplam	100

Spectrum 26	
Element	Ağırlık%
C	0.47
O	2.35
Al	4.02
Ti	88.56
V	3.37
Cr	0.18
Fe	1.05
Toplam	100

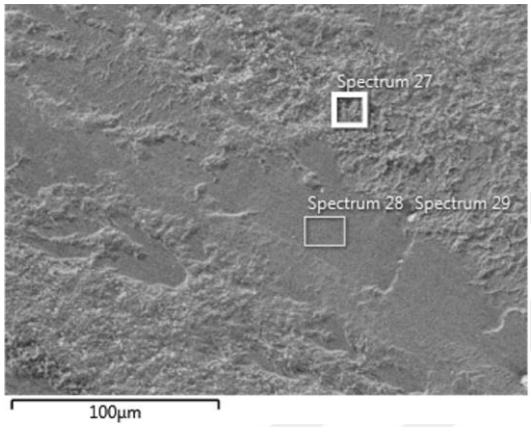
Şekil 4.6. Döküm ile üretilmiş R numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Şekil 4.6'da dairesel aşınma izi boyunca kayma yönüne paralel gelişen belirgin oluklar ve çizikler gözlenmektedir. Bu morfoloji, aşınma sürecinde abrasif aşınma mekanizmasının baskın olduğunu göstermektedir. Aşınma kanalı detaylarında derinleşmiş oluklar, yer yer plastik deformasyon izleri ve sınırlı malzeme yığılmaları tespit edilmiştir. Ayrıca bazı bölgelerde gözlenen yapışma izleri, aşınma sırasında adhezif etkileşimlerin de meydana gelmiş olabileceğine işaret etmektedir.

Aşınma kanalından alınan EDS analizlerinde, Ti6Al4V alaşımının ana bileşenleri olan Ti, Al ve V elementlerine ek olarak Fe ve Cr elementlerinin tespit edilmesi, aşınma sırasında 100Cr6 çelik bilyeden numune yüzeyine sınırlı ölçüde malzeme transferi gerçekleştiğini düşündürmektedir. Spectrum 26 noktasında Fe ve Cr ile C elementinin belirlenmesi de bilyenin Fe–Cr–C esaslı yapısı dikkate alındığında, bu bölgedeki oluşumların karşı yüzey kaynaklı olabileceğini desteklemektedir. Elde edilen bulgular, aşınma mekanizmasının ağırlıklı olarak abrasif karakterde olmakla birlikte, kısmi adhezif katkılar da içerebileceğini göstermektedir.



Aşınma Genel Aşınma Detay Aşınma Kanalı Detay



Spectrum 27	
Element	Ağırlık%
C	0.28
O	16.84
Al	2.03
Ti	62.42
V	1.90
Cr	3.02
Mn	0.57
Fe	11.24
Ni	1.71
Toplam	100

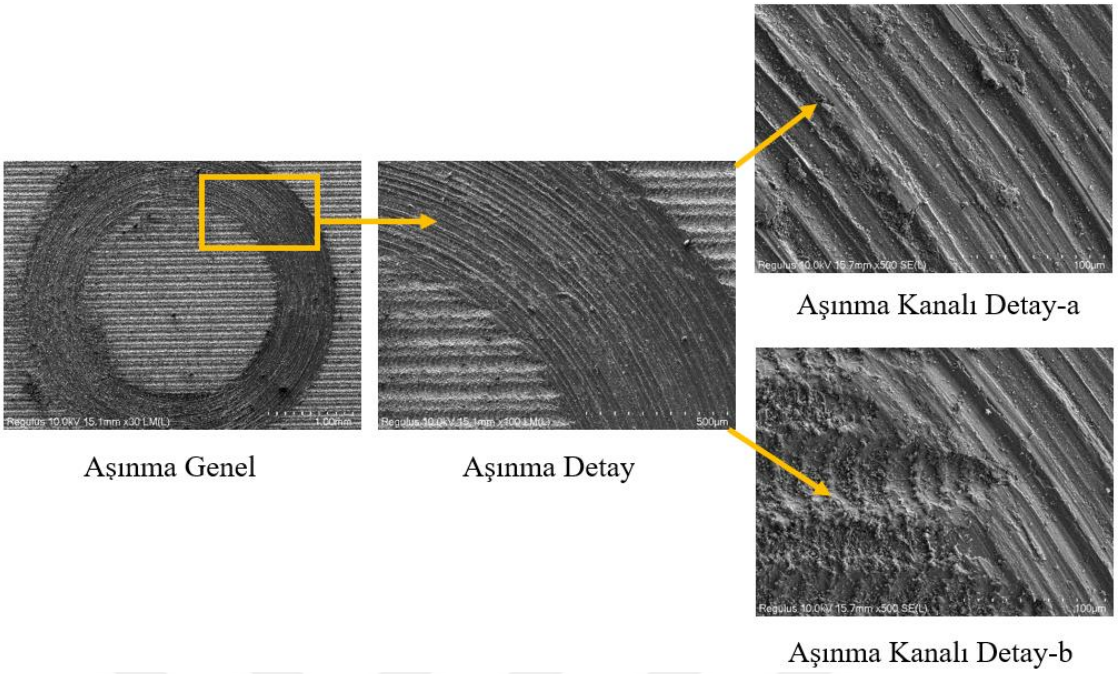
Spectrum 28	
Element	Ağırlık%
C	0.50
O	21.42
Al	1.03
Ti	28.34
V	1.37
Cr	8.75
Mn	1.53
Fe	33.48
Ni	3.58
Toplam	100

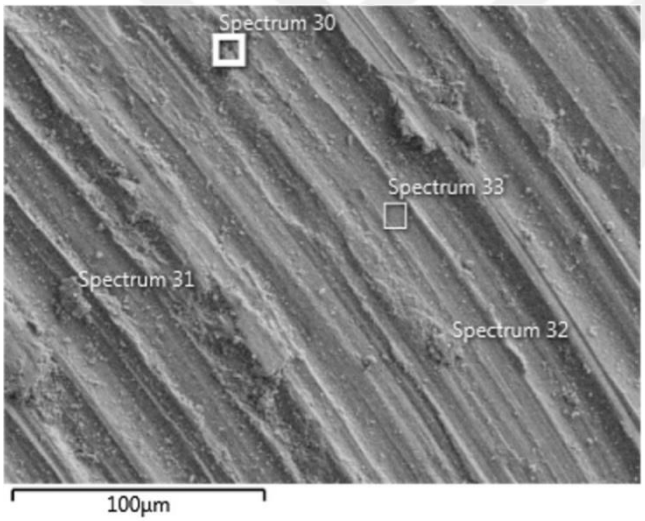
Spectrum 29	
Element	Ağırlık%
C	0.13
O	25.06
Al	1.16
Ti	29.59
V	1.45
Cr	8.05
Mn	1.25
Fe	29.85
Ni	3.45
Toplam	100

Şekil 4.7. Döküm ile üretilmiş O numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Şekil 4.7'de, farklı büyütme oranlarında aşınma izinin genel morfolojisini ve kanal iç yapısını ortaya koymaktadır. Aşınma izi boyunca kayma yönüne paralel gelişen izler ve yüzeydeki düzensizlikler, aşınma sürecinde mekanik etkileşimlerin belirgin olduğunu göstermektedir. Aşınma kanalı detaylarında yüzey pürüzlülüğünde artış, yer yer plastik deformasyon izleri ve aşınma artıkları gözlenmektedir. Bu morfolojik özellikler, aşınma mekanizmasının ağırlıklı olarak abrasif karakter taşıdığını, ancak lokal bölgelerde adhezif etkileşimlerin de meydana gelmiş olabileceğini düşündürmektedir.

Aşınma kanalından alınan EDS analizlerinde Ti6Al4V alaşımına ait Ti, Al ve V elementlerinin yanı sıra Fe, Cr, Mn ve Ni elementlerinin tespit edilmesi, aşınma sırasında karşı yüzey malzemesinden numune yüzeyine kısmi malzeme transferi gerçekleşmiş olabileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, bazı bölgelerde belirlenen O elementi, numunenin oksitleme işlemine tabi tutulmuş olmasıyla ilişkilendirilebilir. Bu nedenle, belirlenen oksijen içeriğinin yalnızca aşınma sırasında oluşan oksidatif etkileşimlerden değil, aynı zamanda yüzeyde önceden mevcut olan oksit tabakasından da kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir.





Spectrum 30	
Element	Ağırlık%
C	1.21
O	12.67
Al	2.47
Ti	61.82
V	5.74
Cr	2.2
Fe	13.88
Toplam	100

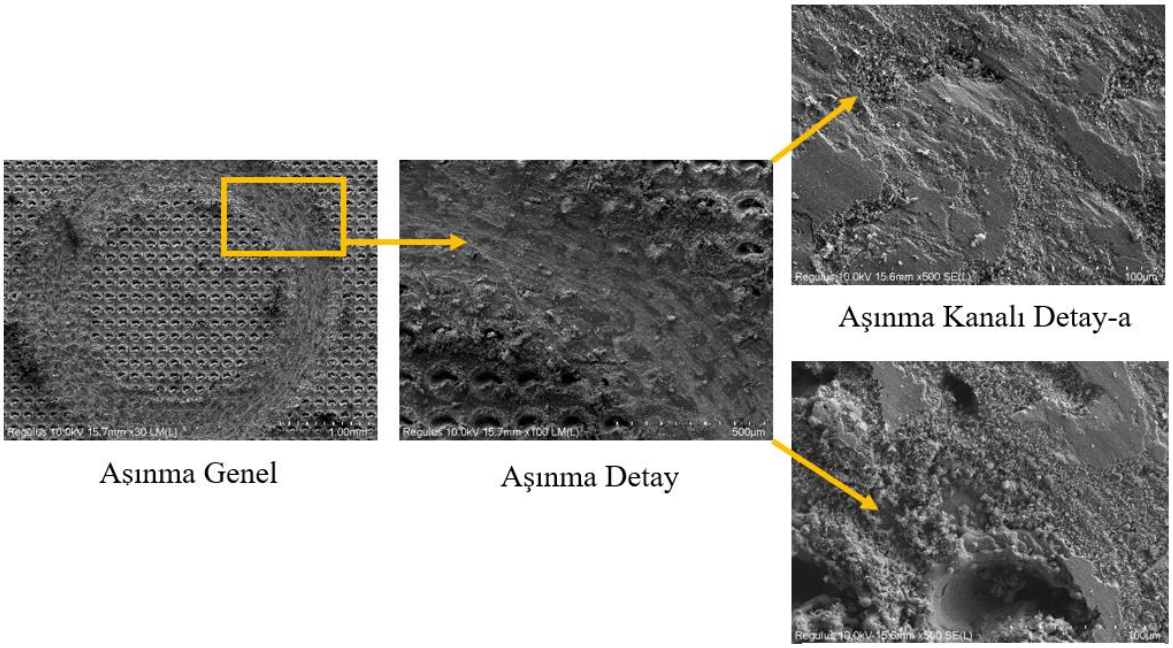
Spectrum 32	
Element	Ağırlık%
O	8.50
Al	1.91
Ti	50.15
V	3.05
Cr	5.82
Fe	30.57
Toplam	100

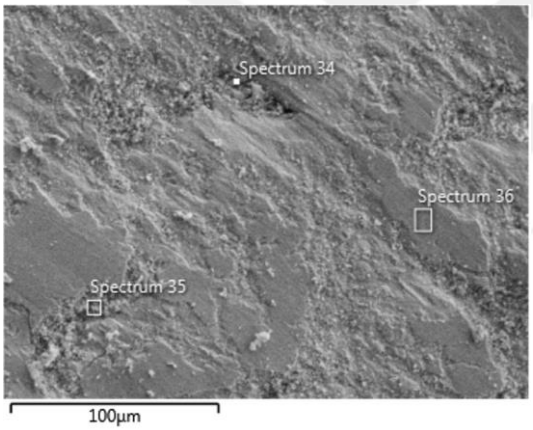
Spectrum 31	
Element	Ağırlık%
C	0.15
O	4.14
Al	4.63
Ti	76.47
V	3.06
Mn	8.69
Fe	2.85
Toplam	100

Spectrum 33	
Element	Ağırlık%
O	2.97
Al	4.54
Ti	81.99
V	0.57
Cr	2.26
Mn	4.48
Fe	3.18
Toplam	100

Şekil 4.8. Döküm ile üretilmiş L1 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Şekil 4.8'de numuneye ait aşınma sonrası SEM görüntülerinde, kayma yönüne paralel gelişen oluklar ve yer yer malzeme yığılmaları gözlenmektedir. Aşınma kanalı detaylarındaki derinleşmiş çizikler ve artan yüzey pürüzlülüğü, abrasif aşınmanın baskın olduğunu, lokal düzensizlikler ise sınırlı adhezif etkileşimlerin de oluşabileceğini göstermektedir. EDS analizlerinde Fe ve Cr gibi elementler, aşınma sırasında çelik bilyeden numune yüzeyine sınırlı malzeme transferi gerçekleştiğine işaret etmektedir.





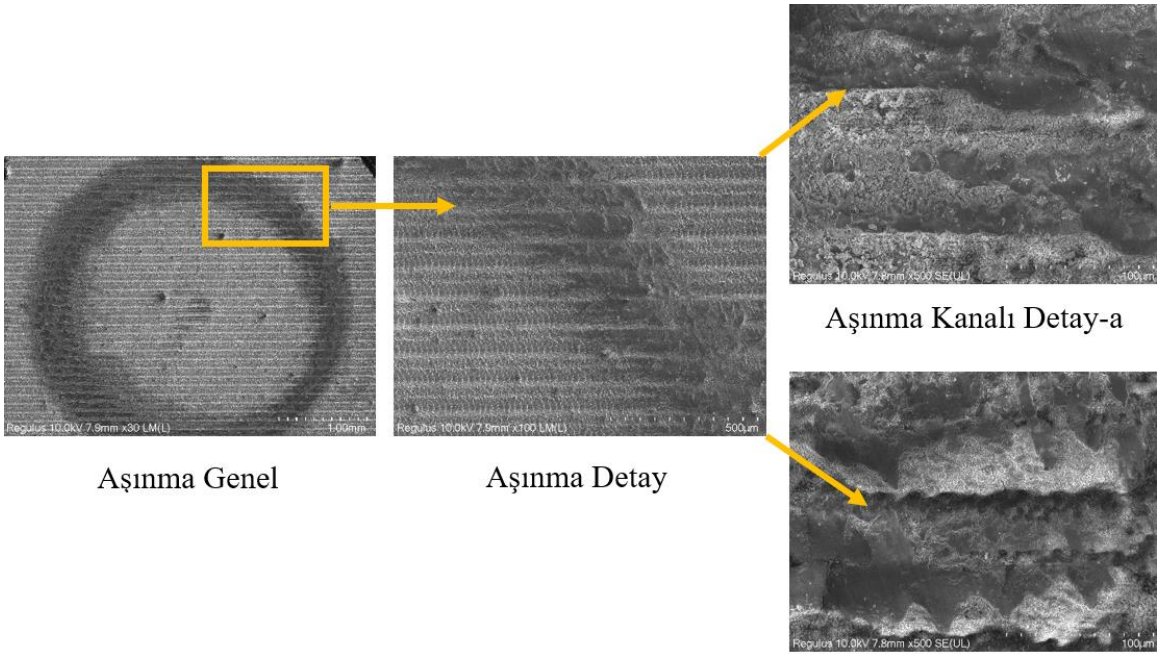
Spectrum 34	
Element	Ağırlık%
O	12.42
Al	0.74
Ti	20.29
V	3.78
Cr	11.88
Mn	5.07
Fe	45.81
Toplam	100

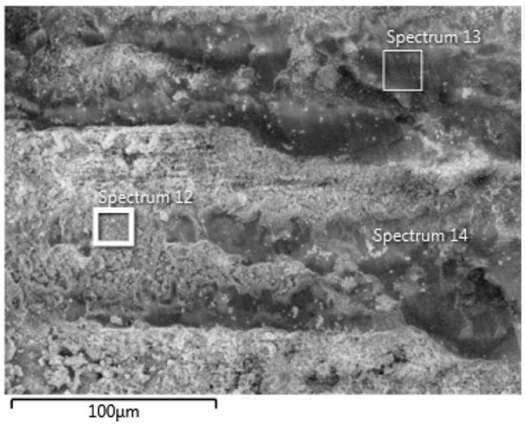
Spectrum 35	
Element	Ağırlık%
C	0.21
O	23.33
Al	1.18
Ti	23.50
Cr	7.86
Mn	5.01
Fe	38.91
Toplam	100

Spectrum 36	
Element	Ağırlık%
C	0.68
O	22.70
Al	0.88
Ti	14.17
V	1.10
Cr	8.57
Mn	2.53
Fe	32.92
Ni	16.46
Toplam	100

Şekil 4.9. Döküm ile üretilmiş L2 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Diğer numunelere kıyasla Şekil 4.9'da L2 numunesine ait SEM görüntülerinde aşınma kanalı boyunca daha yoğun yüzey bozulmaları, malzeme yığılmaları ve kopmalar gözlenmektedir. Bu durum, L2 numunesinde aşınma sırasında yüzeyler arası temasın daha şiddetli gerçekleştiğini ve adhezif etkileşimlerin daha belirgin hâle geldiğini göstermektedir. EDS analizlerinde Ti, Al ve V elementlerine ek olarak, Fe, Cr ve Ni elementlerinin yüksek oranları, aşınma sırasında aşındırıcı 100Cr6 çelik bilyeden numune yüzeyine daha fazla malzeme transferi gerçekleştiğine işaret etmektedir. Bu elementlerin varlığı, test koşulları altında artan adhezif etkileşimler sonucu çelik bilyeden kopan parçacıkların aşınma kanalı içerisinde birikmesi ile ilişkilendirilebilir.





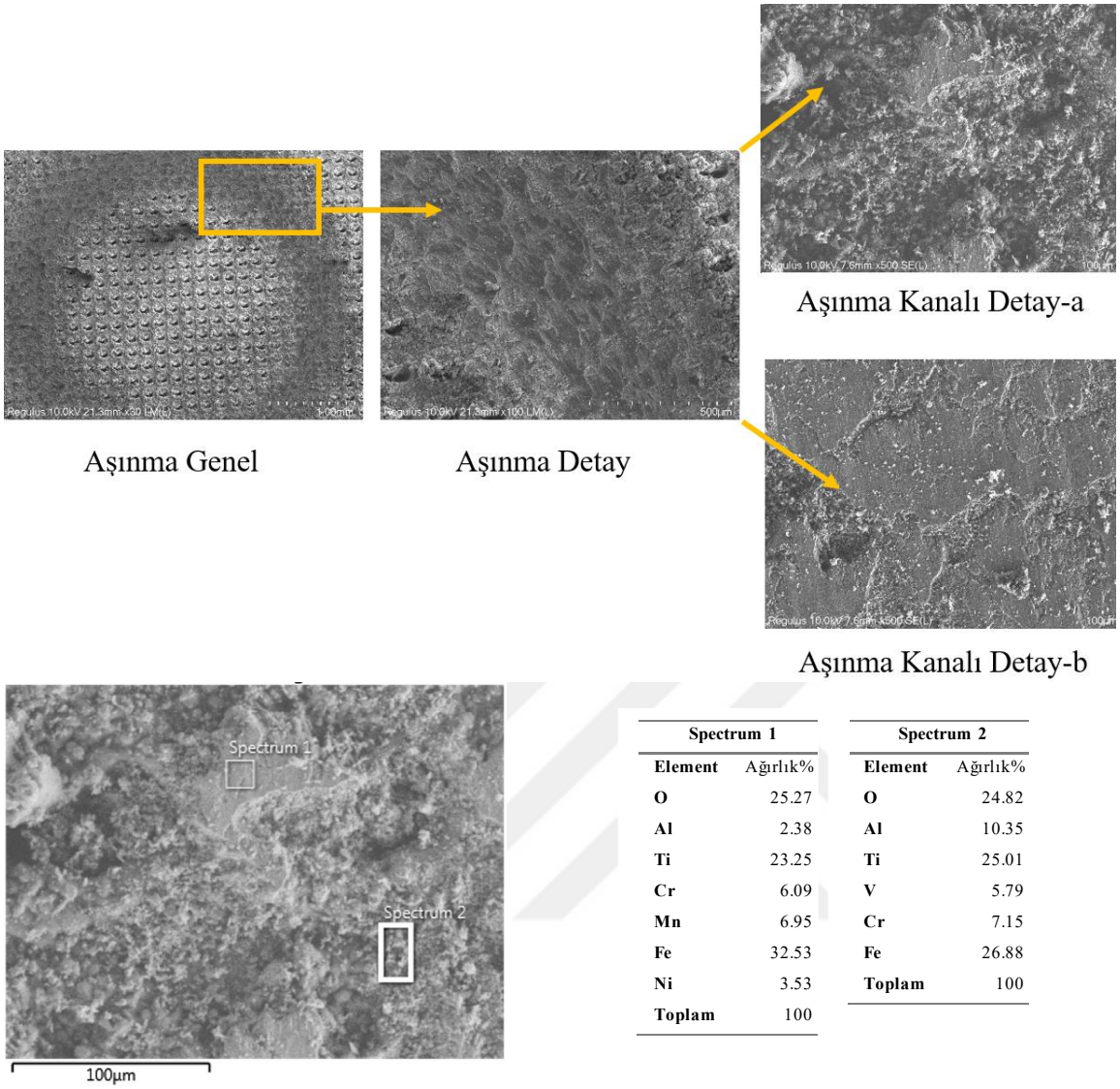
Spectrum 12	
Element	Ağırlık%
O	35.14
Al	28.49
Ti	16.78
V	1.01
Mn	1.10
Fe	17.48
Toplam	100

Spectrum 13	
Element	Ağırlık%
O	25.23
Al	2.07
Ti	3.83
V	0.82
Cr	8.91
Fe	37.54
Ni	21.61
Toplam	100

Spectrum 14	
Element	Ağırlık%
O	19.18
Al	2.26
Ti	8.01
V	2.66
Cr	8.79
Fe	59.10
Toplam	100

Şekil 4.10. Döküm ile üretilmiş L1O numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Şekil 4.10'a ait SEM görüntülerinde, aşınma izinin tekstürlü yüzey üzerinde belirgin bir dairesel hat oluşturduğu görülmektedir. Aşınma kanalına ait detay görüntülerde, tekstürleme ile oluşturulan paralel hatların aşınma sırasında deformasyona uğradığı, ancak tamamen kaybolmadığını görülmektedir. Aşınma kanalı içinde malzeme transferi ve birikimi gözlenmiş olup, yüksek temas basıncı etkisiyle oksit tabakası ve tekstür kenarlarının düzleştiği belirlenmiştir. EDS analizlerinde Spectrum 12 bölgesinde tespit edilen %35,14 oksijen oranı, oksidatif aşınmanın baskın olduğunu ortaya koyarken; Spectrum 13 ve 14 bölgelerindeki yüksek Fe, Ni ve Cr içerikleri karşı elemandan malzeme transferini doğrulamaktadır. Bu bulgular, L1O numunesinde aşınmanın adhesif ve oksidatif mekanizmaların birlikte etkisiyle gerçekleştiğini göstermektedir.

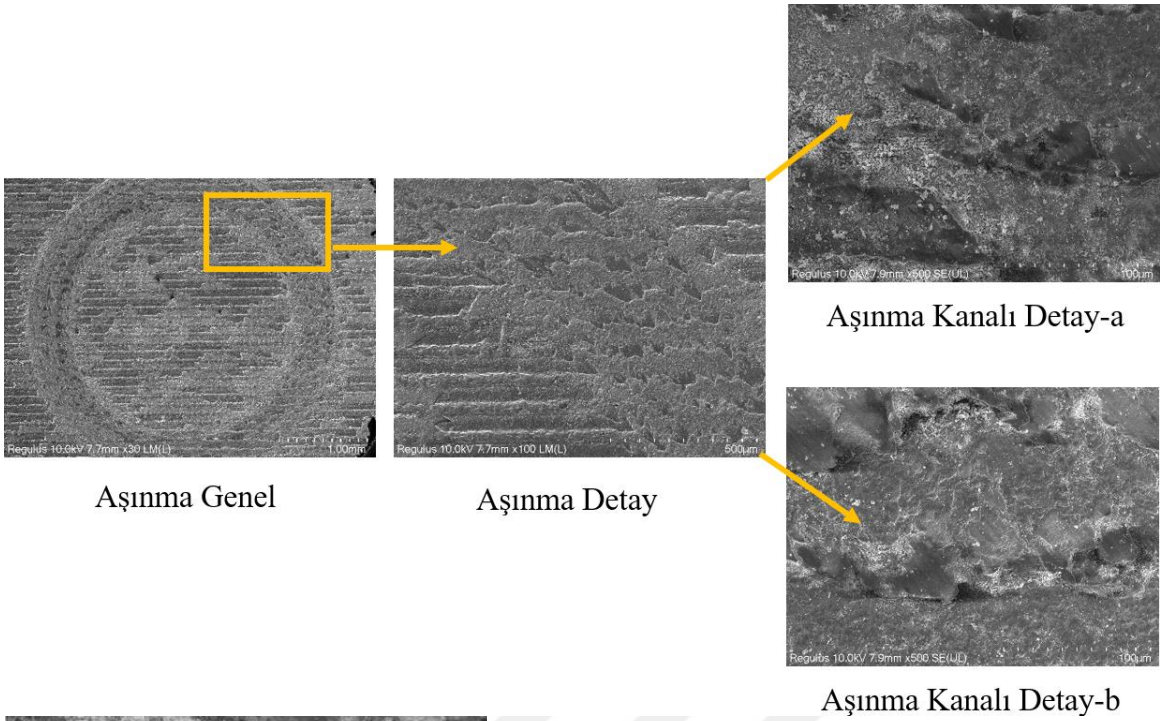


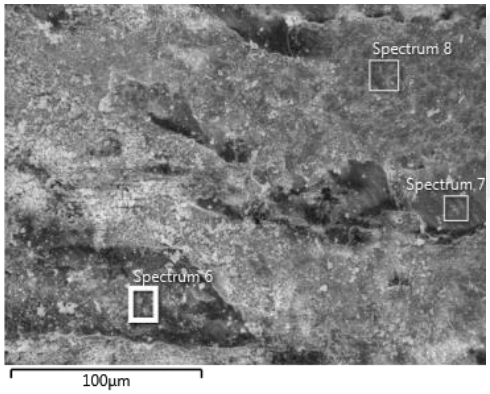
Spectrum 1	
Element	Ağırlık%
O	25.27
Al	2.38
Ti	23.25
Cr	6.09
Mn	6.95
Fe	32.53
Ni	3.53
Toplam	100

Spectrum 2	
Element	Ağırlık%
O	24.82
Al	10.35
Ti	25.01
V	5.79
Cr	7.15
Fe	26.88
Toplam	100

Şekil 4.11. Döküm ile üretilmiş L2O numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Şekil 4.11'de yer alan SEM analizleri incelendiğinde, aşınma izinin numune yüzeyindeki dairesel çukur desenlerini boydan boya kestiği görülmektedir. Aşınma kanalının detay görüntülerinde, tekstürlenmiş çukurların iç kısımlarının büyük ölçüde aşınma döküntüleri ile dolduğu ve çukur kenarlarının uygulanan mekanik yük altında plastik deformasyona uğrayarak ezildiği tespit edilmiştir. Spectrum 1 ve 2'ye ait EDS bulguları, yüzeyde yaklaşık %25 oranında O varlığına işaret ederek oksidatif aşınma mekanizmasının sürdüğünü göstermektedir. Bununla birlikte, her iki spektrumda belirlenen yüksek Fe (%26–32) ve Cr (%6–7) oranları, 100Cr6 bilyadan numune yüzeyine malzeme transferi gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, L2O numunesinde çukurların aşınma partiküllerini kısmen hapseden rezervuarlar gibi davrandığını; ancak yüksek yüzey afinitesi nedeniyle baskın mekanizmanın adhesif aşınma olduğunu göstermektedir.





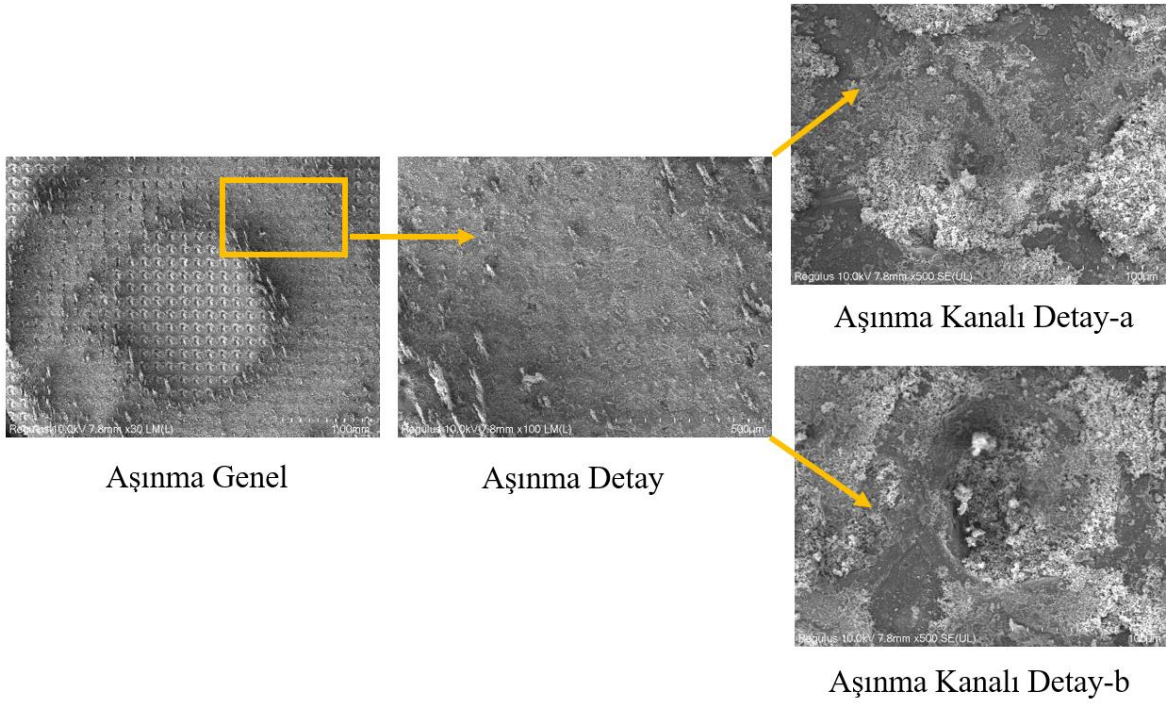
Spectrum 6	
Element	Ağırlık%
C	2.91
O	27.62
Al	21.72
Ti	36.79
V	1.25
Cr	0.17
Mn	4.60
Fe	4.95
Toplam	100

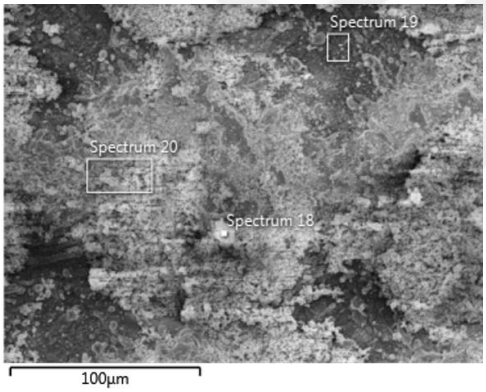
Spectrum 7	
Element	Ağırlık%
O	27.69
Al	1.01
Ti	11.70
V	0.19
Cr	8.18
Mn	0.37
Fe	31.54
Ni	19.32
Toplam	100

Spectrum 8	
Element	Ağırlık%
O	25.82
Al	1.61
Ti	33.67
V	1.39
Cr	7.99
Fe	29.51
Toplam	100

Şekil 4.12. Döküm ile üretilmiş OL1 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Şekil 4.12'de sunulan SEM görüntüleri incelendiğinde, aşınma kanalının tekstürlü yüzey üzerinde yer yer süreksizlik gösterdiği belirlenmiştir. Detay görüntülerde, tekstürleme işleminin oksidasyon sonrasında uygulanması nedeniyle lazerin temas ettiği bölgelerde oksit tabakasının uzaklaştığı ve bu alanların aşınma sırasında daha belirgin plastiki deformasyona maruz kaldığı gözlenmiştir. Spectrum 7 ve 8'e ait EDS sonuçları, %25–27 oranındaki oksijen içeriği ile oksidatif aşınmanın sürdüğünü ortaya koymaktadır. Ayrıca yüksek Fe ve Cr oranları, 100Cr6 bilyadan numune yüzeyine belirgin bir malzeme transferi gerçekleştiğini göstermektedir. Buna karşın Spectrum 6 bölgesinde tespit edilen düşük Fe ve Cr içerikleri, bu noktada adhesif etkileşimin daha sınırlı olduğunu veya aşınma döküntülerinin bölgeden uzaklaştırıldığını düşündürmektedir.





Spectrum 18	
Element	Ağırlık%
O	7.77
Ti	3.52
Cr	14.07
Mn	3.22
Fe	55.39
Ni	16.04
Toplam	100

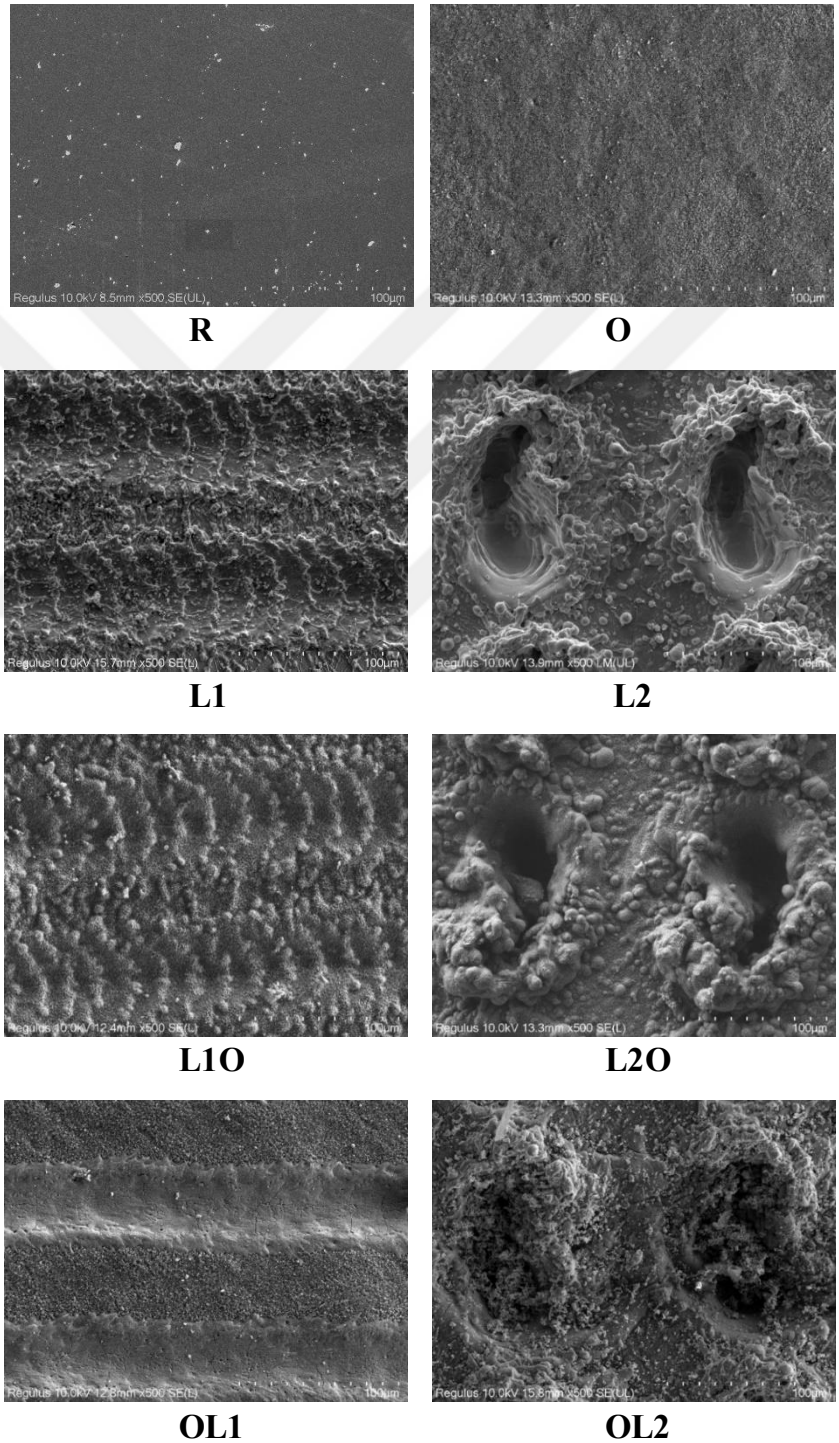
Spectrum 19	
Element	Ağırlık%
C	3.90
O	17.63
Al	12.51
Ti	41.53
V	2.24
Cr	0.81
Fe	5.38
Ni	16.00
Toplam	100

Spectrum 20	
Element	Ağırlık%
O	7.11
Al	0.97
Ti	9.88
V	1.62
Cr	12.99
Mn	3.66
Fe	63.77
Toplam	100

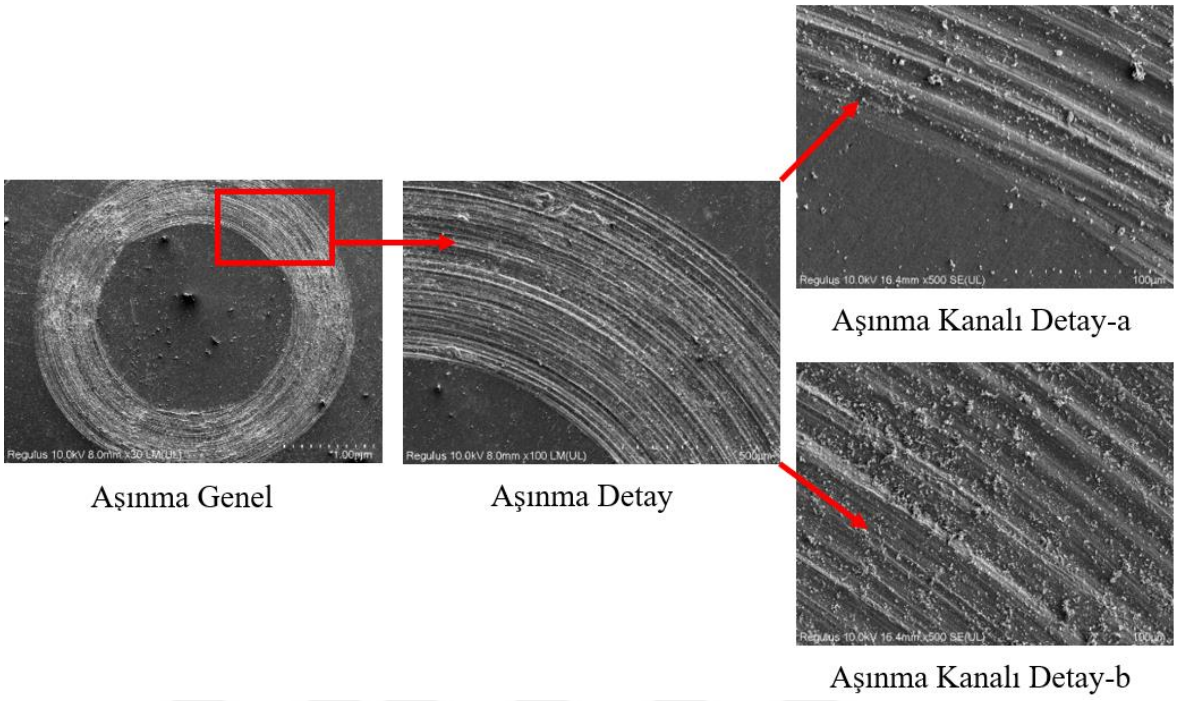
Şekil 4.13. Döküm ile üretilmiş OL2 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri

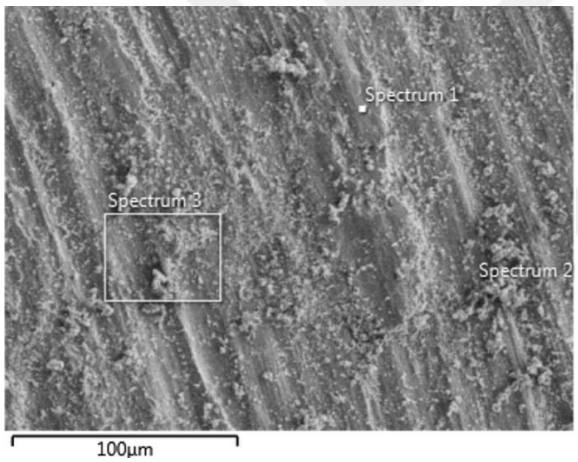
Şekil 4.13'te sunulan OL2 numunesine ait aşınma sonrası SEM mikrografları, oksidasyon basamağının ardından uygulanan çukur desenli tekstürlemenin yüzeydeki koruyucu oksit tabakasını lokal olarak kesintiye uğrattığını ortaya koymaktadır. Aşınma izi içerisinde çukur morfolojilerinin belirgin şekilde deforme olduğu ve bilye ile doğrudan temas eden bu bölgelerde aşınma döküntüsü birikiminin gerçekleştiği gözlenmiştir. Spectrum 18 ve 20'ye ait EDS analizleri, aşınma kanalında %55–63 Fe ve %12–14 Cr gibi yüksek elementel konsantrasyonlar tespit edildiğini göstermektedir. Bu bulgular, 100Cr6 çelik bilyadan numune yüzeyine gerçekleşen malzeme transferinin olduğunu göstermektedir.

EBM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V numunelerin aşınma öncesi SEM görüntüleri Şekil 4.14'te gösterilmekte olup, katmanlı üretim sürecine bağlı olarak belirgin yüzey pürüzlülüğü, düzensiz topoğrafya ve paralel üretim izleri gözlenmektedir. Ayrıca yer yer kısmen ergimiş toz parçacıkları ve çukur yapılar tespit edilmiştir. Bu yüzey özellikleri, tribolojik deneyler sırasında temas koşullarını ve aşınma davranışını etkileyebilmektedir.



Şekil 4.14. EBM ile üretilen Ti6Al4V numunelerin aşınma öncesi SEM görüntüleri





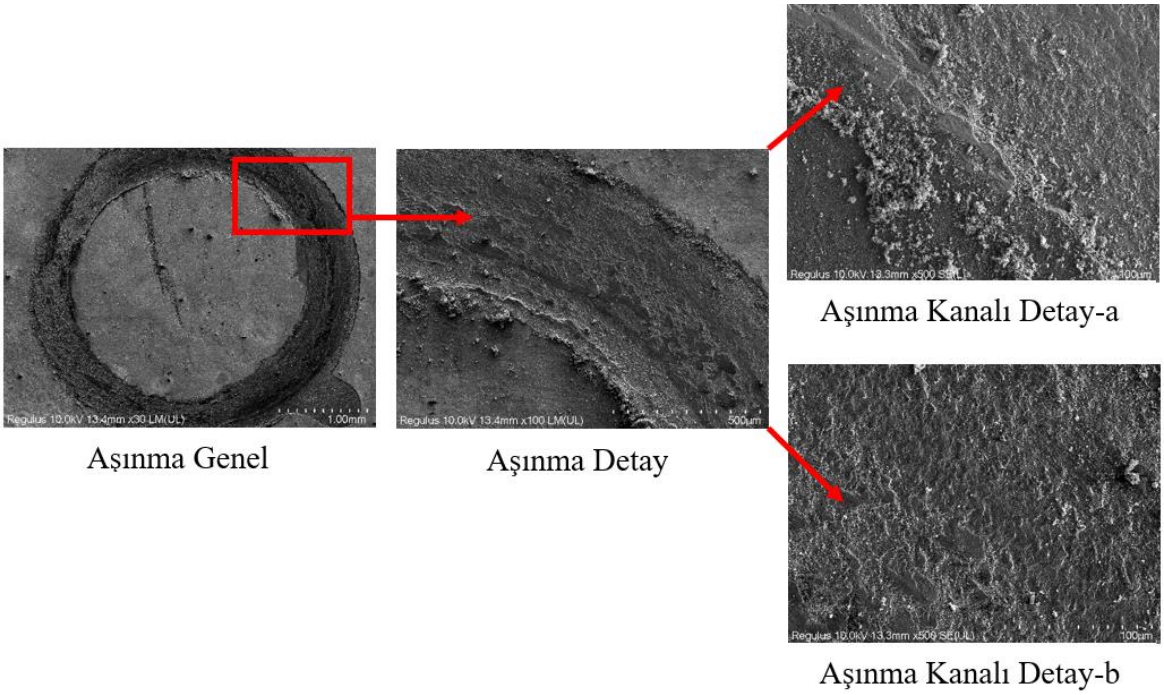
Spectrum 1	
Element	Ağırlık%
C	2.24
O	16.82
Al	4.49
Ti	55.19
V	5.95
Cr	7.88
Fe	7.43
Toplam	100

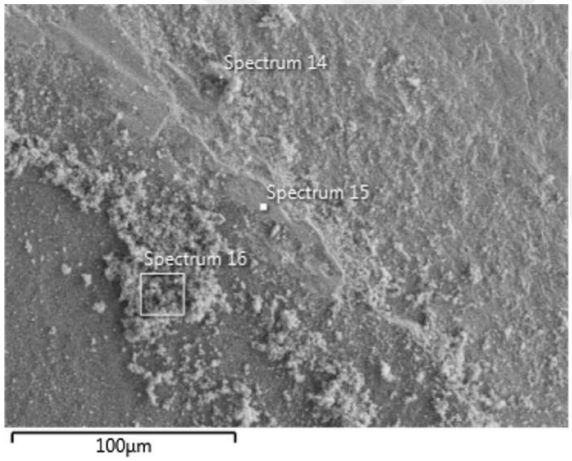
Spectrum 2	
Element	Ağırlık%
C	0.70
O	20.04
Al	4.55
Ti	56.29
V	2.27
Cr	5.23
Mn	7.39
Fe	3.53
Toplam	100

Spectrum 3	
Element	Ağırlık%
O	3.62
Al	3.82
Ti	67.84
V	7.65
Mn	2.47
Fe	14.60
Toplam	100

Şekil 4.15. EBM ile üretilmiş R numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Şekil 4.15'te, aşınma kanalının genişliği boyunca homojen olmayan deformasyon bölgeleri ve yer yer yoğunlaşan malzeme birikimleri dikkat çekmektedir. Bu durum, EBM üretim sürecine özgü heterojen mikroyapı ve yüzey pürüzlülüğünün, temas sırasında gerilme dağılımını yerel olarak artırdığını ve aşınmanın kanal boyunca düzensiz ilerlediğini göstermektedir. Kanal iç yüzeyinde gözlenen ince, süreklilik gösteren çizikler mikro-kesme mekanizmasına, bazı bölgelerdeki parçacık kümelenmeleri ise yüzeyler arası yapışma sonrası kopma süreçlerine işaret etmektedir. EDS analizlerinde Fe ve Cr'nin Ti matrisi içerisinde lokal olarak tespit edilmesi, yüksek temas basıncı altında aşındırıcı 100Cr6 çelik bilyeden kopan parçacıkların aşınma kanalı içerisinde tutunarak transfer tabakası oluşturduğunu göstermektedir.





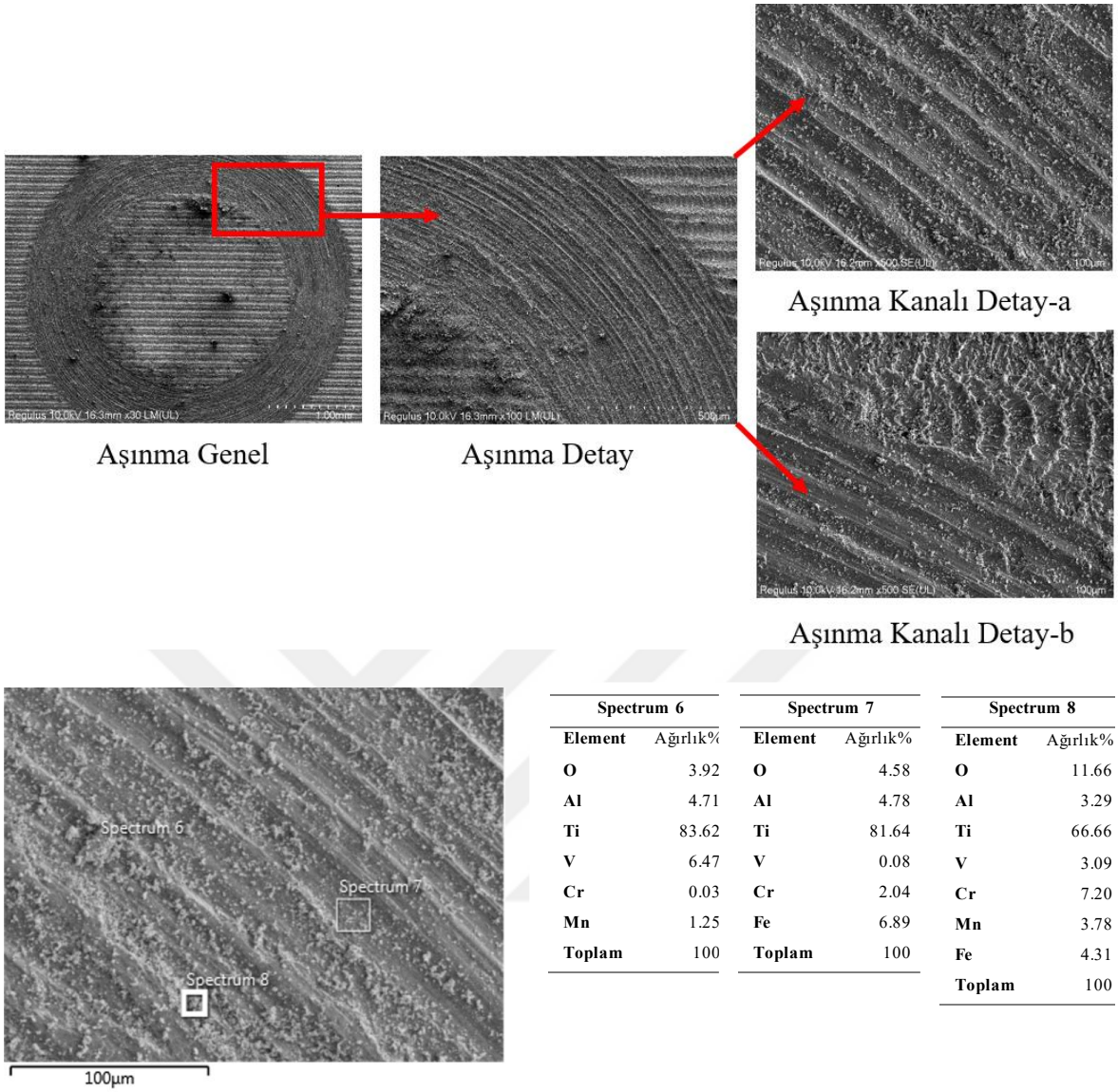
Spectrum 14	
Element	Ağırlık%
C	0.15
O	4.91
Ti	24.64
V	5.98
Cr	9.94
Mn	4.91
Fe	51.47
Toplam	100

Spectrum 15	
Element	Ağırlık%
C	1.69
O	32.36
Al	3.39
Ti	37.77
V	1.20
Cr	2.66
Mn	3.09
Fe	17.83
Toplam	100

Spectrum 16	
Element	Ağırlık%
C	0.80
O	22.81
Al	7.47
Ti	33.03
Cr	5.78
Mn	2.46
Fe	27.66
Toplam	100

Şekil 4.16. EBM ile üretilmiş O numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Şekil 4.16'da, oksitli yüzey yapısına bağlı olarak aşınma kanalında düzensiz yüzey bozulmaları, yerel kopmalar ve parçacık birikimleri gözlenmektedir. Bu durum, yüzeyine herhangi bir işlem uygulanmamış referans numunede baskın olan mekanik kazıma mekanizmasından farklı olarak, oksitleme işlemi uygulanmış O numunesinde kırılgan oksit tabakasının parçalanması ve yeniden yapışma süreçlerinin aşınma davranışında daha belirleyici olduğunu göstermektedir. EDS analizlerinde Fe ve Cr'nin yanı sıra yüksek oksijen içeriğinin tespit edilmesi, aşındırıcı 100Cr6 çelik bilyeden gerçekleşen malzeme transferi ile oksit tabakasının aşınma sürecine etkin biçimde katıldığını düşündürmektedir.



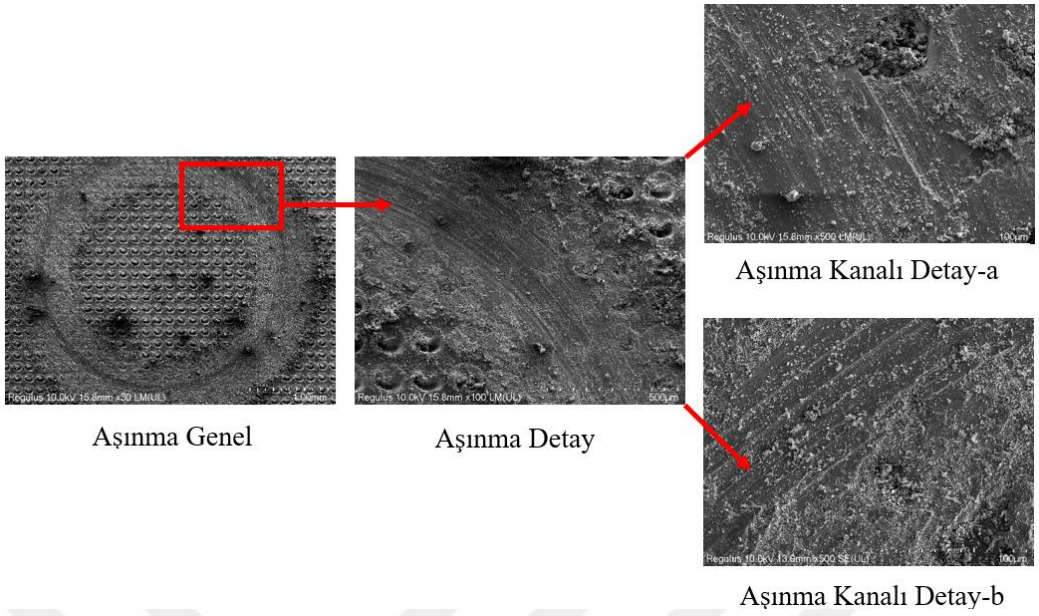
Spectrum 6	
Element	Ağırlık%
O	3.92
Al	4.71
Ti	83.62
V	6.47
Cr	0.03
Mn	1.25
Toplam	100

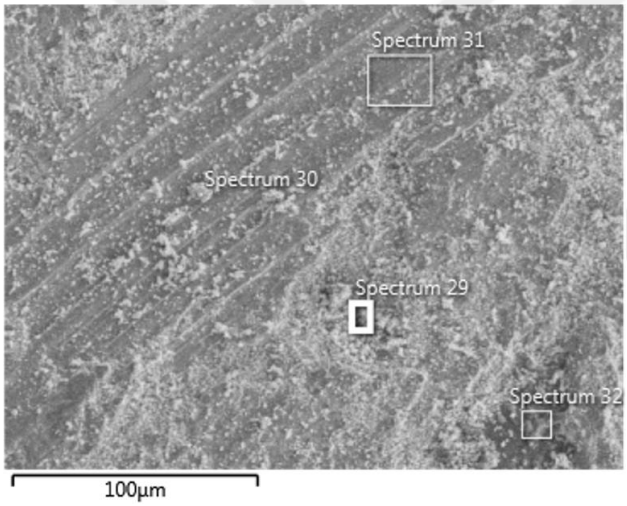
Spectrum 7	
Element	Ağırlık%
O	4.58
Al	4.78
Ti	81.64
V	0.08
Cr	2.04
Fe	6.89
Toplam	100

Spectrum 8	
Element	Ağırlık%
O	11.66
Al	3.29
Ti	66.66
V	3.09
Cr	7.20
Mn	3.78
Fe	4.31
Toplam	100

Şekil 4.17. EBM ile üretilmiş L1 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Şekil 4.17'de, aşınma kanalının lazerle oluşturulmuş paralel mikro oluklar boyunca yönlendiği ve bu yapıların aşınma izleri üzerinde belirleyici olduğu görülmektedir. Kanal detaylarında lazer oluklarının büyük ölçüde korunduğu, ancak bazı bölgelerde bu yapıların kısmen doldurulduğu ve yüzeyde mikro ölçekte malzeme birikimlerinin oluştuğu gözlenmektedir. Bu durum, paralel hat tekstürlerin aşınma sırasında aşınma artıklarını kanal içerisinde tutarak doğrudan temas alanını sınırlayabildiğini göstermektedir. EDS analizlerinde Ti6Al4V alaşım elementlerinin baskın olduğu, Fe ve Cr gibi elementlerin ise sınırlı oranlarda tespit edilmesi, aşındırıcı 100Cr6 çelik bilyeden gerçekleşen malzeme transferinin bu numunede görece daha düşük seviyede olduğunu göstermektedir.





Spectrum 29	
Element	Ağırlık%
C	0.83
O	16.94
Al	1.70
Ti	23.26
V	0.43
Cr	10.59
Mn	0.39
Fe	39.33
Ni	6.52
Toplam	100

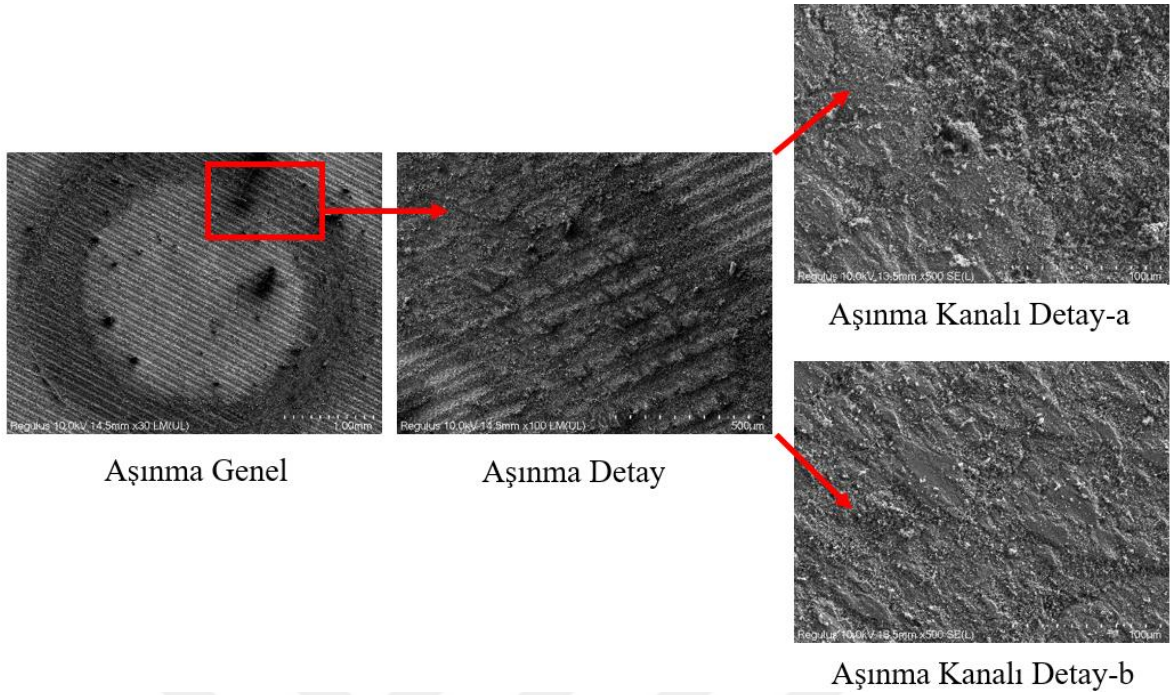
Spectrum 30	
Element	Ağırlık%
C	1.01
O	24.89
Al	2.44
Ti	32.79
V	3.61
Cr	6.81
Mn	1.09
Fe	27.36
Toplam	100

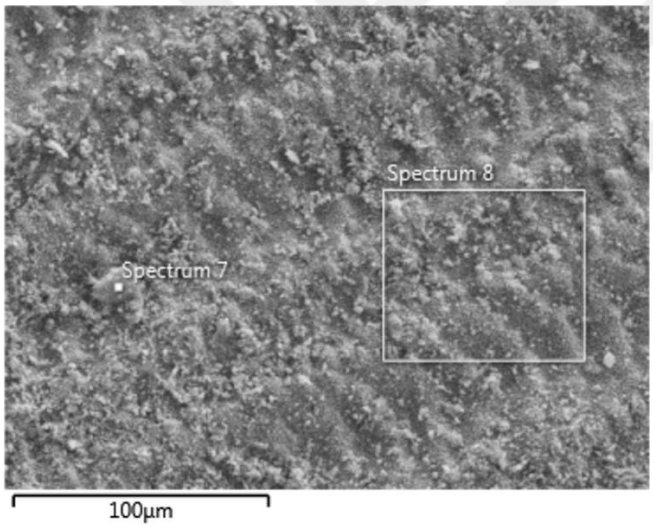
Spectrum 31	
Element	Ağırlık%
O	4.63
Al	5.52
Ti	84.31
V	4.31
Fe	1.24
Toplam	100

Spectrum 32	
Element	Ağırlık%
C	1.39
O	12.57
Al	4.35
Ti	73.94
V	3.48
Cr	1.99
Fe	2.28
Toplam	100

Şekil 4.18. EBM ile üretilmiş L2 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Şekil 4.18'de, aşınma kanalının çukur yapılar boyunca düzensiz ilerlediği ve bu bölgelerde belirgin yüzey bozulmaları oluştuğu gözlenmektedir. Aşınma kanalı detaylarında çukurların aşınma artıkları ve transfer tabakası ile dolması, yerel temas basınçlarının artmasına ve yüzeyde kopma ile parçacık birikimlerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. EDS analizlerinde Fe ve Cr gibi 100Cr6 çelik bilye kaynaklı elementlerin belirgin oranlarda tespit edilmesi, çukur lazer yapıların aşınma sırasında karşı yüzeyden kopan parçacıkların yüzeyde tutulmasını kolaylaştırdığını göstermektedir.



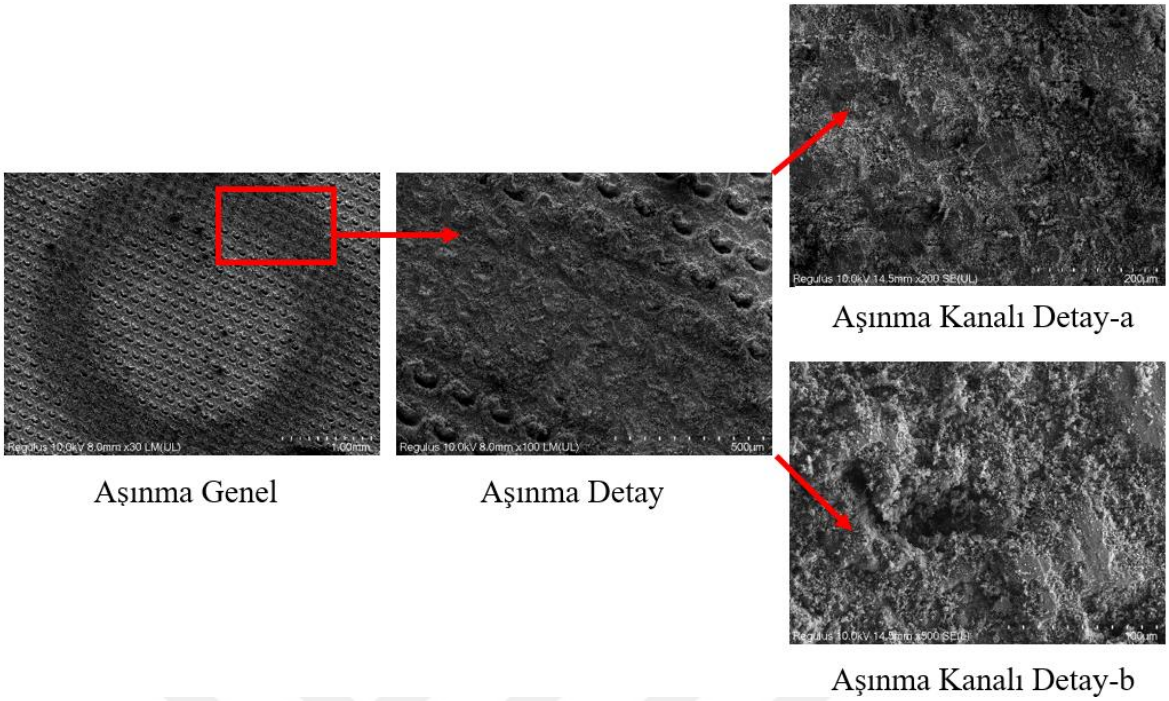


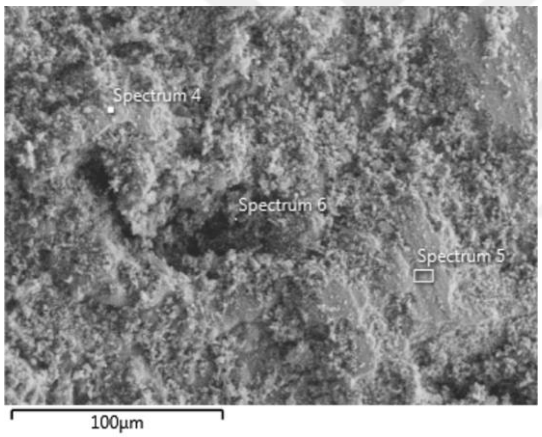
Spectrum 7	
Element	Ağırlık%
C	20.00
O	34.78
Al	13.00
Ti	14.59
Cr	8.47
Fe	9.16
Toplam	100

Spectrum 8	
Element	Ağırlık%
C	1.02
O	30.74
Al	28.39
Ti	25.46
V	2.35
Cr	2.46
Mn	4.32
Fe	5.26
Toplam	100

Şekil 4.19. EBM ile üretilmiş L1O numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Şekil 4.19'da gösterilen L1O numunesinde paralel hat yüzey tekstürleme sonrası uygulanan oksitleme işlemi, aşınma davranışını birlikte etkilemiştir. Aşınma sonrası SEM görüntülerinde lazerle oluşturulan paralel mikroyapıların kısmen korunduğu, ancak üzerlerini kaplayan oksit tabakasının yer yer parçalandığı gözlenmektedir. EDS analizlerinde yüksek oksijen içeriğinin yanı sıra Fe ve Cr elementlerinin tespit edilmesi, oksit tabakasının aşınmaya katıldığını ve aşındırıcı çelik bilyeden sınırlı malzeme transferinin gerçekleştiğini göstermektedir.





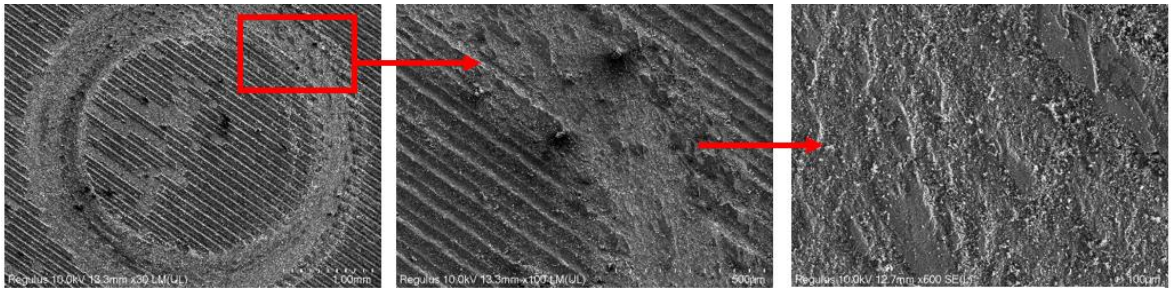
Spectrum 4	
Element	Ağırlık%
O	23.59
Al	1.40
Ti	63.41
V	2.26
Cr	3.18
Fe	6.16
Toplam	100

Spectrum 5	
Element	Ağırlık%
C	0.70
O	28.91
Al	6.98
Ti	39.56
Cr	4.00
Fe	19.86
Toplam	100

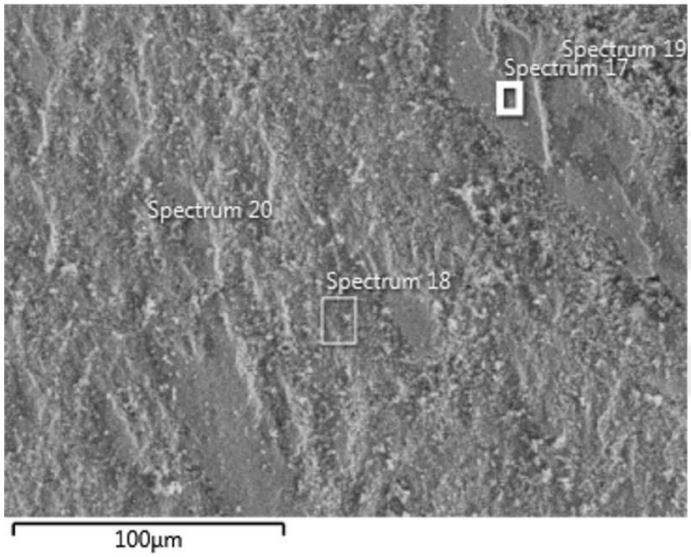
Spectrum 6	
Element	Ağırlık%
C	0.69
O	4.32
Al	1.03
Ti	16.23
V	3.26
Cr	13.25
Mn	4.63
Fe	56.59
Toplam	100

Şekil 4.20. EBM ile üretilmiş L2O numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Şekil 4.20'de EBM ile üretilmiş, önce çukur desen tekstürleme uygulanmış ve ardından oksitleme işlemine tabi tutulmuş L2O numunesine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri sunulmaktadır. Aşınma kanalında çukur lazer yapılarının büyük ölçüde bozulduğu ve oksitleme ile oluşan yüzey tabakasının aşınma sırasında parçalanarak düzensiz yüzey bozulmalarına ve yoğun parçacık birikimlerine yol açtığı gözlenmektedir. EDS analizlerinde yüksek oksijen içeriği ile Fe ve Cr elementlerinin belirlenmesi, oksit tabakasının aşınma sürecine etkin biçimde katıldığını ve aşındırıcı 100Cr6 çelik bilyeden gerçekleşen malzeme transferinin bu numunede daha belirgin olduğunu göstermektedir.



Aşınma Genel | Aşınma Detay | Aşınma Kanalı Detay



Spectrum 17	
Element	Ağırlık%
C	0.14
O	32.67
Al	2.13
Ti	20.58
V	0.86
Cr	7.54
Mn	3.43
Fe	31.72
Ni	0.93
Toplam	100

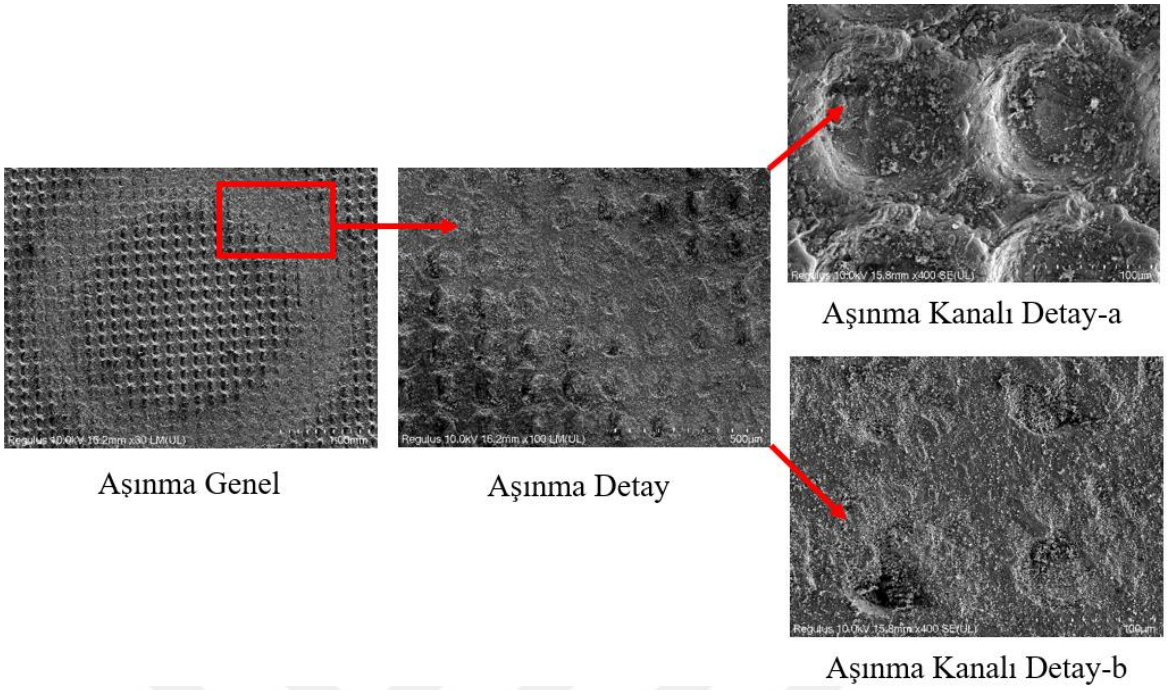
Spectrum 18	
Element	Ağırlık%
C	1.13
O	29.02
Al	3.19
Ti	36.86
Cr	2.04
Mn	1.32
Fe	26.44
Toplam	100

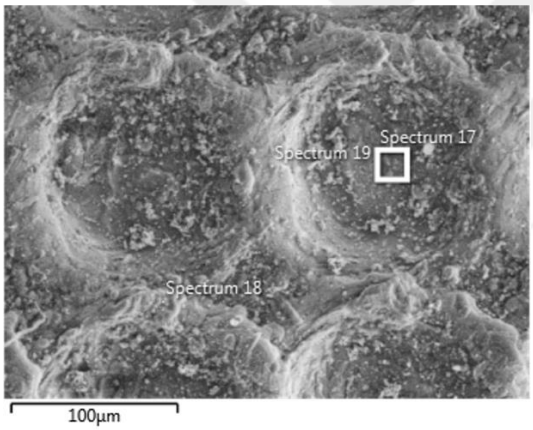
Spectrum 18	
Element	Ağırlık%
C	1.13
O	29.02
Al	3.19
Ti	36.86
Cr	2.04
Mn	1.32
Fe	26.44
Toplam	100

Spectrum 20	
Element	Ağırlık%
C	1.14
O	32.08
Al	1.90
Ti	29.55
V	1.33
Cr	9.57
Mn	3.80
Fe	20.64
Toplam	100

Şekil 4.21. EBM ile üretilmiş OL1 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Şekil 4.21'de EBM ile üretilmiş önce oksitleme, ardından paralel hat yüzey tekstürleme uygulanmış OL1 numunesine ait aşınma sonrası SEM görüntüleri sunulmaktadır. OL1 numunesinde lazer işleminin oksit tabakası üzerinde uygulanması, paralel mikroyapıların daha belirgin ve süreklilik gösteren bir yüzey geometrisi oluşturmasına neden olmuş, bu yapıların aşınma sırasında kısmen korunduğu gözlenmiştir. Buna karşılık L1O numunesinde lazer tekstürlerin oksitleme sonrası yüzey tabakasıyla kaplanması, oksit tabakasının aşınma sırasında daha düzensiz şekilde parçalanmasına yol açmıştır. EDS analizlerinde OL1 numunesinde Fe ve Cr elementlerinin daha sınırlı oranlarda oluşması, lazer işleminin oksit tabakasını kısmen uzaklaştırarak malzeme transferini azaltması ile ilişkilendirilebilir.





Spectrum 17	
Element	Ağırlık%
C	4.28
O	19.61
Al	3.07
Ti	65.61
V	7.29
Mn	0.14
Toplam	100

Spectrum 18	
Element	Ağırlık%
C	2.99
O	14.27
Al	1.88
Ti	31.33
V	2.98
Cr	7.82
Mn	4.27
Fe	23.88
Ni	10.58
Toplam	100

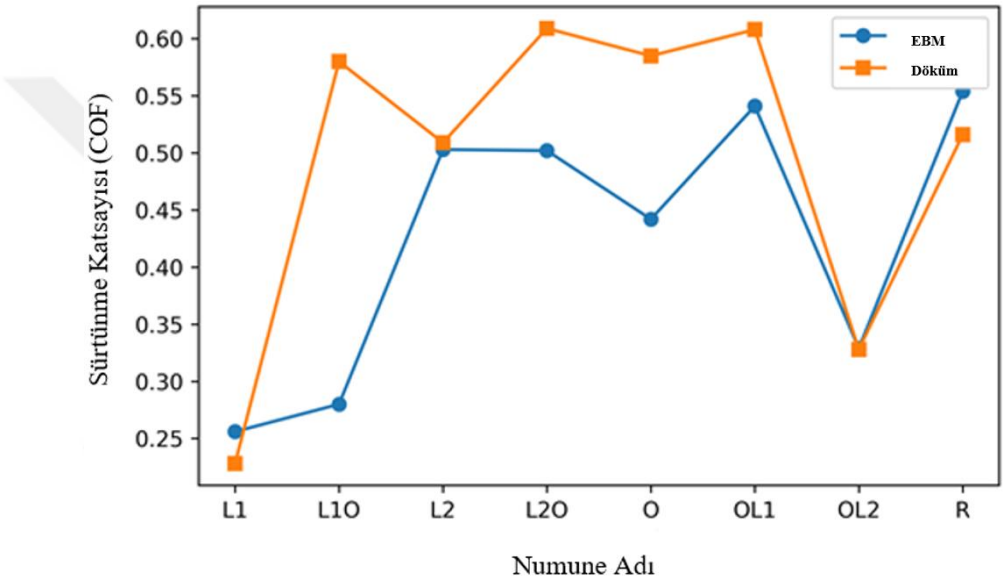
Spectrum 19	
Element	Ağırlık%
C	9.04
O	17.66
Al	4.50
Ti	55.82
V	2.98
Mn	1.48
Fe	8.52
Toplam	100

Şekil 4.22. EBM ile üretilmiş OL2 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Şekil 4.22'de gösterilen OL2 numunesinde oksitleme işleminin lazer tekstürlemeden önce uygulanması, çukur desen tekstürleme sırasında yüzeydeki oksit tabakasının büyük ölçüde yeniden şekillenmesine ve aşınma sırasında daha stabil bir çukur geometrisinin korunmasına neden olmuştur. Buna karşılık L2O numunesinde oksit tabakasının çukur lazer sonrası oluşması, aşınma sırasında bu tabakanın kolayca parçalanmasına ve yüzeyde düzensiz bozulmaların artmasına yol açmıştır. EDS analizlerinde OL2 numunesinde aşındırıcı 100Cr6 çelik bilye kaynaklı Fe ve Cr elementlerinin daha sınırlı oranlarda tespit edilmesi, işlem sırasının malzeme transferi davranışı üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

4.2.3. Sürtünme analizleri

Farklı yüzey modifikasyonlarına sahip döküm ve EBM yöntemleri ile üretilen numunelerin sürtünme katsayısı (COF) davranışları Şekil 4.23'te karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, birçok yüzey modifikasyonlarında döküm numunelerin COF değerlerinin EBM numunelerine kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, üretim yöntemine bağlı olarak oluşan yüzey morfolojisinin sürtünme davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.



Şekil 4.23. Farklı yüzey modifikasyonlarına sahip döküm ve EBM numunelerin sürtünme katsayı değerleri.

L1 yüzey modifikasyonuna sahip EBM yöntemi ile üretilmiş numunede elde edilen COF değerlerinin, döküm numuneye kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, EBM yöntemi ile üretilmiş numunelerin daha homojen bir mikroyapıya sahip olmasıyla ilişkilendirilebilir. Söz konusu mikroyapı, lazerle oluşturulan paralel tekstürlerin tribolojik açıdan daha etkin çalışmasına olanak sağlamıştır. Buna karşılık, döküm numunelerdeki COF artışı, lazer tekstürleme sonrası yüzey pürüzlülüğündeki artış ve buna bağlı gelişen mekanik kilitlenme etkileriyle ilişkilendirilebilir. Önceki çalışmalarda, paralel hat tekstürlemenin kayma yönüne bağlı olarak gerçek temas alanını azalttığı ve sürtünme sırasında yüzeyde mikroskobik boşluklar oluşturarak sürtünme katsayısının düşürülmesine katkı sağladığı bildirilmiştir (Bijani vd., 2018).

L1O yüzey modifikasyonuna sahip numunelerde, üretim yönteminden bağımsız olarak COF değerlerinde artış meydana gelmiştir. Literatürde oksit tabakalarının, özellikle sert ve gevrek karakterde olduklarında, sürtünme sırasında mikro çatlaklar ve aşındırıcı üçüncü cisim oluşumuna yol açabildiği belirtilmektedir. Döküm numunelerde bu artışın daha belirgin olması, oksit tabakasının lazerle oluşturulmuş paralel kanallar içerisinde düzensiz bir şekilde birikmesi ve kayma sırasında ilave direnç oluşturmasıyla açıklanabilir. EBM yöntemi ile üretilmiş numunelerde ise oksit tabakasının yüzey morfolojisine daha uyumlu bir şekilde dağılması nedeniyle COF artışı nispeten sınırlı kalmıştır. L2 numunelerinde ise, her iki üretim yöntemi için de L1 numunelerine kıyasla COF değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu etkinin döküm numunelerde daha baskın hâle gelmesi, çukur yapıların mevcut yüzey pürüzlülüğü ile birlikte gerçek temas alanını artırmasıyla ilişkilendirilebilir. Önceki çalışmalarda, bu tür çukur yüzey tekstürlerinin paralel tekstürlere kıyasla daha yüksek mekanik kilitlenmeye yol açabildiği ve özellikle kuru sürtünme koşullarında COF'u artırabildiği rapor edilmiştir. Örneğin, Wei vd. (2022) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, mikro çukur tekstürlerin sürtünme kontrolü üzerindeki etkileri incelenmiş olup, çukur derinliği ve dağılımının temas alanını ve dolayısıyla sürtünme katsayısını etkilediği rapor edilmiştir. Özellikle, daha derin ve sık dağılımlı çukurların temas alanını artırarak mekanik kilitlenmeyi teşvik ettiği ve bu durumun COF değerlerinde artışa yol açtığı belirtilmiştir.

Sadece oksitleme uygulanan numunelerde, her iki üretim yöntemi için orta seviyelerde COF değerleri elde edilmiştir. Önceki çalışmalar, oksit tabakalarının tek başına uygulandığında sürtünme davranışını sınırlı ölçüde değiştirdiğini, ancak tabakanın homojenliğini etkilemede belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık, çukur geometrisinin oksit tabakası ile birlikte bulunmasının aşındırıcı partikül birikimini artırarak mikro kesme mekanizmalarını güçlendirdiği ifade edilmektedir (Wei vd., 2022). Bu sinerjik etki, döküm numunelerde sürtünme katsayısının belirgin şekilde yükselmesine neden olmuştur. Bu çalışma bulgularına göre, L2O yüzey modifikasyonuna sahip numunelerde, özellikle döküm yöntemi ile üretilen numunede en yüksek sürtünme katsayısı değerlerine ulaşılmıştır.

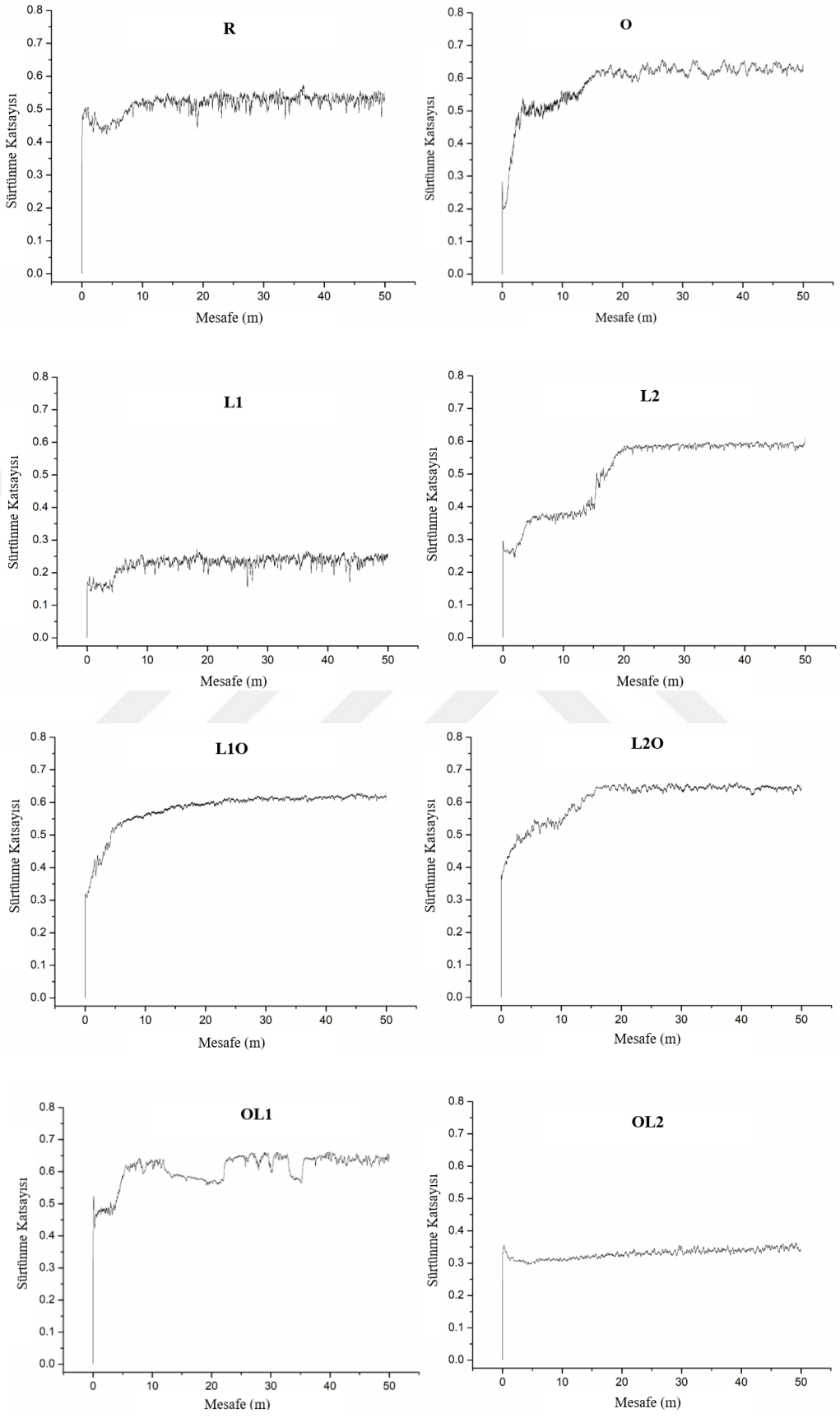
EBM yöntemi ile üretilmiş numunelerin döküm numunelere kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı değerleri sergilemesi, oksit tabakasının bu yüzeylerde daha dengeli ve

uyumlu bir şekilde oluştuğunu göstermektedir. OL1 uygulaması sonrasında ise, her iki üretim yöntemi için de sürtünme katsayısı değerlerinde artış gözlenmiştir. Moldovan vd. (2025), AISI 430 paslanmaz çelik üzerinde farklı lazer yüzey tekstürleme desenlerini incelemiş ve lazer işleminde tekrarlama sayısının, önceden oluşmuş oksit tabakasını kısmen bozarak yüzeyde lokal oksit kesintilerine yol açtığını rapor etmiştir. Bu bozulmaların, lazer-malzeme etkileşimi sonucunda mikro çatlak oluşumu ve düzensiz yüzey topografisi ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. Bu bulgular ışığında, önceden oluşturulmuş oksit tabakasının lazer işlemi sırasında kısmen bozulmasının veya yeniden şekillenmesinin, yüzeyde düzensiz oksit–pürüzlülük kombinasyonları oluşturabileceği ve bunun özellikle döküm numunelerde daha yüksek COF değerleri ile sonuçlanabileceği değerlendirilmektedir.

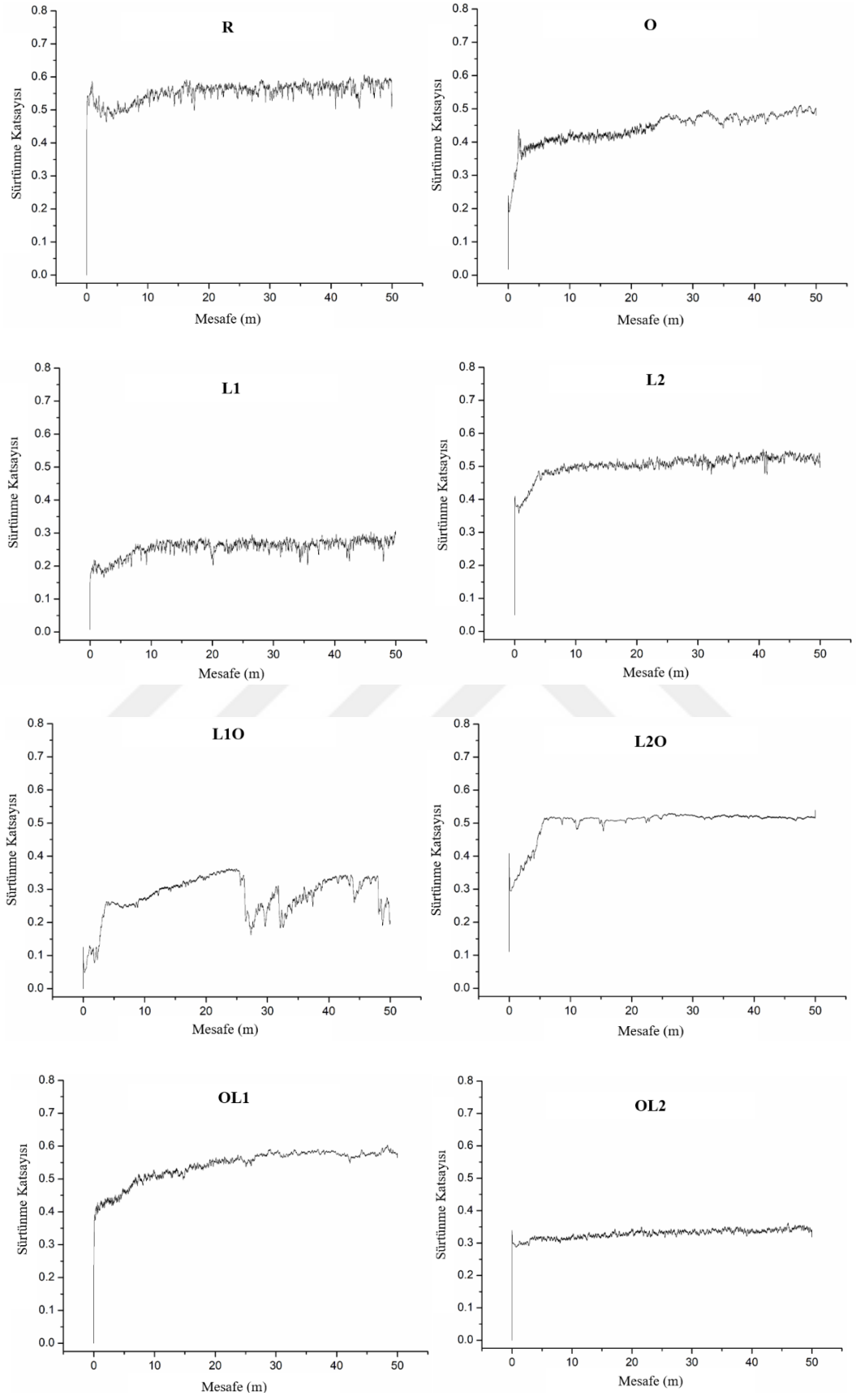
Buna karşılık, OL2 numunelerinde sürtünme katsayısında belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Oksit tabakası sonrasında oluşturulan çukur yapılar, sürtünme sırasında oluşan aşınma ürünlerini hapsederek üçüncü cisim etkisini azaltmıştır. Elde edilen bulgular, bu kombinasyonun her iki üretim yöntemi için de sürtünme katsayısını azaltıcı bir etki oluşturduğunu göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, EBM yöntemi ile üretilmiş numunelerin farklı yüzey modifikasyonlarında döküm numunelere kıyasla daha düşük veya karşılaştırılabilir sürtünme katsayısı değerleri sergilediği görülmektedir. Bu sonuç, EBM yöntemi ile elde edilen yüzey morfolojisinin lazer tekstürleme ve oksitleme işlemleriyle daha uyumlu çalıştığını ve tribolojik performans açısından avantaj sağladığını gösterebilir.

Bu genel karşılaştırmanın ardından, döküm yöntemi ile üretilmiş numunelerin sürtünme katsayısının mesafeye bağlı değişimi Şekil 4.24'te, EBM yöntemi ile üretilmiş numunelerin sürtünme katsayısının mesafeye bağlı değişimi ise Şekil 4.25'te sunulmuştur. Bu grafikler incelendiğinde, numunelerde testin başlangıç aşamasında kısa bir alışma (run-in) bölgesi bulunduğu ve bu bölgeyi takiben sürtünme katsayısının belirli bir seviyede kararlı bir rejime ulaştığı görülmektedir. Ancak kararlı rejimde elde edilen sürtünme katsayısı seviyeleri ve dalgalanma karakteri, uygulanan yüzey modifikasyonuna bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bazı yüzey modifikasyonlarında sürtünme katsayısının daha yüksek ve dalgalı bir seyir izlediği, bazı durumlarda ise daha düşük ve nispeten daha stabil bir davranış sergilediği gözlenmiştir.



Şekil 4.24. Döküm yöntemi ile üretilmiş numunelerin sürtünme katsayısının mesafeye bağlı değişimi.



Şekil 4.25. EBM yöntemi ile üretilmiş numunelerin sürtünme katsayısının mesafeye bağlı değişimi.

Şekil 4.26'da farklı yüzey modifikasyonlarına sahip EBM ve döküm yöntemi ile üretilmiş numunelerin aşınma hacimleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Aşınma hacimleri, özgül aşınma oranları esas alınarak ve tüm deneylerde sabit tutulan normal yük ile kayma mesafesi dikkate alınarak hesaplanmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, döküm yöntemi ile üretilen numunelerin aşınma hacimlerinin, EBM yöntemi ile üretilen numunelere kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu eğilim, L1, L2, L2O, OL1 ve R numunelerinde açık şekilde gözlenmektedir. Döküm numunelerde artan aşınma hacmi, üretim yöntemi kaynaklı daha heterojen yüzey yapısı ve görece yüksek yüzey pürüzlülüğünün, aşınma sırasında gerçek temas alanını artırmasıyla ilişkilendirilebilir.

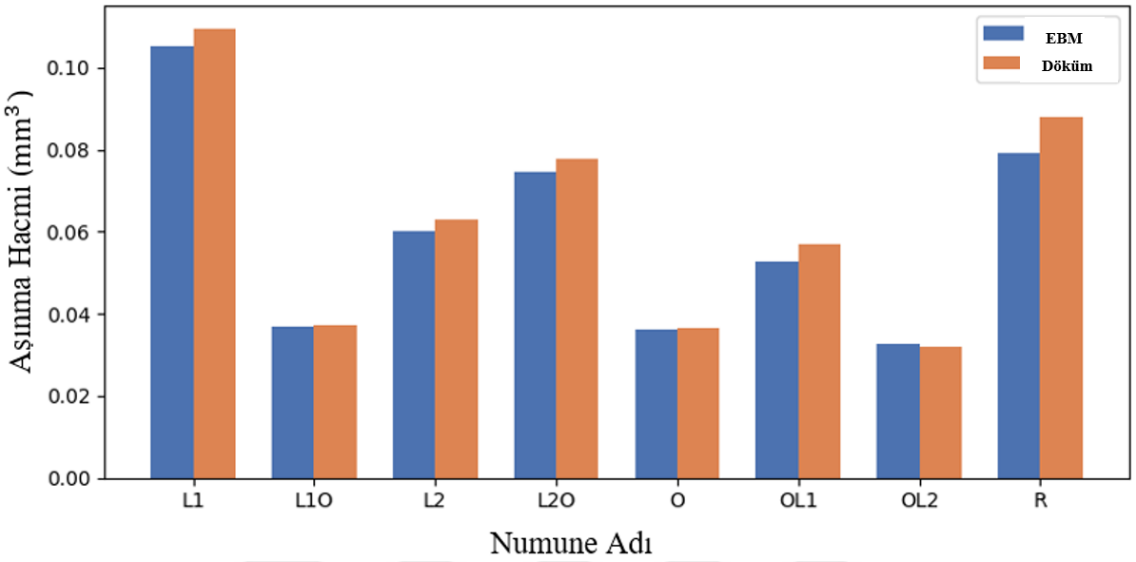
L1 ve L1O yüzey modifikasyonları incelendiğinde, her iki üretim yöntemi için de L1O numunelerinde aşınma hacminin belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum, paralel lazer tekstürleme sonrası uygulanan oksitleme işleminin aşınma direncini artırıcı bir etki oluşturduğunu göstermektedir. Ancak aynı yüzey modifikasyonu için dahi, döküm numunelerin aşınma hacimlerinin EBM numunelere kıyasla daha yüksek seviyelerde kaldığı dikkat çekmektedir.

L2 ve L2O numunelerinde, aşınma hacimlerinin L1 ve L1O'ya göre daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Çukur desen tekstürlemenin, özellikle döküm yüzeylerde mekanik kilitlenme ve mikro kesme mekanizmalarını güçlendirmesi nedeniyle aşınma hacmini artırdığı söylenebilir. L2O numunelerinde ise oksitleme işleminin etkisiyle aşınma hacminde kısmi bir artış gözlenmiş, bu artışın döküm numunelerde daha belirgin olduğu tespit edilmiştir.

Yalnızca oksitleme uygulanan O numunelerinde, her iki üretim yöntemi için de görece düşük ve birbirine yakın aşınma hacimleri elde edilmiştir. Bu durum, oksit tabakasının aşınma davranışını belirli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. OL2 numuneleri ise tüm yüzey modifikasyonları arasında en düşük aşınma hacmi değerlerini sergilemiş olup, bu sonuç oksitleme sonrası uygulanan çukur desen tekstürlemenin aşınma ürünlerini hapsederek aşınma mekanizmasını sınırlandırdığına işaret etmektedir.

Genel olarak sonuçlar, EBM üretim yöntemi ile elde edilen numunelerin, farklı yüzey modifikasyonlarında döküm numunelere kıyasla daha düşük veya karşılaştırılabilir aşınma

hacimleri sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu durum, EBM üretim yöntemi ile oluşan özgün yüzey morfolojisinin lazer tekstürleme ve oksitleme işlemleriyle daha uyumlu çalıştığını ve aşınma direnci açısından avantaj sağladığını göstermektedir.



Şekil 4.26. Farklı yüzey modifikasyonlarına sahip EBM ve döküm numunelerin aşınma hacimlerinin karşılaştırmalı olarak gösterimi.

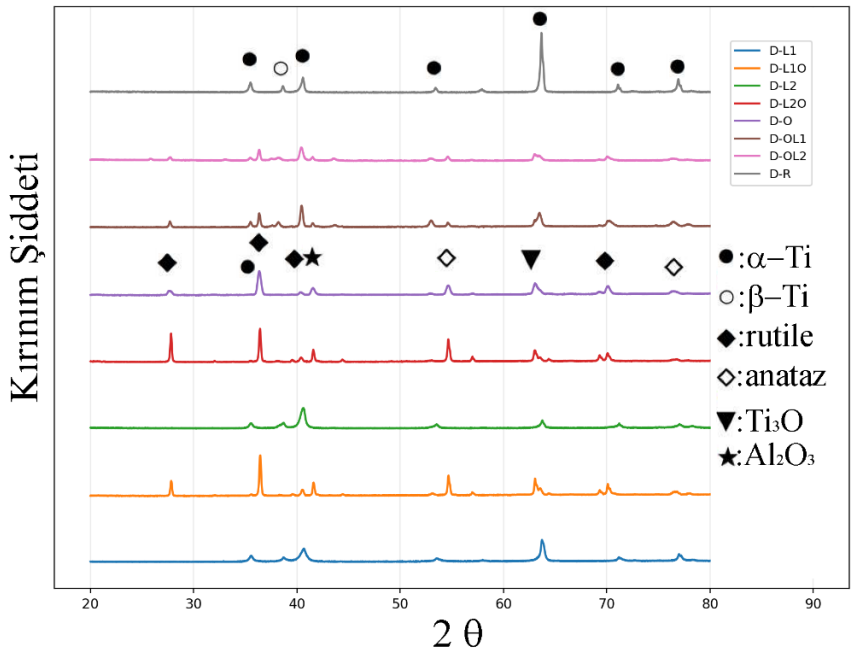
Çizelge 4.2. Farklı yüzey işlemlerine ait numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma hacmi değerleri.

Numune Kodu	COF Döküm	COF EBM	Aşınma Hacmi Döküm (mm³)	Aşınma Hacmi EBM (mm³)
R	0.51 ±0.06	0.55 ±0.06	0.09 ±0.007	0.08 ±0.006
O	0.59 ±0.07	0.44 ±0.05	0.037 ±0.004	0.036 ±0.003
L1	0.23 ±0.03	0.26 ±0.03	0.12 ±0.002	0.11 ±0.002
L2	0.51±0.05	0.50 ±0.05	0.06 ±0.005	0.062 ±0.005
L1O	0.58 ±0.06	0.28 ±0.03	0.037 ±0.004	0.037 ±0.004
L2O	0.61 ±0.06	0.50 ±0.05	0.075 ±0.007	0.07 ±0.007
OL1	0.61 ±0.06	0.54 ±0.06	0.055 ±0.006	0.05 ±0.005
OL2	0.33 ±0.04	0.33 ±0.03	0.032 ±0.003	0.033 ±0.003

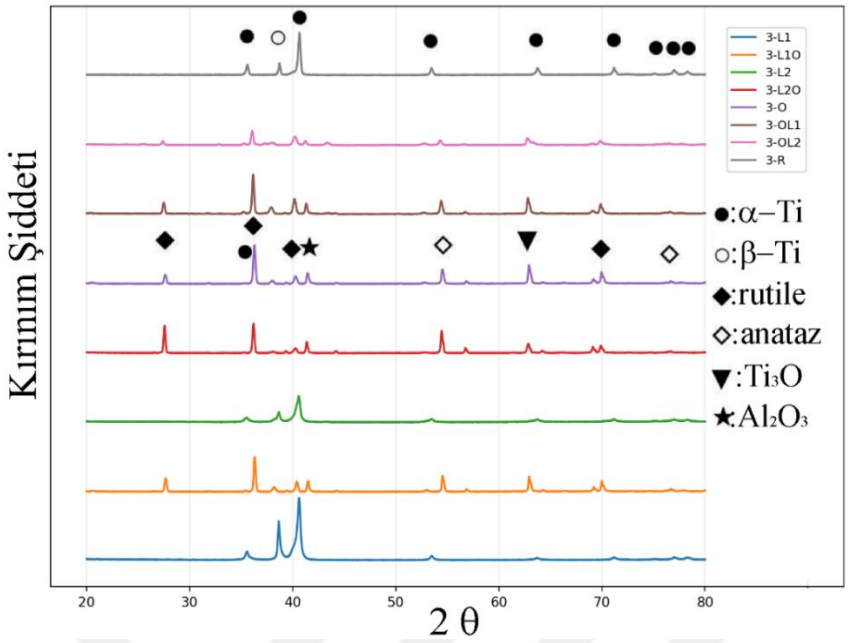
4.2.4. XRD Analizleri

Bu bölümde, çalışmada üretilen ve farklı yüzey modifikasyonlarına tabi tutulan numunelerin faz bileşimleri ve kristal yapıları, X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. XRD analizleri, yüzey işlemleri ve üretim yöntemlerinin malzemenin kristal yapısı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen XRD desenleri, numunelerde bulunan fazların tanımlanmasında kullanılmış ve pik konumları ile şiddetleri literatürde rapor edilen standart kartlar ile karşılaştırılmıştır. Böylece, yüzey modifikasyonları ve üretim yöntemlerinin yeni faz oluşumuna veya mevcut fazların değişimine yol açıp açmadığı değerlendirilmiştir.

Döküm yöntemi ile üretilen Ti6Al4V numunelerine ait XRD analizi Şekil 4.27'de, EBM eklemeli imalat yöntemi ile üretilen Ti6Al4V numunelerine ait XRD desenlerine Şekil 4.28' de yer verilmiştir. Şekiller üzerindeki semboller, şeklin daha rahat okunabilmesi için sadece Referans (R) ve Oksitlenmiş (O) numunelerin üzerinde gösterilmiştir. Referans malzemesine benzer şekilde piklerin yer aldığı L1 ve L2 numuneleri ile oksitlenmiş numuneye benzer şekilde piklerin yer aldığı OL1, OL2, L1O ve L2O numuneleri görülmektedir.



Şekil 4.27. Döküm yöntemi ile üretilen Ti6Al4V numunelerine ait XRD analizi



Şekil 4.28. EBM eklemeli imalat yöntemi ile üretilen Ti6Al4V numunelerine ait XRD analizi

XRD analizleri incelendiğinde, referans (R) ve yalnız lazer tekstürlü (L) numunelerde baskın olarak α-Ti (HCP) fazına ait karakteristik kırınım piklerinin görüldüğü, bunun yanında bazı numunelerde Ti6Al4V alaşımının çift fazlı (α+β) yapısı nedeniyle β-Ti (HMK) fazına ait zayıf piklerin eşlik edebildiği gözlenmektedir. Bu durum, Ti6Al4V'nin oda sıcaklığında α fazının baskın olduğu ve belirli oranlarda β fazı içerebildiği bilinen yapısıyla uyumludur.

Buna karşılık, termal oksidasyon uygulanmış numunelerde (O) ek olarak TiO_2 oksit fazına ait piklerin belirginleştiği görülmektedir. Özellikle rutile TiO_2 için ayırt edici olan düşük açılı bölgedeki (yaklaşık 25–30° aralığı) ve orta açılardaki piklerin şiddet artışı, yüzeyde oluşan oksit filminin kristallenmesi ile ilişkilidir. Benzer şekilde literatürde, termal oksidasyon sonrası XRD desenlerinin temel olarak "rutile TiO_2 + α-Ti" bileşiminden oluştuğu belirtilmekte, ayrıca sıcaklık arttıkça rutile piklerinin daha belirgin hale geldiği raporlanmaktadır.

Kombine işlem uygulanan numunelerde işlem sırasına bağlı olarak oksit sinyalinin değiştiği dikkat çekmektedir. Lazer işleminden sonra oksidasyonun uygulandığı numunelerde (LO) numunelerinde rutile TiO_2 pikleri genel olarak daha belirgin olup, bu

durum lazer tekstürlemenin oluşturduğu mikro-çukur/topografyanın oksidasyon sırasında aktif yüzey alanını ve difüzyon/nükleasyon bölgelerini artırarak oksit büyümesini kolaylaştırmasıyla açıklanabilir. Literatürde de oksidasyon sıcaklığı yükseldikçe rutile piklerinin ortaya çıktığı ve güçlendiği belirtilmektedir (Sun vd., 2016). Oksidasyon işleminden sonra lazer işleminin uygulandığı numunelerinde (OL) ise rutile piklerinin göreli şiddetinin düşmesi mümkündür. Bunun temel nedeni, lazer işleminin oksit filmi üzerinde lokal ergitme/yeniden katılaşma veya kısmi uzaklaştırma etkisi oluşturabilmesi ve sonuçta XRD'de oksit tabakanın etkin katkısını azaltabilmesidir. Bu nedenle OL numuneleri, oksit varlığına rağmen metalik α-Ti piklerinin daha baskın göründüğü desenler üretebilir. Döküm yöntemi ile oluşturulan numuneler ile EBM yöntemi oluşturulan numunelerin faz türleri aynı eğilimi göstermesine rağmen, oksit piklerinin göreli baskınlığı gruplar arasında değişmektedir. Bunu nicel olarak takip etmek için 27.4° civarındaki rutile piki ile 35.1° civarındaki α-Ti pikinin tepe yükseklikleri oranlanmıştır (Rutile/α indeksi). Bu indeks, oksit tabakasının XRD desenine katkısının pratik bir göstergesidir.

L numuneleri her iki grupta da düşük oksit katkısı göstermiştir (EBM ortalama ≈ 0.162, Döküm ortalama ≈ 0.214). O numunelerinde oksit katkısının arttığı gözlenmiş olup bu değerler EBM için ortalama ≈ 9.57, döküm için ise ortalama ≈ 7.51 olarak belirlenmiştir. LO numunelerinde oksit katkısı daha da artmış, ancak bu artışın EBM grubunda (ortalama ≈ 22.48) döküm grubuna (ortalama ≈ 4.56) kıyasla çok daha belirgin olduğu görülmüştür. Buna karşılık, OL numuneleri her iki grupta da daha düşük oksit katkısı sergilemiş olup ortalama değerler EBM için ≈ 3.82 ve döküm için ≈ 1.81 olarak tespit edilmiştir.

Bu sonuçlar, her iki grupta işlem mantığının aynı çalıştığını fakat oksit tabakanın göreli baskınlığının özellikle LO koşulunda gruplar arasında belirgin şekilde farklılaştığını göstermektedir. Bu tür farklar; başlangıç yüzey durumu (pürüzlülük, kalıntı oksit), lazerle oluşan mikrogeometri yoğunluğu, oksit tabaka kalınlığı/kristalleşmesi ve ölçüm koşullarına bağlı difraksiyon geometrisi gibi parametrelerden etkilenebilir. Özellikle yüzeyde lazer ile işlenmesinden sonra yüzey pürüzlülüğü mikro boşluklara bağlı artmıştır. Yüzey alanının artışı ile oksidasyona uğrayabilecek alan artışına bağlı olarak rutile piklerinde artış olduğu düşünülmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, döküm ve EBM eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen Ti6Al4V alaşımının tribolojik davranışı üzerinde farklı yüzey modifikasyonlarının etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Yüzey modifikasyonu kapsamında paralel hat yüzey tekstürleme, çukur desen yüzey tekstürleme, termal oksidasyon ve bu işlemlerin farklı sıralarla birlikte uygulanması değerlendirilmiştir. Tribolojik performans, sürtünme katsayısı (COF) ve aşınma hacmi parametreleri esas alınarak karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüzey modifikasyonunun türünün yanı sıra uygulama sırasının da tribolojik davranış üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu açıkça ortaya koymuştur. İşlemsiz (R) numunelerde, döküm ve EBM üretim yöntemleri için sırasıyla yaklaşık 0.51 ve 0.55 COF değerleri ölçülmüş olup, buna eşlik eden aşınma hacimleri yaklaşık döküm yönteminde 0.09 mm^3, EBM yönteminde 0.08 mm^3 seviyelerinde gerçekleşmiştir. Bu bulgular, yüzey modifikasyonu uygulanmayan numunelerde sürtünme ve aşınma davranışının olumsuz olduğunu ve yüzey mühendisliği yaklaşımlarının tribolojik performansın iyileştirilmesinde gerekli olduğunu göstermektedir.

Paralel hat yüzey tekstürleme (L1) uygulanan numunelerde sürtünme katsayısında belirgin bir düşüş elde edilmiş; COF değerleri döküm numunede yaklaşık 0.23, EBM numunede ise yaklaşık 0.26 seviyelerine kadar gerilemiştir. Ancak bu numunelerde aşınma hacminin sırasıyla yaklaşık 0.12 mm^3 ve 0.11 mm^3 seviyelerinde kalması, paralel hat lazer yüzey tekstürlemenin sürtünmenin azaltılmasında etkili olmasına karşın, aşınma direncinin artırılması açısından tek başına yeterli olmadığını ortaya koymuştur.

Çukur desen yüzey tekstürleme (L2) uygulanan numunelerde COF değerlerinin döküm ve EBM numuneler için sırasıyla yaklaşık 0.51 ve 0.50 olduğu belirlenmiştir. Paralel hat lazer yüzey tekstürlemeye kıyasla daha yüksek sürtünme katsayıları elde edilmesi, mikro-çukur yapıların temas sırasında mekanik kilitlenmeyi artırmasıyla ilişkilendirilmiştir. Buna karşın aşınma hacminin yaklaşık 0.06–0.062 mm^3 seviyelerine düşmesi, çukur yapıların aşınma sırasında oluşan döküntüleri hapsederek aşınma davranışını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

Termal oksidasyon işleminin tek başına uygulandığı numunelerde (O), COF değerleri döküm numunelerde yaklaşık 0.59, EBM numunelerde ise yaklaşık 0.44 olarak ölçülmüştür. Aşınma hacminin her iki üretim yöntemi için yaklaşık 0.036–0.037 mm³ seviyelerine düşmesi, yüzeyde oluşan oksit tabakasının aşınmaya karşı koruyucu bir bariyer görevi üstlendiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, oksit tabakasının görece kırılgan yapısı nedeniyle sürtünme davranışında sağlanan iyileşmenin sınırlı kaldığı değerlendirilmiştir.

Paralel hat yüzey tekstürleme ve termal oksidasyon işlemlerinin birlikte uygulanması durumunda, işlem sırasının tribolojik davranış üzerinde önemli farklılıklara yol açtığı görülmüştür. Lazer yüzey tekstürleme sonrası termal oksidasyon uygulanan L1O numunelerinde, COF değerleri döküm numunelerde yaklaşık 0.58, EBM numunelerde ise yaklaşık 0.28 olarak ölçülmüş; aşınma hacmi her iki üretim yöntemi için yaklaşık 0.037 mm³ seviyesinde gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, oksidasyonun lazer tekstürleme sonrasında uygulanmasının aşınma direncini artırmasına karşın, özellikle döküm numunelerde sürtünme katsayısını olumsuz etkileyebildiğini göstermektedir.

Buna karşılık, termal oksidasyon sonrası paralel hat yüzey tekstürleme uygulanan OL1 numunelerinde COF değerlerinin döküm ve EBM numuneler için sırasıyla yaklaşık 0.61 ve 0.54 olduğu belirlenmiştir. Aşınma hacminin ise döküm numunesinde yaklaşık 0.055 mm³, EBM numunesinde 0.050 mm³ seviyelerinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu durum, lazer işleminin oksit tabakasını yer yer yeniden şekillendirmesi sonucunda sürtünme davranışının olumsuz yönde etkilenebildiğini, ancak aşınma direncinin işlemsiz yüzeye kıyasla iyileştiğini ortaya koymaktadır.

Lazer yüzey tekstürleme ve termal oksidasyon işlemlerinin çukur desen yüzey tekstürleme ile birleştirildiği OL2 numuneleri, incelenen tüm yüzey durumları arasında en üstün tribolojik performansı sergilemiştir. Bu numunelerde COF değeri her iki üretim yöntemi için yaklaşık 0.33 olarak ölçülmüş; aşınma hacmi döküm numunel yaklaşık 0.032 mm³, EBM numunesinde ise yaklaşık 0.033 mm³ seviyesinde gerçekleşmiştir. Bu performans, mikro-çukur yapıların aşınma ürünlerini hapsederek üçüncü cisim aşınmasını sınırlandırması ve oksit tabakasının yüzey üzerinde koruyucu bir rol üstlenmesiyle açıklanabilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, EBM yöntemiyle üretilmiş numunelerin, döküm numunelere kıyasla hemen her yüzey modifikasyonu koşulunda daha düşük veya karşılaştırılabilir COF değerleri ve daha düşük aşınma hacimleri sergilediği belirlenmiştir. Bu durum, eklemeli imalatla elde edilen yüzeylerin lazer yüzey tekstürleme ve termal oksidasyon işlemlerine daha uyumlu bir yanıt verdiğini ve tribolojik açıdan avantaj sunduğunu göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar doğrultusunda, Ti6Al4V alaşımının tribolojik performansının iyileştirilmesi amacıyla lazer yüzey tekstürleme ve termal oksidasyon işlemlerinin birlikte ve uygun işlem sıralarıyla uygulanması önerilmektedir. Özellikle oksidasyon sonrası çukur desen yüzey tekstürleme yaklaşımının, sürtünme ve aşınmanın kritik olduğu mühendislik uygulamaları için etkili bir yüzey iyileştirme yöntemi olduğu sonucuna varılmıştır. Gelecek çalışmalarda, farklı yük ve kayma hızı koşullarının incelenmesi, oksit tabaka kalınlığının optimize edilmesi ve yağlı sürtünme rejimlerinin değerlendirilmesiyle bu yaklaşımın endüstriyel uygulamalara daha etkin biçimde uyarlanabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Akdaş, Y. F. (2006). Termal Oksidasyon Yöntemi İle Cp-ti Ve Ti6al4v Alaşımının Yüzey Modifikasyonu. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi*.

Akıllılar, H. (2020). Elektron Işını ile Ergitme Yöntemi ile Ti-6Al-4V İçin Isıl Modellemesi ve Ergiyik Havuzunun Geometrik İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi* .

Ammosova, L., Mönkkönen, K., & Suvanto, M. (2020). Precise fabrication of microtextured stainless steel surfaces using metal injection moulding. *Precision Engineering, 62*, 89-94. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.11.012

Aniołek, K. (2017). The influence of thermal oxidation parameters on the growth of oxide layers on titanium. *Vacuum, 144*, 94-100. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.07.023

Anno, J., Walowit, J., & Allen, C. (1968). Microasperity Lubrication. *Journal of Lubrication Technology, 90*(2), 351-355. https://doi.org/10.1115/1.3601568

Arslan, A., Masjuki, H., Kalam, M., Varman, M., Mufti, R., & Mosarof, M. (2016). Surface Texture Manufacturing Techniques and Tribological Effect of Surface Texturing on Cutting Tool Performance: A Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences , 41*(6), 447-481. https://doi.org/10.1080/10408436.2016.1186597

Ashrafizadeh, A., & Ashrafizadeh, F. (2009). Structural features and corrosion analysis of thermally oxidized titanium. *Journal of Alloys and Compounds, 480*(2), 849-852. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.02.079

ASTM International, A. (2015). ASTM F52900–15 : Standard terminology for additive manufacturing—General principles—Terminology. ASTM International.

Ayday, A. (2018). Mikro Ark oksidasyon işlemi ile kaplanan Ti6Al4V alaşımının yüzey karakterizasyonu ve korozyon özelliklerinin incelenmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22*(2), 243-247.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Ayday, A. (2020). Ti6Al4V Alaşımı ve Saf Titanyum (Cp-Ti) Oksidasyon Kinetiği. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 7*(2), 402-409. https://doi.org/10.31202/ecjse.648678

Baeslack, W., Davis, J., & Cross, C. (1993). Selection and Weldability of Conventional Titanium Alloys. *ASM Handbook*, 507 - 523. https://doi.org/10.31399/asm.hb.v06.a0001415

Balaban, N. (2007). Titanyum ve Alaşımlarının Biyouyumluluklarının İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi*.

Basher, M., Mishan, R., Biswas, S., Hossain, M., Akand, M., & Matin, M. (2019). Study and analysis the Cu nanoparticle assisted texturization forming low reflective silicon surface for solar cell application. *AIP Advances, 9*(7). https://doi.org/10.1063/1.5109003

Bathe, R., Krishna, V., Nikumb, S., & Padmanabham, G. (2014). Laser surface texturing of gray cast iron for improving tribological behavior. *Applied Physics A, 117*, 117–123. https://link.springer.com/article/10.1007/s00339-014-8281-y

Baumgart, P., Krajnovich, D., Nguyen, T., & Tam, A. (1995). A new laser texturing technique for high performance magnetic disk drives. *IEEE Transactions on Magnetics, 31*(6), 2946 - 2951. https://doi.org/10.1109/20.490199

Bijani, D., Deladi, E., Akchurin, A., De Rooij , M., & Schipper, D. (2018). The Influence of Surface Texturing on the Frictional Behaviour of Parallel Sliding Lubricated Surfaces under Conditions of Mixed Lubrication. *Lubricants, 6*(4), 91. https://doi.org/10.3390/lubricants6040091

Boidi, G., Tertuliano, I., Profito, F., Rossi, W., & Machado, I. (2020). Effect of laser surface texturing on friction behaviour in elastohydrodynamically lubricated point contacts under different sliding-rolling conditions. *Tribology International, 149*, 105613. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.021

KAYNAKLAR DİZİNİ

Borgioli, F., Galvanetto, E., Iozzelli, F., & Pradelli, G. (2005). Improvement of wear resistance of Ti–6Al–4V alloy by means of thermal oxidation. *Materials Letters, 59*(17), 2159-2162. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.02.054

Boyer, R. (1996). An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials Science and Engineering: A, 213*(1), 103-114. https://doi.org/10.1016/0921-5093(96)10233-1

Chang , Y.-Y., Zhang, J.-H., & Huang , H.-L. (2018). Effects of Laser Texture Oxidation and High-Temperature Annealing of TiV Alloy Thin Films on Mechanical and Antibacterial Properties and Cytotoxicity. *Materials, 11*(12). https://doi.org/10.3390/ma11122495

Chaturvedi, M. (2020). *Welding and Joining of Aerospace Materials.*

Chen, Q., & Thouas, G. (2015). Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering: R: Reports, 87*, 1-57. https://doi.org/10.1016/j.mser.2014.10.001

Chen, Q., Zhang, J., Huang, A., & Wei, P. (2021). Study on Wear Resistance of Ti-6Al-4V Alloy Composite Coating Prepared by Laser Alloying. *Applied Sciences, 11*(1), 446. https://doi.org/10.3390/app11010446

Chichkov, B., Momma, C., Nolte, S., Alvensleben, F., & Tünnermann, A. (1996). Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. *Applied Physics A, 63*, 109–115.

Conradi, M., Sever, T., Kocijan, A., & Gregorčič, P. (2019). Short- and Long-Term Wettability Evolution and Corrosion Resistance of Uncoated and Polymer-Coated Laser-Textured Steel Surface. *9*(9), 592. https://doi.org/10.3390/coatings9090592

Çakar, Y. (2006). Toz enjeksiyon kalıplama ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçalarda işlem, yapı ve özellik ilişkileri. *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi*.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Çevirme, İ. İ. (2025). Eklemeli İmalatta EBM Yöntemiyle Üretilen Ti6Al4V Malzemenin Kalibrasyon ve Doğrulanması Sonrası Delik Delme Parametrelerinin İncelenmesi. *Yüksek LİSans Tezi Marmara Üniversitesi*.

Çiftçi, İ., & Gökçe , H. (2019). Ti6Al4V Titanyum Alaşımının Delinmesinde Delme Yönteminin Aşınmaya Etkisinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi, 22*(3), 627 - 631. https://doi.org/10.2339/politeknik.450289

Dai, D., Gu, D., Zhang, H., Xiong, J., Ma, C., Hong, C., & Poprawe, R. (2018). Influence of scan strategy and molten pool configuration on microstructures and tensile properties of selective laser melting additive manufactured aluminum based parts. *Optics & Laser Technology, 99*, 91-100. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.08.015

Demirel, M., & Karaağaç, İ. (2021). Titanyum Alaşımlarının Mikroyapı ve Şekillendirilebilirliğine Sıcaklığın Etkileri. *Duzce University Journal of Science and Technology, 9*(3), 192 - 207. https://doi.org/10.29130/dubited.853833

Donachie, M. J. (2000). *Titanium: A Technical Guide.*

Dutta, B., & Froes, F. (2017). The Additive Manufacturing (AM) of titanium alloys. *Metal Powder Report, 72*(2), 96-106. https://doi.org/10.1016/j.mprp.2016.12.062

Estupinán-López, F., Orquiz-Muela, C., Gaona-Tiburcio, C., Cabral-Miramontes, J., Bautista-Margulis, R., Nieves-Mendoza, D., Maldonado-Bandala, E., Almeraya-Calderón, F., & Joe Lopes, A. (2023). Oxidation Kinetics of Ti-6Al-4V Alloys by Conventional and Electron Beam Additive Manufacturing. *Materials, 16*(3), 1187. https://doi.org/10.3390/ma16031187

Etsion, I. (2004). Improving Tribological Performance of Mechanical Components by Laser Surface Texturing. *Tribology Letters, 17*(4), 733-737. https://doi.org/10.1007/s11249-004-8081-1

Etsion, I., & Burstein, L. (1996). A Model for Mechanical Seals with Regular Microsurface Structure. *Tribology Transactions, 39*(3), 677-683. https://doi.org/10.1080/10402009608983582

KAYNAKLAR DİZİNİ

Etsion, I., Halperin, G., Brizmer, V., & Kligerman , Y. (2004). Experimental Investigation of Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearings. *Tribology Letters, 17*(2), 295–300.

Ezhilmaran, V. (2022). Experimental analysis of Nd3+:YAG laser-assisted ablation on piston ring surface in an environmentally friendly underwater ambiance. *Journal of Manufacturing Processes, 76*, 311-319. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.032

Ezugwu, E., & Wang, Z. (1997). Titanium alloys and their machinability—a review. *Journal of Materials Processing Technology, 68*(3), 262-274. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)00030-1

Froes , F., & Boyer, R. (2019). *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry.* https://doi.org/10.1016/C2017-0-00712-7

Gachot, C., Rosenkranz, A., Reinert, L., Ramos-Moore, E., Souza, N., Müser, M., & Mücklich, F. (2013). Dry Friction Between Laser-Patterned Surfaces: Role of Alignment, Structural Wavelength and Surface Chemistry. *Tribology Letters, 49*, 193–202.

García-Fernández, J., Salguero, J., Vázquez-Martínez, J., Sol, I., & Batista, M. (2025). Influence of laser surface texture orientation on the tribological behavior of the WC-Co/Ti6Al4V pair in dry and lubricated conditions. *Wear, 571*(205852). https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205852

García-Rueda, A., Guzmán-Castillo, D., García-González, L., Zamora-Peredo, L., & Hernández-Torres, J. (2022). Surface modification of a Ti6Al4V alloy by thermal oxidation to improve its tribological properties. *Materials Letters, 317*(132082). https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132082

Gemelli, E., & Camargo, N. (2007). Oxidation kinetics of commercially pure titanium. *Matéria (Rio de Janeiro)* , 525-531. https://doi.org/10.1590/S1517-70762007000300014

KAYNAKLAR DİZİNİ

Genna , S., & Rubino, G. (2020). Laser Finishing of Ti6Al4V Additive Manufactured Parts by Electron Beam Melting. *Applied Sciences, 10*(1), 183. https://doi.org/10.3390/app10010183

Gökdemir, Y. (2005). Saf Titanyum ve Ti6Al4V Alaşımının Yüksek Sıcaklıkta Oksidasyon Davranışı. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi*.

Greiner, C., Schäfer, M., Popp, U., & Gumbsch, P. (2014). Contact Splitting and the Effect of Dimple Depth on Static Friction of Textured Surfaces. *ACS Applied Materials&Interfaces, 6*(11), 7986–7990. https://doi.org/10.1021/am500879m

Gujba, A., & Medraj, M. (2014). Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening. *Materials, 7*(12), 7925-7974. https://doi.org/10.3390/ma7127925

Güçlü, M. (2004). Recrystallization and Oxidation Behavior of Commercial Purity Titanium. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi*.

Güden, M. (2015). Spinal Enstrümanların Metalürjik Özellikleri. *İzmir Institute of Technology*. https://doi.org/DOI:10.13140/RG.2.1.4220.2962

Harbaugh, J. A. (2015). NASA 3-D prints first full-scale copper rocket engine part. NASA. https://www.nasa.gov/technology/nasa-3-d-prints-first-full-scale-copper-rocket-engine-part/

Herrera, P., Hernandez-Nava, E., Thornton, R., & Slatter, T. (2023). Abrasive wear resistance of Ti-6AL-4V obtained by the conventional manufacturing process and by electron beam melting (EBM). *Wear*(204879), 524-525. https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204879

HoudkováŠ, Š., Šperka, P., Repka, M., Martan, J., & Moskal, D. (2017). Shifted laser surface texturing for bearings applications. *Journal of Physics: Conference Series, 843*. https://doi.org/10.1088/1742-6596/843/1/012076

KAYNAKLAR DİZİNİ

Hsu, S., Jing, Y., Hua, D., & Zhang, H. (2014). Friction reduction using discrete surface textures: principle and design. *Journal of Physics D: Applied Physics, 47*(33). https://doi.org/0.1088/0022-3727/47/33/335307

Hu, J., & Xu, H. (2016). Friction and wear behavior analysis of the stainless steel surface fabricated by laser texturing underwater. *Tribology International, 102*, 371-377. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.06.001

Huang, J., Zhu, J., Zhou, K., Liu, Z., & Huang, Y. (2025). Probing wear mechanism of Ti6Al4V micro-textured surfaces processed by laser-assisted grinding. *Journal of Alloys and Compounds, 1010*(178272). https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.178272

İçdem, C. (2007). Saf Titanyum ve Ti6Al4V, Ti6Al7Nb Alaşımlarının Akışkan Yatak Ortamında Termal Oksidasyonu. *Yüksek Lİsans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi*.

İnce, F., & Özel, T. (2025). Laser surface texturing of materials for surface functionalization: A holistic review. *Surface and Coatings Technology, 498*(131818). https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.131818

Ito, S., Takahashi, K., & Sasaki, S. (2020). Generation mechanism of friction anisotropy by surface texturing under boundary lubrication. *Tribology International, 149*, 105598. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.006

Jain, A., & Bajpai, V. (2019). Mechanical micro-texturing and characterization on Ti6Al4V for the improvement of surface properties. *Surface and Coatings Technology, 380*, 125087. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125087

Joshi, V. A. (2006). *Titanium Alloys An Atlas of Structures and Fracture Features.* https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781420006063

Kan, W., Peng, H., Lim, S., Zhu, Y., Zhang, K., & Huang, A. (2023). The mechanisms behind the tribological behavior of titanium alloys processed by laser powder bed fusion sliding against steel. *Tribology International, 180*, 108279. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108279

KAYNAKLAR DİZİNİ

Kang, Z., Fu, Y., Ji , J., & Puoza , J. (2017). Effect of local laser surface texturing on tribological performance of injection cam. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92*, 1751–1760.

Khanna, A. (2002). *Introduction to High Temperature Oxidation and Corrosion.*

Komotori, J., Lee, B., Dong, H., & Dearnley, P. (2001). Corrosion response of surface engineered titanium alloys damaged by prior abrasion. *Wear, 251*(1-12), 1239-1249. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00753-0

Körner, C. (2016). Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review. *Sage Journals Home, 61*(5). https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289

Kumar, S., Narayanan, T., Raman, S., & Seshadri, S. (2010). Thermal oxidation of Ti6Al4V alloy: Microstructural and electrochemical characterization. *Materials Chemistry and Physics, 119*(1-2), 337-346. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2009.09.007

Kumari, R., Scharnweber, T., Pfleging, W., Besser, H., & Majumdar, J. (2015). Laser surface textured titanium alloy (Ti–6Al–4V) – Part II – Studies on bio-compatibility. *Applied Surface Science, 357*, 750-758. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.08.255

Kurt, B., & Orhan, N. (2005). Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmiş Ti-6al-4v Alaşımı ve 316 Paslanmaz Çelik Çiftinin Ara Yüzey Mikroyapısının İncelenmesi. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmalar*, 65-69.

Lauwers, B., Bleicher, F., Haaf, P., & Vanparys, M. (2010). Investigation of the Process-Material Interaction in Ultrasonic Assisted Grinding of ZrO2 based Ceramic Materials. *CIRP International Conference on High Performance Cutting*.

Lawrence , J., & Waugh, D. (2015). *Laser Surface Engineering Processes and Applications*. https://doi.org/10.1016/C2013-0-16444-6

KAYNAKLAR DİZİNİ

Leyens, C., & Peters, M. (2006). *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications.*

Leyens, D., & Peters, D. (2003). *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications.* https://doi.org/DOI:10.1002/3527602119

Li, K., Yao, Z., Hu, Y., & Gu, W. (2014). Friction and wear performance of laser peen textured surface under starved lubrication. *Tribology International, 77*, 97-105. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.04.017

Li, X., Li, Y., Tong, Z., Ma, Q., Ni, Y., & Dong, G. (2019). Enhanced lubrication effect of gallium-based liquid metal with laser textured surface. *Tribology International, 129*, 407-415. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.08.037

Liu, S., & Shin, Y. (2019). Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials & Design, 164*(107552). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107552

Liu, Y., Liu, L., Deng, J., Meng, R., Zou, X., & Wu, F. (2017). Fabrication of micro-scale textured grooves on green ZrO2 ceramics by pulsed laser ablation. *Ceramics International, 43*(8), 6519-6531. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.02.074

Liu, X., Chu, P., & Ding, C. (2004). Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports, 47*(3-4), 49-121. https://doi.org/10.1016/j.mser.2004.11.001

Lu, H., Ren, S., Zhang, P., Guo, J., Li, J., & Dong, G. (2017). Laser-textured surface storing a carbon dots/poly(ethylene glycol)/chitosan gel with slow-release lubrication effect. *RSC Advances, 35*. https://doi.org/DOI https://doi.org/10.1039/C7RA02387A

Lütjering, G. (1999). Property optimization through microstructural control in titanium and aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A, 263*(2), 117-126. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)01169-1

KAYNAKLAR DİZİNİ

Lütjering, G., & Williams, J. (2003). *Titanium.* Springer Science & Business Media.

Majumdar, J., & Manna, I. (2015). Laser surface engineering of titanium and its alloys for improved wear, corrosion and high-temperature oxidation resistance. *Laser Surface Engineering*, 483-521. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-074-3.00021-0

Mao, B., Liao, Y., & Li, B. (2018). Gradient twinning microstructure generated by laser shock peening in an AZ31B magnesium alloy. *Applied Surface Science, 457*, 342-351. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.06.176

Mao, B., Siddaiah, A., Liao, Y., & Menezes, P. (2020). Laser surface texturing and related techniques for enhancing tribological performance of engineering materials: A review. *Journal of Manufacturing Processes, 53*, 153-173. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.009

Martz, L. S. (1949). Preliminary Report of Developments in Interrupted Surface Finishes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 161*(1). https://doi.org/https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1949_161_007_02

Metal, A. (2014). New GE plant to assemble world's first passenger jet engine with additive manufactured fuel nozzles. https://www.metal-am.com/new-ge-plant-to-assemble-worlds-first-passenger-jet-engine-with-additive-manufactured-fuel-nozzles/

Moldovan, E., Baltes, L., Croitoru, C., & Alexandru, P. (2025). Corrosion Behavior upon Laser Surface Texturing AISI 430 Stainless Steel. *Metals, 15*(12). https://doi.org/10.3390/met15121387

Molinari, A., Straffelini, G., Tesi, B., & Bacci, T. (1997). Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy. *Wear, 208*(1-2), 105-112. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07454-6

Murray, J., & Wriedt, H. (1987). The O−Ti (Oxygen-Titanium) system. *Journal of Phase Equilibria , 8*, 148–165.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Murr, L., Gaytan, S., Ramirez, D., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K., Shindo, P., Medina, F., & Wicker, R. (2012). Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies. *Journal of Materials Science & Technology, 28*(1), 1-14. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60016-4

Murzin, S., & Balyakin, V. (2017). Microstructuring the surface of silicon carbide ceramic by laser action for reducing friction losses in rolling bearings. *Optics & Laser Technology, 88*, 96-98. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.09.007

Mücklich, F., Lasagni, A., & Daniel, C. (2005). Laser interference metallurgy—periodic surface patterning and formation of intermetallics. *Intermetallics, 13*(3-4), 437-442. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.intermet.2004.07.005

Nastac, L., Gungor, M., Ucok, I., Klug, K., & Tack, W. (2006). Advances in investment casting of Ti–6Al–4V alloy: a review. *International Journal of Cast Metals Research, 19*(2), 73-93. https://doi.org/https://doi.org/10.1179/136404605225023225

Nouari, M., & Makich, H. (2013). Experimental investigation on the effect of the material microstructure on tool wear when machining hard titanium alloys: Ti–6Al–4V and Ti-555. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 41*, 259-269. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2013.04.011

Okamoto, H. (2011). O-Ti (Oxygen-Titanium). *Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 32*, 473–474.

Pfleging, W., Kumari, R., Besser, H., Scharnweber, T., & Majumdar, J. (2015). Laser surface textured titanium alloy (Ti–6Al–4V): Part 1 – Surface characterization. *Applied Surface Science, 355*, 104-111. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.06.175

Polmear, I., John, D., Nie, J., & Qian, M. (2017). *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals.*

KAYNAKLAR DİZİNİ

Pushp, P., Mabrukar, D., & Arati, C. (2022). Classification and applications of titanium and its alloys. *Materials Today Proceedings, 54*, 537-542. https://doi.org/DOI:10.1016/j.matpr.2022.01.008

Ramesh, S., Karunamoorthy, L., & Palanikumar, K. (2008). Surface Roughness Analysis in Machining of Titanium Alloy. *Materials and Manufacturing Processes, 23*(2), 174-181. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10426910701774700

Rosenkranz, A., Reinert, L., Gachot, C., & Mücklich, F. (2014). Alignment and wear debris effects between laser-patterned steel surfaces under dry sliding conditions. *Wear, 318*(1-2), 49-61. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.06.016

Rosenkranz, A., Szurdak, A., Grützmacher, P., Hirt, G., & Mücklich, F. (2017). Friction Reduction Induced by Elliptical Surface Patterns under Lubricated Conditions. *Advanced Engineering Materials*. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adem.201700731

Ryk, G., & Etsion, I. (2006). Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction. *Wear, 261*(7-8), 792-796. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.01.031

Safdar, A., We, L.-Y., Snis, A., & Lai, Z. (2012). Evaluation of microstructural development in electron beam melted Ti-6Al-4V. *Materials Characterization, 65*, 8-15. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.12.008

Sankaran, K., & Mishra, R. (2017). *Metallurgy and Design of Alloys with Hierarchical Microstructures.*

Schneider, J., Braun, D., & Greiner, C. (2017). Laser Textured Surfaces for Mixed Lubrication: Influence of Aspect Ratio, Textured Area and Dimple Arrangement. *Lubricants, 5*(3), 32. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/lubricants5030032

Sedlaček, M., Podgornik, B., & Ramalho, A. (2017). Influence of geometry and the sequence of surface texturing process on tribological properties. *Tribology International, 115*, 268-273. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.06.001

KAYNAKLAR DİZİNİ

Semiatin, S., Seetharaman, V., & Weiss, I. (1998). Hot workability of titanium and titanium aluminide alloys—an overview. *Materials Science and Engineering: A, 243*(1-2), 1-24. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00776-4

Sharma, D., Kamran, M., Paraye, N., & Anant, R. (2021). Insights into the wear behaviour of electron beam melted Ti–6Al–4V alloy in the as-built and the heat-treated conditions. *Journal of Manufacturing Processes, 71*, 669-678. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.09.060

Singh, A., & Harimkar, S. (2012). Laser surface engineering of magnesium alloys: A review. *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 64*, 718-733. https://doi.org/10.1007/s11837-012-0340-2

Spears , T., & Gold, S. (2016). In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation, 5*, 16-40.

Sun, Y., Zeng, W., Han, Y., Zhao, Y., Wang, G., Dargusch, M. S., & Guo, P. (2011). Modeling the correlation between microstructure and the properties of the Ti–6Al–4V alloy based on an artificial neural network. *Materials Science and Engineering: A, 528*(29-30), 8757-8764. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.08.059

Toh, W., Wang, P., Tan , X., Nai, M., Liu, E., & Tor, S. (2016). Microstructure and Wear Properties of Electron Beam Melted Ti-6Al-4V Parts: A Comparison Study against As-Cast Form. *Metals, 6*(11), 284. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/met6110284

Veiga, C., Davim, J., & Loureiro, A. (2012). Properties and applications of titanium alloys: A brief review. *Advanced Materials, 32*(2), 133-148.

Vilhena, L., Sedlaček, M., Podgornik, B., Vižintin, J., Babnik, A., & Možina, J. (2009). Surface texturing by pulsed Nd:YAG laser. *Tribology International, 42*(10), 1496-1504. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.06.003

KAYNAKLAR DİZİNİ

Vishnoi, M., Kumar, P., & Murtaza, Q. (2021). Surface texturing techniques to enhance tribological performance: A review. *Surfaces and Interfaces, 27*(101463), 1-2. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101463

Wang, Q., & Zhou, W. (2017). Direct fabrication of cone array microstructure on monocrystalline silicon surface by femtosecond laser texturing. *Optical Materials, 72*, 508-512. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.06.046

Wang, X., Xu, Z., Lu, H., Tan, Y., Xu, X., & Wu, H. (2025). Preparation and Tribology of Textured Ti-6Al-4V with Thermal Oxide Coating. *Coatings, 15*(3), 258. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/coatings15030258

Wang, Z., Li, Y.-B., Bai, F., Wang, C.-W., & Zhao, Q.-Z. (2016). Angle-dependent lubricated tribological properties of stainless steel by femtosecond laser surface texturing. *Optics & Laser Technology, 81*, 60-66. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.01.034

Wei , Y., Resendiz, J., Tomkowski, R., & Liu, X. (2022). An Experimental Study of Micro-Dimpled Texture in Friction Control under Dry and Lubricated Conditions. *Micromachines, 13*(1), 70. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/mi13010070

Woźniak, A., Bialas, O., Adamiak, M., Hadzima, B., & Szewczenko, J. (2024). The influence of laser texturing on the tribological behavior . *Archives of Civil and Mechanical Engineering, 24*(146). https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s43452-024-00960-3

Wu, Z., Xing, Y., Huang, P., & Liu, L. (2017). Tribological properties of dimple-textured titanium alloys under dry sliding contact. *Surface and Coatings Technology, 309*, 21-28. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.11.045

Xing, Y., Deng, J., Wu, Z., & Wu, F. (2017). High friction and low wear properties of laser-textured ceramic surface under dry friction. *Optics & Laser Technology, 93*, 24-32. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.01.032

KAYNAKLAR DİZİNİ

Xing, Y., Deng, J., Zhao, J., Zhang, G., & Zhang, K. (2014). Cutting performance and wear mechanism of nanoscale and microscale textured Al2O3/TiC ceramic tools in dry cutting of hardened steel. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 43*, 46-58. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2013.10.019

Xu, W. (2021). Direct Additive Manufacturing Techniques for Metal Parts: SLM, EBM, Laser Metal Deposition. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00095-8

Yalçın, B., & Varol, R. (2009). interlenmiş Titanyum Alaşımlarının Aşınma Performansı ve Bazı Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24*(1), 63-72.

Yıldırım, A. (2022). Eklemeli İmalat ve Geleneksel İmalat Yöntemiyle Üretilen Ti6Al4V Alaşımı Parçaların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi*.

Yıldırım, M., & Çakan, A. (2011). *Mühendislik Malzemeleri III.* AC Kardeşler Matbaa Yayıncılık.

Yu, H., Wang, X., & Zhou , F. (2010). Geometric Shape Effects of Surface Texture on the Generation of Hydrodynamic Pressure Between Conformal Contacting Surfaces. *Tribology Letters, 37*, 123–130.

Zhan, J., & Yang, M. (2013). Effects of laser dimple texturing on the sliding wear of friction pairs. *Journal of Laser Applications, 25*(4). https://doi.org/https://doi.org/10.2351/1.4809538

Zhou, K., & Han, C. (2023). *Metal Powder-Based Additive Manufacturing.*

Zhou, W., Tang, J., & Shao, W. (2020). Modelling of surface texture and parameters matching considering the interaction of multiple rotation cycles in ultrasonic assisted grinding. *International Journal of Mechanical Sciences, 166*, 105246. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105246