



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE
ÜRETİLEN *Ti-6Al-4V* MALZEMELERİNİN
SÜRÜKLENEREK YÜZEYLERİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ VE AŞINMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

EMRAH GÜNEŞSU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği

Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2020



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE
ÜRETİLEN *Ti-6Al-4V* MALZEMELERİNİN
SÜRÜKLENEREK YÜZEYLERİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ VE AŞINMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

EMRAH GÜNEŞSU

(523218024)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği

Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2020

ÖNSÖZ

İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarı bünyesinde lisansüstü eğitimim boyunca TÜBİTAK ve BAPKO projelerinde çalışma fırsatı vererek, proje alışkanlığı kazanma ve tecrübelerinden yararlanma imkânı verdiği için tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Yusuf KAYNAK'a çok teşekkür ediyorum.

Lisansüstü tez çalışmalarım süresince İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarında beraber çalıştığım, her konuda desteğini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Emre TAŞCIOĞLU'na, Tolga Berkay ŞİRİN'e ve Yusuf KARABULUT'a çok teşekkür ediyorum.

Eğitimim süresince her zaman desteklerini hissettiren, birer kale misali arkamda duran değerli Babam (Elbegi GÜNEŞSU), Annem (Nuray GÜNEŞSU), Ablam (Nadife ARAS) ve Abilerime (Savaş ve Aytaç GÜNEŞSU) en içten dileklerimle teşekkür ediyorum.

Bu tez çalışması Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAPKO) tarafından FEN-C-YLP-250919-0271 Proje Numarası ile desteklenmiştir. Desteğinden dolayı Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Ağustos, 2020

Emrah GÜNEŞSU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
SEMBOLLER	vi
KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
Eklemeli İmalat	2
1.1 Titanyum ve Titanyum Alaşımları	7
1.2 Aşınma	11
1.3 Sürükleyerek (Darg Finishing) Yüzey İyileştirme	13
2. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DÜZENEKLER	18
2.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan İş Malzemesi.....	18
2.2 CAD Modelin Oluşturulması ve STL Formatına Çevrilmesi	19
2.3 Seçici Lazer Ergitme Yöntemi ile Numunelerin Üretilmesi	20
2.4 Boyutsal Doğruluk Ölçümü	21
2.5 Sürükleyerek Yüzey İyileştirme Çalışmaları	22
2.6 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	23
2.7 Aşındırma Testleri	24
2.8 Yüzey Bütünlüğü Analizi İçin Yapılan Çalışmalar	25
2.9 Sertlik Ölçümü	27
2.10 X Işını Kırınımı (XRD) Analizi	28
2.11 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi.....	28
2.12 Mikroyapısal İnceleme.....	29
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	31
3.1 Boyutsal Doğruluk.....	31
3.2 Mikrosertlik.....	37
3.3 XRD Analizi Sonucu	38
3.4 Sürükleyerek Yüzey İyileştirme (Drag Finishing) Sonuçları	39
3.5 Aşınma	50

4. SONUÇLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN *Ti-6Al-4V* MALZEMELERİNİN SÜRÜKLENEREK YÜZEYLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ VE AŞINMA KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Seçici Lazer Ergitme (SLE), toz yatağında ergitme ile hızlı prototipleme (HP) tekniklerinden biri olup, bir Eklemeli İmalat işlemidir. Seçici Lazer Ergitme (SLE), geleneksel yöntemler ile üretilmesi neredeyse imkânsız olan parça imalatı için oldukça geniş bir platform sağlamaktadır. Bu sayede malzeme/makine ekipmanı üretiminde devrim yaratır niteliktedir. SLE'nin çok eklemeli yaklaşımı, 3D CAD model tasarımını, herhangi bir destekleyici 3D dilimleme programını kullanarak, modeli tipik olarak 20 ila 100 µm arasında son derece ince katmanlara böler ve parça üretimi için 3D yazıcılara gönderir. SLE'de metal tozları, güçlü lazer kaynağı vasıtasıyla ergitilerek kaynaştırılır. Yüksek tarama hızında yönlendirilen lazer kaynaklı ısı enerjisi, üretilen parçaların nihai mekanik ve mikroyapısal özelliklerini belirleyen önemli bir etkidir. Lazerin etkidiği noktada oluşan ergiyik havuzunda fiziksel, kimyasal, mekanik ve mikroyapısal özellikler değişir. Ayrıca ergime havuzunun şekli, soğutma kanalları, parçaların geometrik toleransları, hücresel tip kafes profilleri vb. karmaşık geometrilerin yapısal bütünlüğünü önemli oranda etkiler.

Bu çalışmada, Seçici Lazer Ergitme yöntemi ile farklı geometriye sahip *Ti-6Al-4V* numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelere, yüzey işleme yöntemlerinden birisi olan sürükleyerek yüzey iyileştirme yöntemiyle, farklı cihaz parametreleri ve yüzey iyileştirme medyaları kullanılarak, yüzey kalitelerini iyileştirilme operasyonları uygulanmıştır. Yapılan bu işlemler sonucunda numunelerin aşınma davranışları incelenmiştir. Aşınma davranışları farklı koşul ve parametrelerde işlem gören numuneler ile işlem görmemiş numuneye uygulanmış ve kıyaslanmıştır. Ayrıca yüzey bütünlükleri analizi için numunelerin yüzey pürüzlülükleri, topografileri, mikrosertlikleri, tane yapıları karakteristikleri ölçülerek analizleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Toz Yatağında Ergitme, Seçici Lazer Ergitme, *Ti-6Al-4V*, İkincil İşlem, Sürükleyerek Yüzey İyileştirme, Aşınma Davranışı

ABSTRACT

IMPROVEMENT OF THE SURFACES OF *Ti-6Al-4V* SAMPLES PRODUCED BY SELECTIVE LASER SMELTING METHOD BY DRAG FINISHING METHOD AND EXAMINATION OF WEAR CHARACTERISTICS

Selective Laser melting (SLM) is one of the techniques of powder bed fusion rapid prototyping (HP) and is an additive manufacturing process. Selective Laser melting (SLM) revolutionizes material/machine equipment production by providing a large platform for parts manufacturing that is almost impossible to produce by conventional methods. SLM is multi-slice approach uses the 3D CAD model design, using any supporting 3D slicing program, to divide the model into extremely thin layers, typically between 20 and 100 μm , and send it to 3D printers for part generation. In SLM, metal powders are fused by melting by means of a powerful laser source. Laser-induced heat energy, which is directed at a high scanning rate, alters the physical and chemical events in the ergiik melt that determine the final mechanical and microstructural properties of the manufactured parts and occurs at the point where the laser is affected. Also the shape of the melt pool, cooling channels, geometric tolerances of parts, cellular type lattice profiles etc. it significantly affects the structural integrity of complex geometries.

In this study, the surface quality of *Ti-6Al-4V* materials with different geometry produced by selective laser smelting method was improved by using different device parameters and surface improvement media using drag surface improvement method, which is one of the surface treatment methods. As a result of these processes, the wear behavior of the samples was examined. Wear behavior of the materials was compared with the materials that were treated under different conditions and parameters as a result of the wear tests performed on the materials that were not treated at all. In addition, surface roughness, topography, microsertlik, grain structure characteristics of the samples were measured for surface Integrity analysis.

Keywords: Additive Manufacturing, Selective Laser Melting, Powder Bed Fusion, *Ti-6Al-4V*, Post Processing, Drag Finishing, Wear Behavior

SEMBOLLER

E	: Enerji yoğunluğu (J/mm^2)
P	: Lazer gücü (W)
t	: Katman kalınlığı (μm)
v	: Tarama hız (mm/s)
h	: Tarama aralığı (μm)
V	: Aşınma hacmi (mm^3)
k	: Aşınma oranı (mm^3/Nm)
H	: İşlem yüksekliği (cm)
μ	: Sürtünme katsayısı



KISALTMALAR

Eİ	: Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing)
SLM	: Selective Laser Melting (Seçici Lazer Ergitme)
CAM	: Computer Aided Manufacturing (Bilgisayar Destekli Üretim)
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
XRD	:X-Ray Diffraction (X Işınımı Kırınım Yöntemi)
SYI	: Sürüklemeli Yüzey İyileştirme (Drag Finishing)
P	: Plastik Aşındırma Medyası
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
TTS	: Tribo Teknik Sistem
COF	: Coefficient Of Friction (Sürtünme Katsayısı)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Seçici Lazer Ergitme yönteminin şematik gösterimi[14].	5
Şekil 1.2. Birkaç farklı malzeme için belirli mukavemet ve sıcaklığın karşılaştırılması [21].	8
Şekil 1.3. Titanyum alaşımlarının çeşitli biyomedikal uygulamaları; (a) dental implant, (b) kalça eklemi, (c) vasküler stent [23].	9
Şekil 1.4. Aşınma sisteminin temsili gösterimi [2].	11
Şekil 1.5. Mikroskopik olarak görülen temel aşınma mekanizmaları (görünür temas yüzeyindeki F_n normal kuvveti, taban gövde ve karşı gövde arasındaki F_f sürtünme kuvveti, F_n , pürüzlülük temasında normal kuvvet olarak, ΔV bağlı hızı, HV Vickers sertliği) [30].	12
Şekil 1.6. Sürükleyerek (Drag finishing) yüzey iyileştirme cihazının işlem esnasında dönüş yönlerinin gösterimi	14
Şekil 1.7. Sürükleyerek (Drag finishing) yüzey iyileştirme cihazının işlem esnasında numuneler ile medyaların temasları esnasında etkilenen bölgelerin gösterimi	15
Şekil 1.8. Sürükleyerek (Drag finishing) yüzey iyileştirme cihazının kullanım alanları	15
Şekil 1.9. SYİ operasyonlarında kullanılan: a) farklı geometri ve abatlarda seramik, b) farklı geometri ve abatlarda çelik, c) Al_2O_3 , d) Plastik, e) Ceviz granül medyaları...	16
Şekil 2.1. SLE ile üretilen $Ti-6Al-4V$ numunelerine ait mikroyapı görüntüsü	19
Şekil 2.2. Numunelerin SolidWorks paket programı ile çizilmesi ve tabla üzerine yerleştirilmesi	19
Şekil 2.3. SLE üretim öncesinde STL formatına çevrilen numunelere destek yapılarının (support) atılması	20
Şekil 2.4. $Ti-6Al-4V$ numunelerinin üretildiği EOSSİNT M 280 cihazı	21
Şekil 2.5. a) SLE ile üretim sürecindeki tablanın görüntüsü, b) üretim sonrasında tozlardan arındırılan $Ti-6Al-4V$ numunelerine ait görüntü	21
Şekil 2.6. Boyutsal doğrulukta kullanılan Solutionix C500 marka 3D tarama cihazı	22
Şekil 2.7. Sürükleyerek (Drag Finishing) yüzey iyileştirme cihazı, a) Cihaza ait motordan aldığı hareketi numune tutucu kollara ilettiği mekanizma, b) Al_2O_3 medyası, c) Ceviz granül+ Al_2O_3 medyası d) Al_2O_3 ve Plastik aşındırma medyası	23
Şekil 2.8. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı	24
Şekil 2.9. İleri-geri aşındırma test cihazı	25
Şekil 2.10. Yüzey bütünlüğü analizinde izlenen yolun şematik gösterimi	25
Şekil 2.11. Metalografik analiz için $Ti-6Al-4V$ numunesinden alınan kesitlerin gösterimi	26
Şekil 2.12. Hassas kesme cihazı	26
Şekil 2.13. Zımparalama ve parlatma cihazı	27

Şekil 2.14. Future-Tech sertlik ölçme cihazı.....	27
Şekil 2.15. XRD ölçüm sistemi ve ölçülen numunelere ait görüntü.....	28
Şekil 2.16. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	29
Şekil 2.17. Dağlama esnasında zararlı gazların ortamdaki atılması için kullanılan çeker ocak.....	30
Şekil 2.18. Mikroyapı, aşınma izi, aşınma profili görüntülerinin alındığı optik mikroskop.....	30
Şekil 3.1. Kare kesitli iş parçasına ait boyutsal doğruluk analizi	31
Şekil 3.2. Kare kesitli iş parçasına ait; a) tabandan 5 mm yükseklikteki kesit doğrusalığı, b) tabandan 25 mm yükseklikteki kesit doğrusalığı, c) tabandan 45 mm yükseklikteki kesit doğrusalığı	32
Şekil 3.3. Üçgen kesitli iş parçasına ait boyutsal doğruluk analizi	33
Şekil 3.4. Üçgen kesitli iş parçasına ait; a) tabandan 5 mm yükseklikteki kesit doğrusalığı, b) tabandan 25 mm yükseklikteki kesit doğrusalığı, c) tabandan 45 mm yükseklikteki kesit doğrusalığı,	34
Şekil 3.5. Daire kesitli iş parçasına ait boyutsal doğruluk analizi	35
Şekil 3.6. Daire kesitli iş parçasına ait; a) tabandan 5 mm yükseklikteki kesit doğrusalığı, b) tabandan 25 mm yükseklikteki kesit doğrusalığı, c) tabandan 45 mm yükseklikteki kesit doğrusalığı	36
Şekil 3.7. 120 rpm dönme hızında sürükleyerek (drag finishing) operasyonu uygulanan numunelere ait mikrosertlik değerleri.....	37
Şekil 3.8. 60 rpm dönme hızında sürükleyerek (drag finishing) operasyonu uygulanan numunelere ait mikrosertlik değerleri.....	38
Şekil 3.9. SLE ile üretilen, işlem görmemiş ve sürükleyerek (Drag Finishing)yüzey iyileştirme işlemi uygulanan numunelere ait XRD sonuçları	39
Şekil 3.10. İşlem görmemiş numunelere ait ortalama yüzey pürüzlülük değerleri.	40
Şekil 3.11. Sürükleyerek yüzey iyileştirme cihazında ceviz granül+Al ₂ O ₃ medyaları kullanılarak yüzeyleri iyileştirilen numunelere ait yüzey görüntüleri	42
Şekil 3.12. 60 rpm dönme hızı ve ceviz granül+Al ₂ O ₃ medya karışımı kullanılması sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri.....	43
Şekil 3.13. 120 rpm dönme hızı ve ceviz granül+Al ₂ O ₃ medya karışımı kullanılması sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri.....	43
Şekil 3.14. Sürükleyerek yüzey iyileştirme cihazında Al ₂ O ₃ medyası kullanılarak yüzeyleri iyileştirilen numunelere ait yüzey görüntüleri	45
Şekil 3.15. 60 rpm dönme hızı ve Al ₂ O ₃ medyası kullanılması sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri.....	46
Şekil 3.16. 120 rpm dönme hızı ve Al ₂ O ₃ medyası kullanılması sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri	46

Şekil 3.17. Sürükleyerek yüzey iyileştirme cihazında Al_2O_3 + plastik aşındırma medyası kullanılarak yüzeyleri iyileştirilen numunelere ait yüzey görüntüleri	48
Şekil 3.18. 60 rpm dönme hızı ve Al_2O_3 + plastik aşındırma medyası kullanılması sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri	49
Şekil 3.19. 120 rpm dönme hızı ve Al_2O_3 + plastik aşındırma medyası kullanılması sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri	49
Şekil 3.20. İşlem görmemiş numuneye ait COF (coefficient of friction) grafiği	52
Şekil 3.21. 1 saat boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan üçgen geometriye ait COF (coefficient of friction) grafiği	55
Şekil 3.22. 15 dakika boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan üçgen geometriye ait COF (coefficient of friction) grafiği.	56
Şekil 3.23. 1 saat boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan silindirik geometriye ait COF (coefficient of friction) grafiği.	57
Şekil 3.24. 15 dakika boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan silindirik geometriye ait COF (coefficient of friction) grafiği.	58
Şekil 3.25. 1 saat boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan kare geometriye ait COF (coefficient of friction) grafiği.....	59
Şekil 3.26. 15 dakika boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan kare geometriye ait COF (coefficient of friction) grafiği	60
Şekil 3.27. 1 saatlik yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan üçgen geometriye ait aşınma oranı (k) grafiği.....	62
Şekil 3.28. 15 dakika yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan üçgen geometriye ait aşınma oranı (k) grafiği	63
Şekil 3.29. 1 saatlik yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan Silindirik geometriye ait aşınma oranı (k) grafiği.....	64
Şekil 3.30. 15 Dakika yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan Silindirik geometriye ait aşınma oranı (k) grafiği.....	65
Şekil 3.31. 1 saatlik yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan kare kesitli geometriye ait aşınma oranı (k) grafiği	66
Şekil 3.32. 15 dakika yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan kare kesitli geometriye ait aşınma oranı (k) grafiği	67
Şekil 3.33. İşlem görmemiş numuneye ait aşınma izi SEM görüntüsü	69
Şekil 3.34. 120 rpm 1 saat boyunca Al_2O_3 medyası + Plastik Aşındırma Taşı kullanılarak yüzey kalitesi iyileştirilen üçgen geometriye ait aşınma izi SEM görüntüsü	69
Şekil 3.35. 60 rpm 15 dakika boyunca Al_2O_3 medyası kullanılarak yüzey kalitesi iyileştirilen kare geometriye ait aşınma izi SEM görüntüsü	70
Şekil 3.36. İşlem görmemiş numuneye ait aşınma izi, topografisi ve profili.....	72

Şekil 3.37. Al_2O_3 + Plastik aşındırma medyası kullanılarak yüzeyi iyileştirilen üçgen geometrili numunelere ait aşındırma davranışı sonucunda elde edilen aşınma izleri, topografileri ve profilleri.....	73
Şekil 3.38. Al_2O_3 medyası kullanılarak yüzeyi iyileştirilen üçgen geometrili numunelere ait aşındırma davranışı sonucunda elde edilen aşınma izleri, topografileri ve profilleri	74
Şekil 3.39. Al_2O_3 + Plastik aşındırma medyası kullanılarak yüzeyi iyileştirilen dairesel geometrili numunelere ait aşındırma davranışı sonucunda elde edilen aşınma izleri, topografileri ve profilleri.....	75
Şekil 3.40. Al_2O_3 medyası kullanılarak yüzeyi iyileştirilen dairesel geometrili numunelere ait aşındırma davranışı sonucunda elde edilen aşınma izleri, topografileri ve profilleri.....	76
Şekil 3.41. Al_2O_3 + Plastik aşındırma medyası kullanılarak yüzeyi iyileştirilen kare geometrili numunelere ait aşındırma davranışı sonucunda elde edilen aşınma izleri, topografileri ve profilleri.....	77
Şekil 3.42. Al_2O_3 medyası kullanılarak yüzeyi iyileştirilen kare geometrili numunelere ait aşındırma davranışı sonucunda elde edilen aşınma izleri, topografileri ve profilleri	78

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1. Farklı sınıflarda yer alan titanyum alaşımlarının özellikleri [23]	9
Tablo 2.1. SLE ile üretilen <i>Ti-6Al-4V</i> 'ün kimyasal bileşimi.....	18
Tablo 2.2. SLE ile üretilen <i>Ti-6Al-4V</i> 'ün fiziksel özellikleri[40, 41].....	18
Tablo 2.3. Üretim parametreleri ve numunlerin boyutları	20
Tablo 2.4. Solutionix C500 marka 3D tarama cihazına ait teknik özellikler	22
Tablo 2.5. Sürükleyerek (Drag Finishing) yüzey iyileştirmede kullanılan yüzey iyileştirme parametreleri	23
Tablo 2.6. Aşındırma test parametreleri.....	24
Tablo 3.1. Aşındırma testi parametreleri.....	51
Tablo 3.2. 1 saat boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan üçgen geometriye ait ortalama sürtünme katsayısı (μ) değerleri.....	55
Tablo 3.3. 15 dakika boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan üçgen geometriye ait ortalama sürtünme katsayısı (μ) değerleri.....	56
Tablo 3.4. 1 saat boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan silindirik geometriye ait ortalama sürtünme katsayısı (μ) değerleri.....	57
Tablo 3.5. 15 dakika boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan silindirik geometriye ait ortalama sürtünme katsayısı (μ) değerleri	58
Tablo 3.6. 1 saat boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan kare geometriye ait ortalama sürtünme katsayısı (μ) değerleri.....	59
Tablo 3.7. 15 dakika boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan kar geometriye ait ortalama sürtünme katsayısı (μ) değerleri.....	60
Tablo 3.8. 1 saatlik yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan üçgen geometriye ait aşınma oranı (k) değerleri	62
Tablo 3.9. 15 dakika yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan üçgen geometriye ait aşınma oranı (k) değerleri.....	63
Tablo 3.10. 1 saatlik yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan Silindirik geometriye ait aşınma oranı (k) değerleri	64
Tablo 3.11. 15 dakika yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan Silindirik geometriye ait aşınma oranı (k) değerleri.....	65
Tablo 3.12. 1 saatlik yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan kare kesitli geometriye ait aşınma oranı (k) değerleri.....	66
Tablo 3.13. 15 dakika yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan kare kesitli geometriye ait aşınma oranı (k) değerleri	67

1. GİRİŞ

Ti-6Al-4V alaşımı, diğer metalik malzemelerle karşılaştırıldığında yüksek mukavemet ve yüksek korozyon direnci gibi üstün özellikleri nedeniyle havacılık ve biyomedikal sektörlerinde kullanılmaktadır. Bu alaşım, ürün tasarımı için ağırlıktan tasarrufunun yanı sıra, yüksek sıcaklıkta mukavemetin gerektiği uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. *Ti-6Al-4V* kullanımı, yaklaşık 500 °C çalışma sıcaklığına sahip aero motor diskleri ve bıçaklarının fan ve sıkıştırma bölümlerinde % 25 oranından fazladır [1]. *Ti-6Al-4V*'nin yükseltilmiş sıcaklığa özgü mukavemeti, alüminyum alaşımlarından daha yüksektir ve yoğunluğu çelik ve nikel alaşımlarınınkinden daha düşüktür. Bu özelliklerine ek olarak, *Ti-6Al-4V*, iyi biyoyumluluk ve mükemmel korozyon direncine sahip olduğu için vücut ortamında imlant olarak kullanılabilir [2].

Geleneksel imalat tekniklerine kıyasla, *Ti-6Al-4V* alaşımlarının Eklemeli İmalat (Eİ), pahalı kalıplara ve iş gücüne ihtiyaç duymadan karmaşık yapısal tasarımların net şekle yakın üretimi de dâhil olmak üzere çeşitli avantajlar sunar. Seçici Lazer Eritme (SLE) bir Eklemeli İmalat (Eİ) yöntemi olup, bir parçanın bilgisayar destekli tasarım modeli kullanılarak doğrudan üretilmesini sağlar. SLE, geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi zor olan karmaşık geometriye sahip makine elemanların kısa sürelerde üretilmesini ve piyasaya sürülmesini sağlayan günümüz üretim teknolojilerinden biridir. Böylece son yıllarda, çok çeşitli alanlarda kullanılan karmaşık geometriye sahip *Ti-6Al-4V* parçaları SLE yöntemiyle üretilerek bu teknolojiye daha popüler hale getirmiştir [3].

SLE işlemi sırasında, *Ti-6Al-4V* tozları, bir asal gaz olan argon gazı ortamı altında bir lazer ışını ile seçici bir şekilde bir bölme içinde katman katman oluşturulur. Daha az kalıntı gözeneklilik ile yüksek malzeme yoğunluğu sağlamak için lazer gücü, tarama hızı, toz tabakası kalınlığı gibi proses parametrelerinin optimizasyonu esastır. Lazer ışınının yeterli güçle etkileşmesi üzerine, *Ti-6Al-4V* tozları ısıtılır ve eritilir. Lazerin uzaklaştırılmasından sonra, sıvı *Ti-6Al-4V* çok hızlı katılaşır ve kaynaşmış toz son parçanın bir tabakasını oluşturur. SLE'deki büyük termal girdi olan lazer ışını, metalin farklı kısımlarını aynı anda ergittiğinden, ergime havuzunun hızlı katılaşmasına neden olur.

SLE 'deki hızlı katılaşmanın mikroyapıda denge dışı fazların oluşumu gibi bazı problemlere yol açtığı bulunmuştur. *Ti-6Al-4V* kısımları SLE ile üretildiğinde çok ince, asiküler bir martensit yapı oluşmaktadır. Ayrıca, lazer ışınının neden olduğu yüksek lokalize ısı girişi iç ve artık gerilmelere yol açarken, lazerin kısa etkileşim süresi yapıda ayrılmaya neden olmaktadır. *Ti-6Al-4V*'nin SLE' si durumunda mukavemet, süneklik, kırılma tokluğu ve yorulma direnci gibi çok sayıda mekanik özellik ayrı ayrı değiştirilmiştir. Ayrıca, eriyik havuzu kararsızlıkları, gözeneklilik ve yüksek yüzey pürüzlülüğü optimal olmayan tarama parametreleri nedeniyle ortaya çıkabilir [4]. Bu nedenle, özellikle havacılık ve biyomedikal alanlara uyarlanmış standartların özelliklerini karşılaması istenen mekanik özellikleri sağlaması için SLE parçalarına ikincil işlemler uygulanması gerekmektedir [5].

Literatürde eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçaların yüzey iyileştirme işlemlerinin ve tribolojik özelliklerinin belirlendiği çalışmalar mevcuttur. Ancak yapılan bu çalışmalarda, Seçici Lazer Ergitme yöntemi ile yapılan üretimlerde, *Ti-6Al-4V* numunelerine sürükleyerek (Drag Finishing) yüzey iyileştirme işleminin uygulanmadığı ve bu işlemin etkilerinin incelenmediği görülmüştür. Aynı zamanda SLE ile üretilen *Ti-6Al-4V* numunelerine uygulanan ikincil işlemler sonrasında aşınma performansının incelenmediği anlaşılmaktadır. Bu tez kapsamında SLE ile üretilen *Ti-6Al-4V* numunelerine SYİ operasyonları uygulanmış ve aşınma davranışları incelenmiştir.

Eklemeli İmalat

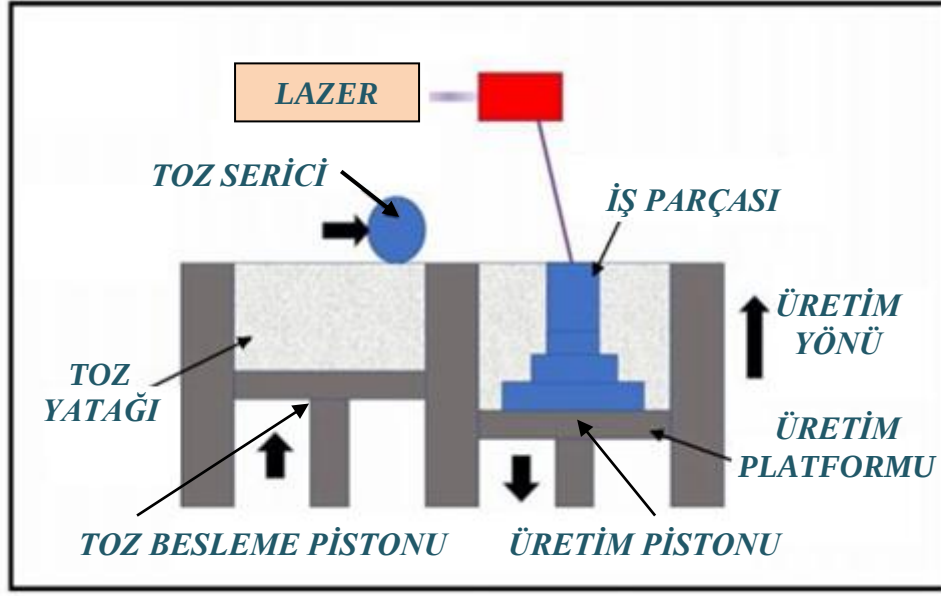
Eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi mümkün olmayan karmaşık şekilli parçaların üretiminde kolaylık sağlamakla birlikte, hızlı şekilde prototip üretimine olanak sağlayan bir üretim yöntemidir [6]. Sağladığı bu avantajlarından dolayı özellikle uzay, havacılık ve biyomedikal alanında tercih edilen bir üretim yöntemi haline gelmiştir. Eklemeli imalat yönteminde, lazer ve elektron demeti gibi ısı kaynakları kullanılarak malzemenin kontrollü olarak ergitilmesi ve kalıplama teknolojilerine ihtiyaç duyulmadan metalin eriyik veya yarı eriyik formdan kontrollü katılaşması sağlanmaktadır. Bir bilgisayar destekli tasarım programı ile (Computer Aided Design – CAD) yapılmış olan tüm parçaların/elamanların .STL (STereoLithography) formatına dönüştürülmesiyle katmanlı olarak üretilmesi, eklemeli imalat olarak tanımlanmaktadır. Üretim sonrasında oluşan atık malzeme miktarının

oldukça az olması, talaşlı imalatı zor malzemelerin ve geleneksel talaş uzaklaştırma prensibine sahip yöntemler ile üretilmesi imkânsız olan karmaşık geometrilerin üretilmesini mümkün kılan eklemeli imalat yöntemleri son dönemde oldukça ilgi çekmektedir. Eklemeli imalat yöntemlerinde malzemeyi ergitecek olan ısı girdisinin elektron demeti veya lazer demeti ile sağlanması söz konusudur. Bir eklemeli üretim yöntemi olan Seçici Lazer Ergitme (SLE) metodu, toz formundaki malzemeyi lazer ışınıyla ergitmesi esnasında vakum ortamına ihtiyaç duymaması sebebiyle bakım maliyetlerinin nispeten düşük ve proses kolaylığı ile elektron demeti kullanan sistemlere kıyasla üstünlük sağlamaktadır[7]. Lazer demetinin elektron demetine göre sahip olduğu daha küçük boyutlar ve toz formundaki malzemenin iletken veya yalıtkan özelliklerinden etkilenmeksizin tüm malzemelere uygulanabilmesi ile lazer kullanım ve hassasiyet yönünden elektron demeti kullanan sistemlerden daha üstün yeteneklere sahiptir. SLE yöntemi, karmaşık geometriye sahip ürünlerin imal edilebildiği yeni nesil bir üretim teknolojisidir. Bu yöntemde esas, toz haldeki malzemenin lazer ile ergitilerek katmanlar şeklinde birbirine bağlanması ve nihai ürünün oluşturulmasıdır. Bilinen isimlerin yanı sıra hızlı prototipleme, serbest şekil fabrikasyonu, katmanlı üretim gibi isimlerin de atfedildiği proses, talaşlı imalattaki kesici takımları kullanmadan veya kalıp gibi aparatlar oluşturulmadan, üretilmesi hedeflenen ürünün 3B tasarımının yapılarak kullanılabilir ürüne dönüştürülmesi işlemidir. SLE yönteminin başlıca avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Giderek hızlanan ürün geliştirme ve farklı tasarımların hızlıca üretilmesinde ayrıcalık katan bir yöntemdir.
- Klasik yöntemlerle üretilmeyecek kadar karmaşık parçalar hızlıca üretilbilmektedir.
- Mühendislik, tıp ve diğer disiplinler arası çalışma alanlarına cevap verebilen bu teknoloji, implant üretiminde büyük bir avantaja sahiptir. Özellikle MR ile tomografi datalarını kullanarak imalat yapılabilmesi, standart ölçülerde implant üretimindeki olumsuzlukları gidererek hastaya özel implant tasarımlarının üretilmesi çok ciddi bir üstünlük sağlamaktadır.
- Toz bileşiminin değiştirilebilmesi ile değişik stokiyometriye sahip, farklı özellikte malzemelerin üretilmesine olanak sağlamaktadır.

1.1.1 Seçici Lazer Ergitme (SLE) Yöntemi

Son yıllarda fonksiyonelliği arttırılan kompleks şekillerin üretimi ile pek çok endüstriyel alanda kullanımı yaygınlaşmaya başlayan SLE yöntemi, medikal, otomotiv, savunma ve havacılık gibi pek çok alanda dikkat çekmektedir [8, 9]. Yaygın olarak tercih edilen çeşitli eklemeli imalat yöntemleri mevcut olmakla birlikte, en çok tercih edilen eklemeli imalat yöntemlerinden biri SLE yöntemidir[10, 11]. Bu proseste son ürüne yakın geometrilerin sağlanması ile üretim döngüsündeki zamanın azaltılmasının yanı sıra atık malzeme miktarındaki düşüş ile çevreci bir yaklaşım sergilemektedir [12]. Başlangıçta tekil kullanım için fonksiyonel prototiplerin üretildiği bu proses zamanla son kullanıcıya direkt olarak ürünün teslim edildiği hızlı üretim tekniği şeklinde anılmaya başlamıştır. Özellikle medikal ve otomotiv sektörü bu üretim yöntemine oldukça büyük ilgi ve ihtiyaç duyan sektörler arasında başı çekmektedir[13]. SLE sistemlerinde fiber lazerler kullanılmakta olup lazerin zamanla neredeyse hiç dalgalanma olmadığı sürekli karakterli lazer vuruşu ile çalışmaktadırlar. Lazer kaynağından çıkan lazer demeti galvano aynalar tarafından yönlendirilerek tozun serili olduğu üretim platformuna planlanan tarama hızı ile etkileşim sağlanmaktadır. SLE sisteminde direkt lazer ile sağlanan ısı girdisi toz tarafından absorbe edilir ve seçici lazer sinterleme yönteminden farklı olarak tamamen ergime gerçekleştirilerek bir önceki katman ile bağ kurması sağlanır. Çalışılan parçaya ait kısım oluşturulduktan sonra, bir önceki katman ile birleştirilmesi ve bu tekrarın tüm parçayı oluşturana kadar devam etmesi sonucu parça üretilmiş olur. Şekil 1.1' de SLE ie üretim yönteminin şematik gösterimi sunulmaktadır.



Şekil 1.1. Seçici Lazer Ergitme yönteminin şematik gösterimi[14].

Üretim parametreleri üretilecek parçanın istenilen kalitede olması için malzeme çeşidine ve yapısına göre belirlenmelidir. Birçok üretim parametresi, oluşturulan ürüne ait kimyasal, morfolojik, mikro yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerin değişimine neden olur [15]. Bu üretim parametreleri aşağıda sıralanmıştır:

- Lazer gücü,
- Lazer odak çapı, vuruş modu,
- Tarama hızı,
- Tarama stratejisi,
- İnşa oryantasyonu
- Tabaka/katman kalınlığı,
- Üretim sonrası uygulanan yüzey ve ısı işlemler, şeklinde sıralanabilir.

Lazer ergitmede, katmanları ve bitişik eriyik havuzları arasında dayanım artırılması ve bütünlük sağlanması gerekmektedir. Bu bütünlük, üretim parametreleri olarak bilinen lazer gücü (P), katman kalınlığı (t), lazer tarama hızı (V), tarama mesafesinin (h) değişimi ile kontrol edilen enerji yoğunluğu (E) ve bu enerjinin eriyikten uzaklaştırılma hızı ile sağlanmaktadır. Tüm bu değişkenler eriyik oluşturulması için gereken enerji yoğunluğuna etki etmekte olup, mekanik özellikler üzerinde direkt olarak etkilidir [16].

Enerji yoğunluğu ve proses parametreleri arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikte verilmiştir[17].

$$E_v = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \left[\frac{J}{mm^3} \right] \quad (1.2)$$

SLE ile üretim yöntemi hem avantajlara hem de bazı dezavantajlara sahiptir. En önemli avantajı diğer imalat yöntemlerine kıyasla üretilmesi oldukça zor ya da mümkün olmayan veya maliyeti çok yüksek olan parçalar için ileri derece bir tasarım özgürlüğü sunmasıdır. Diğer avantajları aşağıdaki gibidir:

- Giderek hızlanan ürün geliştirme ve farklı tasarımların hızlıca üretilmesinde ayrıcalık katan bir yöntemdir.
- Klasik yöntemlerle üretilmeyecek kadar karmaşık parçalar hızlıca üretilmektedir.
- Mühendislik, tıp ve diğer disiplinler arası çalışma alanlarına cevap verebilen bu teknoloji, implant üretiminde büyük bir avantaja sahiptir. Özellikle MR ile tomografi datalarını kullanarak imalat yapılabilmesi, standart ölçülerde implant üretimindeki olumsuzlukları gidererek hastaya özel implant tasarımlarının üretilmesi çok ciddi bir üstünlük sağlamaktadır.
- Toz bileşiminin değiştirilebilmesi ile değişik stokiyometriye sahip, farklı özellikte malzemelerin üretilmesine olanak sağlamaktadır.

Eklemeli imalat yöntemi birçok avantaja sahip olmasına rağmen işlevsel parçaların üretiminin daha geniş kullanımını engelleyen birtakım dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlar aşağıda belirtilmiştir:

- Parça büyüklüğü: Toz yatak teknolojisinde, parça boyutu, standart toz yatak sistemleri için 400x400x400 (EOS M-400-4) mm olan toz yatak boyutu ile sınırlıdır. Bununla birlikte, doğrudan enerji biriktirme (ya da lazer metal biriktirme) süreçleri ile parça boyutları daha büyük olabilir. Ancak toz katmanlarının düşük kalınlığı nedeniyle, yüksek parçaların ya da büyük parçaların yapılması çok yavaş ve maliyetli olabilir.
- Üretim serileri: Eİ prosesleri genellikle üniter ya da küçük seriler için uygundur ve toplu üretim için uygun değildir. Ancak makine üretkenliğini artırma ve

dolayısıyla daha büyük serilerin üretimine olanak verme yolunda ilerlemeler kaydedilmektedir.

- Parça tasarımı: toz yatak teknolojisi ile ilgili olarak, çıkıntı (overhang) açısı 45°'nin altında olduğunda sökülebilir destek yapıları gereklidir.
- Malzeme seçimi: birçok alaşım mevcut olmakla birlikte, kaynaklanabilir olmayan metaller eklemeli imalat ile işlenemez ve kaynaklanması zor alaşımlar ise özel yaklaşımlar gerektirir.

Bu dezavantajlara ilave olarak bir takım kusurlarda oluşabilmektedir. Bu kusurlar lazer ısısından dolayı hızlı ısınma ve soğuma sonucunda çarpılmalar, üretim sürecinde kullanılan parametreler ve cihaz kalibrasyonundan kaynaklı porozite / boşluklu yapı oluşumu, üretilen parçaların mekanik ve tribolojik açıdan üretim sonrası beklentiyi karşılamaması ve en kritik ve önemli olan yüzey kalitesini istenilen değerde vermemesidir. Dolayısıyla üretilen numunlerin, son kullanımı açısından yeterli bulunmadığı için üretimde karşılaşılan olumsuz durumların üstesinden gelmek için iyileştirmeler gereklidir. Literatür incelendiği zaman bahsi geçen kusurların iyileştirilmesi için optimizasyon çalışmaları yapıldığı görülmüştür. Ancak yüzey kalitesi, mekanik özellikler ve aşınma dayanımı bakımından istenilen değerlerin yakalanmadığı görülmüştür [18]. Bu durum eklemeli imalat ile üretilen numunlerin üretim sonrasında son kullanıma gitmeden ikincil işlemler uygulanması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır [19]

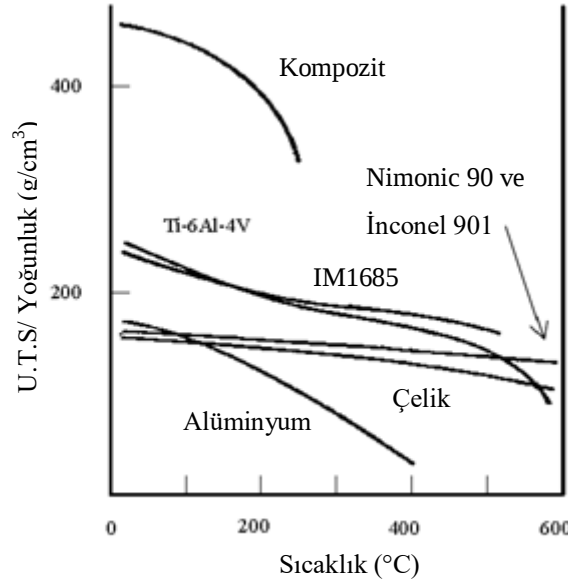
1.1 Titanyum ve Titanyum Alaşımları

Titanyum ve alaşımları, yüksek mukavemet / ağırlık oranı (spesifik mukavemet) ve mükemmel korozyon direnci gibi üstün özellikleri nedeniyle havacılık, biyomedikal, petrokimya, kişisel ürün ve otomotiv endüstrileri dahil olmak üzere çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda göstermiş olduğu yüksek özgül mukavemet değeri titanyumu vazgeçilmez bir havacılık malzemesi olmasını sağlar. Şekil 1.2' de görüldüğü gibi, *Ti-6Al-4V* ağırlık oranı, 400-550 °C çalışma sıcaklığına kadar çoğu metalik malzemeden daha yüksektir. Günümüzde, havacılık endüstrisinde titanyum alaşımlarının yaygın kullanımı için sebepleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir [20].

- ❖ Saf titanyum, çelik ve nikel bazlı süper alaşımlardan% 40 daha hafiftir,

- ❖ Bazı titanyum alaşımlarının gerilme mukavemeti ferritik ve östenitik paslanmaz çeliklerden daha iyidir ve martensitik paslanmaz çelikle karşılaştırılabilir,
- ❖ Titanyum alaşımları 400-550 ° C sıcaklık aralığında faydalıdır. Titanyum alüminatlar daha yüksek sıcaklıklarda daha da yüksek mukavemete sahiptir.
- ❖ Termal genleşme katsayıları alüminyumun yarısından daha az ve çelikten daha düşüktür.
- ❖ Çalışma sıcaklığı 130 °C ‘ yi aştığında titanyum alaşımları alüminyumun yerini alabilir

Düşük sıcaklıklarda diğer metalik malzemelerden ziyade sadece kompozitlerin özgül mukavemeti daha yüksek olsa da, aero motor bileşenleri gibi havacılık ve uzay uygulamalarında kullanımları sınırlı çalışma sıcaklıkları nedeniyle azalır.

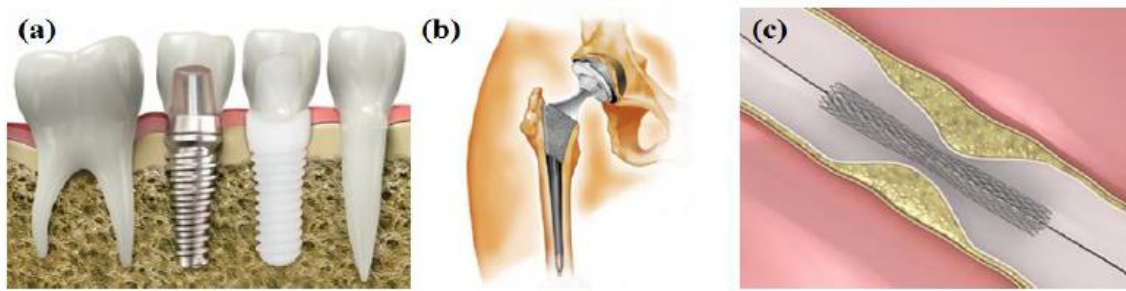


Şekil 1.2. Birkaç farklı malzeme için belirli mukavemet ve sıcaklığın karşılaştırılması [21].

Havacılık ve uzay endüstrisi için, titanyum alaşımlarının temel seçim kriterleri, çeliklere kıyasla ağırlık tasarrufuna izin veren düşük yoğunluklarına dayanmaktadır. Titanyum alaşımlarının mukavemeti, daha yüksek sıcaklıklarda bile alüminyum alaşımlarından daha yüksektir. Bu nedenle titanyum alaşımları, yüksek sıcaklık uygulamalarında alüminyum alaşımlardan daha fazla direnç sunar. Ayrıca, yaklaşık% 60'lık daha yüksek

yoğunluğuna rağmen titanyum alüminyum ile değiştirildiğinde ağırlık tasarrufu sağlanabilir [22].

Titanyum alaşımları için en yaygın kullanılan diğer alan biyomedikal alandır. Titanyum yüksek korozyon direncine, kemiğe yakın mekanik özelliklere ve vücut ortamında iyi biyouyumluluğa sahip olduğundan, vücudun sert dokuları yapay titanyum implantlarla değiştirilebilir. Bu nedenle kalça eklemlerinde, dişlerde, dizlerde, yapay vasküler stentlerde, vida şeklindeki kalça kemiği gibi cihaz ve uygulamalarda kullanılabilir bu durum Şekil 1.3’ de gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Titanyum alaşımlarının çeşitli biyomedikal uygulamaları; (a) dental implant, (b) kalça eklemi, (c) vasküler stent [23].

1.1.1 Titanyum alaşımları

Alaşım içeriği ve alaşım elementlerinin türüne göre sınıflandırılmış α , yaklaşık α alaşımlar, $\alpha + \beta$ alaşımlar, yaklaşık β ve β alaşımları gibi farklı özelliklere sahip titanyum alaşımları vardır bunlar Tablo 1.1’ de verilmiştir.

Tablo 1.1. Farklı sınıflarda yer alan titanyum alaşımlarının özellikleri [24]

α Alaşımları	Saf Titanyum	↑ ❖ Daha yüksek yoğunluk ❖ Daha yüksek ısıt işlem kabiliyeti ❖ Birim şekil değiştirme Duyarlılığı ❖ Üretim gelişimi ↓	
	<i>Ti-5Al-2,5Sn</i>		
Yaklaşık- α	<i>Ti-8Al-1Mo-1V</i> <i>Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo</i>		
$\alpha+\beta$ Alaşımları	<i>Ti-6Al-4V</i> <i>Ti-6Al-2Sn-6V</i>		
Yaklaşık- β	<i>Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo</i> <i>Ti-3Al-10V-2Fe</i>		
β Alaşımları	<i>Ti-13V-11Cr-3Al</i> <i>Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al</i>		❖ Yüksek sürünme mukavemeti ❖ Kaynaklanabilirlik

α - alaşımları

Alüminyum, kalay veya zirkonyum içeren α alaşımları daha çok, yüksek sıcaklık ya da soğuk ortamlarda tercih edilmektedir. α fazı zengin olan alaşımlar, beta alaşımlarına göre yüksek sıcaklıklarda sürünmeye karşı genellikle daha dayanıklıdır. Çok düşük miktarda ara yer atomu içeren α alaşımları, sünekliğini ve tokluğunu çok düşük sıcaklıklarda dahi sürdürmektedirler [25].

α alaşımları, beta alaşımları ya da $\alpha + \beta$ alaşımlarının aksine, kararlı alfa fazına sahip olduklarından ısıtılma işlemi ile sertleştirilememektedirler. Fakat, soğuk bir işlem sonrasında oluşan artık gerilmeleri gidermek için yeniden kristalleştirme ya da sadece tavlama işlemi yapılabilir. Dövülebilme kabiliyetleri oldukça düşüktür ve diğer alaşımlara göre dövme sıcaklık aralıkları dardır. Dövme sırasında oluşan yüzey çatlakları veya merkez çatlakları bu durumu kanıtlar niteliktedir. Bu durumun önüne geçmek için dövme işleminde deformasyonun küçük seçilmesi ve malzemenin sık sık ısıtılması gerekmektedir [26].

Tek fazlı yapıya sahip alfa alaşımına *Ti-5Al-2,5Sn* malzemesi örnek olarak gösterilebilir. Bu alaşım, oda sıcaklığında ve 300°C ye kadar olan sıcaklıklarda yüksek çekme ve sürünme dayanımını göstermekle birlikte yüksek şekillendirme kabiliyetine de sahiptir [27].

$\alpha + \beta$ alaşımları

Bu kategoriye ait alaşımlar, hem α hem de β stabilizatör elementlerini birlikte içerir. α ve β fazını kararlaştırıcı elementlerin uygun bir şekilde ayarlanması sonucunda oda sıcaklığında α ve β fazlarının karışımı olan bir içyapı elde edilmektedir. Tavlama sonrasında da yüksek süneklik, homojenlik ve yüksek dayanım sağlanmaktadır. $\alpha + \beta$ alaşımları ailesi içerisinde en çok kullanılanları; *Ti-6Al-4V* ve *Ti-4Al-2Sn-4Mo-0.5Si* alaşımlarıdır. *Ti-6Al-4V* malzemesi toplam titanyum üretiminin %45 ten fazlasını oluşturmaktadır[28]. Bu alaşımlara yüksek mukavemet elde edebilmek için ısıtılma işlemi uygulanabilmektedir. Bu yüzden $\alpha + \beta$ alaşımları 350-400°C arasındaki sıcaklıklarda ve özellikle yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır [24, 27].

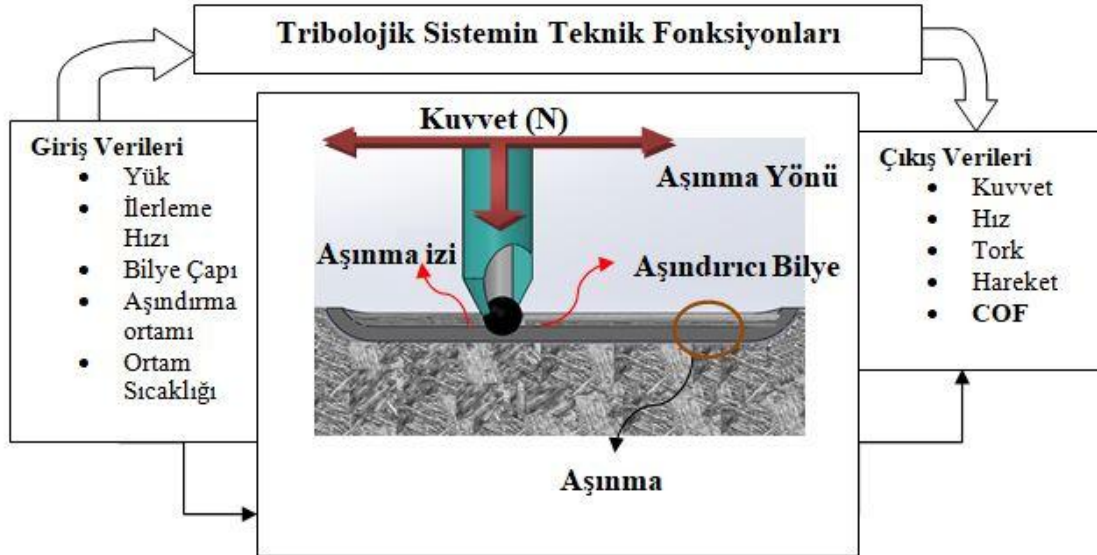
β alaşımları

Bu alaşımlar önemli miktarda β fazını kararlaştırıcı alaşım elementleri içeren malzemelerdir ve sertleştirilebilme, dövülebilme, dövülebilirlik, soğuk şekillendirme ve yüksek yoğunluk gibi özellikleriyle diğer titanyum alaşımlarından ayrılmaktadır. Bu alaşımlar oda sıcaklığında $\alpha + \beta$ alaşımları ile benzer mukavemet değerlerine sahiptirler fakat yüksek sıcaklık değerleri, $\alpha + \beta$ alaşımının gerisine düşmesine sebep vermektedir [27].

1.2 Aşınma

Triboloji, birbirleriyle temas halinde hareket eden ve bunun sonucunda etkileşen yüzeyleri inceleyen bir alandır. Triboloji, hem katılar hem de katılar ile sıvılar ya da gazlar arasındaki sınır katmanı etkileşimlerini kapsar. Triboloji, yağlama da dahil olmak üzere tüm sürtünme ve aşınma alanını kapsar Şekil 1.4 [29].

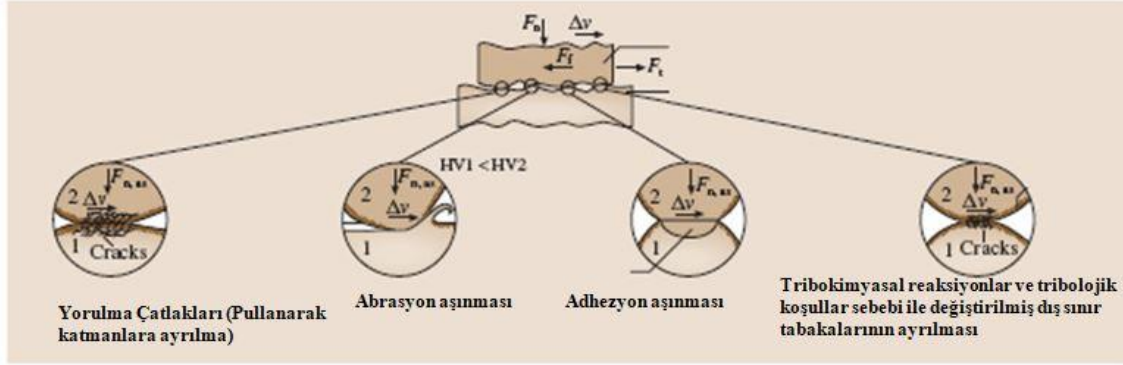
Triboloji, belirli bir uygulama durumu için sürtünmeyi ve aşınmayı optimize etmeyi amaçlamaktadır. Gerekli işlevi yerine getirmenin yanı sıra, mümkün olan en düşük üretim, montaj ve bakım maliyetlerinde yüksek verimlilik ve yeterli güvenilirlik sağlamak anlamına gelir.



Şekil 1.4. Aşınma sisteminin temsili gösterimi [2]

Sürtünme ve aşınma triboteknik bir sistemde (TTS) meydana gelir. Bir TTS'yi sınırlamak için, doğrudan sürtünme ve aşınmaya karışan bileşenler ve malzemeler

etrafına uygun bir şekilde bir sistem zarfı yerleştirilir, böylece bunların geriye kalan bileşenlerden neredeyse yalıtılması sağlanır. Sürtünme ve aşınmaya karışan malzemeler ve bileşenler TTS'nin elamanlarıdır. Malzeme ve şekil özellikleri ile karakterize edilirler. Bir triboteknik sistem, yerine getirilecek fonksiyon, giriş değişkenleri (çalışma değişkenleri), çıkış değişkenleri, kayıp değişkenleri ve yapı elemanları ile tanımlanır (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. Mikroskopik olarak görülen temel aşınma mekanizmaları (görünür temas yüzeyindeki F_n normal kuvveti, taban gövde ve karşı gövde arasındaki F_t sürtünme kuvveti, F_n , pürüzlülük temasında normal kuvvet olarak, ΔV bağıl hızı, HV Vickers sertliği) [30]

Şekil 1.5' te etkili aşınma mekanizmalarının temsili gösterimi verilmiştir. Aşınma mekanizmaları ayrı ayrı, arka arkaya veya eşzamanlı olarak ortaya çıkabilir. Yüzey yorulması, çatlama, çatlak büyümesi ve temel gövdenin (Aşınan) ya da karşı gövdenin (Aşındıran) yüzeye yakın bölgelerinde değişen yüklerin getirdiği aşınma parçacıklarının ayrılması ile kendini gösterir. Bu aşınma hasarı yorulma aşınması adı ile bilinmektedir.

Abrasyon aşınmasında uygulanan yük ve tekrarlı hareketin etkisiyle temas eden iki cisimden daha sert olanının, pürüzlü tepecikleri ya da taneleri aracılığı diğer cismi çizerek üzerinden mikron mertebesinde talaş kaldırılma olayıdır. Adhezyon aşınması, iki düzgün katı cismin sıvı ya da kuru aşındırma koşullarında kayma teması ile oluşmaktadır. Bu aşınma tipinde, eş çalışan yüzeyler arasındaki yükü taşıyan yüzey pürüzlülüklerinin arasında oluşan mikro kaynakların kesme olayı sonucunda ortaya çıkmaktadır [31]. Yapışkan bağların mukavemeti daha yumuşak sürtünme ortağından daha büyükse, malzeme en sonunda daha yumuşak sürtünme ortağının deforme olmuş

yüzeyinden ayrılır ve daha sert olana aktarılır. Aktarılan malzeme daha sert sürtünme ortağı üzerinde kalabilir veya ayrılabilir veya hatta geri dönebilir.

Korozif aşınma mekanizmasında, korozif bir ortam söz konusu olduğunda parçaları oluşturan metal ve alaşımlar bileşik oluşturmak için çevre ile kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyona girerler ve çeşitli bileşikler oluşturarak metalin içyapısında bir zayıflama yaratırlar. Oluşan bu bileşiklerin ana metalle bağlantıları zayıflar ve bileşikler ana metalden koparlar. Korozyon aşınması, metallerde hem korozyon hem de aşınmanın birlikte meydana gelmesi şeklinde tanımlanabilir. Korozyonlu aşınmada meydana gelen malzeme kaybı, bu mekanizmaların ayrı ayrı meydana gelmesi halinde ortaya çıkan malzeme kaybının toplamından daha fazladır.

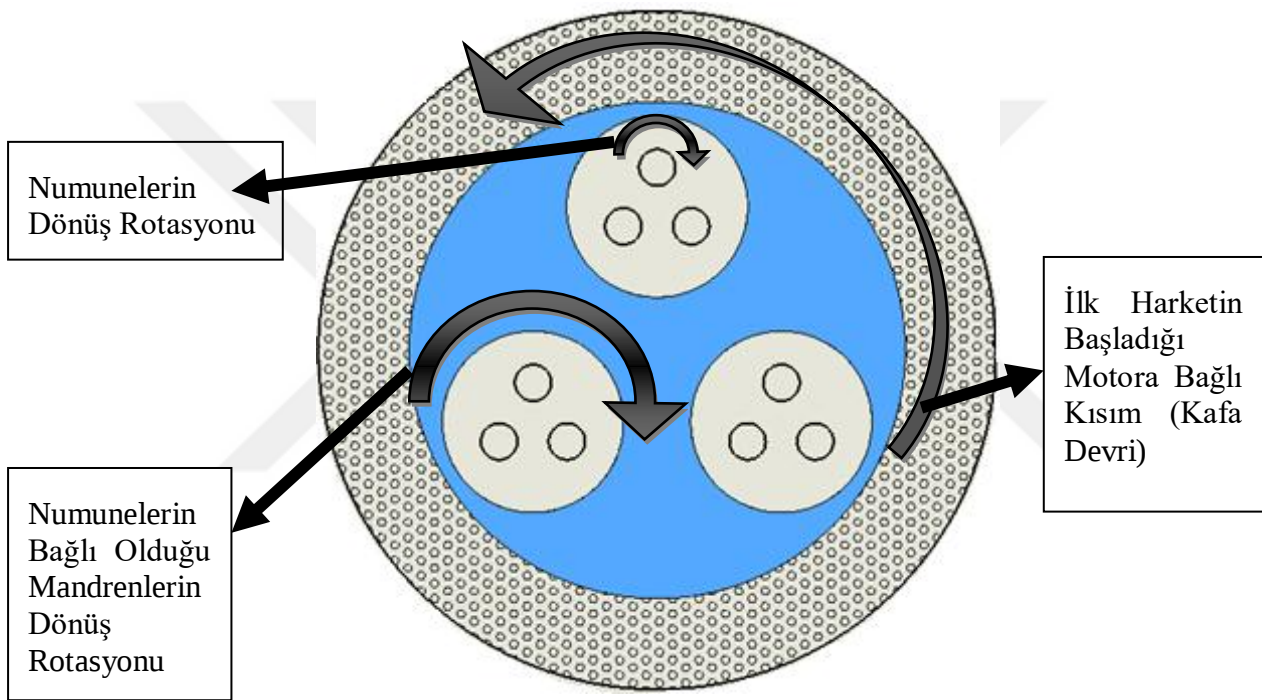
SLE üretim yöntemi ile üretilmiş olan numunelerin aşınma davranışını araştıran bir takım çalışmalar vardır. Sun ve diğ. [32], kuru kayma testleri kullanılarak *SLE 316L* paslanmaz çelik bileşenlerinin tribolojik özellikleri hakkında bir araştırma yürütmüşler. Sonuç olarak, *SLE 316L* çeliğinin aşınma oranının, standart dökme *316L* çeliğinden çok daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, Zhu ve ark. [33], *SLE 316L* bileşenleri kullanılarak düşük hızda yağlanmış testler gerçekleştirmiş ve sürtünme ve aşınmanın geleneksel olarak işlenmiş olanlara kıyasla fazla bir fark göstermediğini bulmuşlardır. Attar ve diğ.[34], martensitik mikro yapısı, daha ince tane boyutu ve üstün mikro sertliği nedeniyle SLE ile işlenmiş titanyumun dökme titanyumdan daha yüksek aşınma direncine sahip olduğunu bildirmişlerdir. Prashanth ve diğ. [35] kuru koşullar altında SLE *Al-12Si*'nin tribolojik performansını araştırmışlardır. Sonuç olarak, hazırlanan SLE örneğinin, döküm ve ısıtılma işlem görmüş SLE numunelerine kıyasla en düşük aşınma oranına sahip olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmada, abrasiv aşınma, oksidasyon ile birlikte başlıca aşınma mekanizmasıdır. Prashanth ve diğ. [36], *Al-12Si* matrisi ile *Al-12Si-TNM*'nin mikroyapı ve aşınma performansını karşılaştırmış ve aşınma mekanizması ve geçişleri tartışılmıştır. Çoğu çalışma, kuru koşullar altında SLE fabrikasyon parçaların aşınma performansına odaklanmıştır ve SLE ile işlenen *Ti-6Al-4V*'nin aşınma davranışlarından bahsedilmiştir.

1.3 Sürükleyerek (Darg Finishing) Yüzey İyileştirme

Sürükleyerek yüzey iyileştirme teknolojisi, iş parçaları arasında temas olmaksızın, taşlama ya da cilalama gibi yüksek kaliteli yüzeylere ihtiyaç duyulan iş parçaları için

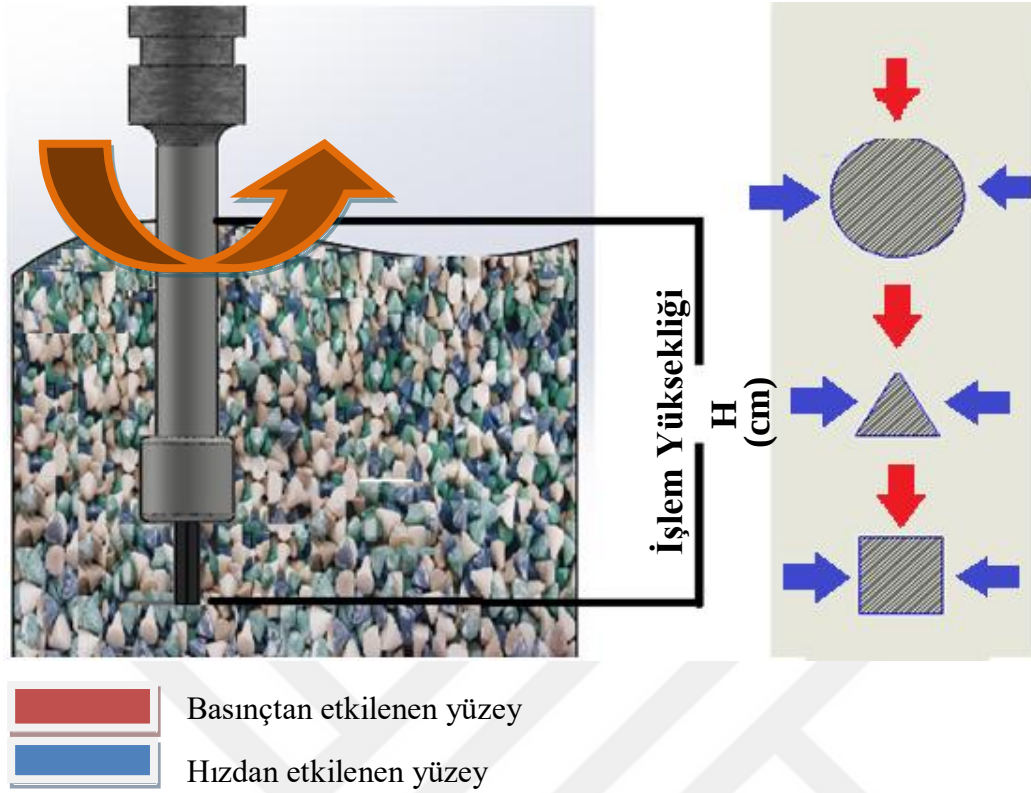
kullanılır. Sürükleyerek yüzey iyileştirme metodu iki farklı koşulda gerçekleştirilir bunlar; kuru ve sıvı koşullardır.

İş parçaları, özel tutucular ile sürükleyerek yüzey iyileştirme makinesinin takım tutucularına sabitlenir. Takım tutuculara sabitlenen iş parçaları, serbest bir halde bulunan aşındırıcı taşlar ve parlatma sıvısı ile doldurulmuş daire kesitli kazan içerisine daldırılarak, dairesel bir hareket ile sürüklenir. Ana iş mili saat yönünde veya saat yönünün tersinde farklı hızlarda döndürülebilir. Şekil 1.6'da sürüklemeli yüzey iyileştirme cihazına ait çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 1.6. Sürükleyerek (Drag finishing) yüzey iyileştirme cihazının işlem esnasında dönüş yönlerinin gösterimi

Sürükleyerek yüzey iyileştirme işlemi büyük ölçüde basınç ve hıza bağlıdır. Sürükleme işleminde yüksek hızlarda, aşındırıcı medya ile iş parçası arasındaki etkileşim artacağından kısa sürede, yüksek kaliteli yüzeyler elde etmek mümkündür. Yüzey kalitesi iyileştirilecek olan numunler ile medyalar arasında ki işlem ilişkisi Şekil 1.7'de gösterilmiştir. Daldırma derinliği ve dönme hızı gibi parametreleri kontrol ederek geleneksel titreşimli santrifüj ile yüzey iyileştirmeye kıyasla yaklaşık 40 kat üstün aynı zamandan yüksek enerjili titreşimli yüzey iyileştirme (vibrasyon) sistemlerinden 4-5 kat daha iyi yüzey iyileştirmesi mümkündür [37].



Şekil 1.7. Sürükleyerek (Drag finishing) yüzey iyileştirme cihazının işlem esnasında numuneler ile medyaların temasları esnasında etkilenen bölgelerin gösterimi

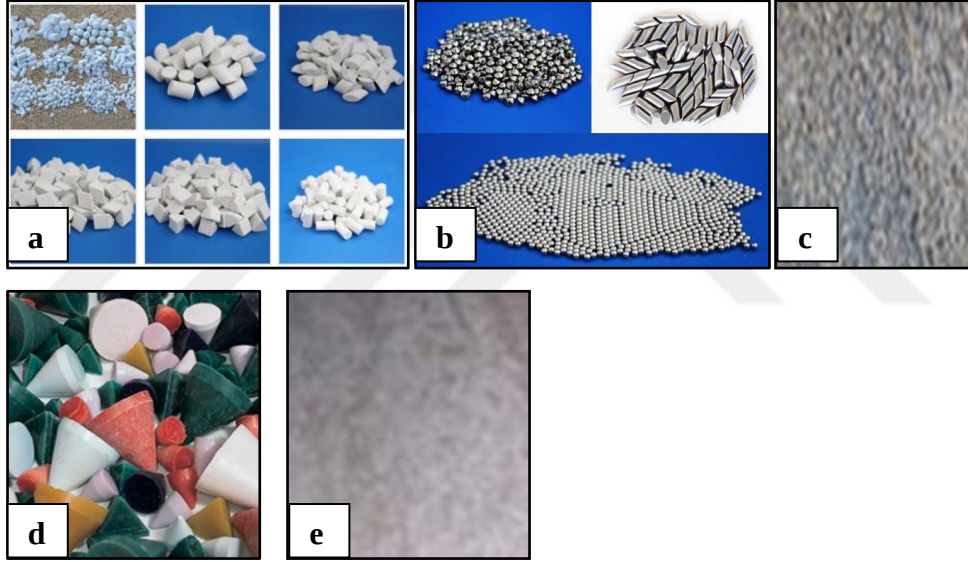
SYİ operasyonları endüstride hassasiyetin gerekli olduğu uygulamalarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 1.8’ de SYİ operasyonunun uygulama alanlarına dair örnekler verilmiştir.



Şekil 1.8. Sürükleyerek (Drag finishing) yüzey iyileştirme cihazının kullanım alanları

1.3.1 Sürükleyerek (Drag Finishing) yüzey iyileştirmede kullanılan medyalar

Üçgen, konik, silindirik, küresel ve tetrahedralin yol açtığı yaklaşık 15 farklı büyük yoğun olmayan aşındırıcı ortam şekli vardır bu ortamlarda kullanılan medyalar Şekil 1.9’ da verilmiştir. Her aşındırıcı ortam, iş parçası konfigürasyonuna bağlı olarak belirli bir uygulama için kullanılır. Şekil, medya seçiminde önemli bir faktördür. Ana hususlar, seçilen gevşek aşındırıcı ortamın şeklinin, çapak alma veya son işlem için çıkıntılar, delikler veya diğer geometrik özellikler anlamına gelen iş parçasının tüm yüzeylerine erişmesine izin vermesi ve ortamın kolayca ayrılmasına izin vermesidir. İş parçası döngünün sonunda yüzey pürüzlülüklerinden arındırılarak işlenmiş olur. Bazı durumlarda, ortamın şekli de etkili olabilir (medyaların kuru ya da sıvı ortamda yüzey iyileştirmesi).



Şekil 1.9. SYİ operasyonlarında kullanılan: a) farklı geometri ve abatlarda seramik, b) farklı geometri ve abatlarda çelik, c) Al_2O_3 , d) Plastik, e) Ceviz granül medyaları

Yoğun olmayan aşındırıcı ortamın boyutu çeşitli nedenlerden dolayı önemlidir. İş parçalarını birbirinden ayrı tutmaya yardımcı olur. Doğru seçim, ortamın tüm yüzeylere ulaşmasını ve çapağının alınmasını sağlayabilir. Daha büyük ortamlarda daha yüksek bir kesme hızı kullanılarak iş parçalarında daha pürüzsüz yüzeylerin elde edilmesi mümkündür. Bununla birlikte, yüksek enerjili kütle sonlandırma yöntemlerinde küçük ortamların kullanılması, döngü süresini arttırmadan yüzey kalitesini iyileştirebilir. Gevşek aşındırıcı ortamın ağırlığı, ortam seçiminde önemli bir faktördür. Daha ağır ortam daha hızlı kesim sağlar. Aynı zamanda kullanılan medyaların ömrünü de uzatır.

Bununla birlikte, kullanılan medyaların boyutları ve medyaların geometrik şekilleri bulundukları ortamda numunelere uygulanan basınç ve hızı etkiler, bu durumun gelişimi ince veya sünek iş parçalarının bükülmesine ya da bozulmasına neden olabilir[38].

Medyaların geometrik karaktersitikleri; prizma şeklinde ya da silindirik şekilde kimediyaların köşegenleri veya keskin köşeleri numunelerden talaş kaldırma yeteneklerini doğrudan etkiler. Bu durum medya aşınmaya kadar devam eder. Medyaların bulunduğu ortamın kapasitesi esasında şu şekilde tanımlanır: İşleme parametreleri; medya bileşimi, kesme hareketi, kesme hızı, medya boyutu, ve finişaj işleminin kalitesi etkindir. Sert medyaların çalışma ömürleri, yumuşak medyalara göre daha uzundur. Medyalar malzeme türü gözetmeksizin (plastik, seramik vs.) zamanla aşınır ve boyut olarak küçülürler. Karmaşık geometri parçalarda ya da üzerinde delik bulunan numunelerde medyaların buralara yerleşmesine sebep olur. Bu durumda medyalar manuel olarak temizlenir.

Medyaların yüzey iyileştirme kabiliyetlerinde sertlik ve yoğunluk arasında güçlü bir bağ kurulabilir. Numuneye bağlı olarak kullanılan medyalardan, sert ve yoğun bir ortam agrasif bir aşındırmaya sebep olur bu da kötü bir yüzey kalitesi eldesine. Bu durumda kullanılacak yumuşak ve yoğunluğu düşük bir ortamda yüzey kalitesi yüksek numunelerin elde edilmesine olanak sağlayacaktır. Bu özellik, bu çalışmada kullanılan medyaların verimlilik kapasitesini anlamakta ciddi bir faktördür.

Moore bir çalışmasında [39], Konik şekilli aşındırıcı taneler, numuneden kaldırılan talaş/çapak miktarından bağımsız olduğunu incelemiştir. İş parçası ve aşındırıcı parçacıkların/medyanın aşınma hacmi ile ortalama çapı arasındaki ilişkiyi araştıran bir çalışmada, medyanın iş yüküne oranını belirleyerek en ekonomik çözümü bulmanın mümkün olduğunu göstermiştir. Bu çalışmanın sonuçları, optimum orandaki herhangi bir değişikliğin elde edilen finişaj kalitesi üzerinde önemli bir etki yaratabileceğini göstermektedir [38]. Ayrıca, çalışmada kullanılan malzeme yelpazesi için, aşındırıcı tanenin çapının arttırılmasının, iş parçasından çıkarılan hacmi arttırdığı da not edilebilir. Domblesk ve Dennis [40], parçacık şeklinin üretilen aşındırıcıların davranışını kontrol eden tek değişken olmadığını ileri sürmüşlerdir. Partikül şekli ve paketlenme davranışı arasındaki ilişkinin, eskisinin aşınma oranını doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılmadan önce anlaşılması gerekir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DÜZENEKLER

2.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan İş Malzemesi

Bu çalışmada kullanılan iş malzemesi, eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan SLE yöntemi ile üretilen *Ti-6Al-4V* malzemesidir. Üretilen malzemeler 3 farklı geometriye sahiptir. Malzemelere, üretimden sonra vakum ortamında 650°C sıcaklıkta 3,5 saat süresince gerilim-giderme ısıtma işlemi uygulanmıştır. Üretilen malzemelere üretim sonrasında ısıtma işlemi haricinde ikincil bir işlem uygulanmamıştır.

Titanyum alaşımları genel olarak üstün mukavemet, korozyon direnci, biyouyumluluk, düşük ısıtma genleşme ve hafif ağırlık sunar. En yaygın kullanılan titanyum alaşımı %6 alüminyum %4 vanadyum ve titanyumun birleşiminden oluşan *Ti-6Al-4V*'dir. Bu çalışmada kullanılan *Ti-6Al-4V* numunesine ait özellikler sırası ile Tablo 2.1 ve Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.1. SLE ile üretilen *Ti-6Al-4V*'ün kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşim	Değerler (% ağırlık)
Alüminyum	5,5 – 6,5
Vanadyum	3,5 – 4,5
Demir	0 – 0,25
Oksijen	0 – 0,13
Karbon	0 – 0,08
Azot	0 – 0,05
Hidrojen	0 – 0,012
Titanyum	Kalan

Tablo 2.2. SLE ile üretilen *Ti-6Al-4V*'ün fiziksel özellikleri[41, 42]

Özkütle (g/cm ³)	4,429
Ergime noktası (°C)	1650
Isıl iletkenlik (W/m°C)	6,6
Özgül ısı (J/Kg°C)	565

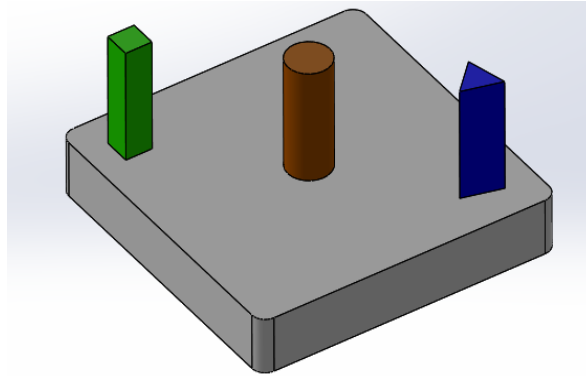
SLE yöntemi ile üretilen *Ti-6Al-4V* numunelerine ait mikroyapı görüntüsü Şekil 2.1’ de verilmiştir. Şekilde görülen mikroyapı, α fazı (koyu renkli bölgeler) ve β fazından (açık renkli bölgeler) oluşmaktadır. Eİ ile üretilen numunelere üretim sonrasında gerilme giderme tavlaması uygulanmıştır. Uygulanan ısıtıl işlem (650 °C/3,5 saat) sıcaklığının faz dönüşümü sıcaklığı altında olması sebebiyle fazlarda herhangi bir değişim söz konusu değildir. Isıl işlem sonrasında α' (asiküler) martenzit fazına ait iğnemi yapı daha yumuşak bir formda oluştuğu (Şekil 2.1) belirlenmiştir. Söz konusu fazların varlığı XRD analizi sonucuyla da kanıtlanmıştır.



Şekil 2.1. SLE ile üretilen *Ti-6Al-4V* numunelerine ait mikroyapı görüntüsü

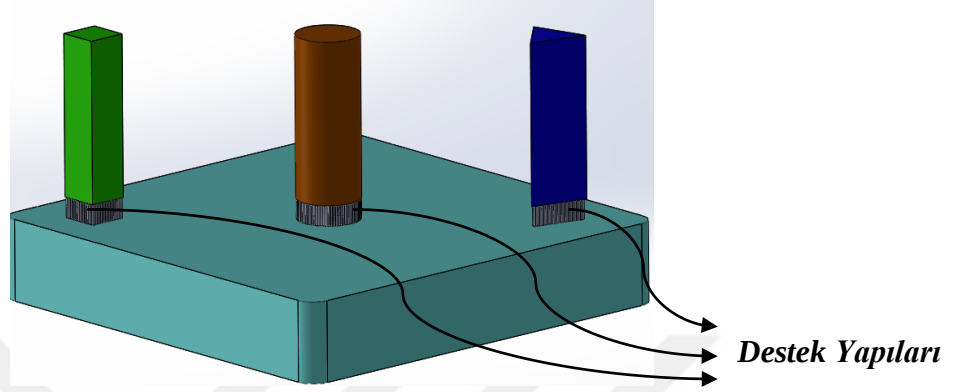
2.2 CAD Modelin Oluşturulması ve STL Formatına Çevrilmesi

İş parçaları SolidWorks paket programı ile çizilerek (Şekil 2.2) STL formatına çevrildi. STL formatına aktarılma esnasında SolidWorks programının default parametreleri kullanıldı. Kullanılan parametre sonucunda STL formatına dönüşümde numune datası üzerinde herhangi bir kusura rastlanmamıştır.



Şekil 2.2. Numunelerin SolidWorks paket programı ile çizilmesi ve tabla üzerine yerleştirilmesi

Oluşturulan CAD modeli, SLE cihazında üretilebilmek için STL formatına dönüştürülmüştür. Üretilcek parçaya destek sağlaması ve numunelerin üretim tablasına yapışmasını engellemek için numunelerin çeşitli bölgelerine destek yapılarının eklenmiş görüntüsü Şekil 2.3’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. SLE üretim öncesinde STL formatına çevrilen numunelere destek yapılarının (support) atılması

2.3 Seçici Lazer Ergitme Yöntemi ile Numunelerin Üretilmesi

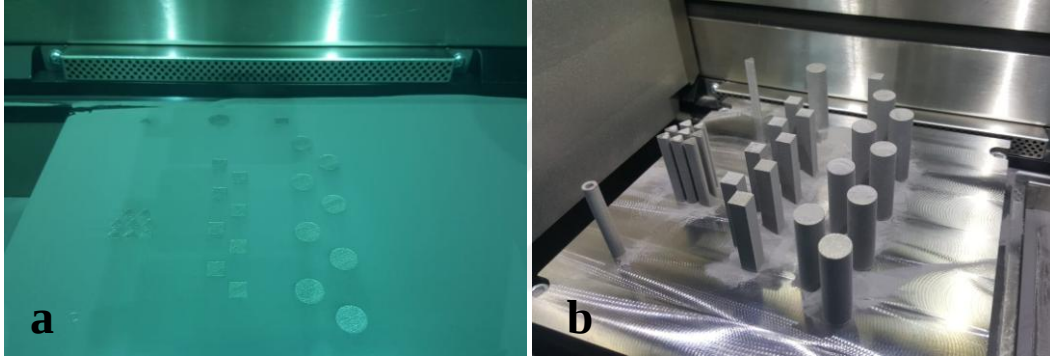
Aşınma testlerinde kullanılacak numuneleri Şekil 2.4’ te gösterilen EOSSİNT M 280 cihazı ile Tablo 2.3’ te verilen üretim parametreleri kullanılarak üretilmiştir. Üretim esnasında tarama stratejisi sırasıyla down-skin, contour son olarak up-skin olarak belirlendi. Şekli Tablo 2.3’te üretilen numunelerin boyutlarına ait bilgilerde verilmiştir. Şekil 2.5 ‘te sırası ile üretim aşması, üretim sonrasında tozlardan arındırılmış numunelere ait görüntüler gösterilmektedir.

Tablo 2.3. Üretim parametreleri ve numunelerin boyutları

Üretim parametreleri	Değerler
Lazer gücü (W)	195
Tarama hızı (mm/s)	1250
Katman kalınlığı (μm)	30
Tarama mesafesi (μm)	100
İnşa oryantasyonu (Derece)	60
Üçgen geometrinin boyutsal verileri	6x6x6x40 (eşkenar üçgen)
Kare geometrinin boyutsal verileri	10x10x40
Silindirik geometrinin boyutsal verileri	$\varnothing 10 \times 40$



Şekil 2.4. *Ti-6Al-4V* numunelerinin üretildiği EOSSİNT M 280 cihazı



Şekil 2.5. a) SLE ile üretim sürecindeki tablanın görüntüsü, b) üretim sonrasında tozlardan arındırılan *Ti-6Al-4V* numunelerine ait görüntü

2.4 Boyutsal Doğruluk Ölçümü

Farklı geometriye sahip iş parçalarının SLE yöntemi ile üretildikten sonra kalite kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Kalite kontrol işlemleri sırasında Şekil 2.6'da gösterilen Solutionix C500 marka 3D tarama cihazı kullanılmıştır. Cihaza ait teknik bilgiler Tablo 'de verilmiştir. Solutionix C500, doğrudan ölçümü yapılacak nesneye veya ölçme plakasına ya da bir fikstrü referans olarak, yapılan ölçümleri tamamen ortak bir global koordinat sistemine dönüştürmektedir. Yapılan ölçümler, kesit ya da STL datası şeklinde hazırlanabilir. Solutionix C500 de, 5 MP çözünürlüğe sahip iki adet kamera, projektör, stand ve sensör kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Otomasyon amaçları için döner bir tablaya sahiptir.

Tablo 2.4. Solutionix C500 marka 3D tarama cihazına ait teknik özellikler

Kamera çözünürlüğü (MP)	5
Ölçüm alanı (mm)	90, 175, 350
Nokta aralığı (μm)	0.028, 0.056, 0.11



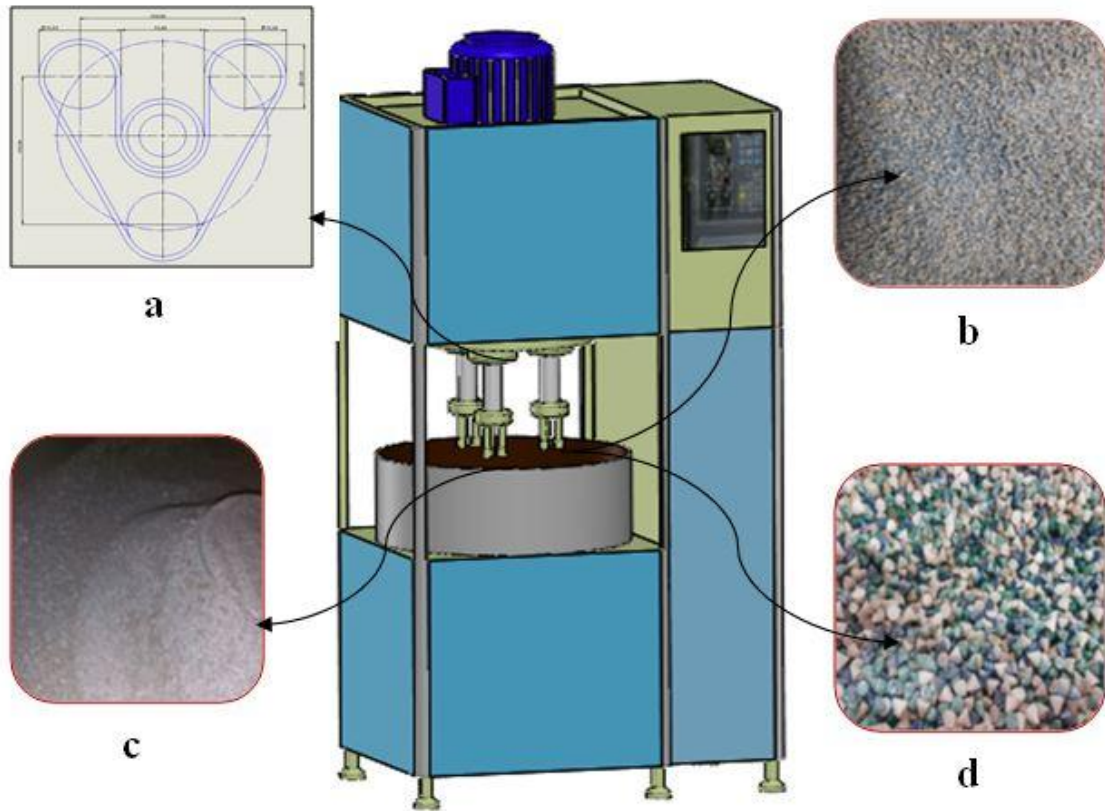
Şekil 2.6. Boyutsal doğrulukta kullanılan Solutionix C500 marka 3D tarama cihazı

2.5 Sürükleyerek Yüzey İyileştirme Çalışmaları

Seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilen numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerini son kullanıma uygun hale getirmek için Şekil 2.7’de gösterilen Drag Finishing adlı cihaz kullanıldı. Testlerde kullanılan aşındırma taşları ve proses parametreleri Tablo 2.5’de verilmiştir.

Tablo 2.5. Sürükleyerek (Drag Finishing) yüzey iyileştirmede kullanılan medyalar ve yüzey iyileştirme parametreleri

SYİ	Ceviz granül (50-100 μ m),	Al_2O_3 Medyası (100- 175 μ m),	Plastik aşındırma medyası (20x20 mm)
Dönme Hızı (Kafa) (rpm)	45	45	45
Dönme Hızı (İş parçası) (rpm)	60, 120	60, 120	60, 120
İşlem süresi (dakika)	15, 30, 60	15, 30, 60	15, 30, 60
İşlem derinliği (cm)	30	30	30

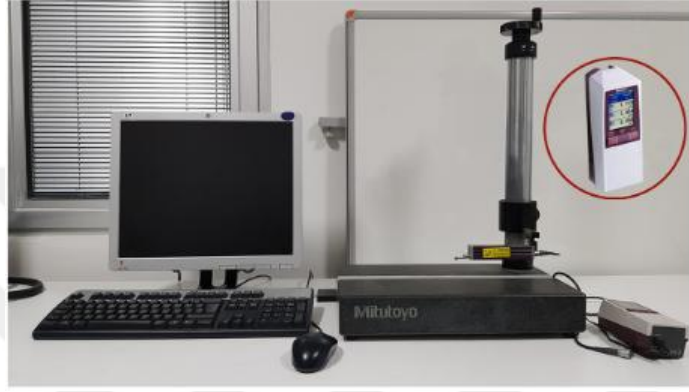


Şekil 2.7. Sürükleyerek (Drag Finishing) yüzey iyileştirme cihazı, a) Cihaza ait motordan aldığı hareketi numune tutucu kollara ilettiği mekanizma, b) Al_2O_3 medyası, c) Ceviz granül+ Al_2O_3 medyası d) Al_2O_3 ve Plastik aşındırma medyası

2.6 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

SLE yöntemi ile üretilen iş parçalarının üretim sonrasındaki yüzey pürüzlülük değerlerini ve sürükleyerek yüzey iyileştirme testleri sonrasındaki yüzey pürüzlülüğü

değerleri Mitutoyo marka SJ210 model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Ölçüm işlemleri TS 6212 EN ISO 4288 standardına göre yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm parametreleri λ_c değeri 0.8mm, λ_s değeri 2.5mm olarak standart değerler belirlendi. Her bir ölçüm, iş parçasının on farklı yerinden ölçülmüş ve elde edilen on ölçüm sonucunun aritmetik ortalaması alınmıştır. Elde edilen sonuç iş parçasının işlem sonrasında ki ortalama yüzey pürüzlülüğü olarak kabul edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı Şekil 2.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

2.7 Aşındırma Testleri

İş parçalarına yapılan ikincil işlem sonrasında aşınma davranışının incelenmesi üzere Şekil 2.9’ da gösterilen Turkeyus İleri-Geri aşındırma cihazı kullanılmıştır. Aşındırma işleminde Al_2O_3 aşındırıcı bilye kullanılmıştır [43]. Kullanılan bilyenin yüzey pürüzlülük değeri (Ra) 0,032 mm, mikrosertlik değeri ise 1310 ± 10 HV olarak ölçülmüştür. Aşınma testlerinde kullanılan parametreler Tablo 2.6’ da verilmiştir.

Tablo 2.6. Aşındırma test parametreleri

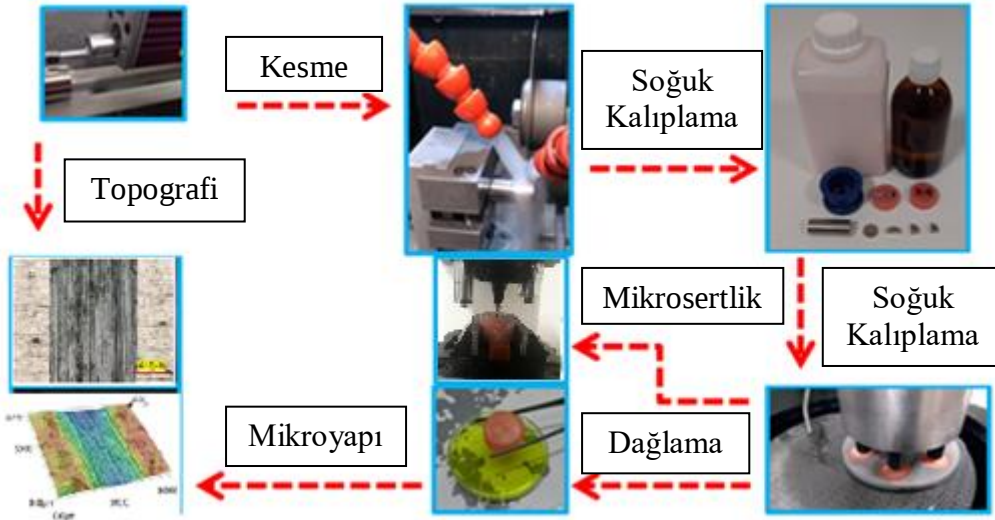
Deney Parametreleri	Değerleri
Test Türü	İleri- Geri
Uygulanan Yük (N)	10
Aşındırma stroğu (mm)	6
Aşındırıcı bilye malzeme	Al_2O_3
Aşındırıcı bilye çapı (mm)	6
Aşındırma hızı (mm/s)	20,6
Aşındırma süresi (s)	600
Sıcaklık (°C)	Oda sıcaklığı (24 ± 2)
Ortam	Kuru şartlar altında



Şekil 2.9. İleri-geri aşındırma test cihazı

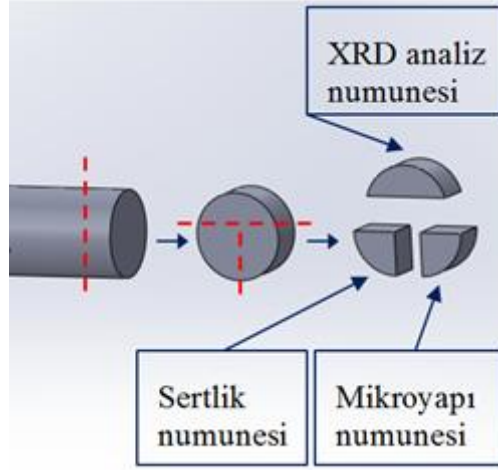
2.8 Yüzey Bütünlüğü Analizi İçin Yapılan Çalışmalar

Yüzey bütünlüğü analizi kapsamında yapılan çalışmalar Şekil 2.10' da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Yüzey bütünlüğü analizinde izlenen yolun şematik gösterimi

Sürükleyerek yüzey iyileştirme operasyonu sonucunda iş parçasının yüzey ve yüzey altında meydana gelen değişimlerin incelenmesi için hassas kesme cihazı ile iş parçaları üzerinden incelenmek üzere numuneler alınmıştır. Alınan numuneler ayrıntılı olarak Şekil 2.11'da, hassas kesme cihazı ise Şekil 2.12'de gösterilmiştir.

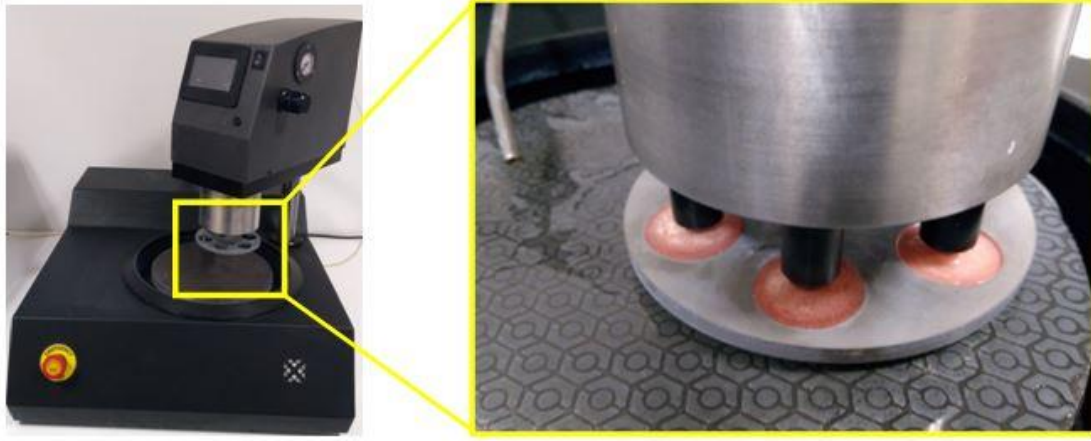


Şekil 2.11. Metalografik analiz için *Ti-6Al-4V* numunesinden alınan kesitlerin gösterimi



Şekil 2.12. Hassas kesme cihazı

Yüzey bütünlüğü analizi kapsamında hassas kesme cihazı kullanılarak kesilen numuneler 2 birim toz + 1 birim sıvı sertleştirici oranında hazırlanan akrilik çözelti içerisinde bakalit alınmıştır. Bakalit alınan numuneler daha sonra metalografik analizler için ilk olarak zımparalama cihazında sırasıyla 60, 30 ve 15 μm gritteki manyetik disklerle zımparalanmıştır. Bakalit alınan numunelerin zımparalama işlemi 250 rpm devir ve 300 N yük uygulayabilen zımparalama/parlatma cihazında yapılmış olup, cihaz Şekil 2.13’ te gösterilmiştir. Zımparalama işlemi tamamlandıktan sonrası zımparalama/parlatma cihazında manyetik parlatma keçesi ile 50 nm boyutunda elmas partiküllü parlatma solüsyonu kullanılarak parlatılmıştır.



Şekil 2.13. Zımparalama ve parlatma cihazı

2.9 Sertlik Ölçümü

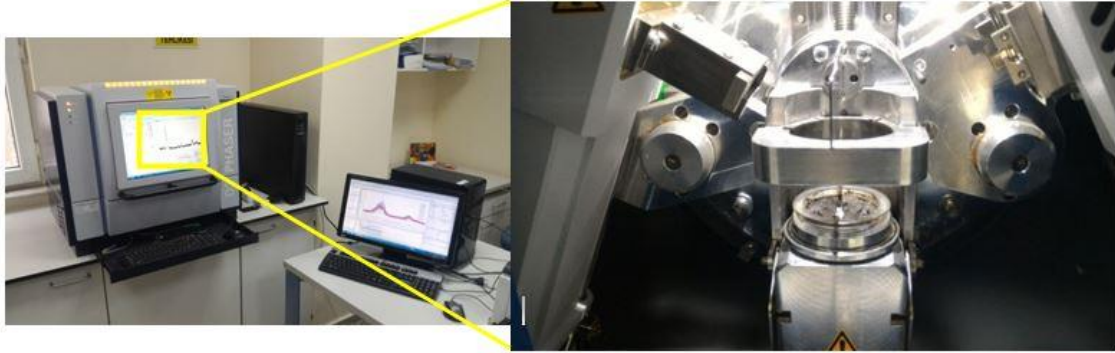
İşlem görmemiş ve sürükleyerek yüzeyleri iyileştirilen numunelerin yüzeyinden derinlere inildikçe meydana gelen sertlik değerlerindeki değişimleri gözlemlemek için parlatılan sertlik numunelerine Future-Tech FM310e model mikrosertlik cihazı ile numuneye iki farklı yerinden 50gf yük uygulanıp dört defa ölçüm yaptıktan sonra elde edilen Vickers (HV) sertlik değerlerinin ortalaması alınmıştır. Sertlik ölçme cihazı Şekil 2.14’de gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Future-Tech sertlik ölçme cihazı

2.10 X Işını Kırınımı (XRD) Analizi

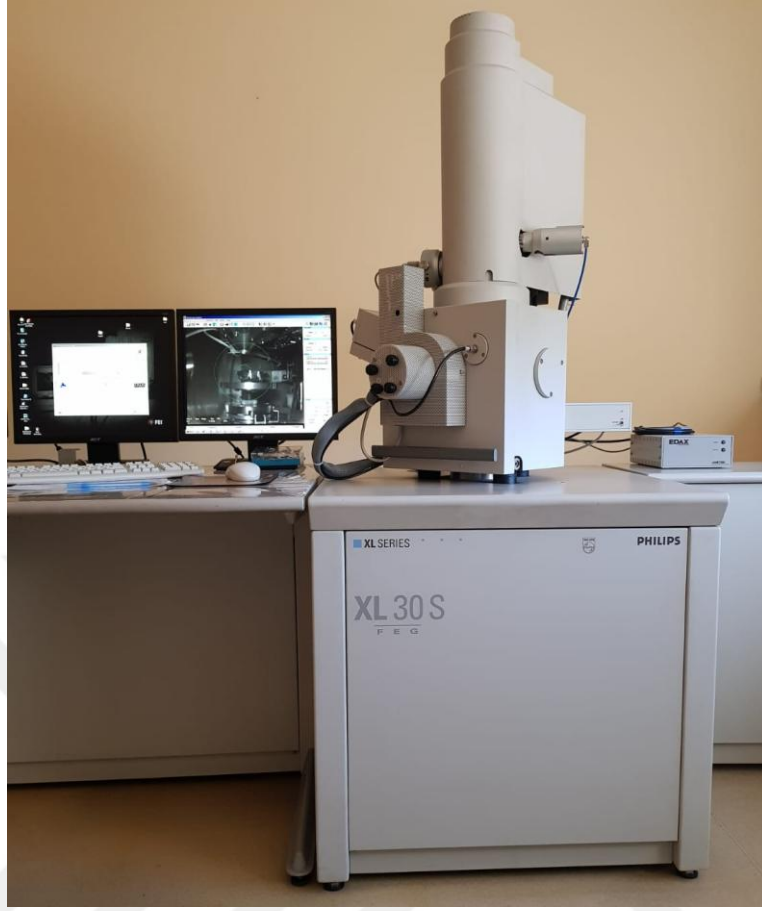
Seçici Lazer Ergitme yöntemi ile üretilen numuneler üzerinde oluşan fazların ölçümleri için Şekil 2.15'te gösterilen Bruker AXS Marka D2 Phaser cihazı kullanılmıştır. Faz analizi kapsamında yapılan XRD ölçümlerinde, $1,5405 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip Cu-K α kullanılmıştır. Akım ve voltaj değerleri sırasıyla; 10 mA ve 30kv olarak seçilmiştir. Ölçüm aralığı literatür dikkate alınarak $20-120^\circ$ seçilmiştir. Ölçümler işlem görmemiş numuneye ve sürükleyerek (drag finish) yüzey iyileştirme testlerinde işlem gören yüzeylere ve işlem görmemiş numuneye yapılmıştır.



Şekil 2.15. XRD ölçüm sistemi ve ölçülen numunelere ait görüntü

2.11 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi

Aşındırma işlemi sonucunda elde edilen aşınma izlerinin görüntülemek için Şekil 2.16'da gösterilen PHİLİPS XL 30 SFEG markalı taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.



Şekil 2.16. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

2.12 Mikroyapısal İnceleme

SLE yöntemi ile üretilen numunelerde üretim sonrasında oluşan boşluklu yapıları tespit etmek, sürükleyerek yüzey iyileştirme ve aşındırma operasyonları sonrasında iş parçasının yüzey bölgelerinde meydana gelen değişimleri incelemek için Şekil 2.17’de gösterilen çeker ocakta (3 mL HF, 6 mL HNO₃ ve 100 mL H₂O [44]) kullanılarak dağlama solüsyonu hazırlanmıştır. Parlatılan numuneler üzerine hazırlanan solüsyon damlatılmış ve dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.17. Dağlama esnasında zararlı gazların ortamdan atılması için kullanılan çeker ocak

Mikroyapı görüntüleri Şekil 2.18’ de gösterilen Keyence VHX 6000 dijital mikroskop elde edilmiştir. Dijital optik mikroskop 250x-2500x büyütme aralığı, birden çok görüntüyü birleştirme, 3D görüntü alma, yüzey topografisi alma, görüntü alma sırasında otomatik odaklanma özelliklerine sahiptir.



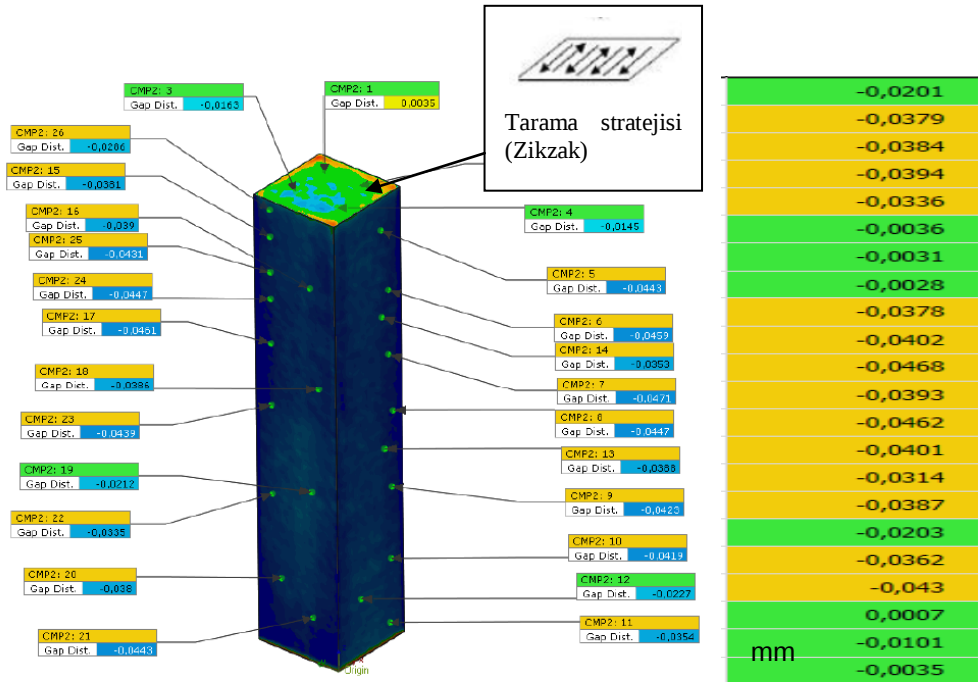
Şekil 2.18. Mikroyapı, aşınma izi, aşınma profili görüntülerinin alındığı optik mikroskop

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Boyutsal Doğruluk

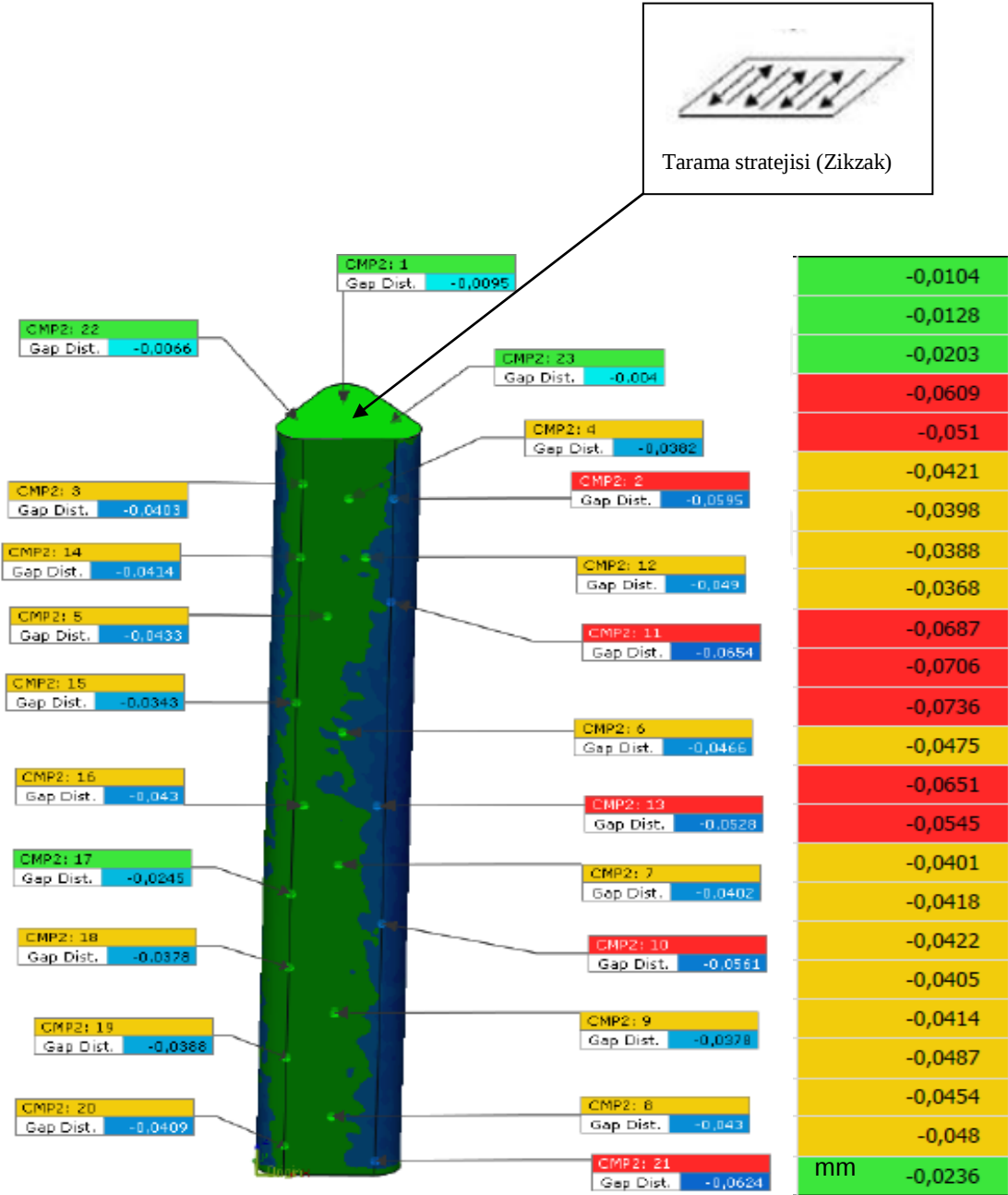
Boyutsal doğruluk kontrol işleminde, 3D tarama cihazı ile 3D CAD modelleri kullanılarak ve SLE yöntemi ile üretilen 3 farklı geometrideki numunelerin boyutsal doğrulukları kontrol edilmiştir. Boyutsal doğruluk kontrol işlemlerinde, iş parçalarının üretim sürecindeki destek yapıları temizlenmiştir. Şekil 3.1-3.6'da iş parçalarına ait ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Ölçümler, iş parçalarının yan duvarlarından ve kesitlerinden ölçülerek gerçekleştirildi. Ölçümler gerçekleştirilirken iş parçalarının tüm duvarları ölçüme dâhil edildi. Ölçümler için kullanılan *DIN ISO 2768-1* tolerans sınırları aralığında en iyi (*f*) tolerans aralığı sınır değerleri olarak kabul edilmiştir.

Şekil 3.1-3.2'de kare kesitli geometriye ait ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde; yeşil renk ile ifade edilen bölgeler ± 0.05 mm olarak kabul edilebilir ISO tolerans değerleri arasındaki üretim doğruluğunu göstermektedir. Mavi renk ile ifade edilen bölgeler kabul edilebilir tolerans değerlerinin altında olduğunu, benzer şekilde turkuaz renkli bölgede kabul edilen tolerans değerinin altındadır. Kare geometriye sahip numune silindirik ve üçgen kesitli numuneye kıyasla referans tolerans aralığında kaldığı görülmektedir.

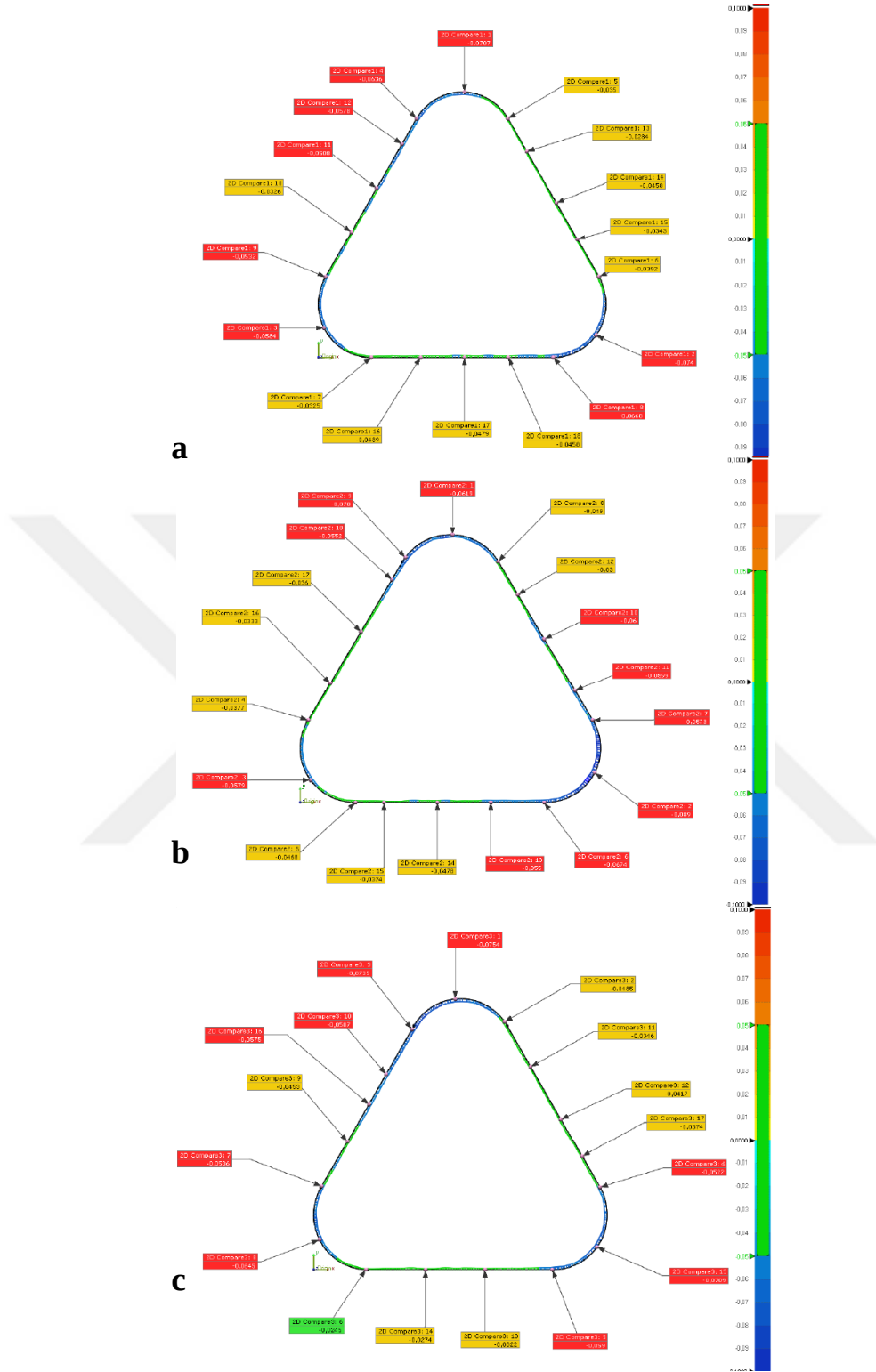


Şekil 3.1. Kare kesitli iş parçasına ait boyutsal doğruluk analizi

Şekil 3.3-3.4’de gösterilen üçgen geometriye ait boyutsal doğruluk sonuçları incelendiğinde iş parçasının yan duvarlarının boyutsal doğruluğu, referans tolerans değeri arasında kaldığı görülmektedir. Radyüslü (1.5mm) köşelerde ise referans tolerans değerinden sapmalar olduğu görülmektedir.



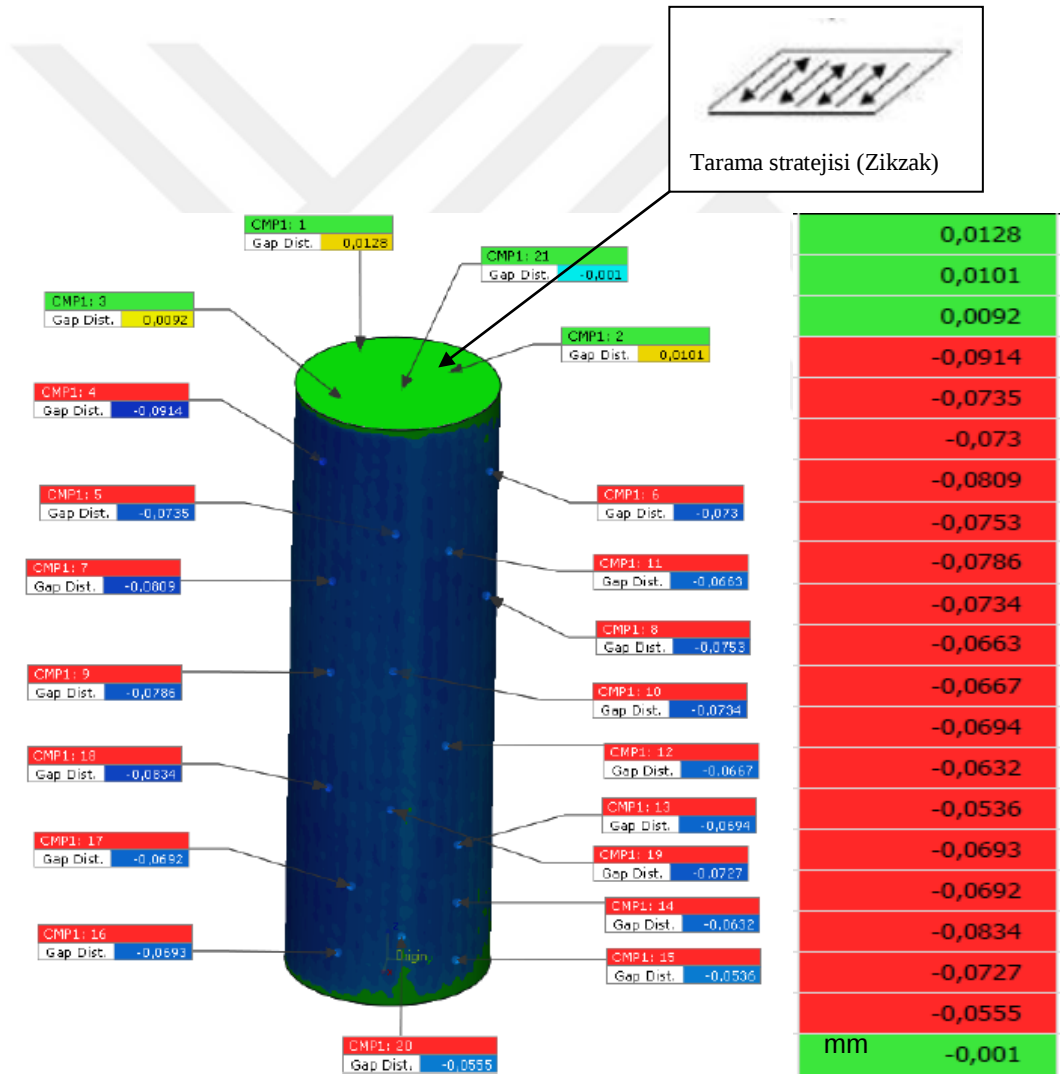
Şekil 3.3. Üçgen kesitli iş parçasına ait boyutsal doğruluk analizi



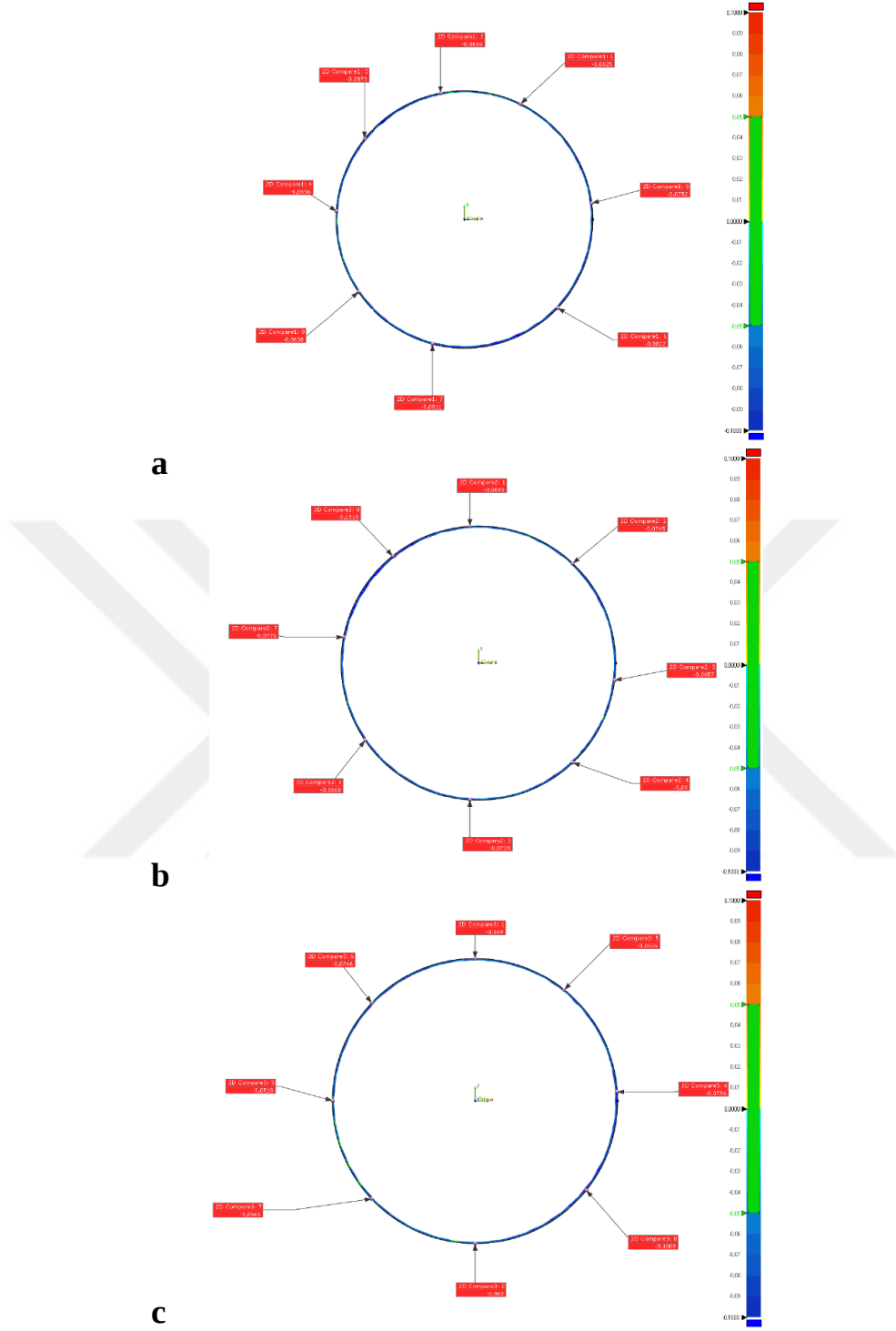
Şekil 3.4. Üçgen kesitli iş parçasına ait; a) tabandan 5 mm yükseklikteki kesit doğrusallığı, b) tabandan 25 mm yükseklikteki kesit doğrusallığı, c) tabandan 45 mm yükseklikteki kesit doğrusallığı,

Son olarak Şekil 3.5-3.6'da silindirik iş parçasının boyutsal doğruluğu incelendiği zaman, kare kesitli ve üçgen kesitli iş parçalarına nazaran boyutsal doğruluk değeri kabul edilen değerlerden yaklaşık olarak -0.09 mm sapsmış durumdadır. Daire kesitli geometride SLE ile üretilen iş parçalarındaki tarama stratejisinin ne derece önemli olduğu açıktır.

Üretim yönteminde kullanılan zikzak tarama strateji ve üretim esnasında parça çevresine uygulanan post countour işleme karşın dairesel kesitli iş parçaları için uygun olmadığı benzer şekilde geometri üretilmek istendiğinde zaman tarama stratejisinin değiştirilmesi gerektiği düşünülmektedir.



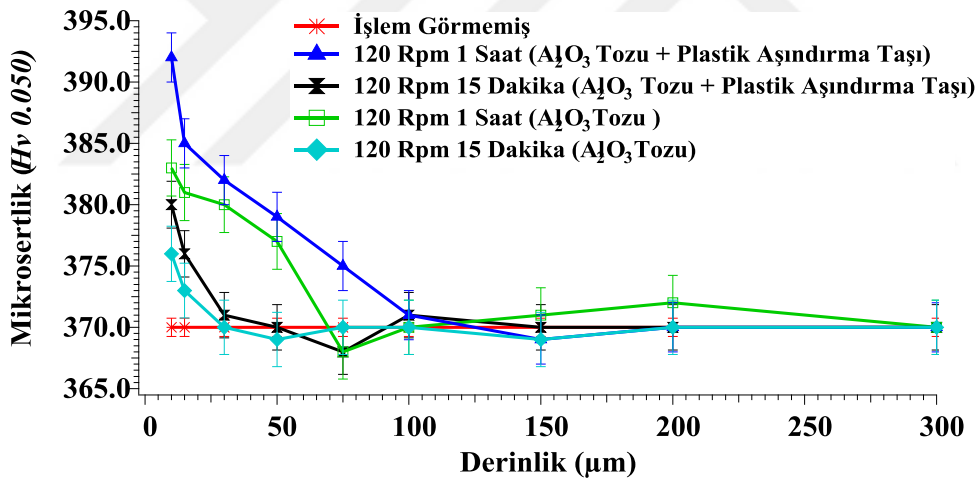
Şekil 3.5. Daire kesitli iş parçasına ait boyutsal doğruluk analizi



Şekil 3.6. Daire kesitli iş parçasına ait; a) tabandan 5 mm yükseklikteki kesit doğrusallığı, b) tabandan 25 mm yükseklikteki kesit doğrusallığı, c) tabandan 45 mm yükseklikteki kesit doğrusallığı

3.2 Mikrosertlik

Sürükleyerek yüzey iyileştirme operasyonu yapılan *Ti-6Al-4V* numunelerine ait mikrosertlik değerleri işlem yüzeyinden 300 μ m derinliğine kadar ölçülerek Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’ de gösterilmiştir. Şekil 3.7’ de yer alan grafik incelendiği zaman; 120 rpm dönme hızında plastik aşındırma taşı ve Al_2O_3 medyası kullanılarak 1 saat boyunca yapılan yüzey iyileştirme işleminde, malzeme yüzeyinde oluşan gerilimlere bağlı olarak sertlik değerinde yaklaşık % 6 oranında bir artış olduğu belirlenmiştir. Aynı yüzey iyileştirme ve medya kombinasyonu kullanılarak 15 dakika boyunca uygulandığı zaman mikrosertlik değerinde meydana gelen değişim yaklaşık olarak % 2.7 oranında olduğu ölçülmüştür. Yüzey iyileştirmede sadece Al_2O_3 medyası kullanımında 1 saatlik operasyonda mikrosertlikte meydana gelen değişim yaklaşık olarak %3 oranında ölçülmüştür. 15 Dakikalık yüzey iyileştirme işleminde ise mikrosertlikte meydana gelen değişim yaklaşık olarak %1.35 olarak belirlenmiştir.

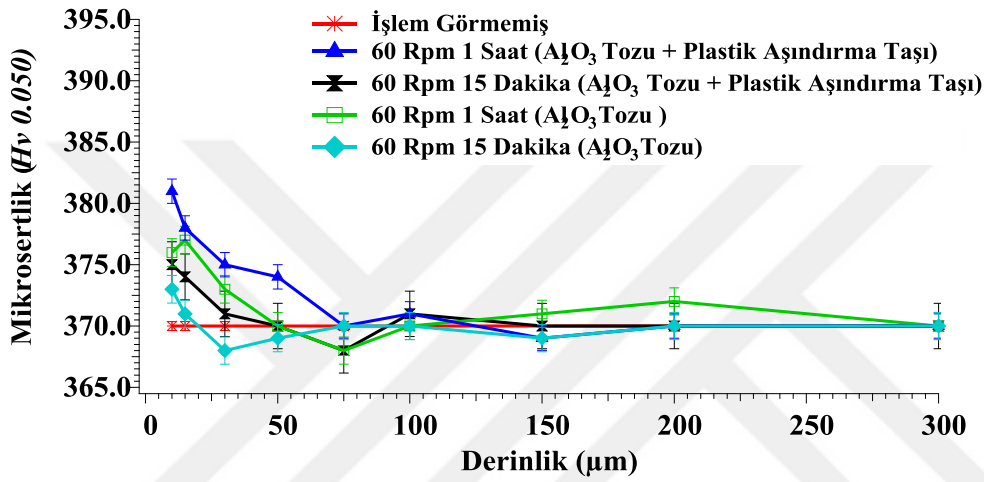


Şekil 3.7. 120 rpm dönme hızında sürükleyerek (drag finishing) operasyonu uygulanan numunelere ait mikrosertlik değerleri

Şekil 3.8’ de gösterilen grafikteyse 60 rpm dönme hızında yapılan yüzey iyileştirme operasyonu sonucunda elde edilen mikrosertlik değerleri verilmiştir. Elde edilen mikrosertlik değerleri incelendiği zaman plastik aşındırma taşı ve Al_2O_3 medyası kullanımı sonucunda 1 saat ve 15 dakikalık yüzey iyileştirme operasyonlarında mikrosertlik değerinde meydana gelen artış oranları sırasıyla %2.9 ve %1.35 olarak belirlenmiştir. Sadece Al_2O_3 medyası kullanıldığında 1 saat ve 15 dakikalık yüzey

iyileştirme operasyonu sonucunda mikrosertlik değerinde artış oranı sırasıyla %1.62 ve %0.1 olarak ölçülmüştür.

60 rpm dönme hızı sonucunda elde edilen mikrosertlik değerleri 120 rpm dönme hızı sonucunda elde edilen mikrosertlik değerleri ile kıyaslandığı zaman mikrosertlik değerinde meydana gelen değişim yaklaşık olarak %50 değerinde azalmaktadır. Mikrosertlik değerindeki değişimin bir diğer sebebi farklı işlem parametreleri kullanılması sonucunda yüzey ve yüzey altındaki değişimlerdir.



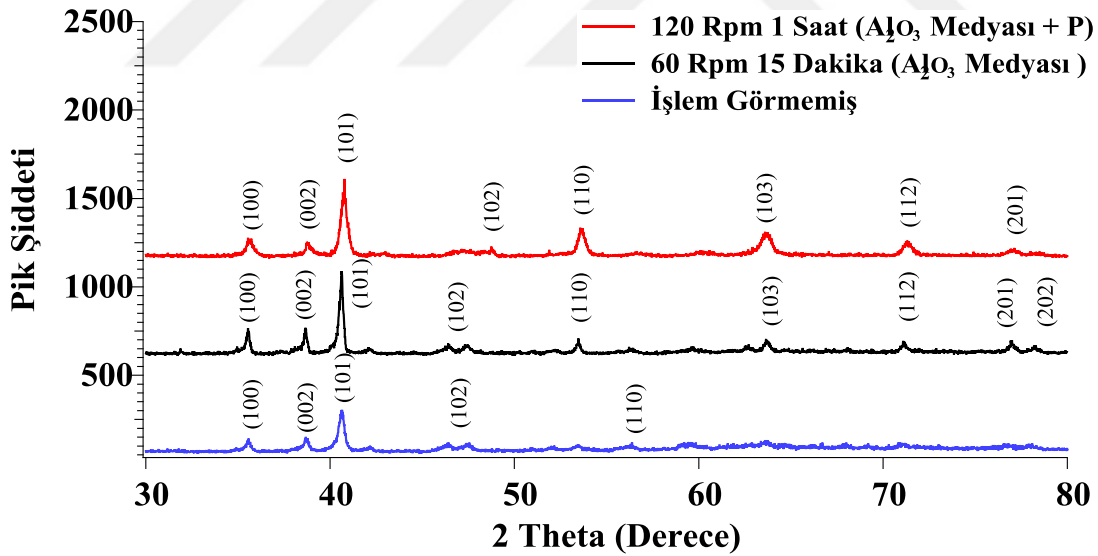
Şekil 3.8. 60 rpm dönme hızında sürükleyerek (drag finishing) operasyonu uygulanan numunelere ait mikrosertlik değerleri

3.3 XRD Analizi Sonucu

XRD analizi sürükleyerek yüzey iyileştirme işlemleri sonucunda numunelerin mikroyapılarında meydana gelen tane küçülmelerini ya da işlenmiş yüzeylerde, ikincil işlemler sonucunda meydana gelen mikrosertlik değişimlerinin yorumlanmasında aynı zamanda faz dönüşümlerini analiz etmede kullanılan etkin bir yöntemdir. XRD profilleri oluşturulurken yüzey pürüzlülük değeri, en iyi seviyede olan test sonucu ile yüzey pürüzlülüğü diğer numunelere göre en kötü seviyede olan test sonucu dikkate alınmıştır. Şekil 3.9’ da SYİ operasyonlarına tabi tutulmuş numunelere ve işlem görmemiş numuneye ait XRD sonuçları sunulmuştur. İşlem görmemiş numuneye ait XRD profili incelendiğinde (110) ve (101) olmak üzere iki ana pikin etkin olduğu görülmektedir. Literatürde işlem görmemiş numuneye ait benzer XRD profili elde edilmiştir [45]. İşlem

görmemiş numunede gözlenen (110) ve (101) pikleri, sıkı paket hegzagonal (SPH) kristal yapıda ki α ve hacim merkezli kübik (HMK) kristal yapıdaki β fazlarıdır[46] .

Elde edilen XRD sonuçları işlem görmemiş olan numune ile kıyaslanmıştır. XRD grafiklerinde 120 rpm dönme hızında 1 saat boyunca uygulanan Al_2O_3 medyası ve plastik aşındırma medyası prosesi sonucunda elde edilen pik değerlerinin şiddetinin ve genişliğinin arttığı görülmektedir. Aynı zaman da 60 rpm dönme hızında ve 15 dakika boyunca uygulanan Al_2O_3 medyası prosesi, sonucunda elde edilen pik değerleri işlem görmemiş numuneye göre pik şiddeti ve genişliği yüksek fakat en iyi test sonucuna göre ise düşük kaldığı görülmüştür. SYİ operasyonlarına tabi tutulan numunlerin medyalar ile temas halindeyken mekanik kuvvetlerin oluştuğu ve sürtünme işleminden kaynaklı olarak oluşan termal etkiden dolayı numunlerin yüzeyinde plastik deformasyonlar oluşmuştur. Bu durum XRD profilinde piklerin şiddetlerinde ve genişliklerinde değişimlere sebep olmuştur. Pik şiddetindeki ve genişliğindeki artışın kristal yapıda tane küçülmesine sebep olduğu literatürde belirtilmiştir [47]. Bu durum mikrosertlik bölümünde incelendiği üzere yüzey altı sertliklerindeki artış ile uyumludur.

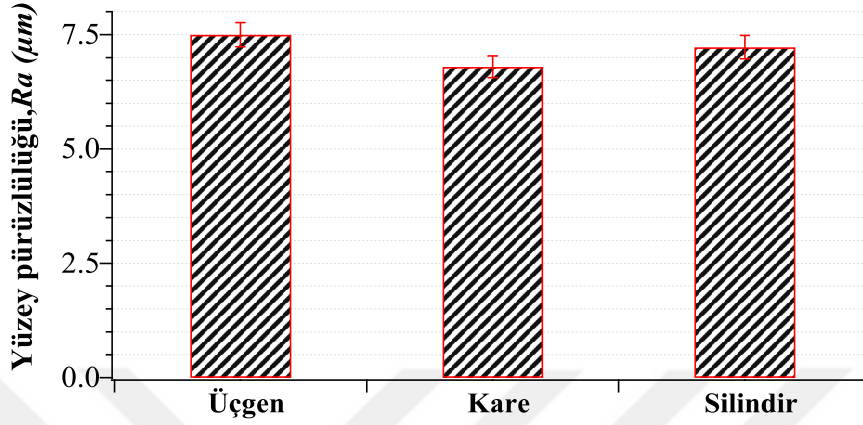


Şekil 3.9. SLE ile üretilen, işlem görmemiş ve sürükleyerek (Drag Finishing)yüzey iyileştirme işlemi uygulanan numunelere ait XRD sonuçları

3.4 Sürükleyerek Yüzey İyileştirme (Drag Finishing) Sonuçları

3 farklı yüzey iyileştirme koşulu ve süresinde elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Yüzey iyileştirme operasyonları sonucunda elde edilen

yüzey pürüzlülüğü değerleri, işlem görmemiş numunelere ait yüzey pürüzlülüğü değerleri ile kıyaslanması sonucunda, yüzey kalitesinin neredeyse % 99,6 oranında iyileştiği görülmüştür.



Şekil 3.10. İşlem görmemiş numunelere ait ortalama yüzey pürüzlülük değerleri.

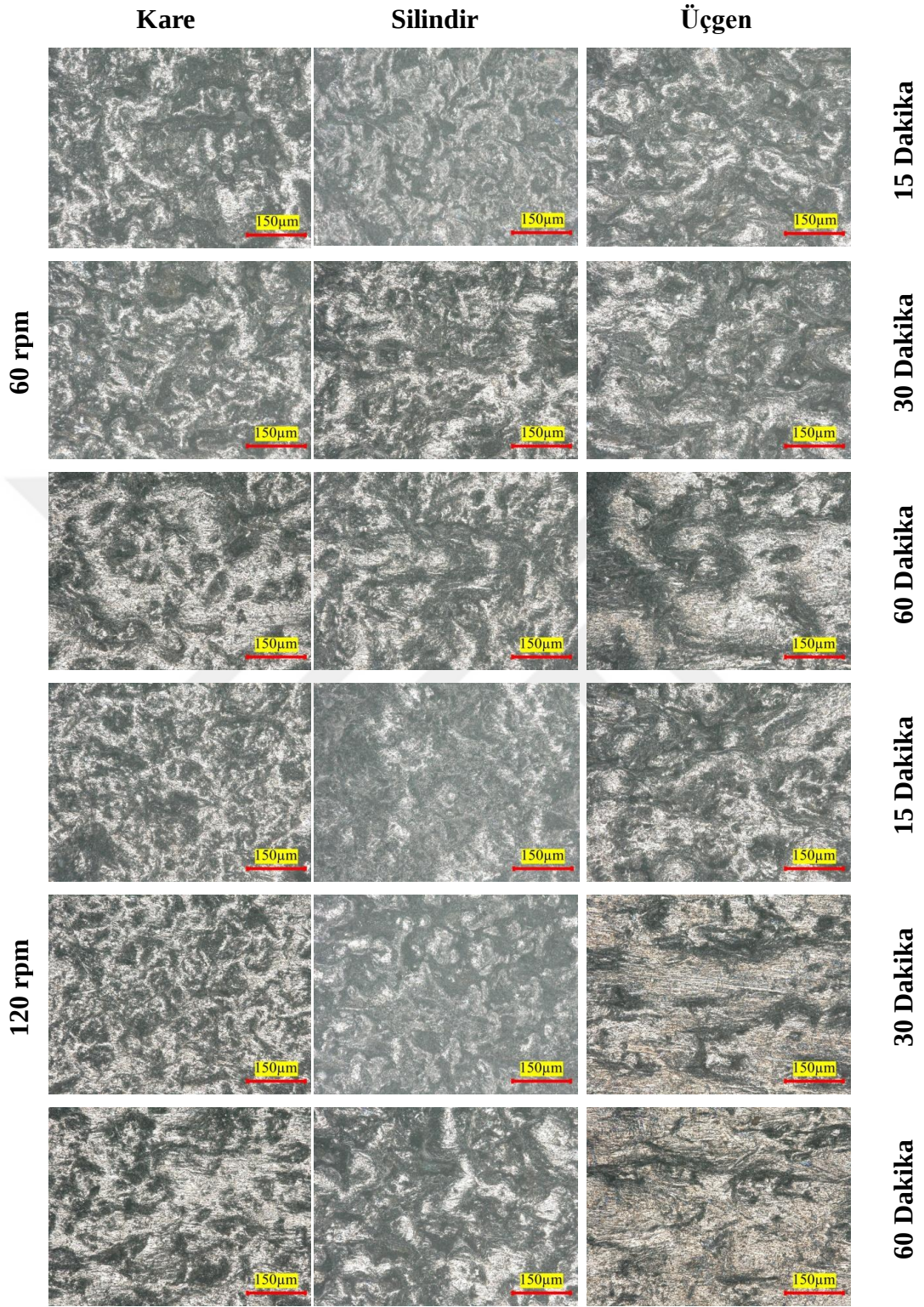
Herhangi bir makine elemanının, özellikle çeşitli ortamlarda kullanılan, dinamik yüklemeye maruz kalan ya da temas kuvvetlerine maruz kalan bileşenlerin yüzey özellikleri önem arz etmektedir. Havacılık endüstrisinde kullanılan makine elemanlarının yüzey ve yüzey kalitelerine son derece dikkat etmek gerekmektedir. SLE ile üretilen *Ti-6Al-4V* numunelerinde üretim sonunda yüzey kalitesi son kullanıma uygun bir değerde değildir. Bunun sebebi SLE üretimi esnasında ergime havuzunda asıl geometriyi oluşturmak için ergitilen mikron seviyesindeki tozlar katılaşmaya başladığı esnada, asıl malzeme/iş parçası etrafını çepeçevre saran tozların malzeme yüzeyine yapışması temel sebeplerdendir [48].

Şekil 3.11-19’da farklı medya türleri kullanılarak, sürüklemeli yüzey iyileştirme işlemi sonuçları gösterilmektedir. SLE yöntemi ile üretilen numunelerin yüzeyinde gözenekli yapıların bulunduğu çok nettir [49] ve bu gözenekli oluşum yüzey pürüzlülüğü değerini oldukça yüksek bir değere taşır. Gözenekli yapı ile birlikte numune yüzeyinde oluşan stres dinamik yüklemeler altında yorulma davranışını olumsuz yönden etkilemektedir [50].

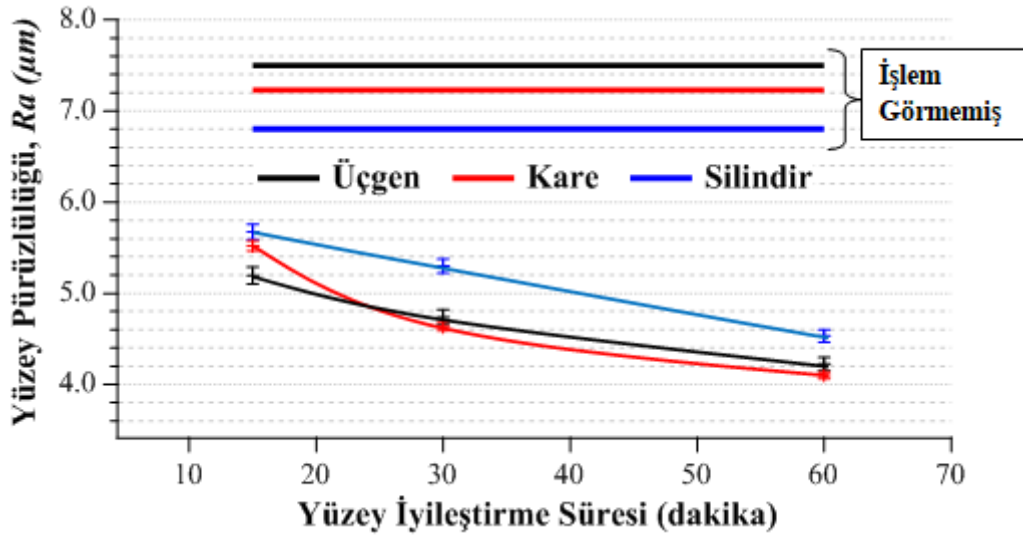
Yüzey pürüzlülük değerini son kullanıma uygun hale getirmek için ikincil işlemler uygulanır. Şekil 3.12-3.13’te görüldüğü üzere yüzey pürüzlülüğü değeri işlem görmemiş numunelerin yüzey kalitelerine kıyasla, ceviz granül+ Al_2O_3 medyasında yaklaşık olarak

%28.7 oranında iyileşmiştir. Yüzeyin büyük ölçüde etkilenmemesinin sebebi ceviz granül+ Al_2O_3 koşulunda kullanılan kombin medyada, ceviz granül miktarının hacme oranının Al_2O_3 medya miktarına göre yaklaşık 2.5 kat fazla olması gösterilebilir. İş parçalarının mikrosertlik değerlerinin yüksek olması ve koşulda kullanılan medya karışımının iş parçaları yüzeyinden yüzey pürüzlülüğünü son paso ayarına getirecek şekilde kütle kaldıramadığı anlaşılmıştır. Yüzey iyileştirme operasyonu sonucunda numunlerin yüzeylerine ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.11’de gösterilmiştir.

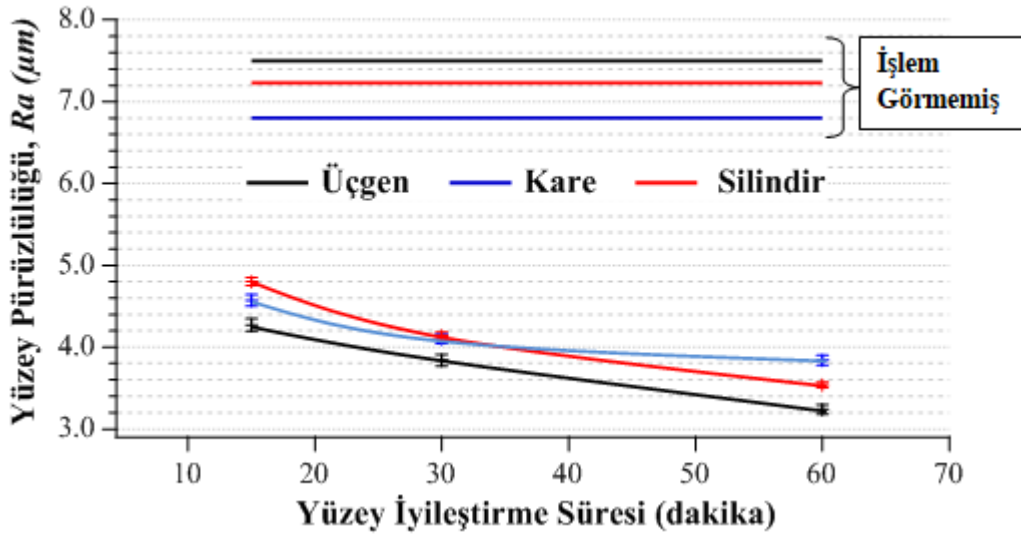
Şekil 3.13’te görüldüğü üzere yüksek dönme hızı ile yüzey pürüzlülüğü değeri azalmaktadır. Bununla birlikte yüzey pürüzlülüğü değeri iş parçalarının geometrik şekilleriyle de farklılık göstermektedir. Bunun sebebi sürükleyerek yüzey iyileştirme süreci boyunca medyalar ile iş parçasının temas alanı ile ilgilidir. Burada belirtilen temas alanı Şekil 1.7’de belirtilmiştir.



Şekil 3.11. Sürükleyerek yüzey iyileştirme cihazında ceviz granül+Al₂O₃ medyaları kullanılarak yüzeyleri iyileştirilen numunelere ait yüzey görüntüleri



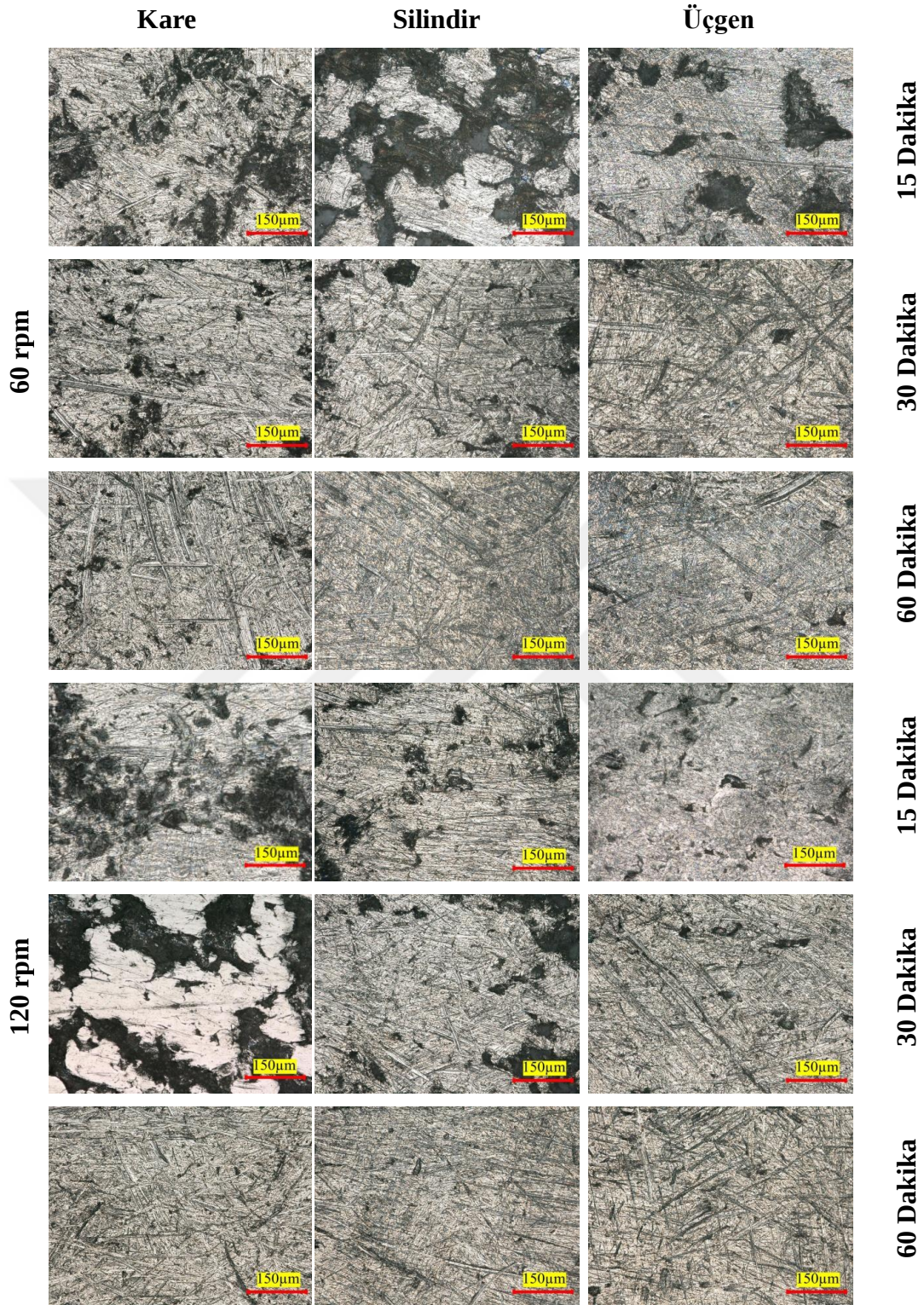
Şekil 3.12. 60 rpm dönme hızı ve ceviz granül+ Al_2O_3 medya karışımı kullanılması sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri



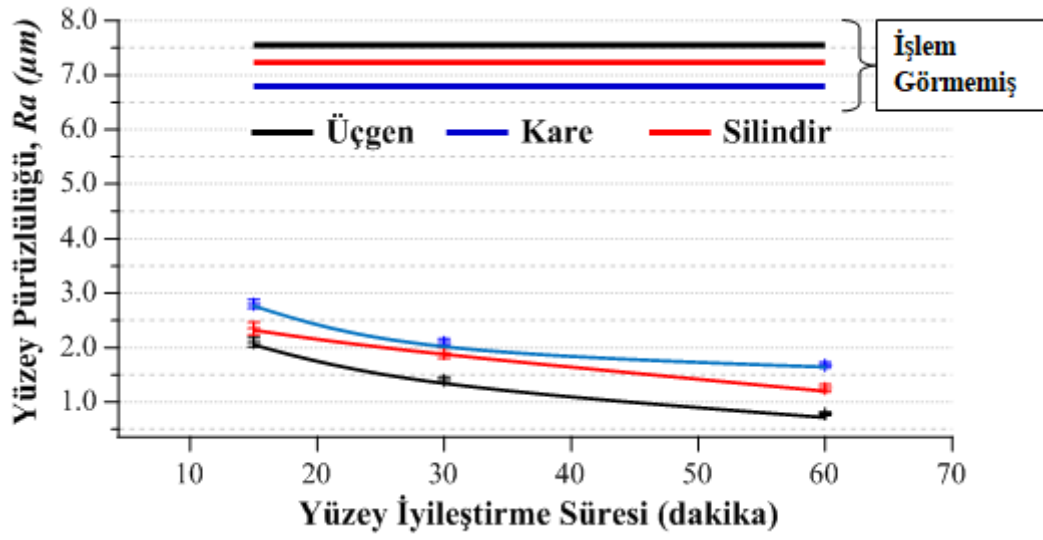
Şekil 3.13. 120 rpm dönme hızı ve ceviz granül+ Al_2O_3 medya karışımı kullanılması sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri

Yüzey iyileştirme operasyonları sonucunda numunelerin yüzeylerine optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.14’de sunulmuştur. Şekil 3.15-3.16’da gösterilen yüzey iyileştirme işlemleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri için saf Al_2O_3 medyası kullanılmıştır. Bu işlem sonucunda yüzey pürüzlülüğü değeri 1 saatlik bir proses sonucunda yaklaşık olarak kare iş parçasında, $1.75\ \mu m$, silindir iş parçasında $1.33\ \mu m$, üçgen geometriye sahip iş parçasında ise $0.8\ \mu m$ yüzey pürüzlülüğü değerlerine düşmüştür.

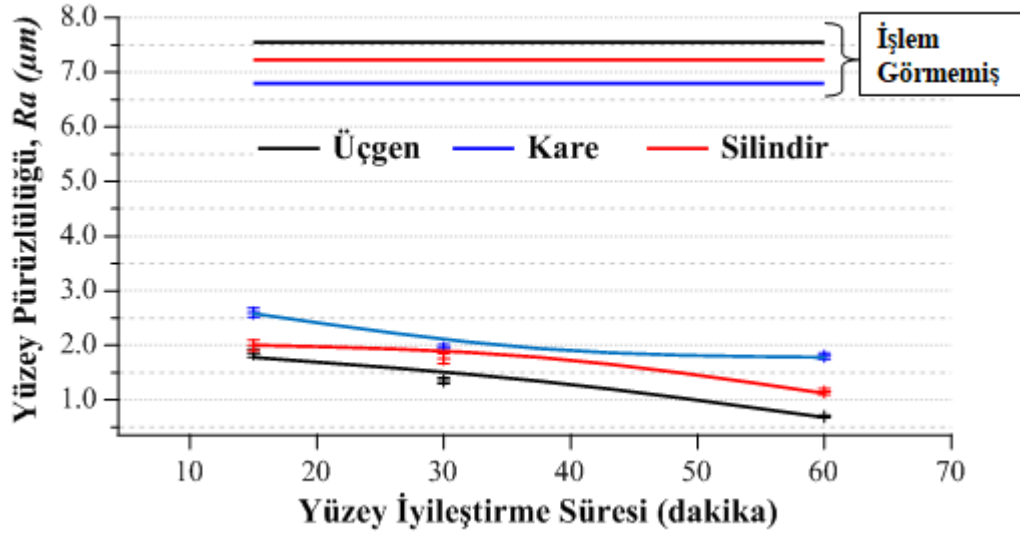
Dönme hızının iki katına çıkılması ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri Şekil 3.16’da gösterilmektedir. Bu şekilden anlaşılabacağı üzere dönme hızının ve proses süresinin artması ile yüzey pürüzlülüğü değerinde bir azalma olduğu açıktır. Şekil 3.16’da elde edilen en düşük yüzey pürüzlülüğü üçgen geometriye sahip iş parçasındadır. Yaklaşık olarak $0.67\ \mu m$ değerinde ölçülmüştür.



Şekil 3.14. Sürükleyerek yüzey iyileştirme cihazında Al_2O_3 medyası kullanılarak yüzeyleri iyileştirilen numunelere ait yüzey görüntüleri



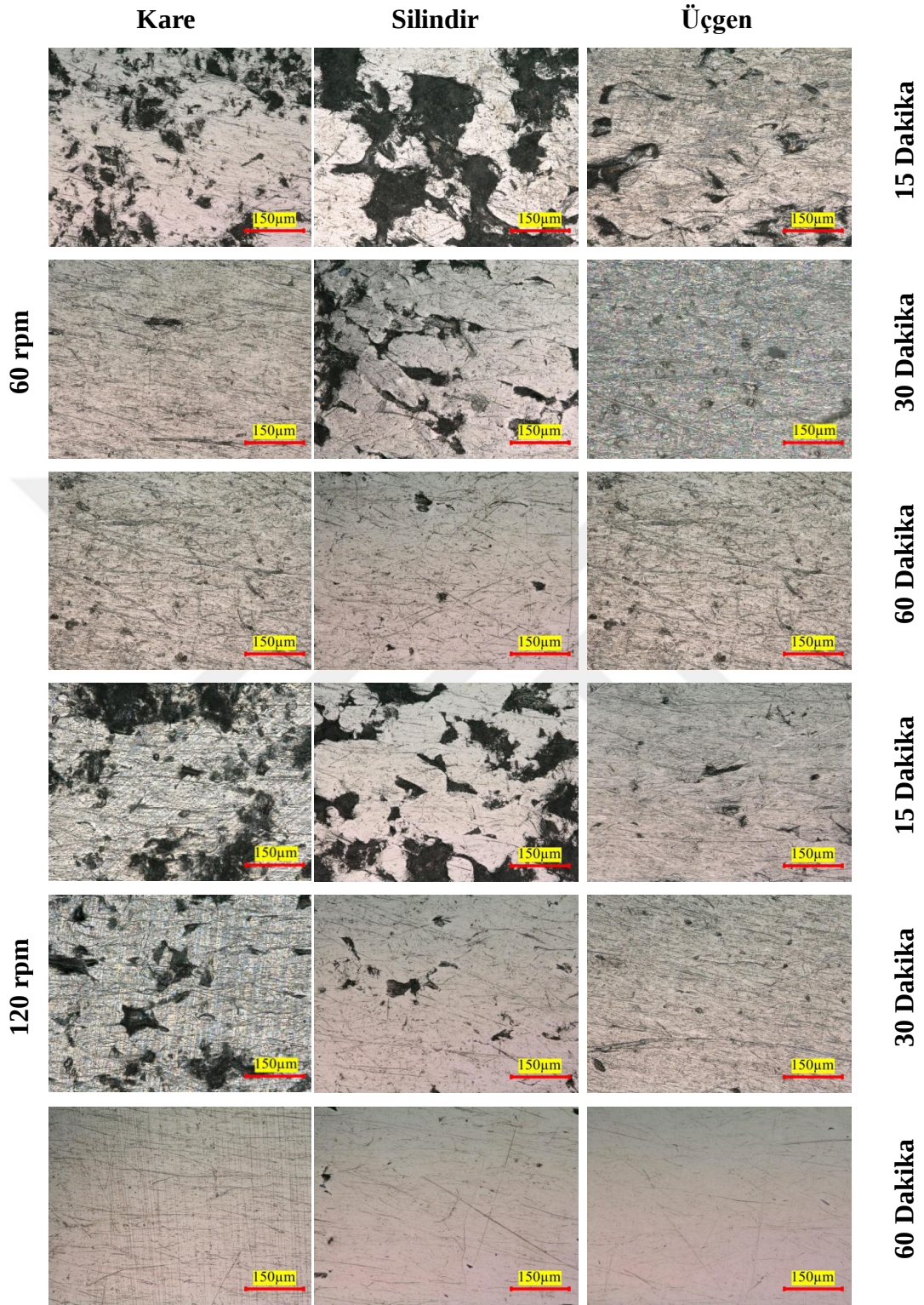
Şekil 3.15. 60 rpm dönme hızı ve Al_2O_3 medyası kullanılması sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri



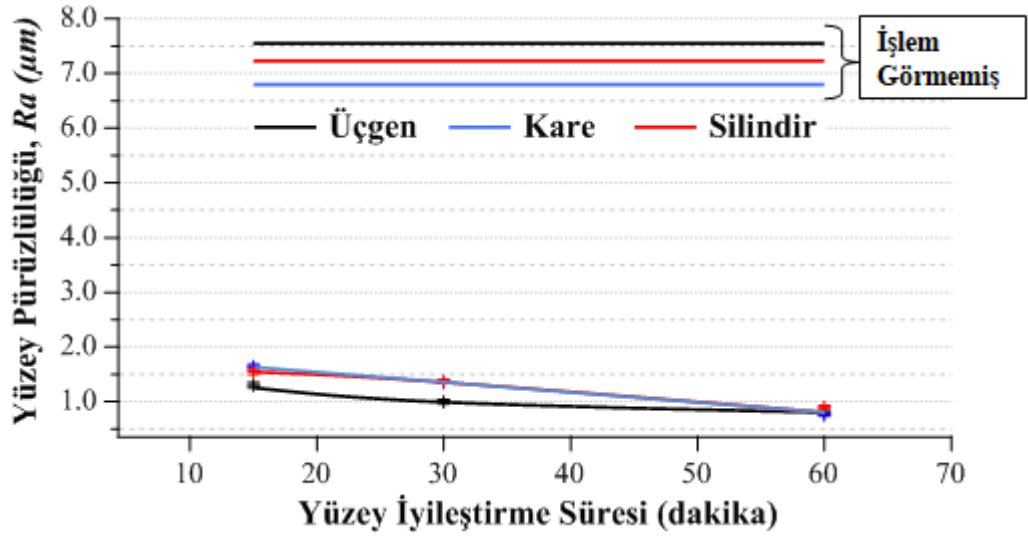
Şekil 3.16. 120 rpm dönme hızı ve Al_2O_3 medyası kullanılması sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri

Yüzey iyileştirme sonucunda etkilenen yüzeylere ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.17’de gösterilmiştir. Burada yüzey iyileştirme operasyonu esnasında kullanılan büyük ebatlarda ki plastik aşındırma taşları iş parçasının yüzeyi ile yüksek bir temas alanı oluşturmuştur. Burada oluşan yüksek temas alanı sonucunda sürtünme artmış[51] ve bunun sonucunda yoğun bir kütle kaldırma işlemi gerçekleştirdiği anlaşılmaktadır. Şekil 3.18-3.19 ‘da kullanılan medya boyutunun, ilk iki testte kullanılan medyalara göre plastik aşındırma medyası oldukça büyük boyutta olması yüzey pürüzlülük değerine ciddi bir şekilde etkilediği görülmektedir.

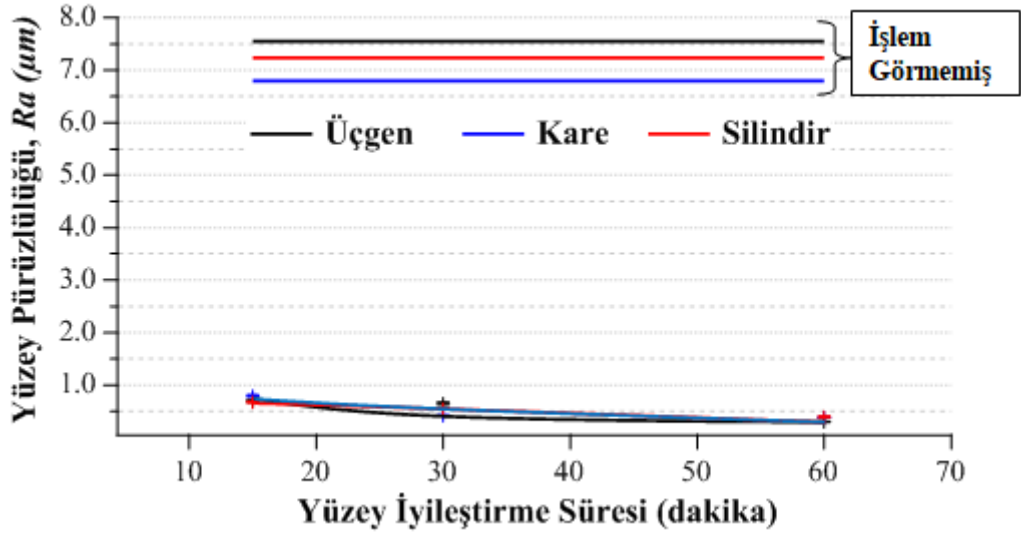
İş parçalarının medyaları ile temas hızı iki katına çıkarıldığı zaman yüzey pürüzlülük değeri talaşlı imalatla gerçekleştirilen son paso değerinden daha aşağı bir değere düştüğü görülmektedir. Dönme hızı iki katına çıkarıldığı zaman aşındırma ortamı darbe etkisi ile indüklendiği ve Seçici Lazer Ergitme yöntemi ile üretilen *Ti-6Al-4V* numunelerinin yüzey pürüzlülük değerlerini %99,99 oranında iyileştirdiği görülmektedir.



Şekil 3.17. Sürükleyerek yüzey iyileştirme cihazında Al_2O_3 + plastik aşındırma medyası kullanılarak yüzeyleri iyileştirilen numunelere ait yüzey görüntüleri



Şekil 3.18. 60 rpm dönme hızı ve Al_2O_3 + plastik aşındırma medyası kullanılması sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri



Şekil 3.19. 120 rpm dönme hızı ve Al_2O_3 + plastik aşındırma medyası kullanılması sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri

3.5 Aşınma

Aşınma mekanik veya kimyasal yollarla oluşur ve genellikle sürtünme kaynaklı ısınma ile hızlanır. Aşınma hasarlarını, 5 farklı mekanizmayla gerçekleşmektedir, ancak temel prensip katı malzemenin yüzeyden kopmasıdır[52]. Buna göre aşınma mekanizmaları; adhezif aşınma, abrasif aşınma, yorulma ve tabakalı (delaminasyon aşınma), erezyon ve çarpma etkisiyle aşınma ve kimyasal/oksidatif aşınma olarak sıralanır. Adhezif aşınma iki katı yüzeyin kayma sırasında birbirleriyle etkileşimi sonucu oluşur. Adhezyon yüzeyindeki pürüzlerin bağlanmasıyla oluşur, kayma sırasında meydana gelen kesme gerilmelerinin etkisiyle bağlantı noktalarında kopma gerçekleşir ve malzeme kaybı meydana gelir [52].

Abrasif aşınma, aşınan iki yüzey arasında, sert partiküllerin daha yumuşak malzemede plastik deformasyon ya da kırılma meydana getirilmesi abrasif aşınma olarak adlandırılır[52].

Yorulma ve tabakalı(delaminasyon) aşınma, adhezif ve abrasif aşınmada sürekli bir temas mevcut iken, çevrimsel bir temasın söz konusu olduğu durumlarda, farklı bir aşınma mekanizması ortaya çıkmaktadır. Bu tür çevrimsel temaslar sonucu oluşan aşınma türüne yorulma aşınması adı verilmektedir. Eğer çevrim sayısı yüksek ise yüksek çevrimli yorulma aşınması, çevrim sayısı düşük ise düşük çevrimli yorulma aşınması olarak adlandırılır[53].

Erozif aşınma, katı veya sıvı parçacıkların yüzeye çarpmasıyla oluşan aşınma türüdür. Erozif aşınma, gaz türbin bıçaklarından pompa pervanelerine kadar birçok alanda meydana gelebilir. Bu aşınma mekanizması diğerlerinden farklı olarak malzeme dayanımına bağlı değildir[54].

Kimyasal veya korozyon aşınma, kayma aşınmasının korozyon ortamda meydana gelmesiyle oluşur. Havada en baskın korozyon oksijendir. Bu sebeple, havadaki kimyasal aşınma genellikle oksidatif aşınma olarak adlandırılır. Kaymanın varlığında, korozyonun kimyasal ürünleri (örneğin oksitler), korozyonu yavaşlatan yüzeyde film oluşur, fakat kayma eylemi bu filmi kaldırır ve korozyona devam edebilir. Korozyon yüksek korozyon ortamlarda, yüksek sıcaklıklarda ve yüksek nem oranlarında daha çok olmaktadır.

Aşınma testleri, Al_2O_3 ve Al_2O_3+ plastik aşındırma medyaları kullanılarak farklı dönme hızı ve sürelerde SYİ operasyonu uygulanan numunelere yapılmıştır. Aşındırma işlemi kuru bir ortamda sabit hız ve sabit bir kuvvet uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan parametreler Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Aşındırma testi parametreleri

Dönüş (rpm)	Hız	Strok (mm)	Hız (mm/s)	Yol (mm)	Kuvvet (N)	Süre (s)
103		6	20.6	37080	10	600

Aşınma hacmi, aşağıdaki gibi tanımlanmış olan denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır [55]

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

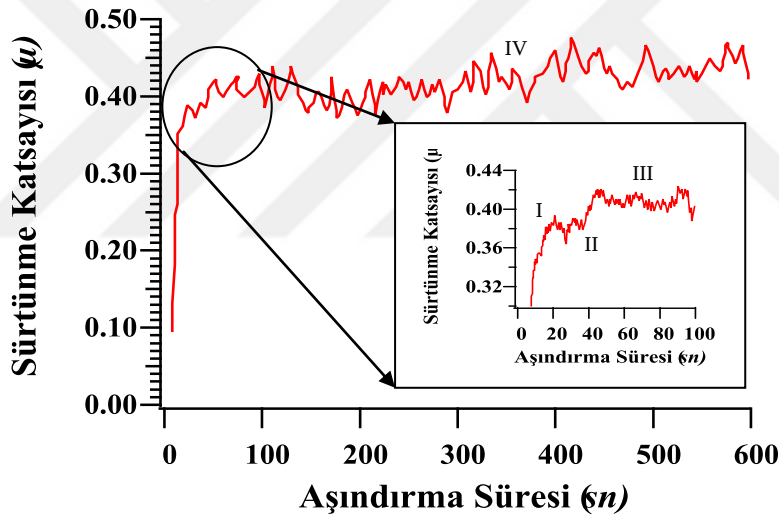
Denklem de verilen kısaltmalar; r , aşındırma topunun çapını, L , topun almış olduğu yolu, w , aşınma izinin genişliğini ifade etmektedir. Denklemde V , aşınma hacmini mm^3 olarak elde etmemizi sağlar.

$$k = \frac{V}{N \times L} \quad (2)$$

Burada k değeri aşınma oranını mm^3/Nm cinsinden vermektedir. N uygulanan kuvveti temsil temektir birimi Newton’dur.

3.5.1 Sürtünme katsayıları

İşlem görmemiş ve yüzey iyileştirme operasyonlarına tabi tutulmuş numunelere ait sürtünme katsayısı grafikleri Şekil 3.20-3.26'da verilmiştir. Belirtilen şekillerde verilen grafiklerde 10 N yük altında 600 s boyunca sürtünme katsayısındaki gelişim görülmektedir. Testler sonucunda elde edilen tüm sürtünme katsayılarının oluşumu öncesinde bir alıştırma periyodundan geçtikleri net bir şekilde görülmektedir. Alıştırma periyodunda numuneler ile Al_2O_3 aşındırma bilyesi arasında noktasal bir temas olduğundan yüksek basınca sebep olmaktadır. Bu da hızlı aşınmaya sebep olmaktadır. Kayma süresinin artmasıyla numune ile Al_2O_3 aşındırma bilyesi yüzeyleri arasındaki mikro dışbükey zirvelerin azalması sonucunda temas alanı kademeli olarak artmıştır. Yüzey temas alanındaki artıştan kaynaklı olarak numune ile Al_2O_3 aşındırma bilyesi arasındaki oluşan basınç azalmış ve sürtünme katsayısı kararlı bir duruma ulaşmıştır.



Şekil 3.20. İşlem görmemiş numuneye ait COF (coefficient of friction) grafiği

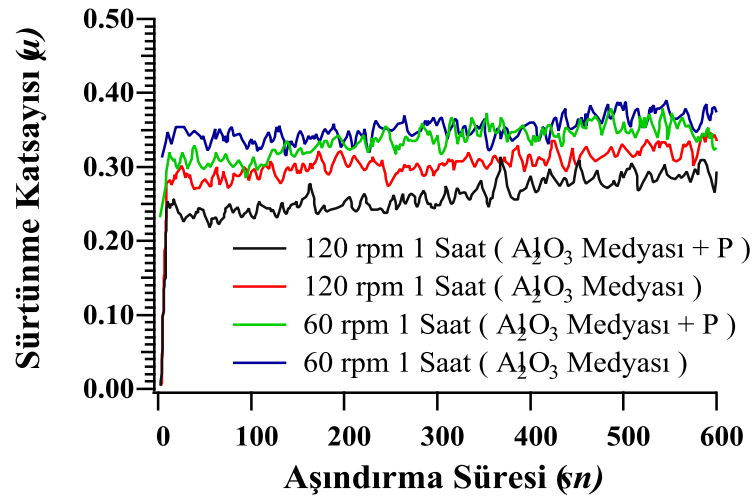
Şekil 3.20'de temsili sürtünme katsayısı grafiği gösterilmektedir. Şekil 3.20-3.26'da SLE ile üretilen farklı geometrideki numunelere uygulanan farklı parametrelerdeki yüzey iyileştirme sonuçlarına ve sertliklerine bakılmaksızın benzer aşınma özellikleri gösterdiği görülmektedir. *Ti-6Al-4V* numunesinin aşınma özelliklerinin 4 ana aşamada sınıflandırılabilceği anlaşılmaktadır.

- I. Aşındırıcı bilyenin, numune yüzeyinde ilk aşındırma hareketine başladığı, oksit tabakası ile doğrudan temas ettiği ve sürtünme katsayısında hızlı bir şekilde artış gösterdiği periyottur.
- II. Muhtemelen aşındırıcı bilye ile numune arasında doğrudan ilk temasın gerçekleştiği yer bu bölgedir. Sürtünme katsayısında bir azalma olduğu ve bu azalmaya aşındırıcı bilye ile numune arasındaki oksit tabakasının engel olduğu düşünülmektedir.
- III. Oksit tabakasının parçalandığı ve bunun sonucunda sürtünme katsayısında önemli bir artış olduğu görülmektedir. Bu periyotta oluşan oksit tabakası kalıntıları tekrarlanan stres ve yük döngüleri sonucunda parçalanmıştır. Oluşan oksit tabakasının neredeyse tamamen yok olması sonucunda aşındırıcı bilyeyle numune tam temasa geçer bunun sonucunda sürtünme katsayısındaki artış devam eder.
- IV. Yaklaşık olarak 100-200 saniye sonrasındaki sürtünme katsayısı stabildir.

SLE ile üretilen titanyum alaşımlarına uygulanan aşındırma işlemi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı değerleri, aşınma testi başlangıcında ilk temas ile yükseldiği ve testin ilerleyen sürelerinde daha kararlı bir form aldığı görülmüştür. Sürtünme katsayısı grafiklerinde salınımlar dikkat çekmektedir. Bu salınımların sebebi aşınma süreci başlangıcında yüzeyde oluşan oksit tabakasından kaynaklı üç gövde etkili (three body effect) aşınma mekanizmasının aktivasyonundan kaynaklı olduğu açıklanabilir [55].

SLE ile üretilen numunelerin aşındırma işlemi sürecinde alıştırma periyoduna geçtiklerinde. Sürtünme katsayısı değerindeki yükselmeye bağlı olarak grafikler arasında bir farklılık ortaya çıktığı görülmektedir. Yaklaşık olarak 400 saniyelik kayma süresi sonucunda sabit bir aşınma performansı sonucu elde edildiği, bu süre sonrasında aşınma gelişim frekansında herhangi bir salınım olmaksızın aşınma sürecini tamamladığı tüm sürtünme katsayısı grafiklerinde görülmektedir. İşlem görmemiş olan numune ile yüzey iyileştirme operasyonu uygulanan numunelerin sürtünme katsayıları kıyaslandığı zaman, yüzey iyileştirme operasyonu uygulanan numunelerin sürtünme katsayılarında daha az salınımlar olduğu açıktır. Bununla birlikte yüzey iyileştirme operasyon parametrelerinin farklılığı sonucunda elde edilen sürtünme katsayıları

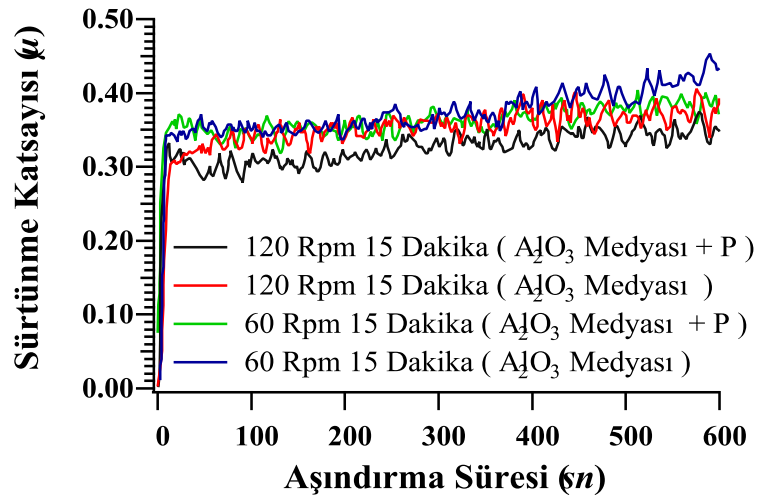
arasında ki fark ile farklı geometrik yapının sürükleyerek yüzey iyileştirme işlemine verdiği cevap arasında bir ilişki kurulmuştur. Bu ilişki yüzey pürüzlülüğü bölümünde açıklanmıştır. Burada ise yüzey kalitesi, aşındırıcı ile aşınan arasında kurulacak olan kontakta doğrudan etki gösterdiği çok açıktır. Kurulan kontak ne kadar uyumlu olur ise aşınma işleminde aşınma döküntüsü akışı o kadar zor olacaktır [56]. Bu da aşınma kalıntılarının tutulmasına neden olacaktır. Tutulan aşınma kalıntıları ile koruyucu bir katman oluşumu söz konusu olacak ve oluşan katman ile aşındırıcı ile aşınan arasında kurulan kontak uyumlu bir hal alacaktır. Temas eden geometrilerin/kontakların hem aşınma mekanizması hem de sürtünme katsayısı üzerinde güçlü bir etkisi olduğu sürtünme katsayısı grafiklerinde görülmektedir[57]. Aşınma performansına bağlı olarak gelişen sürtünme katsayısı değeri genellikle yüzeyde oluşan oksit tabakasına, malzemelerin mikroyapısına, mikro sertliğine ve yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır [58].



Şekil 3.21. 1 saat boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan üçgen geometriye ait COF (coefficient of friction) grafiği

Tablo 3.2. 1 saat boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan üçgen geometriye ait ortalama sürtünme katsayısı (μ) değerleri

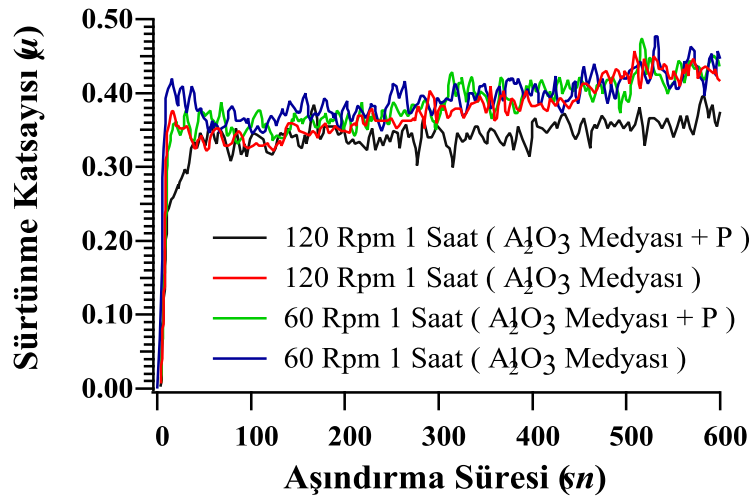
Yüzey İyileştirme Parametreleri	Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)
120 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	0,24
120 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası)	0.30
60 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	0.33
60 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası)	0.35



Şekil 3.22. 15 dakika boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan üçgen geometriye ait COF (coefficient of friction) grafiği.

Tablo 3.3. 15 dakika boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan üçgen geometriye ait ortalama sürtünme katsayısı (μ) değerleri

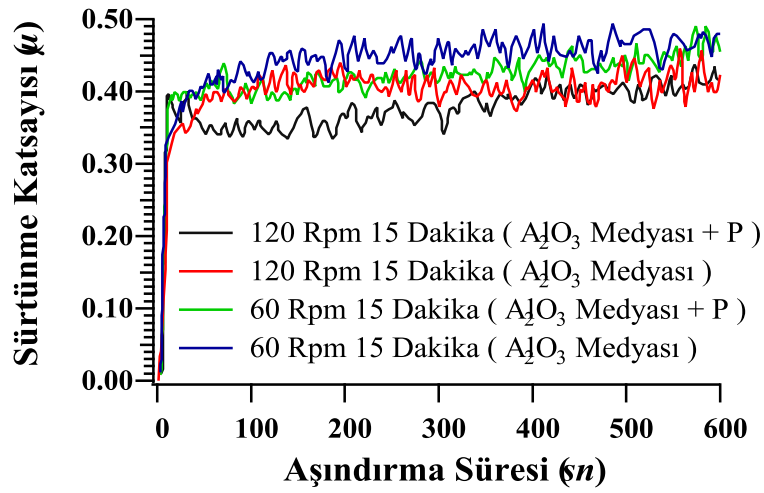
Yüzey İyileştirme Parametreleri	Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)
120 rpm 15 dakika (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	0,32
120 rpm 15 dakika (Al_2O_3 Medyası)	0.35
60 rpm 15 dakika (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	0.36
60 rpm 15 dakika (Al_2O_3 Medyası)	0.37



Şekil 3.23. 1 saat boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan silindirik geometriye ait COF (coefficient of friction) grafiği.

Tablo 3.4. 1 saat boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan silindirik geometriye ait ortalama sürtünme katsayısı (μ) değerleri

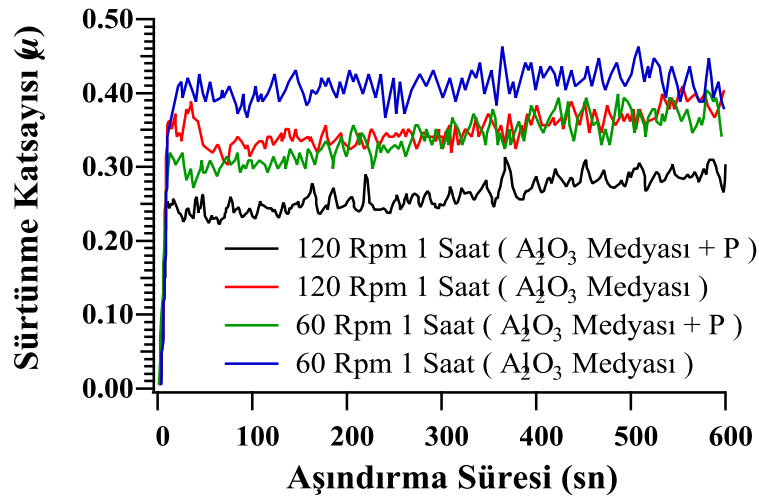
Yüzey İyileştirme Parametreleri	Ortalama Katsayısı (μ)	Sürtünme
120 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	0,34	
120 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası)	0.37	
60 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	0.37	
60 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası)	0.38	



Şekil 3.24. 15 dakika boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan silindirik geometriye ait COF (coefficient of friction) grafiği.

Tablo 3.5. 15 dakika boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan silindirik geometriye ait ortalama sürtünme katsayısı (μ) değerleri

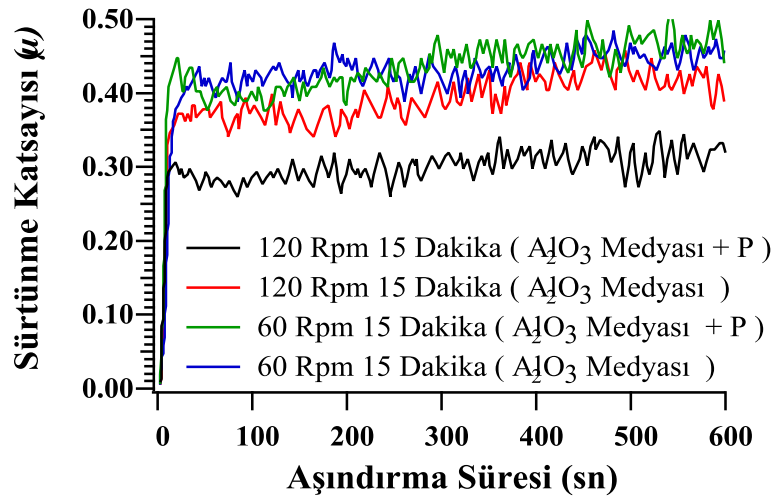
Yüzey İyileştirme Parametreleri	Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)
120 rpm 15 dakika (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	0,36
120 rpm 15 dakika (Al_2O_3 Medyası)	0.38
60 rpm 15 dakika (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	0.38
60 rpm 15 dakika (Al_2O_3 Medyası)	0.43



Şekil 3.25. 1 saat boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan kare geometriye ait COF (coefficient of friction) grafiği

Tablo 3.6. 1 saat boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan kare geometriye ait ortalama sürtünme katsayısı (μ) değerleri

Yüzey İyileştirme Parametreleri	Ortalama Katsayısı (μ)	Sürtünme
120 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	0.26	
120 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası)	0.35	
60 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	0.33	
60 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası)	0.42	



Şekil 3.26. 15 dakika boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan kare geometriye ait COF (coefficient of friction) grafiği

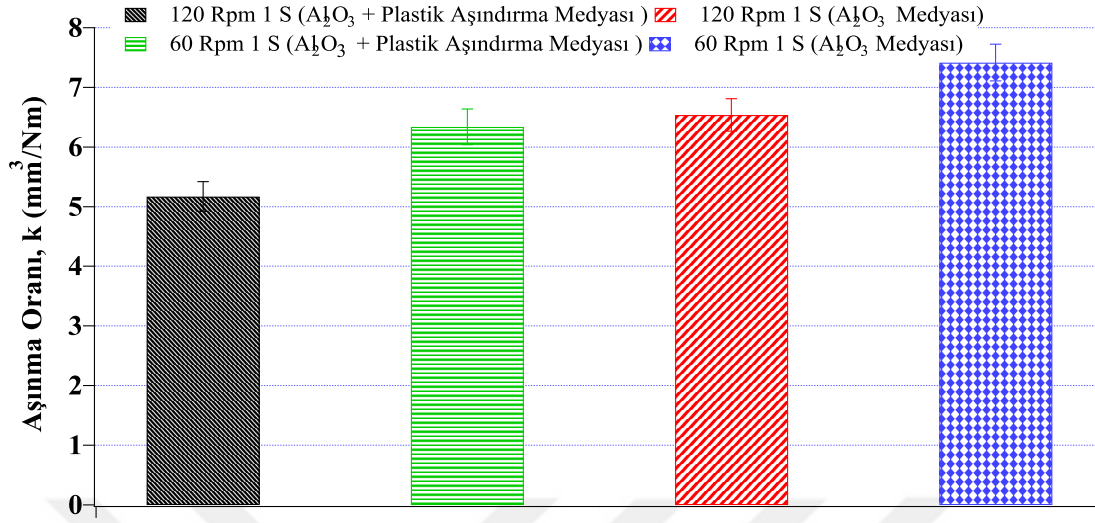
Tablo 3.7. 15 dakika boyunca yüzey iyileştirme işlemi uygulanan kar geometriye ait ortalama sürtünme katsayısı (μ) değerleri

Yüzey İyileştirme Parametreleri	Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)
120 rpm 15 dakika (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	0,31
120 rpm 15 dakika (Al_2O_3 Medyası)	0.39
60 rpm 15 dakika (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	0.45
60 rpm 15 dakika (Al_2O_3 Medyası)	0.43

3.5.2 Aşınma oranları

Farklı işlem parametreleri kullanılarak sürükleyerek yüzey iyileştirme operasyonu uygulanan numunelere yapılan aşınma testleri sonrasında aşınma oranları incelenmiştir. Aşınma oranları denklem 1 ve 2 kullanılarak hesaplanmıştır. İşlem görmemiş numuneye yapılan aşındırma testi sonucunda elde edilen aşınma oranı $8,44 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ olarak hesaplanmıştır. Yüzey iyileştirme işlemi uygulanan numunelere yapılan aşındırma sonucunda elde edilen aşınma oranları Şekil 3.27-3.32’ de verildiği üzere birbirlerine yakın değerlerde gerçekleşmiştir. Uzun süreli (1 saat), Al_2O_3 medyası ve plastik aşındırma medyası kombini ile gerçekleştirilen yüzey iyileştirme operasyonlarında, kısa süreli (15 dakika) ve sadece Al_2O_3 medyası kullanılarak gerçekleştirilen yüzey iyileştirme operasyonlarına kıyasla daha az aşınma oranı elde edildiği grafiklerden görülmektedir.

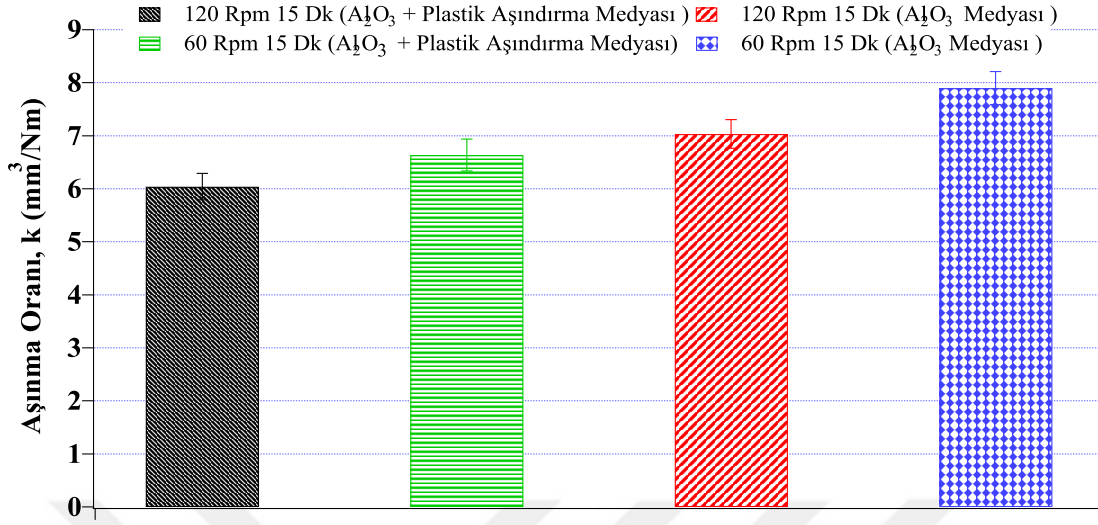
Uzun süreli ve kombine yüzey iyileştirme taşları kullanılarak yapılan işlem sonrasında yüzeyde ve yüzeyin altında oluşan ince taneli yapı malzemenin sertleşmesine (Şekil 3.7) neden olmuştur. Buna karşın işlem görmemiş numune ve kısa süreli Al_2O_3 medyası kullanılan numunelerde aşınmadan kaynaklı olarak daha fazla plastik deformasyon gerçekleşmiştir. Bunun sonucunda uzun süreli ve kombine yüzey iyileştirme taşları kullanılarak yapılan yüzey iyileştirme işlemi gören numunelerde daha az aşınma oranı olduğu görülmüştür.



Şekil 3.27. 1 saatlik yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan üçgen geometriye ait aşınma oranı (k) grafiği

Tablo 3.8. 1 saatlik yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan üçgen geometriye ait aşınma oranı (k) değerleri

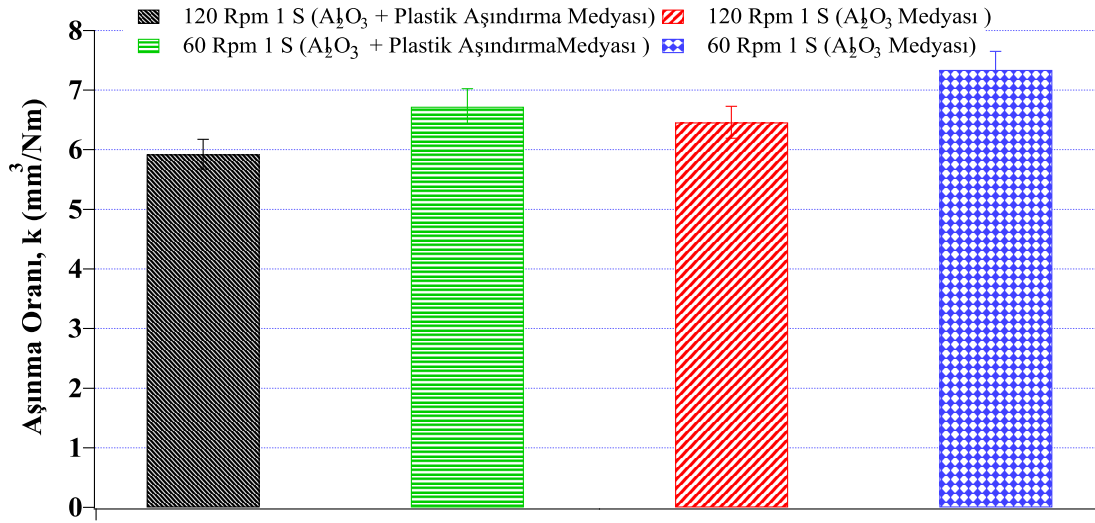
Parametre	Aşınma oranı (mm ³ /Nm)
120 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	5,17
120 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası)	6,34
60 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	6,54
60 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası)	7,42



Şekil 3.28. 15 dakika yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan üçgen geometriye ait aşınma oranı (k) grafiği

Tablo 3.9. 15 dakika yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan üçgen geometriye ait aşınma oranı (k) değerleri

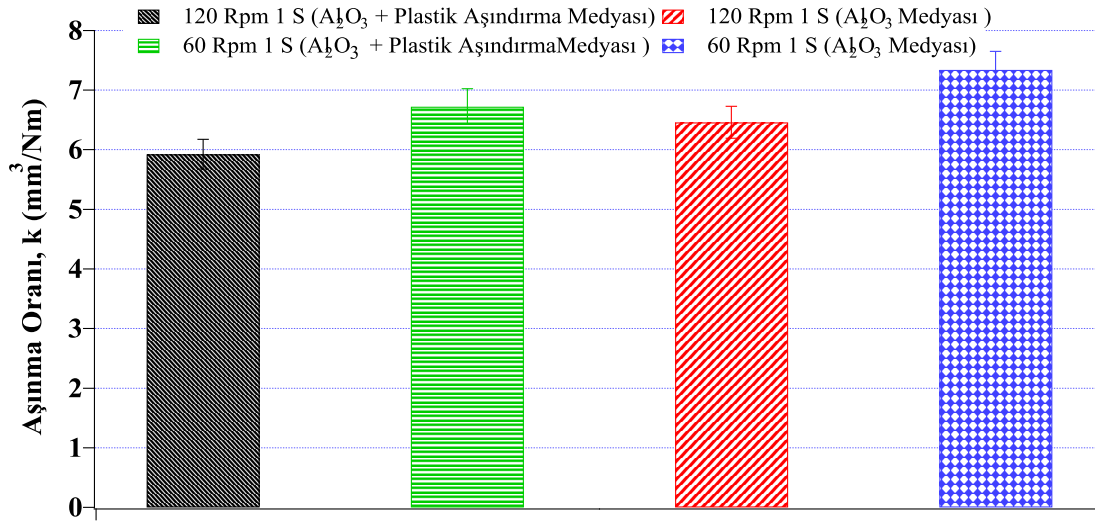
Parametre	Aşınma oranı (mm^3/Nm)
120 rpm 15 Dk (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	6,04
120 rpm 15 Dk (Al_2O_3 Medyası)	6,63
60 rpm 15 Dk (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	7,03
60 rpm 15 Dk (Al_2O_3 Medyası)	7,90



Şekil 3.29. 1 saatlik yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan Silindirik geometriye ait aşınma oranı (k) grafiği

Tablo 3.10. 1 saatlik yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan Silindirik geometriye ait aşınma oranı (k) değerleri

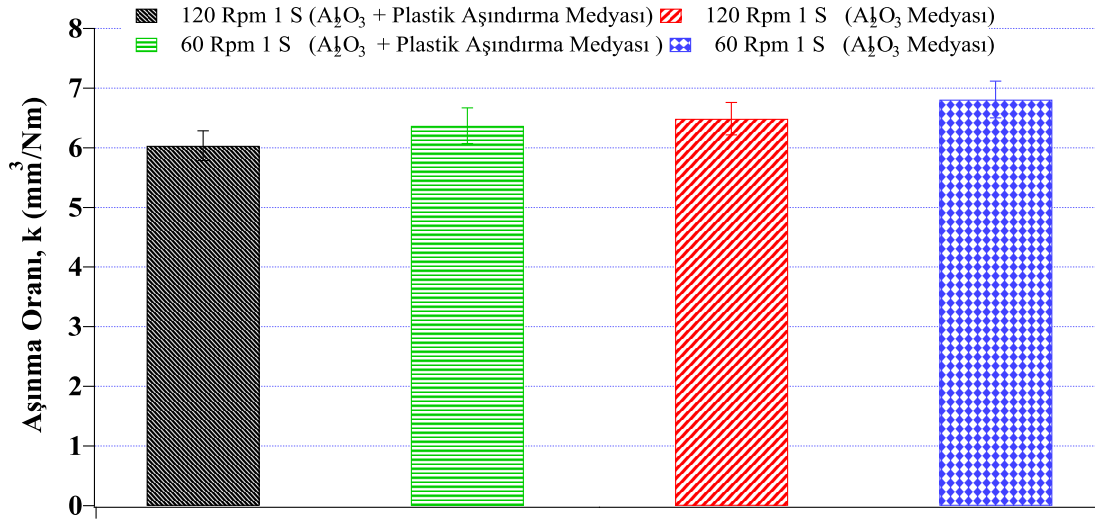
Parametre	Aşınma oranı (mm ³ /Nm)
120 rpm 1 Saat (Al ₂ O ₃ Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	5,92
120 rpm 1 Saat (Al ₂ O ₃ Medyası)	6,72
60 rpm 1 Saat (Al ₂ O ₃ Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	6,46
60 rpm 1 Saat (Al ₂ O ₃ Medyası)	7,34



Şekil 3.30. 15 Dakika yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan Silindirik geometriye ait aşınma oranı (k) grafiği

Tablo 3.11. 15 dakika yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan Silindirik geometriye ait aşınma oranı (k) değerleri

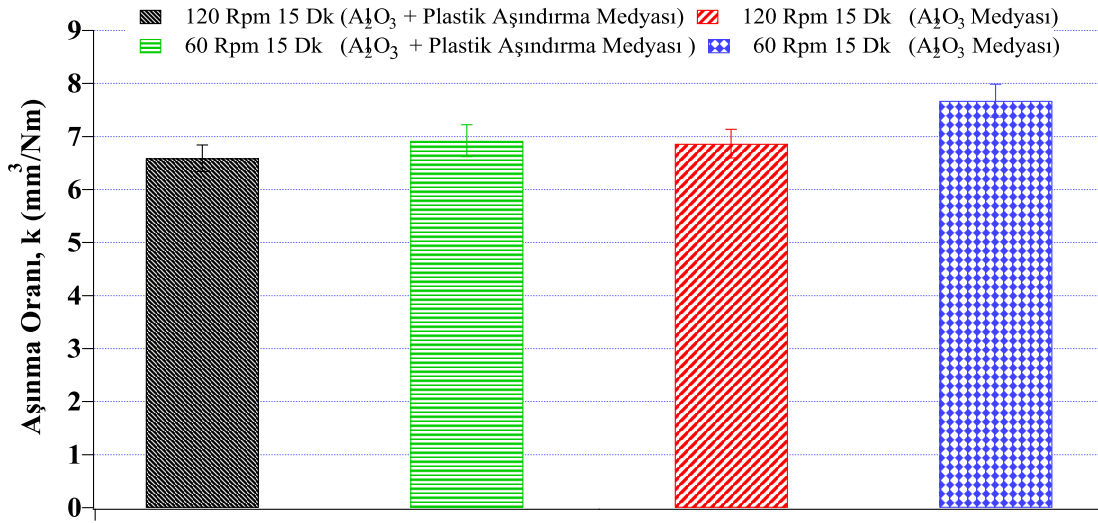
Parametre	Aşınma oranı (mm^3/Nm)
120 rpm 15 Dk (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	6,68
120 rpm 15 Dk (Al_2O_3 Medyası)	7,02
60 rpm 15 Dk (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	7,90
60 rpm 15 Dk (Al_2O_3 Medyası)	8,03



Şekil 3.31. 1 saatlik yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan kare kesitli geometriye ait aşınma oranı (k) grafiği

Tablo 3.12. 1 saatlik yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan kare kesitli geometriye ait aşınma oranı (k) değerleri

Parametre	Aşınma oranı (mm^3/Nm)
120 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	6,03
120 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası)	6,37
60 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	6,49
60 rpm 1 Saat (Al_2O_3 Medyası)	6,81



Şekil 3.32. 15 dakika yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan kare kesitli geometriye ait aşınma oranı (k) grafiği

Tablo 3.13. 15 dakika yüzey iyileştirme işlemi sonucunda aşındırma işlemine tabi tutulan kare kesitli geometriye ait aşınma oranı (k) değerleri

Parametre	Aşınma oranı (mm ³ /Nm)
120 rpm 15 Dk (Al ₂ O ₃ Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	6,59
120 rpm 15 Dk (Al ₂ O ₃ Medyası)	6,92
60 rpm 15 Dk (Al ₂ O ₃ Medyası + Plastik Aşındırma Medyası)	6,86
60 rpm 15 Dk (Al ₂ O ₃ Medyası)	7,68

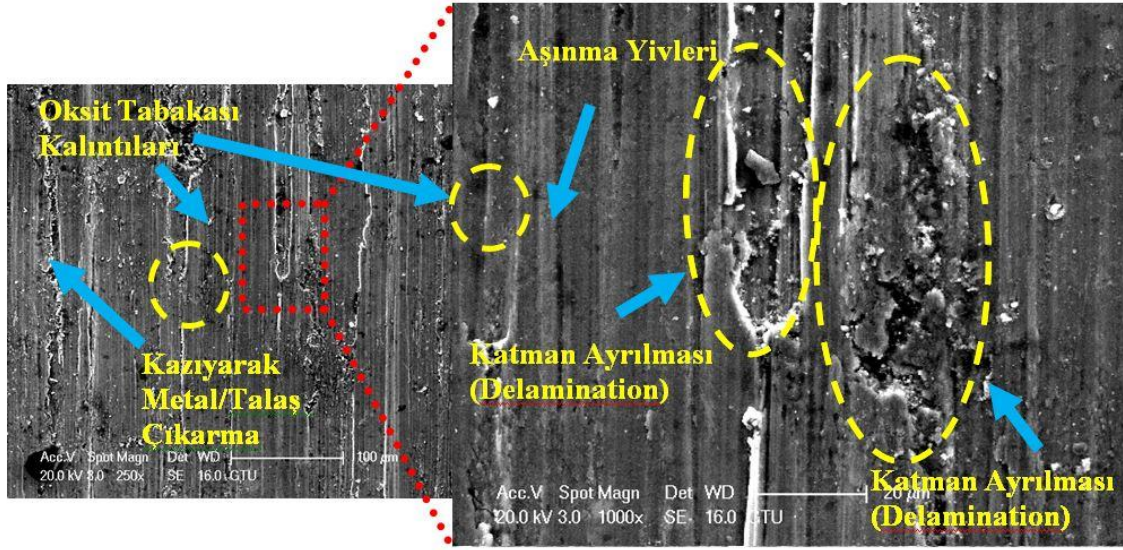
3.5.3 Aşınma İzlerinin Karakterizasyonu

3.5.3.1 Aşınma izlerine ait Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri

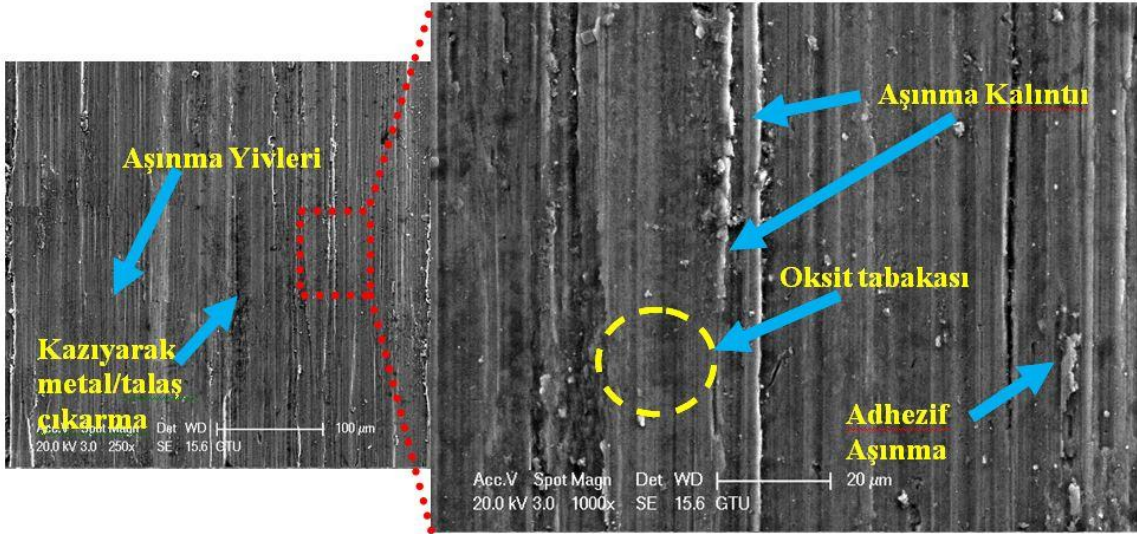
SLE yöntemi ile üretilen numunelere farklı yüzey iyileştirme parametreleri kullanılarak sürükleyerek yüzey iyileştirme işlemleri tamamlandıktan sonra yapılan aşındırma testleri sonucunda elde edilen aşınma izlerinin SEM analizi sonuçları Şekil 3.33-3.35’de görülmektedir. SEM analizi işlem görmemiş numuneye, 120 rpm dönme hızında 1 saat boyunca yüzey iyileştirme işlemine tutulan (Al_2O_3 Medyası + Plastik Aşındırma Medyası) ve 60 Rpm dönme hızında 15 dakika boyunca yüzey iyileştirme işlemine tabi tutulan (Al_2O_3 Medyası) numuneler için alınmıştır. Bunun sebebi işlem görmemiş numuneye kıyasla, en iyi yüzey kalitesine ve yüksek yüzey sertliğine sahip olan ile yüzey pürüzlülüğü kötü olan ve düşük yüzey sertliğine sahip olan numunelerin aşınma süreci sonrasındaki aşınma izleri SEM görüntüleri ile kıyaslanmıştır.

Aşınma izlerinin tamamı incelendiği zaman abrasif aşınmanın bir sonucu olan aşınma yivleri (sliding grooves) net bir şekilde görülmektedir. Ortaya çıkan bu durum tüm aşınma izleri için geçerli ve oldukça düzenli olduğu söylenebilir. Aşınma yüzeylerinde abrasif aşınma ile birlikte adhezif aşınma mekanizmasının da hakim olduğu ve bazı bölgelerde de gevrek karakterde oksit tabakalarının yer aldığı belirlenmiştir.

Aşınma esnasında oluşan oksit tabakası aşınma ile birlikte parçalara ayrılarak yüzeye dağıldığı SEM görüntülerinde de görülmektedir. Titanyum alaşımlarında oksit tabakası oluşumunun olağan bir durum olduğu ve Al_2O_3 aşındırıcı bilyesi ile arasındaki sürtünme kuvvetini düşürebildiği, aşındırma işlemi başlangıcında bir difüzyon bariyeri görevi gördüğü literatürde açıklanmıştır [59]. Yüzeyde korozyona karşı koruma sağlayan bu oksit tabakalarının titanyum alaşımlarının aşınma davranışlarına etkisi oldukça karmaşıktır. Aşınma işlemi sırasında oluşan ve yüzeyden kopan sert oksit tabakalarının aşındırma sürecinde aşındırıcı gibi davranarak üç gövde etkili (three body effect) aşınma mekanizmasını aktif hale getirdiği ve aşındırma işlemini hızlandırdığı belirtilmiştir [55]. Oluşan oksit tabakasının aşınma dayanımını arttırması ve yüzeyi, aşınma esnasında koruması beklenebilir.



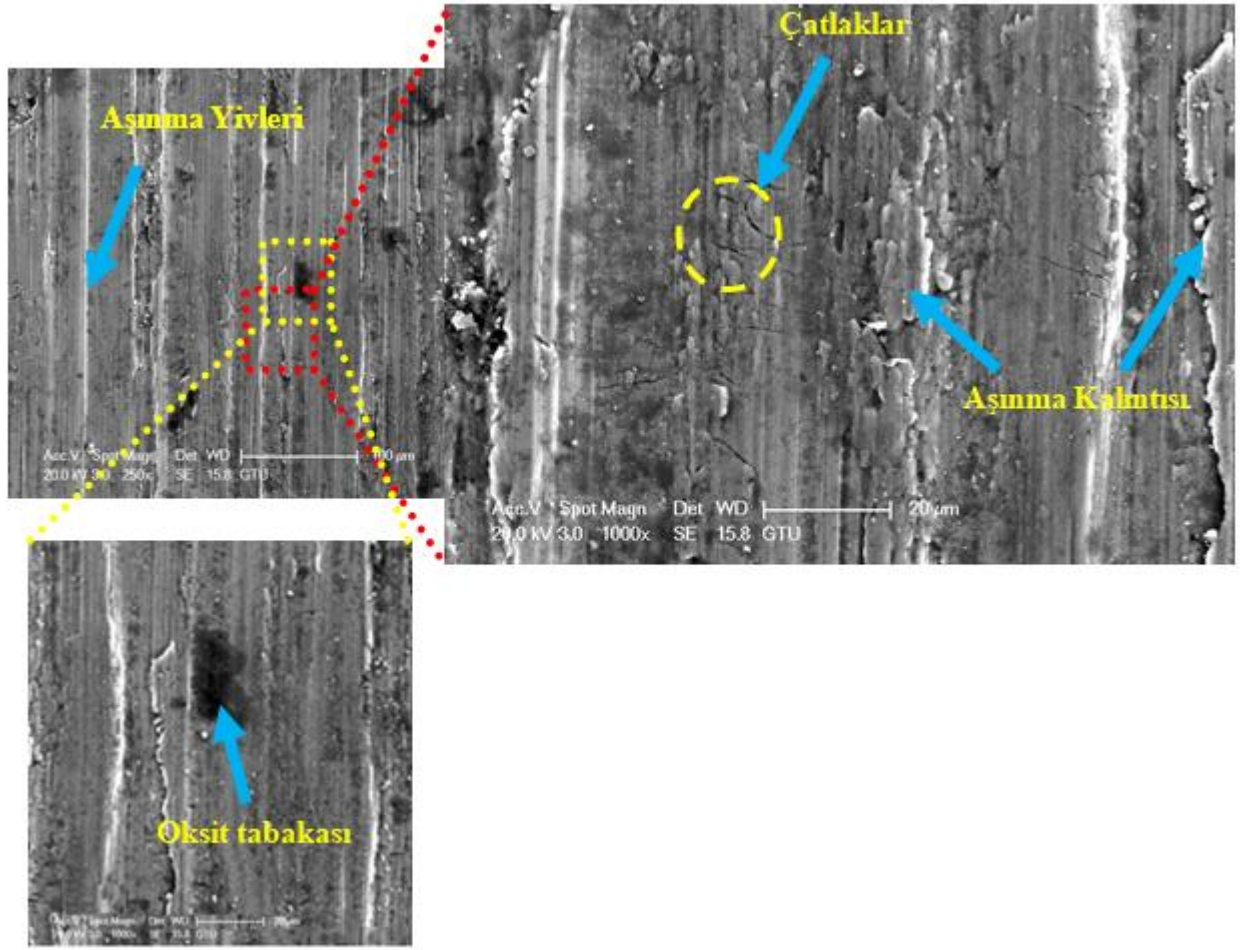
Şekil 3.33. İşlem görmemiş numuneye ait aşınma izi SEM görüntüsü



Şekil 3.34. 120 rpm 1 saat boyunca Al_2O_3 medyası + Plastik Aşındırma Taşı kullanılarak yüzey kalitesi iyileştirilen üçgen geometriye ait aşınma izi SEM görüntüsü

15 dakika süreyle Al_2O_3 medyası kullanılarak 60 rpm devirde yüzey iyileştirme işlemi uygulanan numuneye yapılan aşındırma testi sonucunda aşınma izlerindeki çatlaklar Şekil 3.35’ de net bir şekilde görülmektedir. Aşındırıcı bilyenin numune üzerine kuvvet uygulayarak ilerlenmesiyle numunenin yüzeyinde yüksek gerilmeler oluşur [60]. SEM

görüntüsü üzerinde de işaretlendiği üzere bu yüksek gerilmeler sonucunda mikro çatlaklar oluşur.



Şekil 3.35. 60 rpm 15 dakika boyunca Al_2O_3 medyası kullanılarak yüzey kalitesi iyileştirilen kare geometriye ait aşınma izi SEM görüntüsü

3.5.3.2 Aşınma izlerine ait optik mikroskop görüntüleri

Aşınma izleri optik mikroskop altında, aşınma izleri, topografileri ve aşınma profilleri incelenmiştir. Aşınma profilleri gösterilirken, işlem görmemiş olan numuneye ait aşınma profili referans profil olarak alınmış, işlem görmüş olan numunelere yapılan aşındırma testi sonucunda elde edilen aşınma profilleri ile karşılaştırılmış ve sunulmuştur. Optik mikroskop altında da abrasif aşınmanın bir sonucu olan ve SEM analizi bölümünde de anlatılan aşınma yivleri (sliding grooves) açık bir şekilde görülmektedir. Aşındırma testi sonucunda tüm numunelerde gelişen aşınma mekanizması benzerdir. Aşınma izlerinin genişlikleri incelendiği zaman, aşınma iz

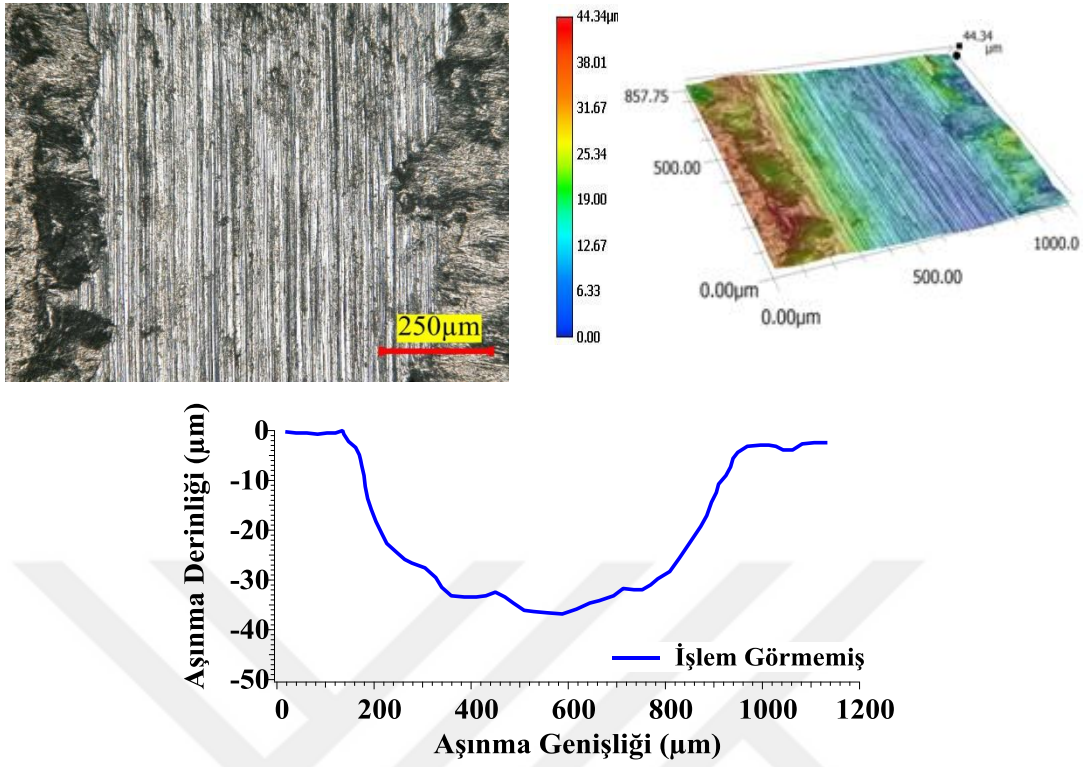
genişlikleri arasında ciddi farklar olduğu görülmektedir. Benzer şekilde aşınma derinliğinde de farklılık söz konusudur.

En geniş ve derin aşınma profili işlem görmemiş olan numuneye aittir. Şekil 3.36'da verilmiştir. En düşük genişlik ve derinlik Şekil 3.37'de verilen, 1 saat süresince Al_2O_3 medyası ve plastik aşındırma taşı kullanılarak 120 rpm de yüzey iyileştirme işlemi uygulanan üçgen geometriye aittir. Buradaki en önemli iki etken üçgen geometriye sahip numunenin bu koşullar altında yüzey pürüzlülük değerinin son paso değerinde olmasından ve mikro sertlik değerinde meydana gelen artıştan kaynaklı olduğudur.

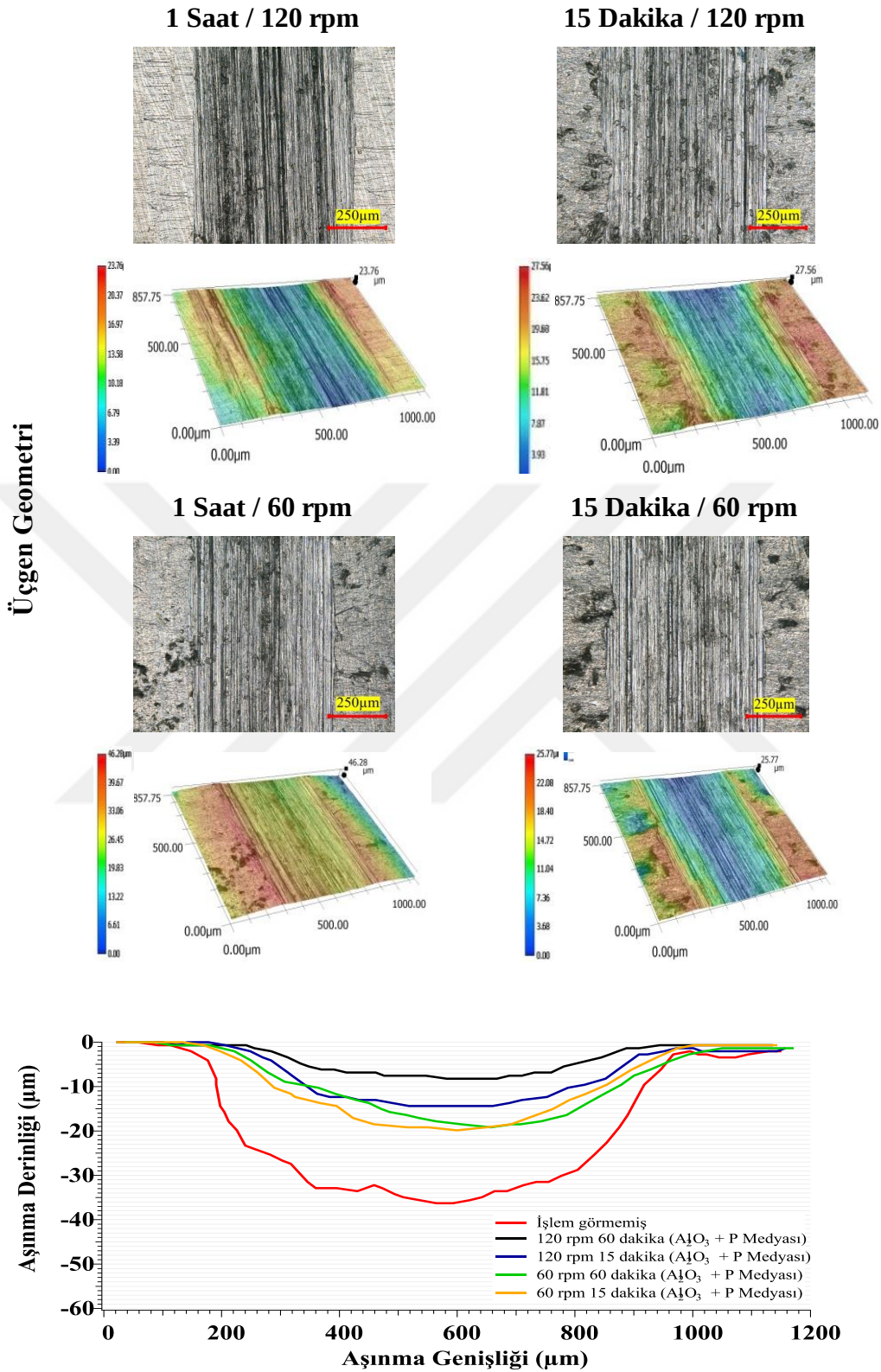
Şekil 3.39-3.40'da verilen, silindirik numunelere yapılan aşındırma testi sonuçları görülmektedir. Bu numunelere yapılan aşındırma testi sonucunda elde edilen aşınma profilleri kare ve üçgen kesitli geometrili numunelere yapılan test sonucunda elde edilen aşınma profil değerleri arasında kalmaktadır.

Şekil 3.41-3.42'de kare kesitli numunelere yapılan aşındırma testi sonucunda elde edilen aşınma profili ve yüzey topografisi görülmektedir. Bu testler içerisinde 15 dakika boyunca sadece Al_2O_3 medyası kullanılarak 60 rpm de yapılan test sonucunda en yüksek aşınma izi ve derinliği elde edilmiştir. Neredeyse işlem görmemiş numuneye ait aşınma profiline sahiptir. Bu durum üzerinde ki etken yüzey pürüzlülüğü ve mikro sertlik değeridir. Şekil 3.8'deki sertlik ve şekil 3.15'deki yüzey pürüzlülüğü değerleri incelenecek olursa işlem görmemiş olan numuneye oldukça yakın değerdedir.

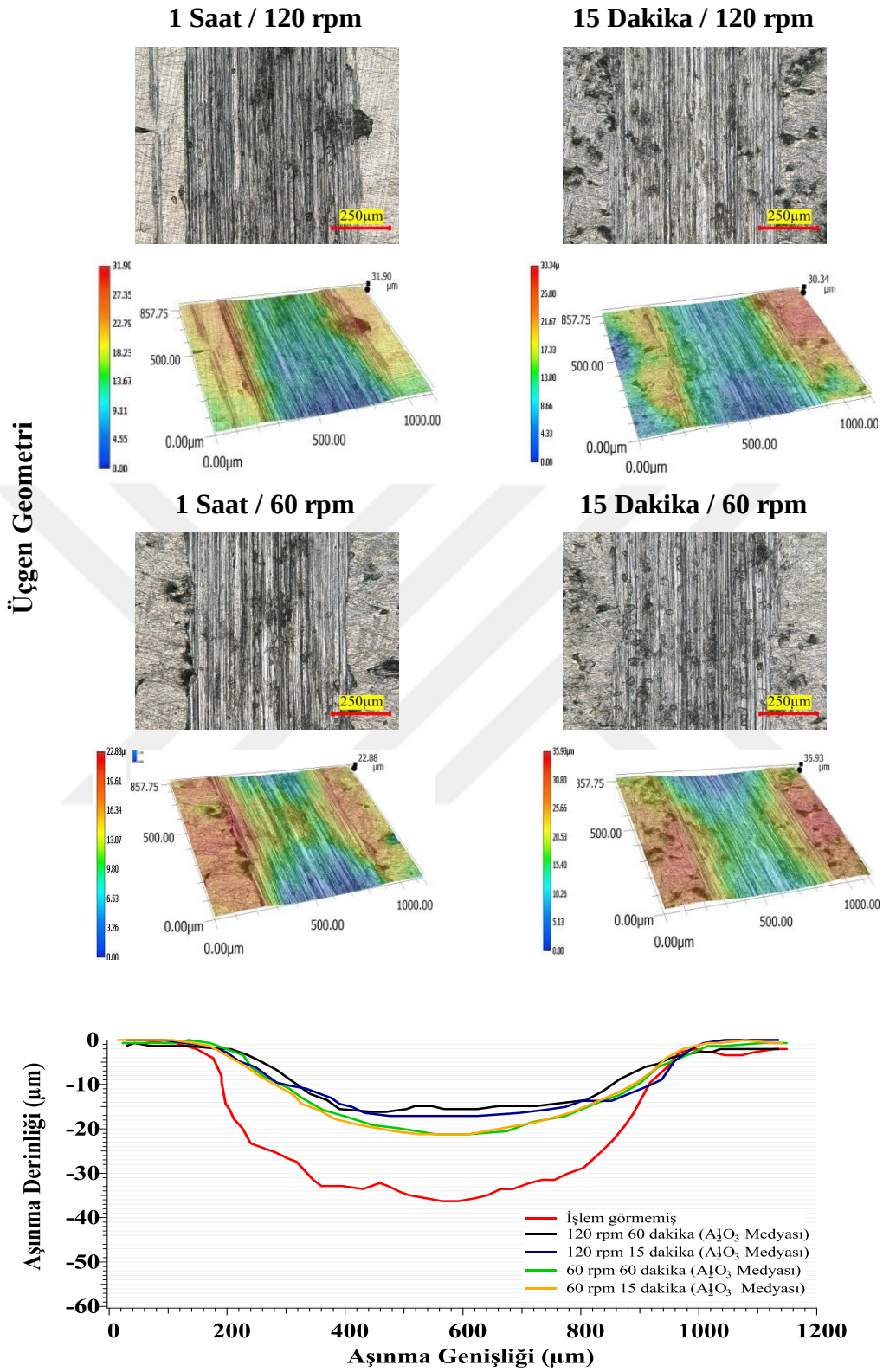
Tüm aşınma izleri, topografileri ve aşınma profilleri bir bütün olarak değerlendirilecek olursa yapılan yüzey iyileştirme işlemleri sonucunda, kullanılan farklı medyalar, SYİ cihazı dönme deviri ve işlem süresine bağlı olarak iyileşen yüzey kalitesi ve mikro sertlik değerinde ki artış ile kendi içerisinde kararlı bir şekilde aşınma testi sonucunda trend elde edilmiştir.



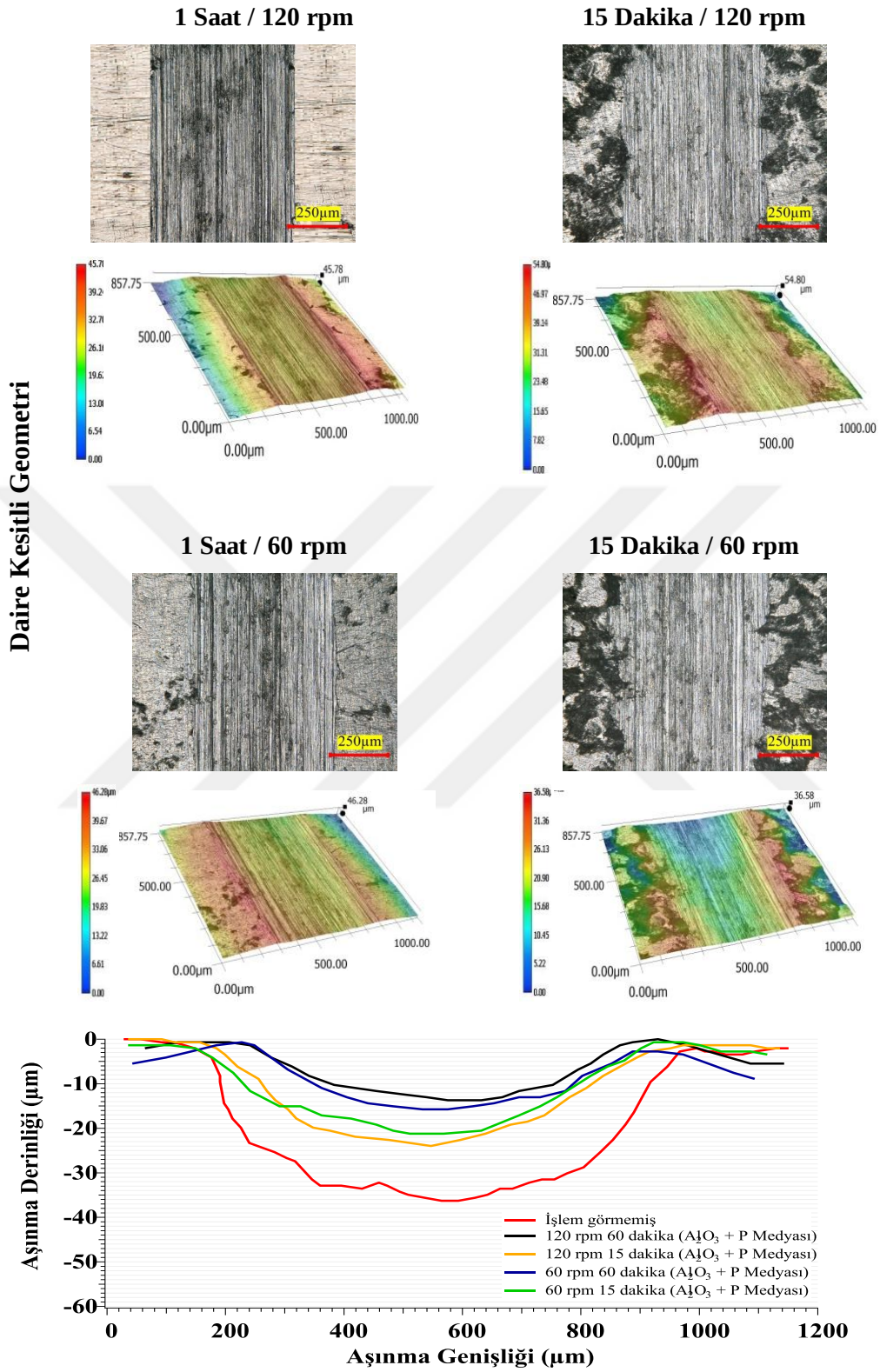
Şekil 3.36. İşlem görmemiş numuneye ait aşınma izi, topografisi ve profili



Şekil 3.37. Al_2O_3 + Plastik aşındırma medyası kullanılarak yüzeyi iyileştirilen üçgen geometrili numunelere ait aşındırma davranışı sonucunda elde edilen aşınma izleri, topografileri ve profilleri



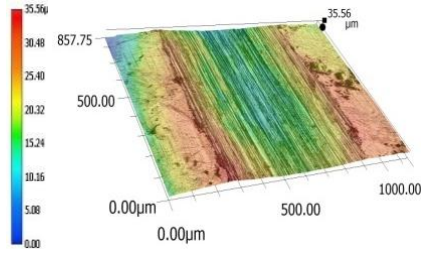
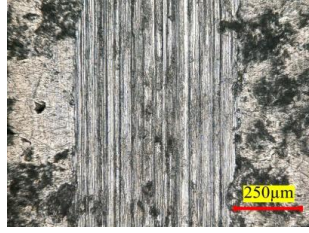
Şekil 3.38. Al_2O_3 medyası kullanılarak yüzeyi iyileştirilen üçgen geometrili numunelere ait aşındırma davranışı sonucunda elde edilen aşınma izleri, topografileri ve profilleri



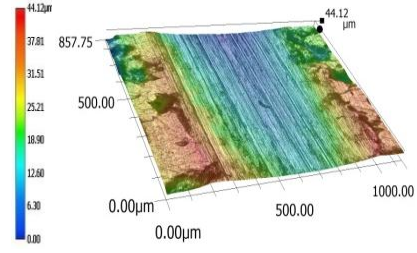
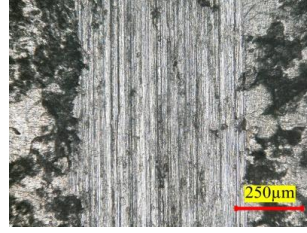
Şekil 3.39. Al_2O_3 + Plastik aşındırma medyası kullanılarak yüzeyi iyileştirilen dairesel geometrili numunelere ait aşındırma davranışı sonucunda elde edilen aşınma izleri, topografileri ve profilleri

Daire Kesitli Geometri

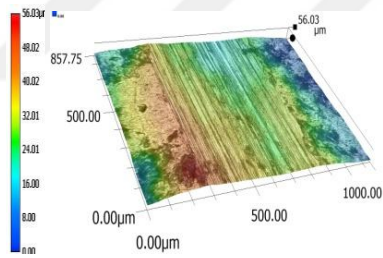
1 Saat / 120 rpm



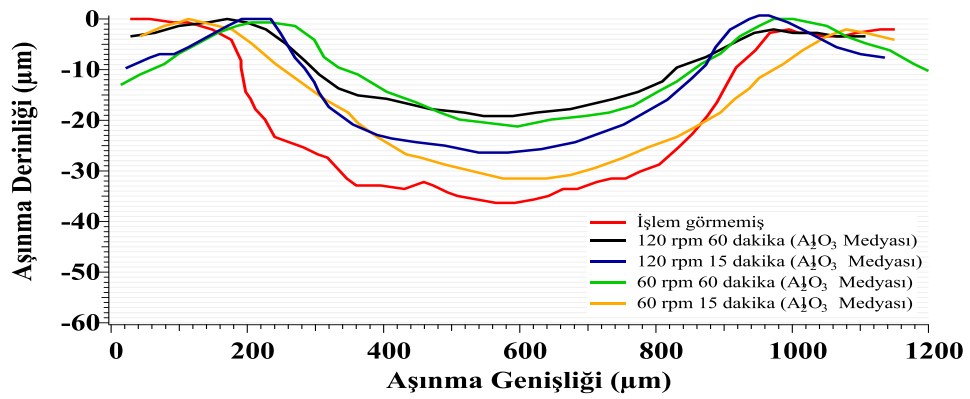
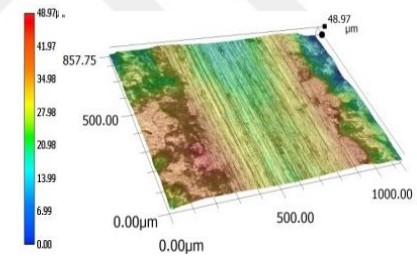
15 Dakika / 120 rpm



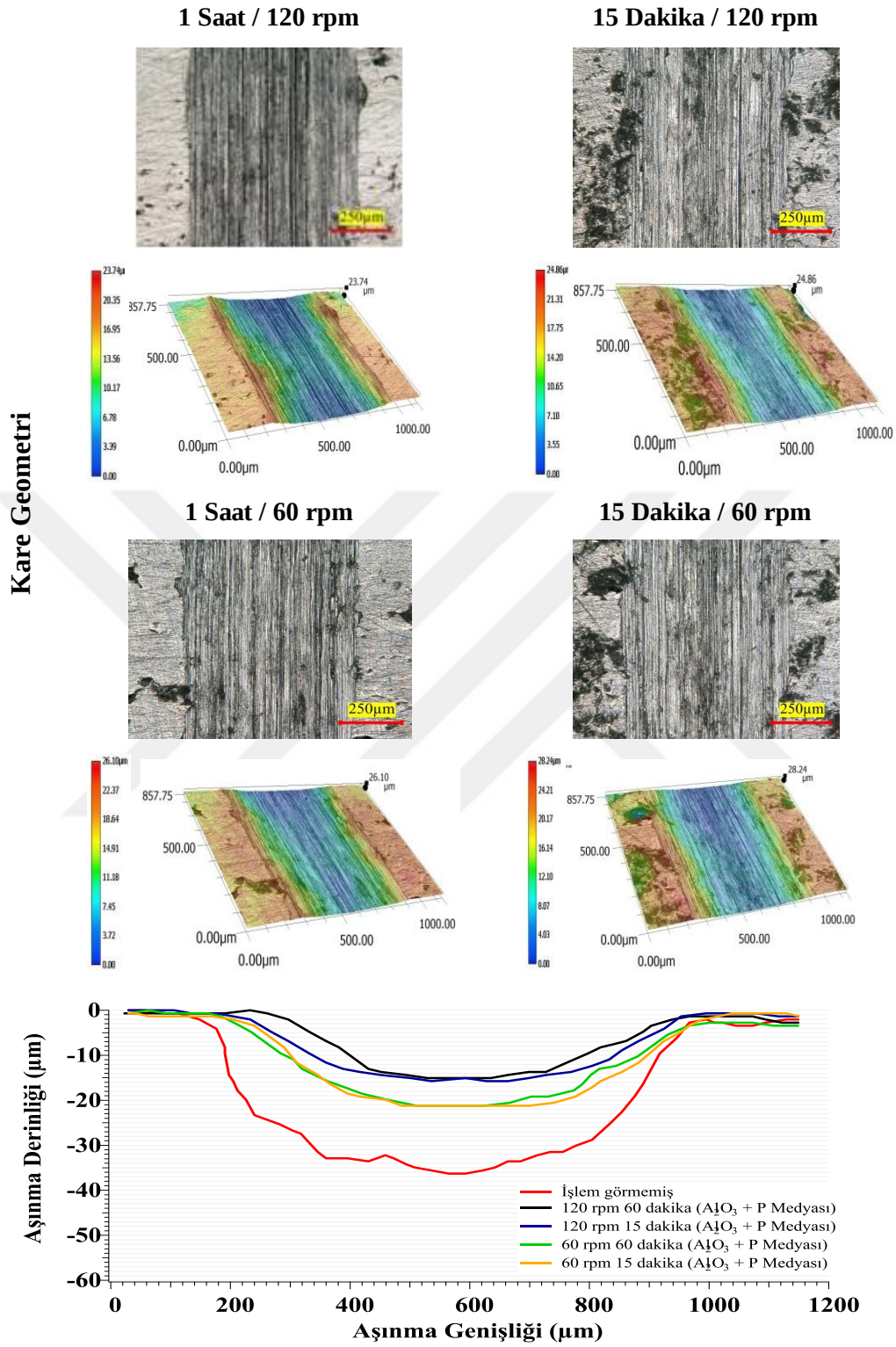
1 Saat / 60 rpm



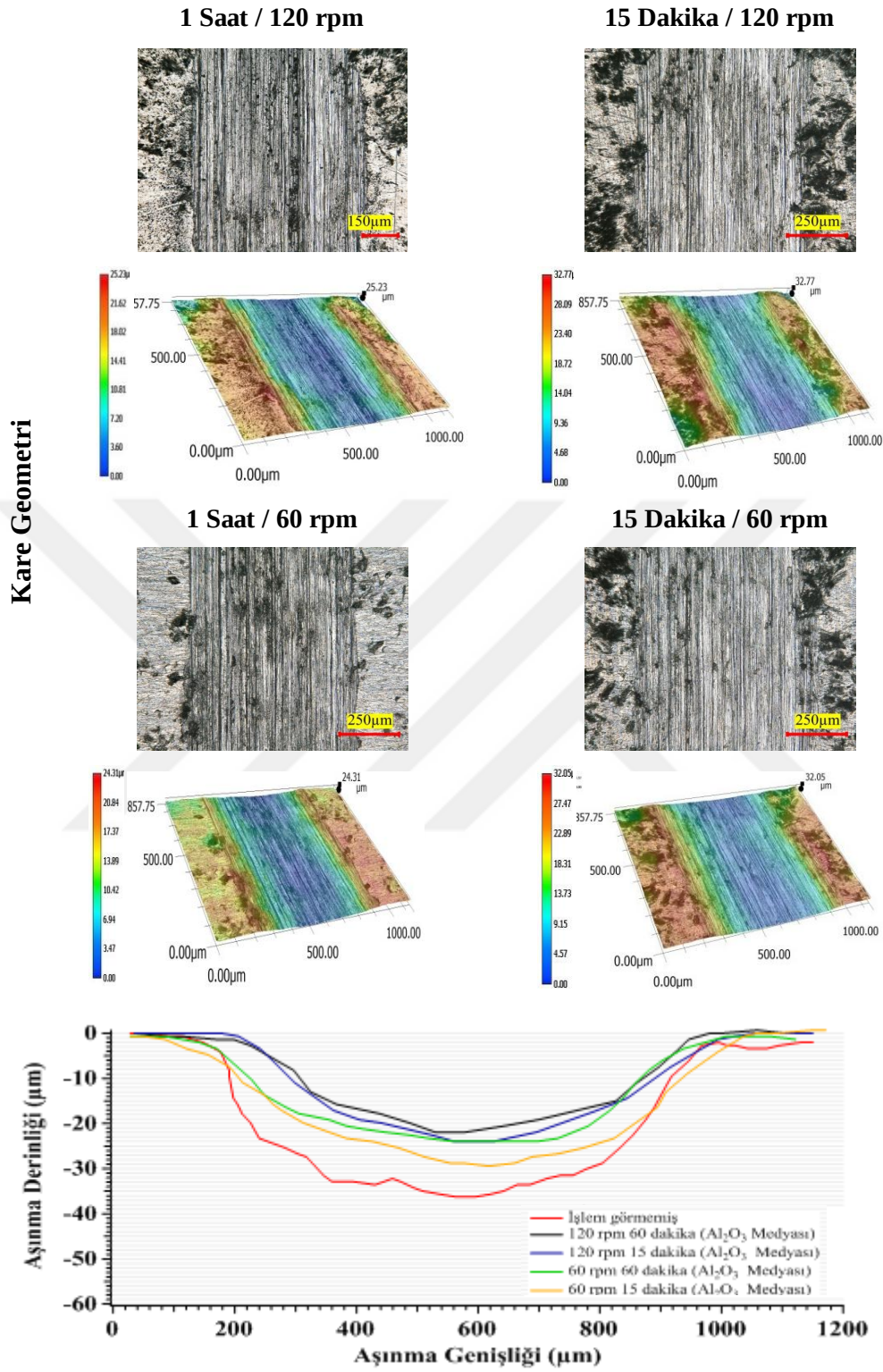
15 Dakika / 60 rpm



Şekil 3.40. Al_2O_3 medyası kullanılarak yüzeyi iyileştirilen dairesel geometrili numunelere ait aşındırma davranışı sonucunda elde edilen aşınma izleri, topografileri ve profilleri



Şekil 3.41. Al_2O_3 + Plastik aşındırma medyası kullanılarak yüzeyi iyileştirilen kare geometrili numunelere ait aşındırma davranışı sonucunda elde edilen aşınma izleri, topografileri ve profilleri



Şekil 3.42. Al_2O_3 medyası kullanılarak yüzeyi iyileştirilen kare geometrili numunelere ait aşındırma davranışı sonucunda elde edilen aşınma izleri, topografileri ve profilleri

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, yeni nesil eklemeli imalat yöntemi olan seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilen farklı geometrideki *Ti-6Al-4V* numunelerinin, sürükleyerek yüzey iyileştirme yöntemi (drag finishing) ile farklı yüzey iyileştirme parametreleri ve yüzey iyileştirme medyaları kullanılarak yüzey kaliteleri iyileştirilmiştir. Yüzey iyileştirme işleminde kullanılan farklı cihaz parametreleri ve medyaların yüzeye etkileri incelenmiştir. Söz konusu numunelerin sürükleyerek yüzeylerinin iyileştirilmesi sonucunda, test parametrelerinin numunelerin aşınma davranışı üzerine etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonular aşağıda özetlenmiştir.

- ❖ Yüzey iyileştirme testleri sonucunda en iyi yüzey kalitesine sahip olan numune, yüzey pürüzlülük değeri ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin altında kalan numune ve işlem görmemiş olan numuneye yapılan XRD analiz sonuçları incelenmiştir. Burada işlem görmemiş olan numunede β (SPH) + α (HMK) fazlarının olduğu görülmüştür. Yapılan sürükleyerek yüzey iyileştirme (drag finishing) sonucunda mikrosertlikte artış olduğu, bundan dolayı β (SPH) ve α (HMK) fazı piklerinde belirgin artış ve genişlemeler olmuştur.
- ❖ Yüzey iyileştirme işleminde kullanılan sürükleyerek yüzey iyileştirme cihazının (drag finishing) çalışma mantığı gereği yüzeyi iyileştirilecek olan numunenin yüzey kalitesinin iyileşmesi üzerinde geometrisinin önemi oldukça yüksektir. Bu durum üç temel geometri üzerinden doğrulanmıştır. Kare şeklindeki geometri cihazın motor bağlantı kısmı ve parça tutucu aparatın kendi eksenini etrafında dönmelerinden dolayı kazanda bulunan yüzey iyileştirme medyası tarafından çok iyi derecede sarılamadığı anlaşılmıştır. Silindirik numune kazan içerisinde yüzey iyileştirme medyaları ile oldukça iyi etkileşimde bulunmuştur. Üçgen kesitli geometriye sahip olan numune medyalar arasında dönerek hareket edince köşegen kısmı medyalar içerisinde bir yarma kuvveti oluşturduğu için yanıl yüzeyleri medyalar ile çok iyi bir şekilde temas ettiği için medyalar yüzeyden talaş kaldırma işlemi görmüşlerdir. Fakat işlem süresi uzun tutulduğu zaman yüzey kalitesini iyileştirdikten sonra kötüleştirilmektedir. Bunun sebebi ilk başta pürüzlü bir yüzeye sahip olan numunenin yüzeyindeki pürüzlülükleri medya aşındırıp kaldırdıktan sonra pürüzsüz yüzeyden de talaş kaldırmak istiyor. Bu

durum göz önünde bulundurularak yüzey iyileştirme işlemi gerçekleştirilmelidir. Oluşan çizikler için kombine yüzey iyileştirme işlemi yapılabilir (1. Y.İ.O plastik aşındırma medyası, 2. Al_2O_3 medyası, 3. Ceviz granül gibi.)

- ❖ El yöntemi ile üretilen numunelerin yüzey kalitelerini iyileştirmek için sürükleyerek yüzey iyileştirme (drag finishing- DF) operasyonlarının, proses süresine ve yüzey iyileştirme için kullanılan medyalara bağlı olduğu bu iki unsurun doğru seçimi ile yüzey pürüzlülük değerleri son paso seviyesine geleceği görülmüştür.
- ❖ Yüzey pürüzlülüğü değerinde Y.İ.O parametrelerine ve Y.İ.O süresine bağlı olarak trend oluştuğu görülmüştür.
- ❖ SLE ile üretilen numunelerin üretim parametrelerinden kaynaklı olarak sertlik değerleri 360-370 *HV* aralığında değişmektedir. Numunelere yapılan Y.İ.O sonrasında sertlik değerinde 5-25 *HV* aralığında artış olduğu ölçülmüştür.
- ❖ Y.İ.O ile numunelerin yüzey kaliteleri son kullanıma uygun hale getirilmiş ve aşınma davranışı incelenmiştir. Yüzey pürüzlülük değeri düşük ve mikrosertlik değeri yüksek olan numunenin aşınma davranışı diğer numunelere göre oldukça iyi bir seviyede olduğu anlaşılmaktadır. Y.İ.O parametrelerinde ki değişim ile yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik değeri ve aşınma davranışı değişerek trend oluşturmuştur.

KAYNAKLAR

1. Inagaki, I., et al., Application and features of titanium for the aerospace industry. Nippon steel & sumitomo metal technical report, 2014. **106**(106): p. 22-27.
2. Huang, S.H., et al., Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. **67**(5-8): p. 1191-1203.
3. Attaran, M., The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. Business Horizons, 2017. **60**(5): p. 677-688.
4. Shipley, H., et al., Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: A review. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018. **128**: p. 1-20.
5. Flynn, J.M., et al., Hybrid additive and subtractive machine tools—Research and industrial developments. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016. **101**: p. 79-101.
6. Herzog, D., et al., Additive manufacturing of metals. Acta Materialia, 2016. **117**: p. 371-392.
7. Sames, W.J., et al., The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. International materials reviews, 2016. **61**(5): p. 315-360.
8. Yan, C., et al., Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting. Materials & Design, 2014. **55**: p. 533-541.
9. Guo, P., et al., Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition. Journal of Materials Processing Technology, 2017. **240**: p. 12-22.
10. Aboutaleb, A.M., et al., Accelerated process optimization for laser-based additive manufacturing by leveraging similar prior studies. IISE Transactions, 2017. **49**(1): p. 31-44.

11. Kitay, Ö., Et Al., Seçici Lazerle Ergitme Yöntemi İle Üretilen Inconel 625 Alaşımlı Parçada Yüzey Bütünlüğünün İncelenmesi.
12. Ahn, D.-G., Applications of laser assisted metal rapid tooling process to manufacture of molding & forming tools—state of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011. **12**(5): p. 925-938.
13. Gibson, I., D.W. Rosen, and B. Stucker, Design for additive manufacturing, in *Additive Manufacturing Technologies*. 2010, Springer. p. 299-332.
14. Jiao, L., et al., Femtosecond laser produced hydrophobic hierarchical structures on additive manufacturing parts. *Nanomaterials*, 2018. **8**(8): p. 601.
15. Song, B., et al., Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V. *Materials & Design*, 2012. **35**: p. 120-125.
16. Thijs, L., Microstructure and texture of metal parts produced by Selective Laser Melting. Katholieke Universiteit Leuven: Leuven, Belgium, 2014.
17. Carter, L.N., et al., Process optimisation of selective laser melting using energy density model for nickel based superalloys. *Materials Science and Technology*, 2016. **32**(7): p. 657-661.
18. Kaynak, Y. and O. Kitay, The effect of post-processing operations on surface characteristics of 316L stainless steel produced by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 2019. **26**: p. 84-93.
19. Bourell, D., et al., Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals*, 2017. **66**(2): p. 659-681.
20. Donachie, M.J., Titanium: a technical guide. 2000: ASM international.
21. Meetham, G., The Development of Gas Turbines. 1981: Springer.
22. Allen, P., Titanium alloy development. *Advanced materials & processes*, 1996. **150**(4): p. 35-37.
23. Liu, X., P.K. Chu, and C. Ding, Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2004. **47**(3-4): p. 49-121.

24. Walter, J., M. Jackson, and C. Sims, Titanium and its alloys: principles of alloying titanium. ASM International, Materials Park, OH, 1988. **1**.
25. Klar, E., Metals Handbook. 1990: Asm Intl.
26. Abdalla, H., et al., Development of novel sustainable neat-oil metal working fluids for stainless steel and titanium alloy machining. Part 1. Formulation development. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007. **34**(1-2): p. 21-33.
27. Ezugwu, E. and Z. Wang, Titanium alloys and their machinability—a review. Journal of materials processing technology, 1997. **68**(3): p. 262-274.
28. Hong, S.Y., I. Markus, and W.-c. Jeong, New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001. **41**(15): p. 2245-2260.
29. Arbeitsblatt, G., 7: Tribologie–Verschleiß, Reibung, Definitionen, Begriffe, Prüfung. Gesellschaft für Tribologie eV (GfT), 2002.
30. Czichos, H. and K.-H. Habig, Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. 2010: Springer-Verlag.
31. Lipson, C. and E. Rabinowicz, Wear considerations in design. 1967.
32. Sun, Y., A. Moroz, and K. Alrbaey, Sliding wear characteristics and corrosion behaviour of selective laser melted 316L stainless steel. Journal of materials engineering and performance, 2014. **23**(2): p. 518-526.
33. Zhu, Y., et al., Tribology of selective laser melting processed parts: Stainless steel 316 L under lubricated conditions. Wear, 2016. **350**: p. 46-55.
34. Attar, H., et al., Comparison of wear properties of commercially pure titanium prepared by selective laser melting and casting processes. Materials Letters, 2015. **142**: p. 38-41.
35. Prashanth, K., et al., Tribological and corrosion properties of Al–12Si produced by selective laser melting. Journal of Materials Research, 2014. **29**(17): p. 2044-2054.

36. Prashanth, K.G., et al., Processing of Al–12Si–TNM composites by selective laser melting and evaluation of compressive and wear properties. *Journal of Materials Research*, 2016. **31**(1): p. 55-65.
37. Jamal, M. and M.N. Morgan, Design Process Control for Improved Surface Finish of Metal Additive Manufactured Parts of Complex Build Geometry. *Inventions*, 2017. **2**(4): p. 36.
38. Gillespie, L., Mass finishing handbook. 2006: Industrial Press.
39. Moore, M. and R. Douthwaite, Plastic deformation below worn surfaces. *Metallurgical Transactions A*, 1976. **7**(12): p. 1833-1839.
40. De Pellegrin, D.V. and G.W. Stachowiak, Assessing the role of particle shape and scale in abrasion using ‘sharpness analysis’: Part I. Technique development. *Wear*, 2002. **253**(9-10): p. 1016-1025.
41. Veiga, C., J. Davim, and A. Loureiro, Properties and applications of titanium alloys: a brief review. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 2012. **32**(2): p. 133-148.
42. Leyens, C. and M. Peters, Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications. 2003: John Wiley & Sons.
43. Souza, J.C., et al., Wear and corrosion interactions on titanium in oral environment: literature review. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 2015. **1**(2): p. 13.
44. Ni, X., et al., Improved surface properties for nanotube growth on selective laser melted porous TiAl4V alloy via chemical etching. *International Journal of Electrochemical Science*, 2019. **14**(6): p. 5679-5689.
45. Wysocki, B., et al., Laser and electron beam additive manufacturing methods of fabricating titanium bone implants. *Applied Sciences*, 2017. **7**(7): p. 657.
46. Haubrich, J., et al., The role of lattice defects, element partitioning and intrinsic heat effects on the microstructure in selective laser melted Ti-6Al-4V. *Acta Materialia*, 2019. **167**: p. 136-148.
47. Mohammadi, M. and D. Fray, Synthesis and characterisation of nanostructured neodymium titanium oxides by sol–gel process: Controlling the phase

- composition, crystal structure and grain size. *Materials Chemistry and Physics*, 2010. **122**(2-3): p. 512-523.
48. Kaynak, Y. and E. Tascioglu, Post-processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 2019: p. 1-14.
 49. Jia, Q. and D. Gu, Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014. **585**: p. 713-721.
 50. Xia, M., et al., Influence of hatch spacing on heat and mass transfer, thermodynamics and laser processability during additive manufacturing of Inconel 718 alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016. **109**: p. 147-157.
 51. Salvatore, F., et al., Experimental and numerical study of media action during tribofinishing in the case of SLM titanium parts. *Procedia CIRP*, 2017. **58**: p. 451-456.
 52. Braunovic, M., N.K. Myshkin, and V.V. Konchits, *Electrical contacts: fundamentals, applications and technology*. 2006: CRC press.
 53. Hutchings, I. and P. Shipway, *Tribology: friction and wear of engineering materials*. 2017: Butterworth-Heinemann.
 54. Stachowiak, G. and A.W. Batchelor, *Experimental methods in tribology*. Vol. 44. 2004: Elsevier.
 55. Bartolomeu, F., et al., Wear behavior of Ti6Al4V biomedical alloys processed by selective laser melting, hot pressing and conventional casting. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017. **27**(4): p. 829-838.
 56. Mary, C., et al., Pressure and temperature effects on Fretting Wear damage of a Cu-Ni-In plasma coating versus Ti17 titanium alloy contact. *Wear*, 2011. **272**(1): p. 18-37.

57. Merhej, R. and S. Fouvry, Contact size effect on fretting wear behaviour: application to an AISI 52100/AISI 52100 interface. *Lubrication Science*, 2009. **21**(3): p. 83-102.
58. Wang, Z., et al., Influence of ultrasonic surface rolling on microstructure and wear behavior of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy. *Materials*, 2017. **10**(10): p. 1203.
59. Zivic, F., et al., Continuous control as alternative route for wear monitoring by measuring penetration depth during linear reciprocating sliding of Ti6Al4V alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011. **509**(19): p. 5748-5754.
60. Suh, N.P., The delamination theory of wear. *Wear*, 1973. **25**(1): p. 111-124.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Emrah GÜNEŞSU
Doğum Yeri ve Tarihi : KARS/MERKEZ – 20.01.1994
İletişim : emrahgunessu1@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans :Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü (2018-2020)
Lisans :Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü (2013-2017)

İŞ TECRÜBESİ

T.C. MİLLÎ SAVUNMA BAKANLIĞI, Askeri Fabrikalar Genel Müdürlüğü, 41'inci Bakım Fabrika Müdürlüğü, Görev: Proje Mühendisi (01/2020 -)

HİDROMODE HİDROLİK MAKİNA SAN. VE TİC. A.Ş. /İstanbul, Görev: Makine Mühendisi /Tasarım ve Analiz (10/2017 - 11/2018)

PROJELER

"Şekil Hafızalı NitiHf Malzemelerin Talaşlı İmalatı-Yüzey Bütünlüğü-Ürün Performansı Arasındaki İlişkisinin Araştırılması", Destekleyen Kuruluş: TÜBİTAK ARDEB (TÜBİTAK-1001 Projesi), NASA Glenn Research Center, ABD, Görev: Proje Bursiyeri, Proje No: 116M346

"Seçici Lazer Ergitme Yöntemi İle Üretilen Ti-6Al-4V Malzemelerinin Sürüklenerek Yüzeylerinin İyileştirilmesi ve Aşınma Karakteristiklerinin İncelenmesi", Destekleyen Kuruluş: Marmara Üniversitesi BAP Projesi, Görev: Proje Araştırmacısı, Proje No: FEN-C-YLP250919-0271

YAYINLAR

E. Güneşsu & Y. Kaynak & T.B. Şirin. Improving the surface of the Ti-6Al-4V sample produced by selective laser melting by Drag Finishing Method and examining the wear behavior (Under review)

E. Güneşsu & Y. Kaynak, Farklı Kesme Parametreleri Kullanılarak İşlenmiş 15-5ph Martenzitik Paslanmaz Çelik Malzemesinin Yüzey Bütünlüğü Ve Aşınma Performansının İncelenmesi, Sözlü Sunum, INTERNATIONAL CONGRESS ON MACHINING, 07 Kasım 2019, 09 Kasım 2019.

M. Uçurum& T.B. Şirin & E. Güneşsu & Y. Kaynak Farklı Kesme Parametreleri Kullanılarak İşlenmiş 316LVM Paslanmaz Çelik Malzemesinin Yüzey Bütünlüğü Ve Yüzey Bütünlüğünün Aşınma Davranışına Etkisinin İncelenmesi, PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ