KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V ALAŞIMLARININ SICAK PRES İLE ÜRETİMİ VE EROZİF AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

KADİR ÖZDEMİR

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

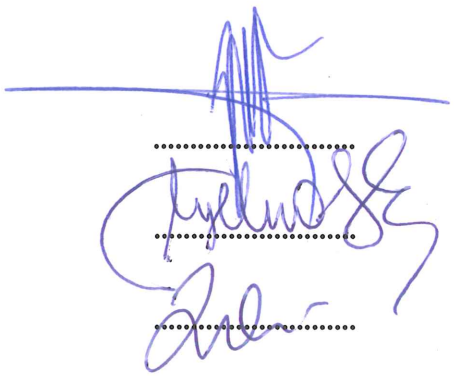
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ti4Al4Mo VE Ti6Al4V ALAŞIMLARININ SICAK PRES İLE ÜRETİMİ VE EROZİF AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

KADİR ÖZDEMİR

Doç. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU		
Danışman,	Kocaeli Üniversitesi	.....
Prof. Dr. Taner YILMAZ		
Jüri Üyesi,	Kocaeli Üniversitesi	.....
Dr. Öğr. Üy. Zeynep TAŞLIÇUKUR ÖZTÜRK		
Jüri Üyesi,	Gedik Üniversitesi	.....



Tezin Savunulduğu Tarih: 09.07.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çalışmalarımda değerli desteklerini esirgemeyen ve yüksek lisans eğitimimde akademik, teknik ve kişisel anlamda her zaman bu yolda yanımda yer alan, ışık tutan hocam Doç. Dr. Rıdvan Yamanoğlu'na teşekkürlerimi borç bilirim. Tez çalışmalarımın Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V alaşımlarının üretilmesi bölümü, Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme, erozif aşınma deneyleri bölümü ise Kocaeli Üniversitesi Ford Otosan İhsaniye Otomotiv Meslek Yüksek Okulu laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Bu anlamda, desteklerinden dolayı ve yardımlarını esirgemeyip hiçbir zaman beni geri çevirmeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Egemen Avcu 'ya, ayrıca teşekkürlerimi sunarım. Laboratuvar çalışmalarımda teknik anlamda desteklerinden dolayı Sayın Okan Yetik, Sayın Can Duran, ve Sayın Erdinç Efendi'ye teşekkürlerimi sunarım.

Beni bugünlere kadar büyüten ve her zaman yanımda olan annem ve babama, yaşamım boyunca yanımda yer alan kardeşime ve hayatımı paylaştığım desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen eşime sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Haziran - 2018 KADİR ÖZDEMİR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ x
ÖZET xi
ABSTRACT xii
GİRİŞ 1
1. TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARI 3
1.1. Titanyumun Kısa Tarihçesi ve Kullanım Alanları 3
1.2. Titanyumun Metalurjisi 4
1.3. Titanyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması 6
1.3.1. CP titanyum 7
1.3.2. α Titanyum alaşımları 8
1.3.3. α Yakın titanyum alaşımları 9
1.3.4. α+β Titanyum alaşımları 10
1.3.5. β Titanyum alaşımları 12
1.4. Titanyum ve Alaşımlarının Havacılık Endüstrisindeki Önemi 12
2. TOZ METALURJİSİ 16
2.1. Toz Metalurjik Üretim Yöntemi 16
2.1.1 Mekanik alaşımlama mekanizması 16
2.1.2. Sinterleme prosesi 18
2.1.3. Sıcak pres 21
2.2. Titanyum Alaşımları ve Toz Metalurjisi 22
3. EROZİF AŞINMA 23
3.1. Katı Partikül Erozyonu 25
3.1.1. Katı partikül erozyonuna etki eden faktörler 26
3.1.2. Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı 27
3.1.3. Aşındırıcı partiküllerin hızı 29
3.1.4. Aşındırıcı partiküllerin kütlesel debisi 30
3.1.5. Aşındırıcı partiküllerin boyutu 30
4. ALUMİNYUM OKSİT 32
5. MALZEME VE YÖNTEM 37
5.1. Tez Kapsamında Kullanılan Tozlar 38
5.2. Mekanik Karıştırma İşlemi 43
5.3. Sıcak Pres ile Numunelerin Üretimi 44
5.4. Sıcak Pres ile Üretilen Numunelerin Metalografik Hazırlanması 47
5.5. Numunelerin Yoğunluklarının Belirlenmesi 47
5.6. Mekanik Testler 48
5.6.1 Sertlik testleri 48
5.6.2 Eğme testi 49
5.7. Mikroyapısal Karakterizasyon 50
5.8. Aşındırıcı Partikül Malzemesi 51

5.9. Alüminyum Oksit Aşındırıcı Partikülün Debisinin Hesaplanması 53
5.10. Katı Partikül Erozif Aşınma Deneyleri 54
6. BULGULAR VE TARTIŞMA 60
6.1. Mekanik Testler 70
6.1.1 Sertlik testi sonuçları 70
6.1.2 Eğme testi sonuçları 70
6.2. Aşındırıcı Partiküllere Ait Kütlesel Debilerin Hesaplanması 71
6.3. Element Analizlerinin İncelenmesi 73
6.4. Partikül Çarpma Açısının Katı Partikül Erozyonuna Etkisi 80
6.5. Partkül Basıncına Bağlı Olarak Katı Partikül Erozyonu Değişimi 88
6.6. Ti4Al4Mo ve Ti6AlV Malzemelerinin Katı Partikül Erozyonu Davranışlarının Kıyaslanması 101
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 108
KAYNAKLAR 110
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 116
ÖZGEÇMİŞ 117

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. SPH α fazı ile HMK β'nın kristal yapıları 5
Şekil 1.2. Alaşım elementlerinin titanyumun dönüşüm sıcaklığına etkisi..... 6
Şekil 1.3 Ti6AlV'un a) 1050 °C'den, c) 800 °C'den, e) 650 °C'den yavaş soğuma sonrasında, b) 1050 °C'den, d) 800 °C'den, f) 650 °C'den hızlı soğuma sonrasında elde edilen mikro yapı görüntüleri 11
Şekil 1.4. F22 savaş uçağında kullanılan malzemeler ve oranları 14
Şekil 2.1. Toz metalürjik Prosesi Akış Şeması..... 16
Şekil 2.2. Bilyeler ile tozlar arasındaki çarpışmanın etkileşim 17
Şekil 2.3. Sinterleme kademelerinin kavramsal aşamalarının gösterimi 19
Şekil 2.4. Tek eksenli preste üretim basamakları 21
Şekil 3.1. Erozif aşınma mekanizması 23
Şekil 3.2. Parçacıkların tekli ve çoklu olarak çarpmaları sebebiyle oluşan aşınma kaybından oluşan mekanizmalar..... 24
Şekil 3.3. Erozif aşınma tipleri 25
Şekil.3.4. Sünek/gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri..... 28
Şekil 3.5. Partikül hızının katı partikül erozyonuna etkisi 29
Şekil 3.6. Erozyon oranının aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi..... 31
Şekil 4.1. Alüminyum Oksit çeşitleri..... 32
Şekil 5.1. Tez çalışması esnasında Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V Alaşımlarının Sıcak pres ile üretiminin akış şeması 37
Şekil 5.2. Tez kapsamında kullanılan ön alaşımlı Ti6Al4V alaşımı tozları, a) SEM görüntüsü, b) boyut dağılımı 39
Şekil 5.3. Tez kapsamında kullanılan Al_2O_3 tozlarının, a) SEM görüntüsü, b) boyut dağılımı 39
Şekil 5.4. Tez kapsamında Ti4Al4Mo alaşımı üretimi için kullanılan tozlar, a) saf Ti, b) Alüminyum, c) molibden (düşük büyütme), d) molibden (yüksek büyütme) 41
Şekil 5.5. Ti4Al4Mo alaşımı üretimi için kullanılan tozların boyut dağılımları, a) saf Ti, b) Al, c) Mo 42
Şekil 5.6. Mekanik karıştırma için kullanılan bilyeli değirmen..... 43
Şekil 5.7. Ti4Al4Mo veTi6Al4V alaşımlarının üretildiği a) DIEX marka sıcak pres makinası b) Yüksek Sıcaklıktaki grafit kalıbın görüntüsü 44
Şekil 5.8. Sıcak preste kullanılan a) grafit kalıp ve zımbalar, ... 45
b) hem gövde hem de zımbalara serilen grafit kağıtlar..... 45
Şekil 5.9. Sıcak pres ile titanyum esaslı malzemelerin üretimi sürecinde kullanılan sıcaklık ve zaman çevrimi 46
Şekil 5.10. (a) Hassas Kesme cihazı (b) zımparalama ve parlatma cihazı..... 47
Şekil 5.11. AND marka GR-200 model hassas terazi 48
Şekil 5.12. Future Tech marka vickers sertlik ölçüm cihazı..... 49

Şekil 5.13. a) Instron marka çekme test cihazı, b) eğme test düzeneği 49
Şekil 5.14. JEOL JSM-6060 marka taramaları elektron mikroskobu 50
Şekil 5.15. Olympus marka, BX41M-LED model ışık mikroskop 50
Şekil 5.16. 60 mesh partikül boyutunda aşındırıcı beyaz alüminyum oksitlerin x25 büyütmede taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı 51
Şekil 5.17. 60 mesh partikül boyutunda aşındırıcı beyaz alüminyum oksitlerin x150 büyütmede taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı 52
Şekil 5.18. Tez çalışması esnasında erozif aşınma çalışmalarının akış şeması 53
Şekil 5.19. Katı partikül erozif aşınma test düzeneği 55
Şekil 5.20. Shimadzu Atx 224 Model 220 gr kapasiteli hassas terazi 57
Şekil 6.1. Mekanik karıştırma sonrası tozların SEM görüntüsü, a)250X, b)500X 61
Şekil 6.2. Mekanik karıştırma sonrası bir Al partikülü üzerinde EDX analizleri 62
Şekil 6.3. Mekanik karıştırma sonrası bir Ti partikülü üzerinde EDX haritalama analizi 63
Şekil 6.4. Sıcak pres ile üretilen Ti6Al4V alaşımının mikroyapısının SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları 64
Şekil 6.5. Tez kapsamında üretilen Ti4Al4Mo alaşımının SEM görüntüleri, a) 1000X, b) 1500X büyütme ile 65
Şekil 6.6. Ti4Al4Mo alaşımının mikroyapısının SEM görüntüsü 66
Şekil 6.7. Şekil 6.6'da verilen 4 farklı bölgenin EDX analizleri 67
Şekil 6.8. Yoğun Mo içeren bölgelerin SEM görüntüsü ve EDX analizleri 68
Şekil 6.9. Ti6Al4V alaşımının a) 20x ve b) 50x büyütmedeki görüntüsü; Ti4Al4Mo alaşımının c) 20x ve d) 50 x büyütmedeki görüntüsü 69
Şekil 6.10. Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V numunelerinin ortalama sertlik değerleri 70
Şekil 6.11. Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V numunelerine ait eğme gerilmesi sonuçları 71
Şekil 6.12. 30 saniye boyunca, farklı basınçlardaki 60 mesh aşındırıcı partikül boyutundaki kütlesel debi 72
Şekil 6.13. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesi EDS analizi.(çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 3 bar) 74
Şekil 6.14. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesi EDS analizi.(Çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 3 bar) 75
Şekil 6.15. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesi EDS analizi. (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 1,5 bar) 76
Şekil 6.16. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesi EDS analizi.(çarpma açısı: 90°, püskürtme basıncı: 1,5 bar) 77
Şekil 6.17. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesi EDS analizi.(çarpma açısı: 90°, püskürtme basıncı: 3 bar) 78
Şekil 6.18. Toz metalurjik Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V numunelerinin 1,5 Bar püskürtme basıncında Erozyon oranları 81

Şekil 6.19. Toz metalurjik Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V numunelerinin 3 Bar püskürtme basıncında Erozyon oranları....82
Şekil 6.20. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)....82
Şekil 6.21. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)....83
Şekil 6.22. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)....84
Şekil 6.23. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)....84
Şekil 6.24. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)....85
Şekil 6.25. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)....86
Şekil 6.26. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)....87
Şekil 6.27. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)....87
Şekil 6.28. Ti4Al4Mo malzemesinde katı partikül erozyonunda, erozyon oranının püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi....88
Şekil 6.29. Ti6Al4V malzemesinde katı partikül erozyonunda erozyon oranının püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi....89
Şekil 6.30. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)....90
Şekil 6.31. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)....90
Şekil 6.32. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 3 bar,

aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.) 91
Şekil 6.33. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.) 92
Şekil 6.34. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.) 93
Şekil 6.35. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.) 93
Şekil 6.36. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.) 94
Şekil 6.37. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.) 95
Şekil 6.38. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.) 96
Şekil 6.39. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.) 96
Şekil 6.40. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.) 97
Şekil 6.41. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.) 98
Şekil 6.42. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.) 99
Şekil 6.43. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.) 99
Şekil 6.44. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 3 bar,

aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.) 100
Şekil 6.45. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x2500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.) 101
Şekil 6.46. Ti4Al4Mo malzemesine ait farklı püskürtme açılardaki erozyon oranı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.) 102
Şekil 6.47. Ti6Al4V malzemesine ait farklı püskürtme açılardaki erozyon oranı (püskürtme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.) 103
Şekil 6.48. (a) 30° partikül çarpma açısı, 1,5 bar partikül basıncında aşındırılmış Ti4Al4Mo malzemesine ait SEM fotoğrafı 105
(b) 30° partikül çarpma açısı, 1,5 bar partikül basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemesine ait SEM fotoğrafı 105
Şekil 6.49. (a) 30° partikül çarpma açısı, 3 bar partikül basıncında aşındırılmış Ti4Al4Mo malzemesine ait SEM fotoğrafı 105
(b) 30° partikül çarpma açısı, 3 bar partikül basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemesine ait SEM fotoğrafı 105
Şekil 6.50. (a) 90° partikül çarpma açısı, 1,5 bar partikül basıncında aşındırılmış Ti4Al4Mo malzemesine ait SEM fotoğrafı 106
(b) 90° partikül çarpma açısı, 1,5 bar partikül basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemesine ait SEM fotoğrafı 106
Şekil 6.51. (a) 90° partikül çarpma açısı, 3 bar partikül basıncında aşındırılmış Ti4Al4Mo malzemesine ait SEM fotoğrafı 106
(b) 90° partikül çarpma açısı, 3 bar partikül basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemesine ait SEM fotoğrafı 106

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Titanyum, demir ve alüminyumun bazı fiziksel özellikleri....4
Tablo 1.2. Ticari saflıktaki titanyum malzemelerin genel özellikleri 8
Tablo 2.1. Sinterleme aşamaları ve oluşan fiziksel değişmeler....20
Tablo 3.1. Partikül erozyonuna etki eden faktörler....27
Tablo 4.1. Alüminyum Oksit minerali fiziksel özellikler....34
Tablo 4.2. Alüminyum Oksit minerali kimyasal özellikleri....35
Tablo 4.3. Alüminyum Oksit Aşındırıcıları Kullanımı....36
Tablo 5.1. Aşındırıcı Partiküllerin kütlesel debilerinin hesaplanması için yapılan deneylerin sonuçları....54
Tablo 5.2. Erozif Aşınma deneylerinde kullanılan malzeme ve parametreler....56
Tablo 5.3. Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V alaşımlarının önemli özellikleri....59
Tablo 6.1. 1,5 ve 3 bar püskürtme basınçlarında aşındırıcı partiküllerin kütlesel debileri....72
Tablo 6.2. Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V malzemelerine ait 1,5 bar partikül püskürtme basıncındaki ve farklı püskürtme açılarındaki katı partikül erozyon oranı verileri....102
Tablo 6.3. Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V malzemelerine ait 3 bar partikül püskürtme basıncındaki ve farklı püskürtme açılarındaki katı partikül erozyon oranı verileri....103

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

cm	: Santimetre
dak	: Dakika
g	: Gram
GPa	: Gigapascal
HV	: Vickers sertlik
J	: Joule
K	: Kelvin
kg	: Kilogram
Kgf	: Kilogram kuvvet
m	: Metre
nm	: Nanometre
µm	: Mikrometre
MPa	: Megapascal
Pa	: Pascal
s	: Saniye
W	: Watt
°C	: Santigrat derece
Ω	: Ohm

Kısaltmalar

CP	: Commercially Pure (Ticari Saflıkta)
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
HMK	: Hacim Merkez Kübik
ppm	: Parts Per Million (Milyonda bir)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SPH	: Sıkı Paket Hegzagonal
YMK	: Yüzey Merkez Kübik

Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V ALAŞIMLARININ SICAK PRES İLE ÜRETİMİ VE EROZİF AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Titanyum alaşımları yüksek spesifik mukavemet, korozyon direnci ve biyouyumluluk özellikleri nedeniyle bir çok endüstriyel uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında havacılık uygulamalarına yönelik malzeme seçimi, üretimi ve karakterizasyonu üzerinde çalışılmıştır. Havacılık alanında en fazla kulanılan Ti6Al4V alaşımı ve ilave olarak odukça yeni bir kompozisyon olarak ortaya konabilecek Ti4Al4Mo alaşımı toz metalurjik prosesler ile üretilmiştir. Çalışma kapsamında Ti6Al4V ön alaşımlı tozlardan, Ti4Al4Mo ise elementel tozlardan hazırlanarak sıcak pres işlemi ile kompakt hale getirilmişlerdir. Titanyumun oksijene olan yüksek afinitesinden dolayı tüm sinterleme süreçleri vakum atmosferi altında gerçekleştirilmiştir. Özellikle elementel tozların kullanıldığı Ti4Al4Mo alaşımı için sıvı faz oluşumu sonrasında basınç etkisi altında kalıptan sızmaların önlenmesi amacıyla kademeli sinterleme çevrimi uygulanmıştır. Elde edilen numunelerin ilk olarak yoğunlukları ve mikroyapısal karakteristikleri belirlenmiş ardından farklı püskürtme açılarında ve farklı basınçlarda aşındırıcı partiküller püskürtülerek erozif aşınmaya tabi tutulmuşlardır. Sonuçlar iki farklı alaşım için değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler:, Basınç Destekli Sinterleme, Erozif Aşınma Havacılık, Ti4Al4Mo, Ti6Al4V.

PROCESSING OF Ti4Al4Mo and Ti6Al4V ALLOYS VIA HOT PRESSING AND INVESTIGATION OF THEIR EROSIVE WEAR BEHAVIOUR

ABSTRACT

Titanium alloys are widely used in various industrial applications owing to their high specific strength, corrosion resistance and bio-compatibility. Within the scope of this thesis, material selection, production and characterisation for aviation applications have been studied. The most widely used Ti6Al4V alloy in the aerospace industry and additionally Ti4Al4Mo alloy, which can be introduced as a new composition, were produced by powder metallurgical processes. In the study, Ti6Al4V was prepared from pre-alloyed powders and Ti4Al4Mo was prepared from elemental powders and compacted by hot pressing process. Due to the high affinity of titanium for oxygen, all sintering processes were carried out under a vacuum atmosphere. Particularly for the Ti4Al4Mo alloy, in which elemental powders are used, a gradual sintering cycle is applied to avoid permanent leakage under pressure effect after liquid phase formation. The densities and microstructural characteristics of the obtained samples were first determined and then subjected to erosive wear by blasting of erodent particles at different impingement angles and at different pressures. The results were evaluated for two different alloys.

Keywords: Pressure Assisted Sintering, Erosive Wear, Aerospace, Ti4Al4Mo, Ti6Al4V.

GİRİŞ

Titanyum ve alaşımları oksijene olan yüksek ilgilerinden dolayı vakum ortamında üretim gerektirmeleri ve bu sebeple oluşan yüksek maliyetlerine rağmen, üstün mekanik özellikler ve korozyon dirençleri nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada kullanım alanı bulmaktadır. Bu üstün özelliklere düşük yoğunluk ile birlikte sahip olunması, titanyum ve alaşımlarını özellikle havacılık, uzay ve otomotiv sanayisinde en cazip malzemelerden birisi haline getirmiştir.

Özellikle düşük yoğunluğu sayesinde elde edilen ağırlık kazancı çevreye salınan zararlı gazların salınımının ve aynı zamanda yakıt tüketiminin azaltılması açısından önem arz etmektedir.

Katı partikül erozyonu, belli bir açı ve hızda hareket eden partiküllerin malzeme yüzeyine çarparak, kütlesel olarak kayıp sonucunda oluşan aşınma türüdür. Bu aşınma tipi, uzay, havacılık ve savunma sanayisinde, jet motorları, kompresör diskleri, jet motor türbin kanatçıkları, rüzgar enerji sistemleri gibi alanlarda görülmektedir. Katı partikül erozyonu ile birlikte malzemelerde yaşanan ömür kısalması ve bununla beraber oluşan hasar sebebiyle hayati sonuçlar meydana gelmektedir.

Bu tez çalışmasında havacılık uygulamalarına yönelik geliştirilen Ti4Al4Mo alaşımı incelenmiştir. Ti4Al4Mo alaşımının karşılaştırma için referans malzemesi olarak da Ti6Al4V alaşımı seçilmiştir. Tez çalışmasında iki aşamada incelemeler gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada; üretim yöntemi olarak toz metalurjisi seçilmiştir.

Çalışma kapsamında elementel titanyum, alüminyum, molibden ve vanadyum tozları kullanılmış ve homojen bir karışım sağlanması için bilyalı değirmende karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlar basınç destekli sinterleme yöntemi ile vakum altında yoğunlaştırılmıştır. Düşük ergime sıcaklığına sahip alüminyumun sinterleme sürecinde basınç etkisi ile kalıptan çıkmasını önlemek amacıyla sinterleme sıcaklığına ulaşana kadar farklı sıcaklık-zaman çevrimi uygulanmış ve istenen bileşim başarılı bir şekilde elde edilmiştir.

Bu doğrultuda elde edilen alaşımın mikroyapısal karakterizasyonu gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar çalışmada tartışılmıştır. İkinci aşamada ise, Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V alaşımlarının katı partikül erozyon davranışları ele alınmıştır.

Aşındırıcı partiküllerin, malzeme yüzeyinde belirli bir sürede, farklı hızlarda ve çarpma açılarında oluşturduğu erozif aşınma davranışlarının yüzey karterizasyon analizi ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

1. TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARI

1.1. Titanyumun Kısa Tarihçesi ve Kullanım Alanları

Titanyum, İngiliz bir araştırmacı ve mineroloji bilimcisi olan William Gregor tarafından 1791 yılında keşfedilmiştir. Araştırmacının, o dönemde "kara tuz" olarak tarif ettiği madde, günümüz literatürüne, titanyum elementinin elde edildiği mineral olan ilmenit olarak geçmiştir [1]. O dönemde William Gregor, ilmenit mineralini manyetik etki ile demirden ayrıştırıp HCl ile dağlayarak yeni bir elementin oksidini meydana getirmiş ve buna "mekanit" adını vermiştir. 1795 yılında ise Alman kimyacı Martin Heinrich Klaproth, bu elementi rutil (titanyum oksiti) olarak adlandırılan bir mineralden tamamen bağımsız hale getirip, ismini yunan mitolojisinden esinlenerek titanyum olarak adlandırmıştır [2].

Endüstriyel olarak kullanımlarına 1952'li yıllarda başlanan titanyum, mühendislik teknolojisinde kullanılan metaller arasında doğadaki yaygınlığı açısından alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra dördüncü sırada yer almaktadır [3]. Titanyum ve alaşımları yüksek mukavemet, üstün korozyon direnci ve düşük yoğunluk özelliklerini bir arada bulunduran üstün mühendislik malzemeleridir. Bu üç özelliğin bir arada olmasından dolayı birçok endüstri uygulamasında titanyum ve alaşımları kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet ve hafifliği, ayrıca yüksek sıcaklık direnci sebebiyle havacılık ve uzay sanayinde, üstün korozyon direnci sayesinde kimya endüstrisinde ve ayrıca sahip olduğu biyouyumluluk özelliklerinden dolayı da biyomedikal alanda sıklıkla tercih edilmektedir [4]. Bunların yanı sıra titanyum ve alaşımları, yüksek korozif özelliklerinden deniz suyundan tatlı su üretimi tesislerinde ve deniz suyuna temas eden gemi parçalarının yapımında da oldukça yaygın şekilde kullanılmaktadır [5-7].

Bütün bu olumlu özelliklere nazaran titanyum, aşınma özelliklerinin kötü olması sebebiyle aşınmanın önemli olduğu mühendislik uygulamalarında kullanımı sınırlıdır. Sahip olduğu bu düşük aşınma direnci, aşınmanın gözlendiği ortamlarda, titanyumun yüzeyinde bulunan ve korozyon direncinin sebebi olan oksit filmini tahrip ederek

korozif özelliklerde de bir nebze düşüşe sebep olmaktadır. Buna karşın, titanyumun sahip olduğu bu zayıf aşınma direnci özellikleri, çeşitli alaşımlama ve yüzey işlemleri ile geliştirilebilmektedir [3].Titanyum, kimyasal açıdan kuvvetli bir indirgeyicidir. Bu

özellik bazen iyi bazen de kötü sonuçlar vermektedir. Kimyasal ortamlara direnci, özellikle düşük sıcaklıklarda oldukça yüksektir. Deniz suyuna ve oksitleyici asitlere karşı çok dayanıklıyken, asitlere karşı direnci daha düşüktür. Uygulamada sülfürik asit, asetik asit ve tartarın asit ortamlarında kullanılabilmektedir. Öte yandan hidroklorik asit, fosforik asit, klor gazı ve triklora asetik asit bulunan ortamlarda kullanılmamalıdır. Artan sıcaklıkla birlikte titanyum yüzeyindeki koruyucu oksit tabakası parçalanmaya başlar ve kullanılabilirliğini etkileyebilecek kadar hidrojen, azot ve oksijen malzeme içerisine difüze olur. Metale difüze olan bu yabancı maddeler çatlak oluşumuna ve gevrekleşmeye sebebiyet verir [8].

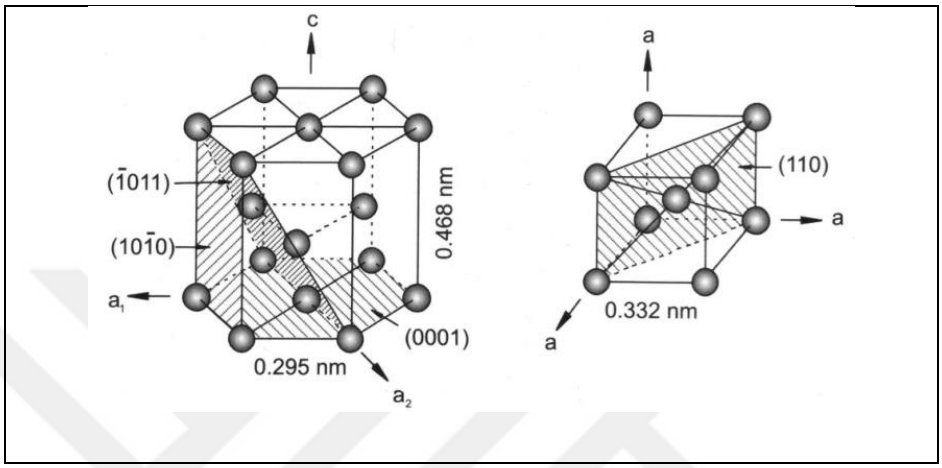
1.2. Titanyumun Metalurjisi

Titanyum 4,54 g/cm^3 yoğunluğuna sahip olan hafif bir metaldir. Bu yoğunluk, sanayide en çok kullanılan metallerden alüminyum (2,71 g/cm^3) ile demirin (7,87 g/cm^3) arasında bulunmaktadır. Alüminyumdan % 60 daha ağır olmasına karşın sahip olduğu mukavamet değerleri yaklaşık 2 kat fazla, çelikten ise % 45 daha hafif olmasının yanında yaklaşık aynı mukavemet değerlerine sahiptir. Aynı zamanda Titanyum, demire göre daha yüksek ancak alüminyumdan daha düşük ergime noktasına ve demir ile alüminyum arasında bir elastisite modülüne sahiptir [9]. Tablo 1.1'de titanyum, demir ve alüminyumun fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Titanyum, demir ve alüminyumun bazı fiziksel özellikleri[3]

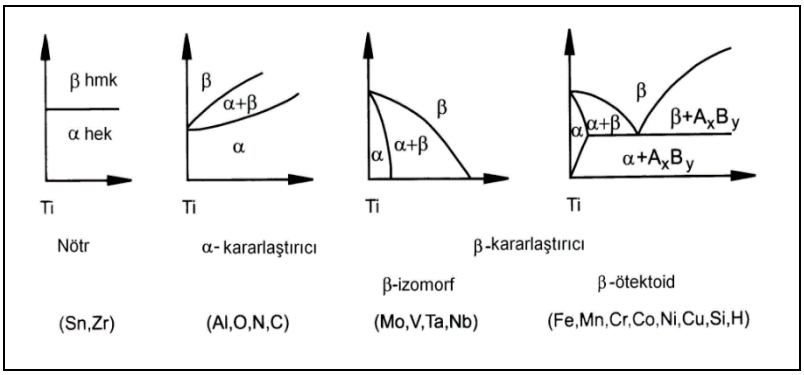
Özellikler	Titanyum	Demir	Alüminyum
Ergime Noktası (°C)	1668	1536	660
Elastisite Modülü (GPa)	115	194	62
Yoğunluk (g/cm^3)	4,54	7,87	2,7
Oda sıcaklığındaki kristal yapısı	SPH	HMK	YMK

Titanyum allotropik dönüşüm sergileyen bir malzemedir. Oda sıcaklığında sıkı paket hekzagonal (SPH) kristal yapısındaki α fazı kararlı olmakta, 885 °C üzerinde ise hacim merkezli kübik (HMK) yapıdaki β fazı kararlı olmaktadır. Titanyumun iki farklı kristal yapısı Şekil 1.1'de gösterilmiştir. 885 °C'de gerçekleşen bu dönüşüm "β dönüşüm sıcaklığı" olarak isimlendirilmektedir [2].



Şekil 1.1. SPH α fazı ile HMK β'nın kristal yapıları [2]

Titanyum içerisine ilave edilen bazı alaşım elementleriyle bu dönüşüm sıcaklığını değiştirmek mümkündür. Titanyum içerisine ilave edilen bu alaşım elementleri α kararlaştırıcı, β kararlaştırıcı ve nötral elementler olmak üzere kabaca 3 gruba ayrılabilir. Alüminyum, azot, oksijen gibi elementler dönüşüm sıcaklığını yükselterek yapıda α fazını kararlaştırıcı rol oynarken; molibden, vanadyum ve tantalyum gibi elementler dönüşüm sıcaklığını düşürerek yapıda β fazının kararlı olmasına katkıda bulunurlar. Kalay ve zirkonyum gibi nötral elementler ise dönüşüm sıcaklığı üzerinde bir etkiye sahip olmayıp, sadece mukavemet açısından etki göstermektedir [2]. Şekil 1.2'de titanyumun dönüşüm sıcaklığına etki eden elementler detaylı şekilde gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Alaşım elementlerinin titanyumun dönüşüm sıcaklığına etkisi[2].

Dönüşüm sıcaklığını yükselten ve α fazını kararlı hale getiren en önemli alaşım elementi alüminyumdur. Karbon, oksijen ve azot α fazını kararlı hale getiren elementlerden olmakla birlikte aynı zamanda ara yer elementi özelliği göstermektedir. β ötektik ve β izomorf elementleri, β fazını, dönüşüm sıcaklığını düşürerek kararlı hale getirirler. β ötektik elementleri, nikel, silisyum, demir, manganez, krom, bakır ve kobalttır. Bu elementler, titanyum ile ötektoid alaşımlar yapan elementler olup diğer grup olan izomorf elementleri β fazı içerisinde tamamen çözülebilen vanadyum, kolombiyum, tantal ve molibden den oluşmaktadır. β ötektik elementleri, α fazında dönüşüm sıcaklığını düşürmekle birlikte düşük çözünürlüğe sahiptirler. β izomorf grup elementleri iki sebepten alaşım içerisine eklenmelidir. Bunlar; yüksek sıcaklıklardaki kullanımlarda oluşan metaller arası bileşiklerin oluşumunu düşürmek ve β fazını kararlı hale getirmektir [17].

1.3. Titanyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyum alaşımlarının standart özellikleri α ve β fazlarının yapıdaki dağılımlarına ve hacim oranlarına göre değişkenlik gösterir. HSP α, HMK beta ile karşılaştırıldığında anizotropik kristal bir yapıya sahiptir ve daha yoğun paketlenmiştir. Bununla beraber HSP α yapısında, fiziksel ve mekanik özelliklerin anizotropik olduğu, plastik deformasyona daha fazla dayanım gösterdiği, difüzyon hızının β'ninkinden ortalama iki katı olduğu, sünekliliğinin daha düşük olduğu ve daha yüksek sürünme dayanımı gösterdiği söylenebilir. Aynı zamanda korozif özellikler açısından da β alaşımlarının korozyona karşı dayanımları, α alaşımlarına göre daha düşüktür. Mukavemet derecelerine göre, α alaşımları orta seviye mukavemete, α+β yüksek, β alaşımları ise çok yüksek mukavemete sahiptir. Fakat çok yüksek mukavemet değerlerine ulaşılırken

süneklik özelliklerinde gözle görülür bir azalma meydana gelmektedir. Bu durumu optimum bir değere çekmek için yaşlandırma sertleştirmesi gibi bazı ısıl işlem uygulamaları gerçekleştirilir. Aksi takdirde süneklilik değerleri α ve α+β alaşımlarına yakın değerlerde olmaktadır [4, 9].

Daha önce bahsedildiği gibi kabaca üç grupta toplanan titanyum alaşımları yapısında bulunan fazlara göre α, α+β ve β alaşımları olmak üzere sınıflandırılmaktadırlar. Bu sınıflandırma doğrultusunda α alaşımlarının yapısının çoğunda α fazı bulunurken, oda sıcaklığında α+β alaşımlarının yapısında yaklaşık %10-13 oranında β fazı bulundurur, β alaşımlarında ise yapının çok büyük bir kısmı β fazından oluşmaktadır. Bütün bu alaşımların yanı sıra, β fazından daha çok oranda α fazı bulunduran alaşımlar ise alfaya yakın alaşımlar olarak adlandırılır [11]. Özetle titanyum ve alaşımları;

- CP Titanyum,
- α alaşımları
- Alfaya yakın alaşımlar
- α+β alaşımları
- β alaşımları

Olarak sınıflandırılmaktadırlar [18].

1.3.1. CP titanyum

CP öneki Commercially Pure kelimelerinin kısaltmasından türetilmiş olup, ticari saflıktaki titanyum anlamına gelmektedir. Yaklaşık % 98,635-% 99,5 oranında saflığa sahip ticari saflıkta titanyum (CP Ti), 885 °C'de hacim merkezli kübik (HMK) yapıya dönüşen ve oda sıcaklığında yapısında α fazını bulunduran sıkı paket hegzagonal (SPH) yapıdadır. Hacim merkezli kübik yapıya dönüşüm esnasında kısa bir sıcaklık aralığında, her iki fazında bir arada olduğu bir sıcaklık dilimi vardır.

Genel olarak korozyon direncinin önemsendiği alanlarda tercih edilen CP Ti, yüksek mukavemet ihtiyacı olmayan uygulamalarda kullanılmaktadır. Alaşım elementlerinden, bilhassa demirin oranı yükseldikçe, mikro yapıdaki tane sınırlarında artan β fazı görülmektedir. Ek olarak oda sıcaklığındaki saf titanyumun mikro yapısında tamamen α fazı mevcuttur [10, 13]. Çoğu zaman yüksek korozyon direnci özelliği ve yüksek dayanım gerektirmeyen uygulamalarda kullanılan alaşımsız

ürünler, yapısında % 98-99,5 oranında Ti bulundururlar. Bu tip malzemeler kaynak edilebilirlik ve yüksek şekillendirilebilme özelliklerinden dolayı da tercih edilebilmektedirler. Ticari saflıktaki titanyumun, empürite ve ara yer atomları ile orantılı olarak akma dayanımları değeri 170-480 MPa arasındadır. Ticari saflıktaki titanyum, içerdiği saflık derecesine bağlı olarak sınıflara ayrılmıştır. "Grade" olarak tarif edilen saf Ti gruplarının sahip olduğu bileşim ve mekanik özellikleri Tablo 1.2'de gösterilmektedir.

Tablo 1.2. Ticari saflıktaki titanyum malzemelerin genel özellikleri [2, 3].

ASTM STANDARDI	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Dönüşüm sıcaklıkları (°C)		Katkı Elementleri (Ağırlıkça max %)				
			Alfa (α)	Beta (β)	N	C	H	Fe	O
Grade 1	170	240	888	880	0,03	0,10	0,015	0,20	0,18
Grade 2	280	340	913	890	0,03	0,10	0,015	0,30	0,25
Grade 3	380	450	920	900	0,05	0,10	0,015	0,30	0,35
Grade 4	480	550	950	905	0,05	0,10	0,015	0,50	0,40

Tablo 1.2'de, akma dayanımının 170 MPa'dan 480 MPa'a kadar farklı değerlere sahip olan birden fazla saf titanyumun olduğu gözükmektedir. Bileşimler de dikkate alındığında malzeme içeriğinde, oksijen ve demirin alaşım elementi olarak yer aldığı görülmektedir. Bu anlamda demir ve oksijenin oranının arttığı doğrultuda, mukavemetin de artış gösterdiği görülmektedir [2].

1.3.2. α Titanyum alaşımları

Oda sıcaklığında yapısında çoğunlukla α fazı içeren alaşımlar, α alaşımları olarak bilinmektedir ve β alaşımlarına göre yüksek sıcaklıklardaki sürünme davranışları çok daha iyidir. Ara yer element oranı çok az olan α alaşımları, sıcaklıkların çok az olduğu aralıklarda bile tokluk ve süneklilik davranışlarını muhafaza edebilmektedir. Çok yüksek ya da çok düşük sıcaklık aralıklarında, yapısında zirkonyum, kalay ve alüminyum bulunduran α alaşımları kullanılmaktadır [4].

Kararlı α fazına sahip olan α alaşımları, α+β ve β alaşımlarına kıyasla ısıl işlemle sertleştirme işlemi yapılamamaktadır. Ancak bu alaşımlara, kalıntı gerilmeleri gidermek için yalnızca tavlama ya da yeniden kristalleştirme işlemleri

uygulanabilmektedir. α alaşımlarının dövme sıcaklık aralıkları, α+β alaşımlarına veya β alaşımlarına kıyasla daha küçük olmasından dolayı dövülebilme özellikleri çok düşüktür. Dövme işlemi esnasında, malzeme yüzey ve/veya göbek bölgesinde oluşan çatlaklar bunu ispat edecek niteliktedir. Malzemeye kısa periyotlarla tavlama uygulaması yapılarak ya da dövme işleminde deformasyon miktarının daha küçük seçilmesi sayesinde bu hatalardan kaçınılması mümkün olmaktadır [10, 13].

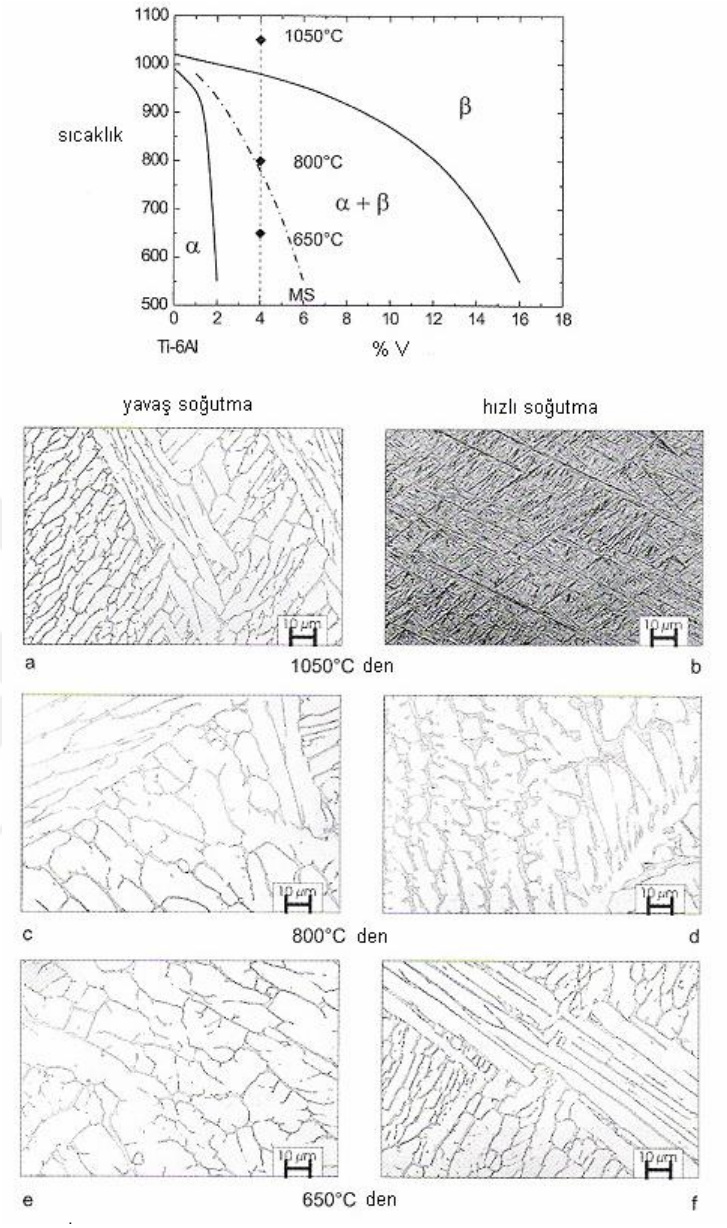
1.3.3. α Yakın titanyum alaşımları

Bu alaşımlar, içyapısında α fazının yanında sınırlı oranda β fazını kararlı hale getiren elementler barındıran alaşımlardır. Bu alaşımlar "süper α" veya "α' yakın alaşımlar" olarak da bilinmektedir. Bünyesinde, Oksijen ve Alüminyum gibi α fazı kararlaştırıcı elementleri fazla oranda, vanadyum ve molibden gibi β fazı kararlaştırıcı elementlerini düşük oranda içermektedirler [10, 13].

Yüksek sürünme dayanımı gösteren α alaşımları ve yüksek mukavemet davranışı sergileyen α+β alaşımları arasında bir özellikte olan α'ya yakın alaşımları, yüksek sıcaklık gerektiren yerlerde sıklıkla kullanılmaktadırlar. Son dönem yapılan çalışmalardan elde edilen bilgilere göre yaklaşık 500-550 °C'lere kadar çıkan sıcaklıklarda mukavemet kaybı yaşanmadan çalışmasını devam ettirebilmektedir. Ti8Al1Mo1V alaşımı ilk yüksek sıcaklıkta çalışan titanyum alaşımlarındandır. Fakat yapısında yüksek oranda alüminyum bulunduran bu alaşımda zayıf gerilmeli korozyon dayanımı söz konusudur. Bu negatif özelliğinden dolayı daha sonradan geliştirilen tüm titanyum alaşımları, yapısında maksimum %6'ya kadar alüminyum bulundurmaktadırlar. 1970'li yıllarda üzerinde çalışılan, içeriğinde maksimum %0,1'e kadar silisyum bulunan Ti6Al2Sn4Zr2Mo alaşımı için, sürünme dayanımı davranışının çok fazla artırılması gözlemlenmiştir. Günümüzde Ti5,8Al4Sn3,5Zr0,7Nb0,5Mo0,35Si0,06C alaşımı, en gelişmiş yüksek sıcaklık titanyum alaşımı olarak kabul edilmektedir. Amerikan TIMETAL 834 olarak da adlandırılan bu alaşım oksidasyona karşı koruma sağlamakta olup, kullanım sıcaklığı son sınırı olan 600 °C'de uzun süre kararlı kalabilmektedir [14].

1.3.4. α+β Titanyum alaşımları

Bu alaşımların bünyelerinde %4-6 oranında β fazını kararlı hale getiren alaşım elementleri mevcuttur. α+β titanyum alaşımlarından en önemli olarak karşımıza Ti6Al4V ve Ti6Al6V2Sn alaşımları çıkmaktadır [11]. Yapılarında bulunan α ve β fazlarındaki kararlılık özelliğini arttırıcı bir ya da birden fazla alaşım elementleri bulundururlar. Bu elementlerin optimum olarak dengelenmesiyle oda sıcaklığında α ve β fazlarının karışımı olarak bir mikroyapı oluşturulabilmektedir. Bu yapıya uygulanacak tavlama işlemiyle birlikte homojenlik, yüksek dayanım ve yüksek süneklilik gibi özellikler elde edilmektedir [13]. Şekil 1.3'te β bölgesinden yapılan soğutma sonucu oluşan α+β yapısının Ti6AlV alaşımının farklı derecelerdeki soğuma hızına bağlı olarak dönüşümü gösterilmiştir [11].



Şekil 1.3 Ti6AlV'un a) 1050 °C'den, c) 800 °C'den, e) 650 °C'den yavaş soğuma sonrasında, b) 1050 °C'den, d) 800 °C'den, f) 650 °C'den hızlı soğuma sonrasında elde edilen mikro yapı görüntüleri[17].

1.3.5. β Titanyum alaşımları

β titanyum alaşımları, bünyelerinde β fazını kararlı hale getiren alaşım elementlerini bulundurmaktadır. Bu alaşımlar diğer titanyum alaşımlarına göre soğuk şekillendirilebilme, yüksek yoğunluk, dövülebilirlik ve de sertleşebilirlik bakımından farklılık göstermektedir. β alaşımları α+β alaşımları ile oda sıcaklığında eşit mukavemet değerine sahip olsa da yüksek sıcaklıklarda bu değer α+β ye göre daha azdır [11].

β titanyum alaşımları kararsız yapıda alaşımlar olup sertleştirilmesi, α fazının β matrisinin içerisinde çökeltme işlemiyle gerçekleştirilir. Eğer yapılarında molibden bulundururlarsa bu sayede korozyona karşı dayanımları arttırmaktadır. Ayrıca yüksek kırılma tokluğa da sahip alaşımlardır. Bu alaşımlar daha iyi ısıl işlem kabiliyeti ve daha iyi işlenebilme özelliğine sahiptir [14].

Yüksek tokluk dayanımı, yüksek mukavemet, bazı alaşımlarında soğuk şekillendirilme ve bazı alaşımlarında da yüksek korozyon dayanımı, ısıl işlem kolaylığı avantajları arasında olsa da düşük ve yüksek sıcaklıktaki özelliklerin zayıflığı, yüksek yoğunluk, segregasyon sorunları, bazı alaşımlarında ise düşük korozyon dayanımı özelliklerinde dezavantajları bulunmaktadır [11].

β alaşımının, kırılma tokluğunun kayda değer seviyelerde olmasından dolayı son yıllarda uzay ve havacılık sanayisinde kullanımını önemli hale gelmiştir. Metastabil β alaşımları, α+β alaşımlarından oda sıcaklığında daha iyi şekillendirilebilme özelliği, akma dayanımının önemsiz olduğu yerlerde daha yüksek dayanım özelliği, kalın kesitli malzemelerde daha kolay ısıl işlem özelliği gibi avantajlarıda mevcuttur [3].

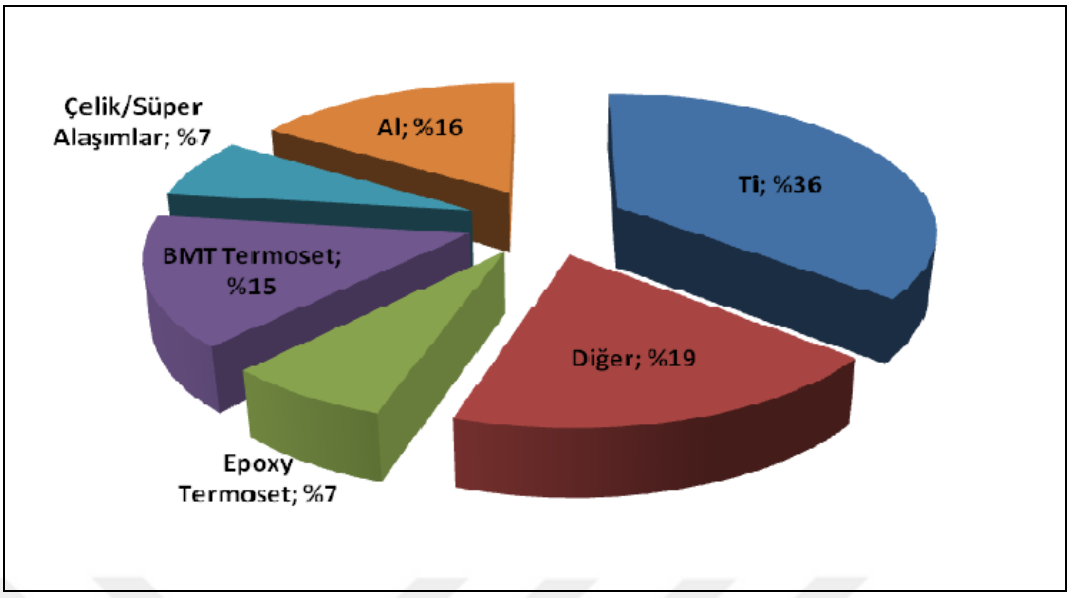
1.4. Titanyum ve Alaşımlarının Havacılık Endüstrisindeki Önemi

Titanyum önceleri uçak ve uzay endüstrisinde kullanılırken, kendine has üstün özelliklerinden dolayı zamanla birçok sektörde tercih edilmeye başlanmıştır. Hafif olması ve yüksek dayanımı sebebiyle en çok havacılık endüstrisinde tercih edilmiştir. Titanyum metalinin havacılık alanında tercih edilmesinin önemli nedenlerinden bazıları şu şekilde sıralanabilir;

- ✓ Hafiflik,
- ✓ Yüksek sıcaklık direnci,
- ✓ Korozyon direnci,
- ✓ Polimer matrisli kompozit malzemeler ile galvanite uyumluluğu [4, 15]

Uçakların yüksek korozyon direnci ve de nispeten mukavemet gerektiren yerlerde sıklıkla ticari saflıkta titanyum kullanılmaktadır. Üretim maliyetlerinin yüksek olmasına karşın, uçakların iniş takımlarında dövme titanyum alaşımları tercih edilmesi günden güne yaygınlaşmaktadır. Kullanım ömürleri sona ermeden, yüksek mukavemetli çeliklerden üretilen uçak iniş takımları, sıklıkla gerilmeli korozyon şüphesiyle değiştirilmesinden dolayı, yüksek mukavemetli çelikler yerine, istenilen mukavemet değerlerine sahip dövme titanyum alaşımları tercih edilmiştir. Büyük ticari yolcu uçağında da kullanımında, uçak toplam ağırlığında 270-300 kg civarında tasarruf sağlanmıştır. Ticari uçaklar ile askeri uçaklar arasında, kullanım olarak kıyaslama yapıldığında, askeri uçaklarda bu kullanım oranının daha fazla olduğu görülmüştür. Askeri uçaklarda, yapısal parçalarda daha fazla termal ve mekanik yüklerin olması, bu yüklere, hızın ve manevraların da eklenmesiyle artması sebebiyle bu tip uçaklarda kullanım nedenini açıklamaktadır. Askeri uçaklardaki gövde üretiminde kullanılan titanyum oranının % 50'lerde olmasının yanı sıra, tekrarlı ve yüksek yükler taşıyan aynı zamanda en kritik ve büyük parça olan, kanat kutusunda da büyük oranda kullanılmaktadır [4, 15].

Büyük ticari uçaklarda ise, gövde de ortalama % 5-9 arasında titanyum kullanımı söz konusudur. Bu oran, çalışma sıcaklığının önemli olduğu yerlerde % 38-39'a kadar çıkmaktadır. Hacimsel olarak, uçak motorlarında titanyum alaşımları en çok kullanılan malzemelerdir. Havacılık endüstrinde, mekanik özelliklerin yanı sıra üretilen parçaların kullanım ömürleri de çok önemlidir. Fiyat/kullanım ömrü değerlendirildiğinde, titanyum parçalarının sahip olduğu uzun kullanım ömrü sebebiyle de tercih edilmektedir [4, 15]. Şekil 1.4'te F22 savaş uçağında kullanılan malzeme oranları gösterilmiştir.



Şekil 1.4. F22 savaş uçağında kullanılan malzemeler ve oranları [3].

Titanyumun havacılık endüstrisinde temel kullanım alanlarından bir tanesi de gaz türbin ve komponentleridir [4, 15, 16]. Modern gaz türbin motorlarında ağırlıkça % 33 oranında titanyum alaşımları kullanılmaktadır. Havacılık endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan titanyum ve alaşımları ve özellikleri aşağıdaki gibidir;

- CP Titanyum (% 99): Orta seviyede mukavemete sahiptir. Uçakların yanma duvar malzemesinde, kompresörlerin kaplamalarında, egsoz nozul kaplamasında ve gövdenin bölme duvarlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tavlama sıcaklığı 590-732 °C dir, gerekirse 537 °C'de 15-20 dakika kadar ardından soğumaya bırakılarak, gerilme giderme tavlaması uygulanabilmektedir. Gaz altı koruyuculu ark kaynağı, nokta kaynağı ve direnç kaynağı uygulanabilir.
- Ti6Al4V α+β Alaşımı: Yüksek mukavemete sahiptir (315 °C'ye kadar). Uçaklarda dövme uçak bağlantıları, gaz türbin kompresör kapakçıkları ve diskleri, preslenmiş uçak gövde yüzeyleri ve metal levha şeklindeki gövde parçalarında kullanılmaktadırlar.
- Ti5Al2,5Sn α Alaşımı: Uçak nozul bağlantı noktalarında ve dövme levha ekipmanlarında kullanılır (çalışma sıcaklığı: 480°C'ye kadar). Roket yakıt tankları, gaz türbin kompresör yatakları, kaynaklanmış statör bağlantıları, delikli kompresör kanatçıklarında yaygın olarak kullanılmaktadır. 830 °C'de 30 dakika veya 880 °C'de 10 dakika kadar tavlama yapılabilmektedir. 1-2 saat, 537 °C veya 560 °C'de tavlama

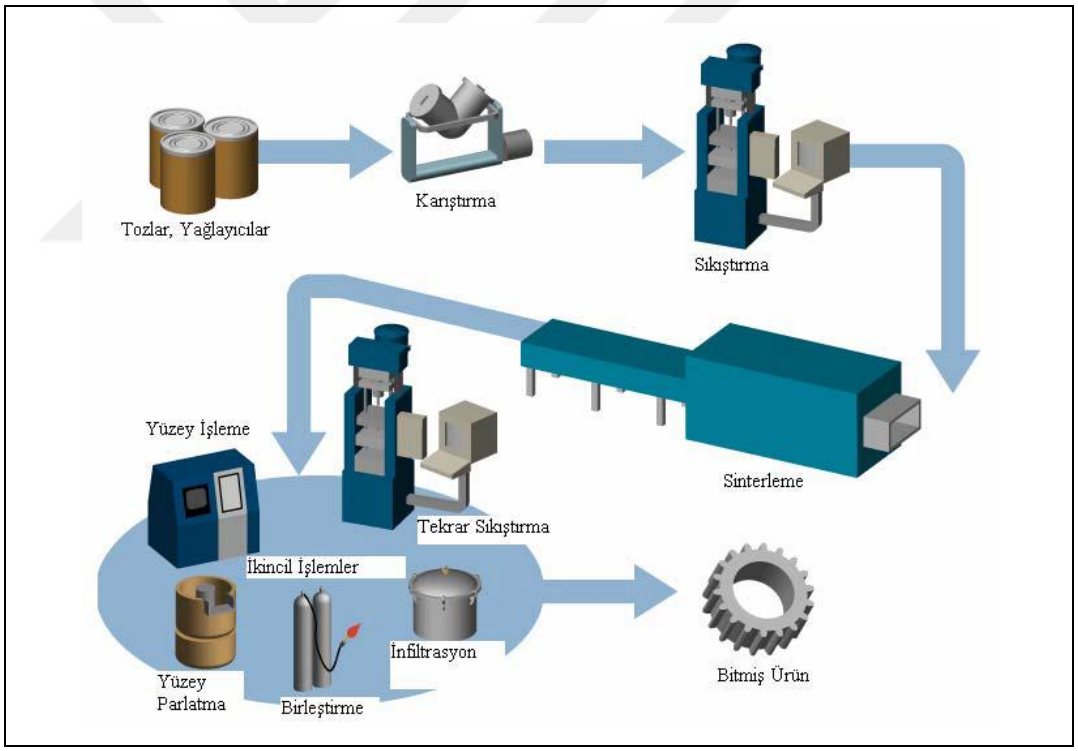
işleminden sonra gerilme giderme işlemi uygulanmalıdır. Gaz altı koruyuculu ark kaynağı, nokta kaynağı ve direnç kaynağı uygulanabilir.

- Ti-8Mn Alaşımı: kaplama ve birincil yapı komponentlerinde kullanılır (çalışma sıcaklığı: 93-315 °C). 680-700 °C tam tavlama sıcaklığıdır ve süre olarak 1 saat olup, sonrasında ise havada soğutulur. Kaynak işlemi olarak ergitme kaynağı yapılamaz fakat ark nokta kaynağı uygulanabilir.
- Ti7Al4Mo Alaşımı: Gaz türbini kompresör kanatçıkları ve disklerde kullanılmaktadır.
- Ti4Al4Mn Alaşımı: Uçak gövde komponentlerinde kullanılmaktadır. Tavlama için 720 °C' ye kadar çıkılır ve dakikada 2 °C azalacak şekilde fırında soğutma uygulanır [8].

2. TOZ METALURJİSİ

2.1. Toz Metalurjik Üretim Yöntemi

Genel anlamda toz metalürjisi prosesi, önceden hazırlanmış tozların homojen bir şekilde karıştırılarak, elde edilen toz karışımının kalıp içinde sıkıştırılması ve toz partiküllerinin difüzyon mekanizması ile belirlenen sıcaklık ve sürede bağ oluşturarak kompakt hale getirilmesi olarak tarif edilebilir [17, 18]. Şekil 2.1'de toz metalurjik üretim prosesine ait akış şeması gösterilmektedir. Başlangıç malzemesi olarak kullanılan tozlar proses öncesi öncesi karıştırma veya alaşımlama işlemine tabi tutulabilir; işlem sonrası ise elde edilen numune nihai özelliklere sahiptir.



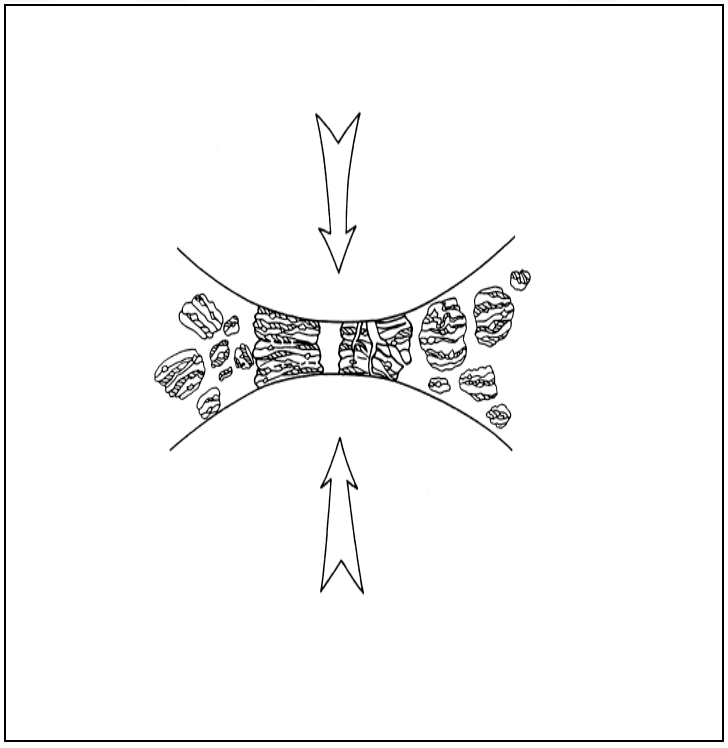
Şekil 2.1. Toz metalürjik Prosesi Akış Şeması [18]

2.1.1 Mekanik alaşımlama mekanizması

Mekanik alaşımlama, iki veya daha fazla farklı bileşimdeki tozların birbiri içerisinde kaynaklanma, kırılma ve yeniden kaynaklanmasının tekrarıyla elde edilen, katı halde

alaşım elde etme işlemidir. Bu yöntem 1960'lardan bu yana oksit dağılımıyla mukavemet kazandırılmış ve süper alaşımlarda yüksek sıcaklıkta sürünme dayanımını yileştirmek amacıyla uygulanmaktadır. Aynı zamanda yeni alaşımların geliştirilmesinde oldukça elverişli bir yöntemdir [19, 20]. Mekanik alaşımlama tekniğinde, geleneksel üretim yöntemlerindeki üretimi zor ya da kısıtlı olan, bilhassa ergime dereceleri farkı yüksek olan iki elementin alaşımlamasına imkan sağlamaktadır. Bu yöntem ile yeni bir kompozisyon meydana getirmenin yanı sıra nano boyutundaki parçacıkların üretimi de yapılabilmektedir [21].

Mekanik alaşımlama işlemi esnasında, toz partiküllerinde sürekli olarak düzleşme, soğuk kaynak, kırılma ve yeniden kaynaklanma olmaktadır. Mekanizma olarak mekanik alaşımlama, iki bilye arasında kalan tozların birbiri içerisinde kaynaklanma-kopma çevrimi sonucunda alaşımlanması olara tarif edilebilir. Bazı durumlarda çelik bilyelerin arasında az miktarda partikül birikebilmektedir. Şekil 2.2'te mekanizmanın işleyişi gösterilmiştir. Bilyelerin birbirlerine çarpmasıyla partiküller, plastik şekil değişimine maruz kalırlar. Bunun sürekli olmasıyla kaynaklanma ve kırılma döngüsüyle devam etmektedir [19, 21].



Şekil 2.2. Bilyeler ile tozlar arasındaki çarpışmanın etkileşimi [21].

Mekanik alaşımlamanın ilk evrelerinde partikül boyutunda artış gözlenmektedir. Partikül boyutunun artmasına sebep olan olay, temiz olan partikül yüzeyleri ve bu yüzeylere yapışan tozların kaynaklanarak boyutu arttırmasıdır. Mekanik alaşımlamanın birinci kademesinde, sünek partikülün kullanımı partikül boyutunun artmasına sebep olmaktadır. Partikül boyutu artışı, başlangıçtaki toz boyutundan 3 kat kadar daha fazla olabilmektedir. Deformasyon etkisinin devam etmesiyle, partiküllerin soğuk sertleşmesi atmakta ve yorulma meydana gelmektedir. Yorulmanın sonucunda ise kırılmalar oluşmaktadır. Böylece partikül boyutu küçülmüş olur [19, 21].

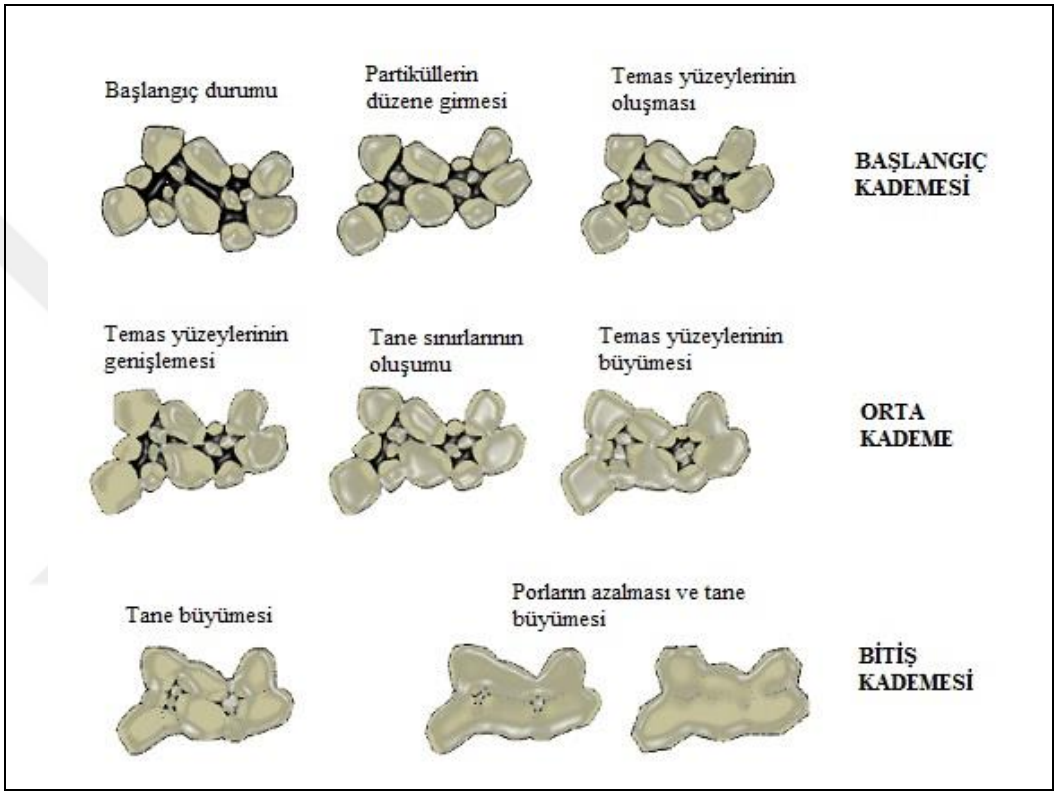
2.1.2. Sinterleme prosesi

Sinterleme işlemi, toz metalürjisinin en önemli kademelerinden birisi olup, toz parçacıkları birbirine bağlanmasını sağlayan, böylelikle dayanımını arttıran, yüzey alanlarını azaltan bir ısıl işlem sürecidir. Sinterleme prosesi, sinterlenecek malzemeye ve zamanına göre farklı yöntemlerle yapılabilmektedir. Bu işlem, yüksek sıcaklıklarda atom difüzyonu mekanizması ile gerçekleştirilen bir işlemdir. Birim hacimdeki partikül miktarı arttıkça, bu birimdeki yüzey enerjisi de artmaktadır. Bu sebeple, daha çok yüzey alanına sahip parçalar daha kolay sinterlenebilmektedir. Sinterleme prosesi, yüksek serbest enerjisine sahip toz kompaktından oluşturulmuş malzemenin daha az miktarda gözenek içeren rijit bir malzemeye çevirme işlemidir[22].

Sinterleme sıcaklığının belirlenmesi, tek bileşenli sistemlerde çoğu zaman ergime sıcaklığının %80'i ya da yaklaşık %70'i alınmaktadır. Çoklu bileşenli sistemlerde ise (Ti6Al4V yada Ti4Al4Mo v.b.) bu sıcaklık, alaşımların sinterleme sıcaklığının, ergime sıcaklığına oranının %75'in üzerinde olması önerilir. Preslenmiş toz partiküllerin arasındaki bağlantılar, mekanik olarak kilitlenme yapışma gibi zayıf türden bağlardır. Sıkıştırılan toz partikülleri normalde birbiriyle temas halinde olsa bile aslında her bir partikül birbirinden ayrı şekilde durmaktadır. Sinterleme prosesiyle herbir partikülün temas eden boyun bölgelerinin genişlemesiyle, yüzey alanının azaltılması, gözenek hacminin azalması ya da küresel form oluşturulması sağlanmaktadır. Atomların ve iyonların arasındaki fiziksel bağ, böylelikle oluşturulmuş olur [17, 23].

Metalurjik olarak sinterleme prosesi, altı kademede gerçekleşmektedir. Başlangıç toz partikül bağlarının meydana gelmesi, partiküller arası köprü bağlarının (boyun)

oluşması, gözeneklerin küresel form haline gelmesi, gözenek kanallarının ortandan kalkması, gözeneklerin azalmasıyla hacim daralması ve yoğunluğun artması olarak sıralanabilmektedir. Malzeme transferi için hacim difüzyonu, buharlaşma ve yoğunlaşma son olarak da tane sınırı difüzyonu gerekmektedir. Bu şekilde sinterleme prosesinin meydana gelmesi için gerekli olan kademeler artmaktadır [24]. Şekil 2.3'te sinterleme prosesine ait kavramsal kademeler gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Sinterleme kademelerinin kavramsal aşamalarının gösterimi [21].

Sinterleme işlemi çok aşamalı bir proses olması sebebiyle her aşamada malzemede oluşan fiziksel değişimlerin bilinmesi gerekmektedir. Bir tablo ile gösterecek olursak, Tablo 2.1'de sinterleme aşamaları ve meydana gelene fiziksel değişmelerin bir özet şekli gösterilmiştir

Tablo 2.1 Sinterleme aşamaları ve oluşan fiziksel değişmeler[24].

Sinterleme Aşamaları	Fiziksel olarak Değişim
Başlangıç Kademesi	Başlangıçtaki durum
	Partiküllerin yeniden düzene girmesi
	Partiküller arası temas yüzeylerinin oluşması (boyun oluşumu)
Orta Kademe	Temas yüzeylerinin gelişmesi (boyun bölgesi gelişimi)
	Tane sınırlarını oluşumu
	Temas yüzeylerinin büyümesi
Bitiş Kademesi	Tanelerin büyümesi
	Tane sınırları porlarının azalması ve tane büyümesi

Sinterleme işlemi iki grupta incelenebilmektedir. Bunlar;

- Katı faz sinterlemesi
- Sıvı faz sinterlemesi şeklindedir [25].

Katı faz sinterlemesi, kalıp içerisindeki tozların sinterleme sıcaklığında katı fazdayken yoğunlaştırılmasıdır. Bu işlemdeki itici güç olarak yüzey enerjisinin azaltılması olarak tarif edilebilir [24]. Sıvı faz sinterlemesi prosesinde ise, sinterleme sırasında toz karışımı içerisinde sıvı faz oluşmakta ve sinterleme kısmi sıvı faz içerisinde yapılmaktadır [26, 27]. Sinteleme esnasında bu oluşan faz, sinterleme hızını önemli oranda arttırmaktadır [24]. Temelde katı hal sinterlemesi üç'e ayrılarak incelenebilir.

i. Birinci (ilk) aşama
ii. İkinci (ileri) aşama
iii. Üçüncü (son) aşama

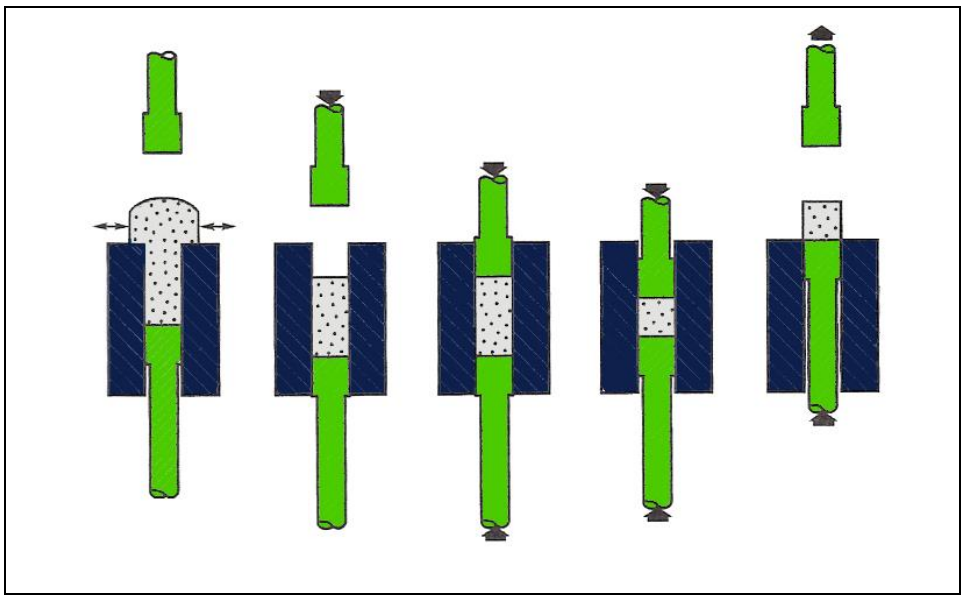
Başlangıç aşaması, partiküller arasında sadece mekanik temasın olduğu kademedir. Henüz malzeme transferi gerçekleşmemiş, dolayısıyla boyun oluşumu da gözlenmemiştir. İlk başlangıç durumunda gözenekler düzensiz ve köşe formundadır[24].

Sinterlemenin ara aşamasında partiküllerin birbirine temas ettiği noktalarda boyun oluşumu gözlenir. Sinterlemenin ilerleyen aşamalarında gözeneklerin yuvarlak form alması, tane büyümesi ve buna bağlı olarak da yoğunluk artması söz konusudur. Teorideki yoğunluğun %92 sine kadar ulaşılmaktadır. Ara aşamasının son kısımlarına doğru tane büyümesi oluşur ve tane boyutu ilk partikülden daha büyük olmaktadır [24].

Son aşamada ise, gözenekler çok fazla küçülerek nihai yoğunluk değerlerine ulaşılır. Bu aşamada gözenekler küresel formda ve kapalı haldedir [24].

2.1.3. Sıcak pres

Toz metalürjisinde özel bir üretim yöntemi olarak kabul edilen sıcak pres (hot pressing) yöntemi, sıcaklık ve basıncın aynı anda uygulandığı bir prosestir. Bu yöntemde elde edilen nihai ürün yoğunluk değerleri, geleneksel toz metalürjik yöntemlerle üretilmiş nihai ürüne kıyasla çok daha yüksektir. Şekil 2.4'de sıcak pres aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Tek eksenli preste üretim basamakları [26]

Öncelikle tozlar kalıp içerisine yerleştirilir. Üst itici hareket ettirilerek tozların kalıp içerisinde sıkışması sağlanır. Bu sıkışma esnasında iticiler arasından yüksek voltajlı akım geçirilerek tozların bu akıma direnç göstermesi, dolayısıyla sıcaklığın artması sağlanır. Bu şekilde sıcaklığın basınçla eş zamanlı çalıştığı toz metalurjik üretim yöntemine sıcak pres denir. Bu yöntem geleneksel sinterleme yöntemleri ile karşılaştırıldığında kısa zamanda yüksek yoğunluk oluşturma avantajına sahiptir. Üretim maliyeti açısında da daha ekonomiktir [19, 28].

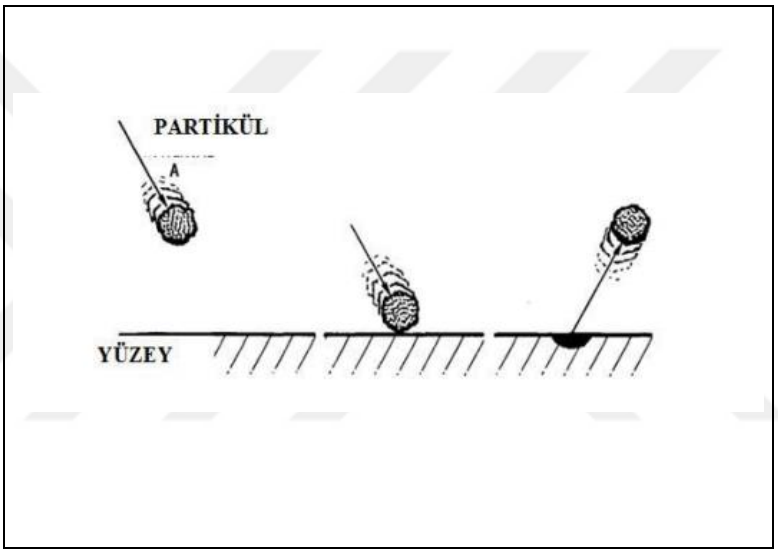
2.2. Titanyum Alaşımları ve Toz Metalurjisi

Daha önce bahsedildiği gibi Ti ve alaşımları birçok üstün özelliklere sahip olması sebebiyle, farklı endüstrilerde birçok uygulama alanı mevcuttur. Ancak ekonomik açıdan bakıldığında Ti üretimi, maliyeti yüksek olan bir işlem olması sebebiyle Ti alaşımlarının kullanımını sınırlıdır. Yüksek maliyeti, mineral halinden çıkarılması ve ayrıştırma işlemlerinin kompleks süreçlerden oluşması ile açıklanabilmektedir [2, 29].

Titanyum ve alaşımlarının üretim yöntemleri genellikle; döküm, dövme, toz metalürjisi ve son zamanlarda geliştirilmekte olan dijital üretim yöntemi olarak sınıflandırılan elektron ışın ergitme, lazer sinter ve lazer teknolojisi kullanılarak net şekillendirme olarak sıralanabilmektedir [30, 31]. Geleneksel döküm yöntemiyle titanyumu ergitmek için çok yüksek sıcaklıklara çıkılması gerekmektedir. Titanyum ve alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda azot ve oksijene olan afinitesi sebebiyle döküm yöntemini zorlaştırması ve vakum ya da koruyucu atmosfer altında üretilebilmesi, maliyeti arttırmaktadır [32]. Toz metalürjisi yöntemi diğer proseslere nazaran malzeme sarfiyatı ve karmaşık şekilli parçaların üretimi açısından nihai ürün üretme noktasında önem kazanmaktadır [11, 23]. Toz metalürjisi yöntemiyle ileri teknoloji malzemelerinin üretimi de gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemde, ham malzemenin tamamına yakının kullanımına imkan sağlayarak, diğer üretim proseslerine kıyasla daha az maliyetle ürünün oluşturulması ve sonrasında ise başka bir işleme gerek olmaması avantajları arasındadır [21,28, 33].

3. EROZİF AŞINMA

Erozif aşınma, sıvı ya da katı parçacıkların bir malzeme yüzeyine çarpası sonucunda meydana getirdiği aşınma olarak tarif edilmektedir [34]. Bir başka deyişle, belli bir hızdaki katı parçacıkların malzeme yüzeyine çarpması sonucu, yüzeyin üst kısmından (tabakasından) parçacıkların koparılmasıyla malzeme kaybı oluşması durumuna erozif aşınma denir [35]. Şekil 3.1'de erozif aşınma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Erozif aşınma mekanizması [35]

Kullanım yerlerine bağlı olarak yüzeyden malzeme koparılması sonucu oluşan malzeme kaybı, hayati önem taşıyan problemlere sebebiyet verebilmektedir. Makine elemanlarının erozif ortamlarda olması durumunda yüzeye sıvı ya da katı parçacıkların çarpması sonucunda elemanların ömürlerinde azalmalar ve makine sistemlerinin çalışma fonksiyonlarında aksaklıklar oluşabilmektedir [36]. Şekil 3.2.'de erozif aşınma mekanizmaları şematik olarak gösterilmiştir.

Erozif aşınma mekanizmalarında aşağıdaki durumlar gözlenebilmektedir;

(a) Mikro kesme ve mikro yarma

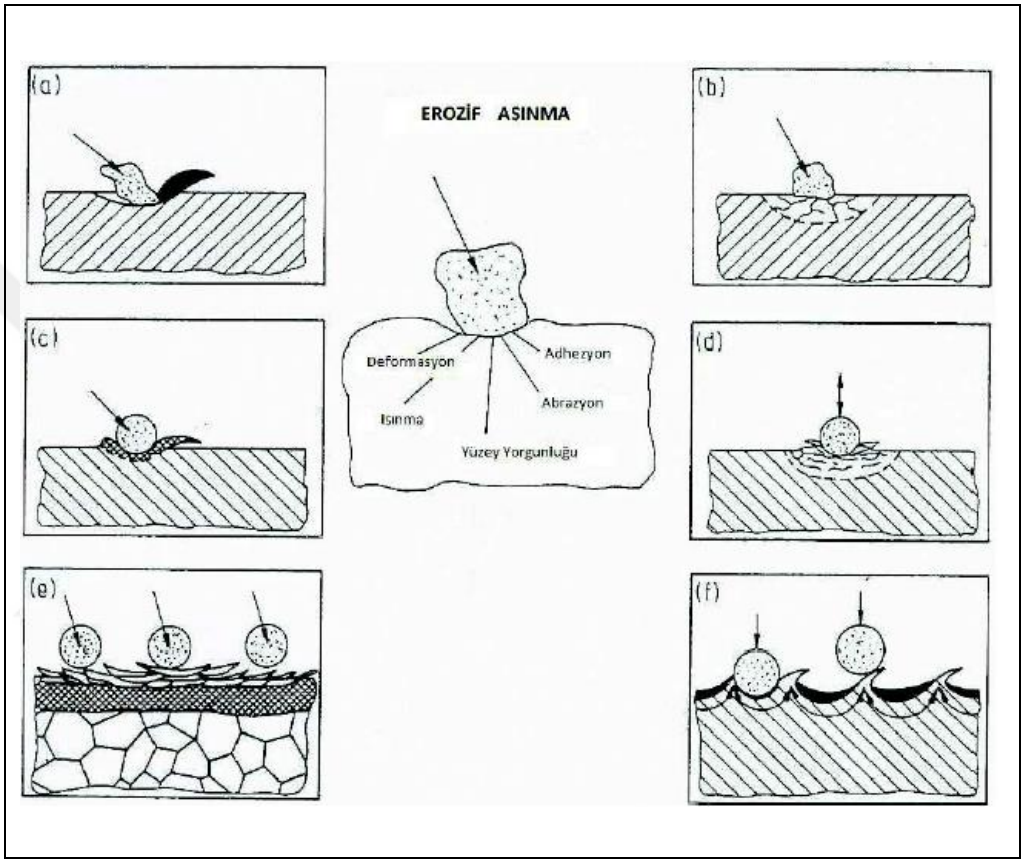
(b) Yüzey çatlaması (mikro çatlak)

(c) Madde taşması

(d) Birbiri ardına çarpmalar sonucunda meydana gelen yüzey ve yüzey altındaki yorulma çatlakları

(e) Birbiri ardına çarpmalar sonucunda meydana gelen malzeme yüzeyinden ayrılmalar ve şekillendirmelerin oluşturdukları ince tabakalı levhacıklar

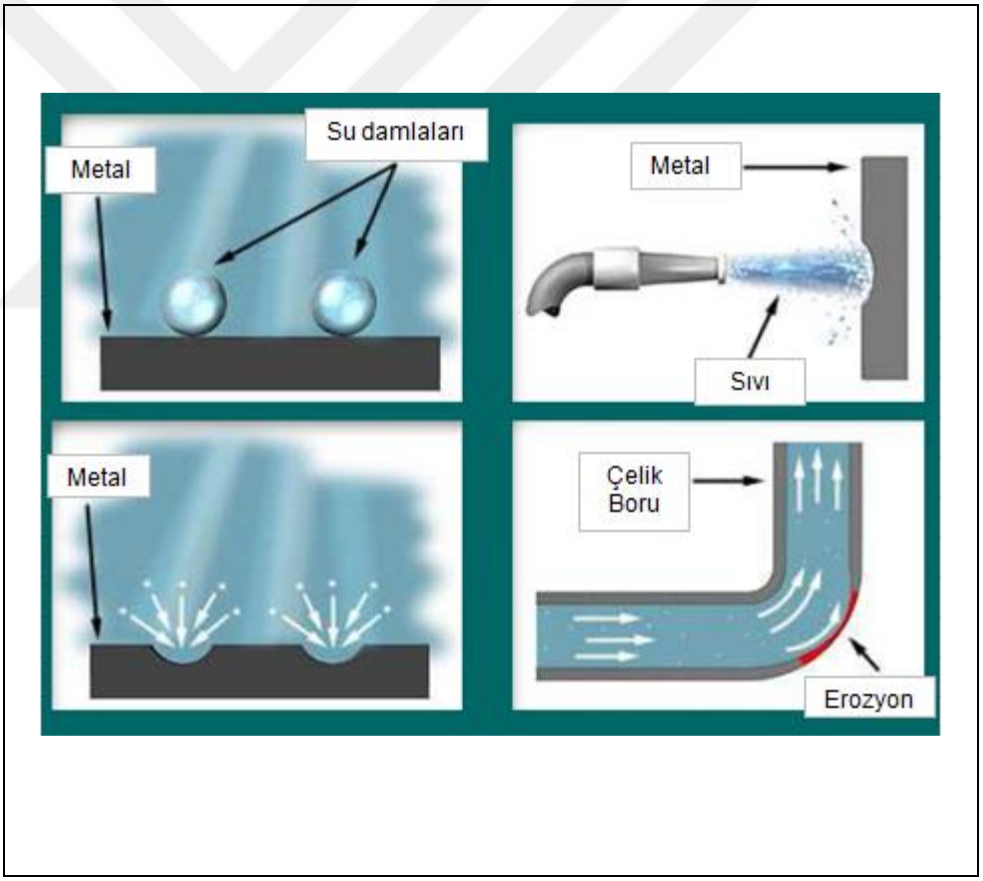
(f) Ayrılarak geriye doğru bir hareket eğiliminde olan malzeme sonucu oluşan levhacıklar.



Şekil 3.2. Parçacıkların tekli ve çoklu olarak çarpmaları sebebiyle oluşan aşınma kaybından oluşan mekanizmalar [35].

Erozif aşınma, genel olarak bakıldığında katı, sıvı ve gaz maddelerin ya da bunların karışımlarının kayma veya çarpma sonucu katı cisimler üzerinde yaratmış oldukları etkilerdir. Uzay havacılık ve savunma sanayisindeki uygulamalarda, kömür dönüştürme santrallerinde, enerji dönüşüm sistemlerinde, türbinlerde, helikopter rotor kanatlarında, jet motorlarında fazlasıyla bu aşınma çeşidine rastlamak mümkündür. Aşındırıcı partiküllerin boru disklerine, valf deliklerine, haraketli kanatlara, boru bağlantılarına, disklere ve diğer yüzeylere çarpıp oldukça fazla miktarda aşınmalar oluşturabilmektedir [37].

Erozif aşınmanın şiddeti, ortamdaki aşındırıcı, aşındırıcının yüzeye çarpma hızı ve çarpma açısı gibi bazı faktörler tarafından değiştirilebilir. Özellikle parçacıkların çarpma açıları yüzeydeki aşınmayı belirleyebilir ve bunun yanı sıra aşınma mekanizmasını da değiştirebilmektedirler. Akışın olduğu yerlerde gözlenen, erozif katı parçacık taşıyan sıvı akışları ile meydana gelen aşınma da bir erozif aşınmadır. Örnek olarak çamur veya çamurla karışık sulu maddelerin taşınmasında kullanılan boru hatlarında bu tip aşınmalar görülmektedir [38]. Ayırca sıvı damlaların sert bir yüzeye çarpmasıyla oluşan yağmur erozif aşınması denilen aşınma tipi de meydana gelmektedir. Örneğin, uçağın yağmur bulutlarıyla dolu bir yerden geçmesiyle uçağın gövdesi ya da buhar türbin pervaneleri bu şekilde bir aşınma meydana gelebilmektedir [3]. Şekil 3.3'de erozif aşınma tipleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Erozif aşınma tipleri [3]

3.1. Katı Partikül Erozyonu

Bu erozyon tipinde bazı mühendislik uygulamalarında kayda değer malzeme kayıpları yaşanmaktadır [39]. Daha önceleri, akışkan sistemde sürüklenen yüksek hızlı partiküllerin yüzeye çarpması sonucunda yaratmış olduğu hasar, açılı erozyon olarak

bilinirdi. Daha sonrasında yapılan çalışmalar sonucunda katı partikül erozyonu, erozif prosesin tekrarlanma etkisiyle hedef yüzeyden devamlı malzeme kaldırılması işlemi olarak tarif edildi. Katı partikül erozyonu, uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılan malzemelerde, helikopter rotor kanatlarında, gaz türbinlerinde, roket nozullarında, silikon ayırıcılarda, valflerde, pompalarda, kompresör disklerinde, kömür dönüştürme santrallerinde, kazan borularında karşılaşılan ciddi bir aşınma problemidir. Ancak bununla birlikte, çok yaygın kullanılan bir üretim prosesi olan abrasif su jeti ile kesim işlemlerinde kullanılabilmektedir [37, 40, 41].

3.1.1. Katı partikül erozyonuna etki eden faktörler

Bu aşınma türünde özellikle uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılan çeşitli mühendislik malzemeleri oldukça hasar görmektedirler. Araştırmacılar son on yıldır metallerin, seramiklerin, polimerlerin ve bunların bileşenlerinin katı partikül erozyon davranışlarını ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Bu çalışmalarını, geleneksel malzemeler ve bilhassa metaller üzerinde yoğunlaştırmışlardır. Erozyon mekanizmalarını, hedef malzemeye ve erozyon parametrelerine göre tanımlanmışlardır. Bu mekanizmaları partikül çarpma açısına bağlı olarak da malzemelerin erozyon davranışlarını sınıflandırmışlardır [42, 43].

Katı partikül erozyonu diğer tribolojik proseslerde olduğu gibi kompleks bir süreçtir. Bu erozyon tipinde oluşan değişimler birden fazla faktöre bağlıdır. Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı, hızı ve boyutu, bu partiküllerin karışım oranı ve aşınan malzemenin mekanik özellikleri katı partikül erozyonun başlıca ve etkin parametreleridir [44]. Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Partikül erozyonuna etki eden faktörler[44]

Katı Partikül Erozyonuna Etki Eden Faktörler	
Aşındırıcı partiküllerin	Çarpma Açısı
	Hızı
	Kütlesel Debisi
	Boyutu
	Geometrisi (yuvarlak köşeli, keskin köşeli v.s)
	Karışım Oranı
Aşınan Malzemelerin Özellikleri	Kimyasal
	Mekanik
Aşınmanın Gerçekleştiği Yerde Çevresel şartlar	Sıcaklık, nem, korozif şartlar v.s

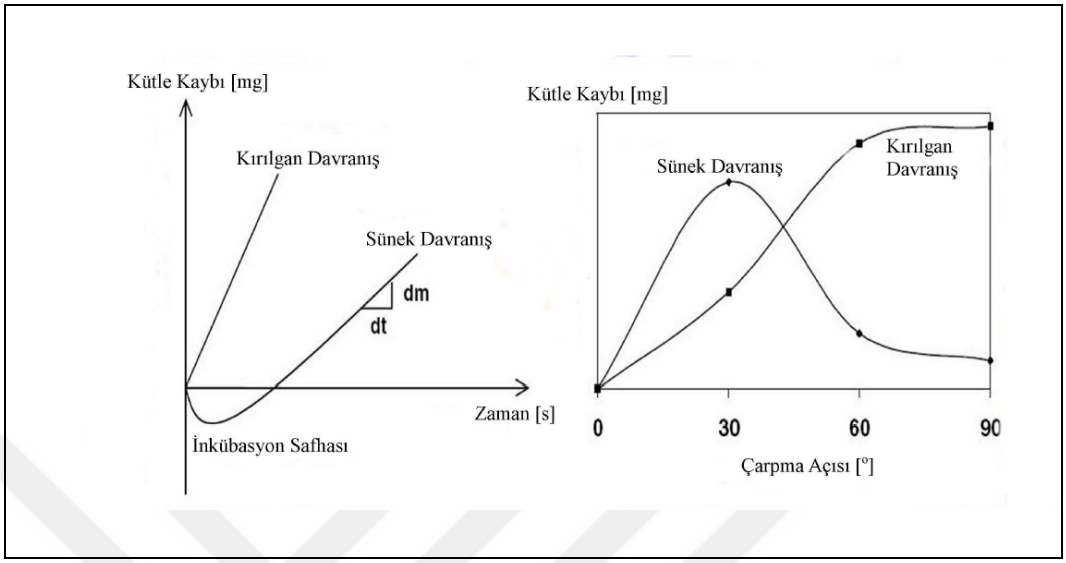
3.1.2. Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı

Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısına göre katı partikül erozyonu iki şekilde sıralanabilir;

- Dik çarpma açılardaki erozyon ($\theta = 90°$)
- Eğik çarpma açılardaki erozyon ($0° < \theta < 90°$) [45]

Katı partikül erozyon mekanizmasında, çarpma açılarının çok az olduğu durumlarda meydana gelen aşınma, cisimlerin birbirlerine sürtünmesi ile meydana gelen aşınma ile benzerlik göstermektedir. Bunun sebebi ise partiküllerin malzeme ile etkileşimi süresince yüzey boyunca bir yol izlemeleridir. Bu durum, yüksek çarpma açılarında ise aşınma mekanizmasını çarpma şeklinde meydana getirmektedir. Şekil 3.4'te görüldüğü üzere, kırılgan tip malzemelerde en yüksek malzeme kaybı yüksek çarpma açılarında görülürken, sünek tip malzemelerde en yüksek malzeme kaybı ise düşük çarpma açılarında (~30°) meydana geldiği gözlemlenir. Sünek malzemelerde, malzeme kaybının zamanla değişimi gözetildiğinde ise öncelikle kütle kaybında bir artış, ardından lineer bir azalış olduğu. Başlangıçtaki ağırlık artışı aşındırıcı partiküllerin sünek hedef malzemeye gömülmesi sonucunda meydana gelmektedir.

Kararlı erozyon davranışı (lineer çizgi), aşındırıcı partiküllerin birbiri sıra malzeme yüzeyini terk etmesiyle gözlemlenmektedir [3, 43, 45, 46].



Şekil 3.4. Sünek/gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri [47].

Farklı malzeme grupları için katı partikül erozyon aşınması, aşağıdaki mekanizmalarla özetlenebilmektedir:

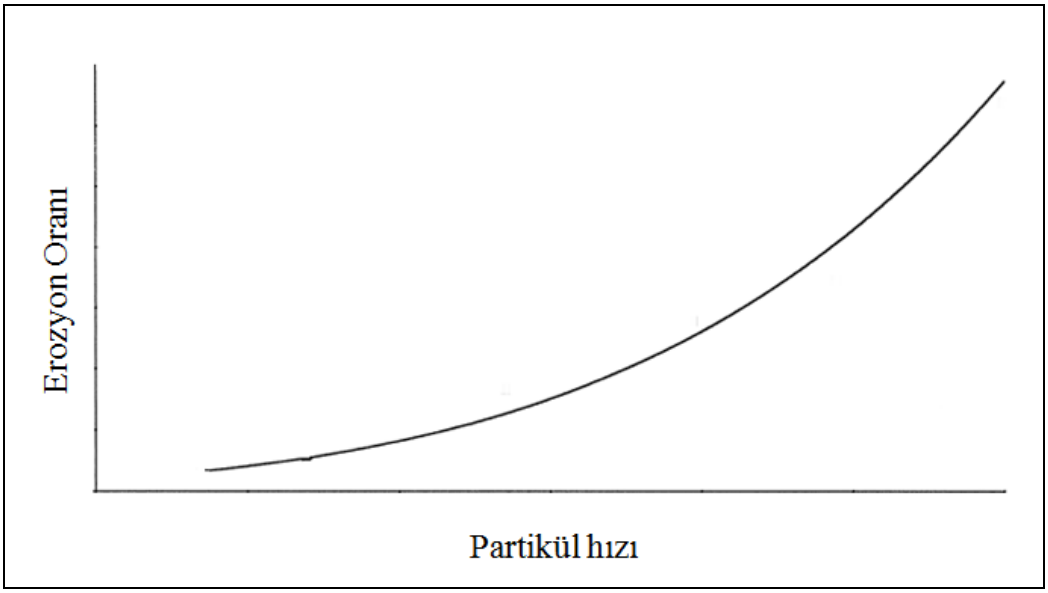
- Kauçuklar için; yırtılma ve yorulma,
- Sünek metaller ve polimer malzemeler için; kesme ve sürülme
- Seramikler, camlar ve gevrek polimer malzemeler için gevrek kırılma, çatlak oluşumu [48, 49].

Partiküllere ait hareket hız bileşenlerini, yatay ve düşey olarak ayırarak belirtmek mümkün olabilmektedir. Bilhassa sünek malzemeleri aşındıran sert partiküller, düşük çarpma açılarında daha az bir çarpma ve ağırlık bakımından yatay hız bileşeni ile malzemenin yüzeyini çizme ve kesme mekanizmalarını ortaya çıkarmaktadır. Açının daha fazla büyümesiyle partikül hızının dikey bileşeni de artmakta ve çarpma etkisine benzer şekilde bir etkiyle karşı karşıya kalmaktadır. Bu mekanizmalar eşliğinde sünek malzemelerdeki çarpma açısı ile küçük açılarda başlayan aşınma değeri, orta derecelerdeki çarpma açılarına doğru ilerledikçe meydana gelen aşınmanın değeri, maksimuma ulaştığı söylenebilir. Malzeme yüzeyine ulaşan partiküllerinde teması sonucunda, kayma ve dönme hareketleriyle farklı etkileşimler meydana gelebilmektedir [50].

Erozyon aşınmasında kütle kaybının, çarpma açısıyla olan ilişkisini daha çok malzemenin özellikleri ortaya koymaktadır. Sünek malzemelerdeki karakteristik özellik, 15° ve 30°'lerde olduğu gibi düşük çarpma açılarında en yüksek değerde erozyon görülmektedir. Kırılgan malzemelerde bu durum normal çarpma açısı olan 90°'de meydana gelmektedir [49, 51, 52].

3.1.3. Aşındırıcı partiküllerin hızı

Erozif aşınma süresince partikül hızının aşınma sürecine önemli ve güçlü bir etkisi vardır. Partikül hızının aşınma oranına etkisi Şekil 3.5'te gösterilmiştir [53]. Hızın çok düşük olduğu durumlarda çarpma sırasındaki gerilmeler plastik deformasyon oluşumu için yetersiz kalmakta ve aşınma, yüzey yorulması olarak devam etmektedir [54]. Partikül hızının artmasıyla, çarpmaya bağlı olarak malzemenin yüzeyinde plastik deformasyon gözlemlenebilmektedir. Bu sistemdeki aşınma davranışı, birbiri ardına tekrarlayan plastik deformasyonla olmaktadır. Bir diğer davranış olan kırılgan aşınmada, alt yüzey kırılması şeklinde meydana gelmektedir. Partikül çarpma hızlarının çok yüksek olduğu durumlardaki aşınmada darbeye uğrayan yüzeyde bölgesel ergimeler görülebilir [55]. Özellikle metaller için, partikül çarpma hızının artmasıyla, erozyon aşınmasına etkisinin yükselmesi lineer olarak artıyor olması söylenebilir [56, 57].



Şekil 3.5. Partikül hızının katı partikül erozyonuna etkisi [53].

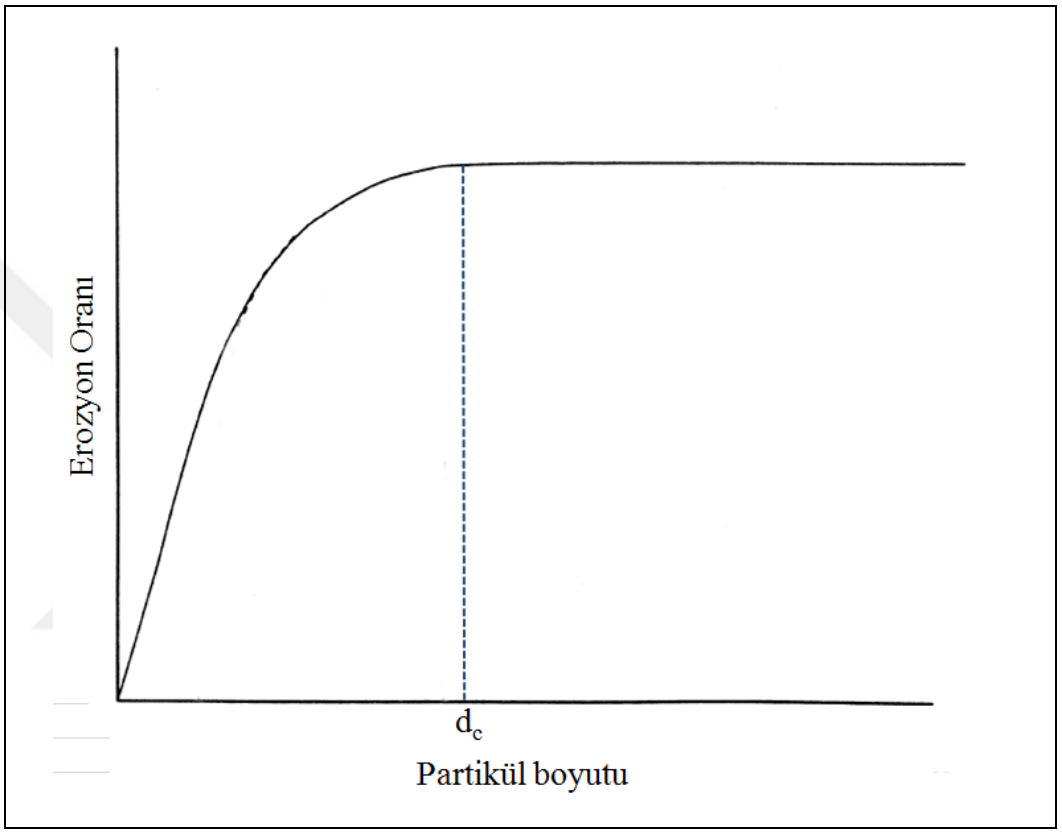
3.1.4. Aşındırıcı partiküllerin kütlesel debisi

Birim zamanda birim alana çarpan aşındırıcı partikül kütlesi olarak tanımlanan partikül akış debisi, erozyon aşınmayı etkileyen parametrelerden biridir [58]. Teoride aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye eşit hızda ve çarpma açısında temas ettikleri kabul edilir. Bu yüzden aşınma miktarı, aşındırıcı partiküllerin akış debisine bağlı olmamalıdır. Fakat, pratikte sayısal olarak değerlendirilen aşınma oranı üzerinde, partikül debisinin önemli etkileri söz konusudur. Sınırlı bir akış oranı eşik değerine kadar erozyon aşınma miktarının, akış debisiyle doğru orantılı olduğu raporlanmıştır. Bu limit değerini ortaya çıkaran sebebin, yüzeye gelen ve geri seken aşındırıcı partiküllerin arasında meydana gelen etkileşimin sonucu olduğuna inanılır. Bu etkinin, çarpan önceki aşındırıcı partiküllerin erozyon sürecini engellediği birinci sırada partikül çarpma modeli ile ispat edilmiştir. Çok düşük değerlerdeki akış debilerinde dahi bu çarpışma teorisi önemli bir etkiye sahip olabilmektedir. Elostomerler için 100 kg/m^2 kadar düşük olan partikül akış oranı sınır değeri, metallerde büyük ve hızlı parçalarla 1000 kg/m^2 kadar yükselebilmektedir. Bu durum sınır akış debisi eşik değeri geçildiği takdirde çok az oranda düşmektedir. Aşındırıcı akış debisinin etkisi, temel olarak bu bahsedilen etkileşimlere nazaran farklı mekanizmalarda meydana gelebilmekte ve erozyon aşınmasını etkileyebilmektedir. Proses, her çarpmanın ardından ortaya çıkan bir geçici reaksiyonlar dizisi olarak değerlendirilebilmektedir. Yüzeydeki çarpmalar arası zamanın azalması, akış debisi arttığında oluşmaktadır. Bu sebepten ötürü bir sonraki çarpımdan önce bozulma reaksiyonu için daha az zaman kalacaktır böylelikle bozulmanın derecesi ve bununla ilişkili olarak erozyon aşınma miktarı da düşecektir. Bu analizler doğrultusunda seçilen malzemenin erozyon davranışını doğrudan etkilememesi için, çevre bozulma etkisi ve partikül etkileşimlerini bertaraf edecek özel bir debi miktarı seçilmesi gereklidir [59-61].

3.1.5. Aşındırıcı partiküllerin boyutu

Katı partikül erozyonunda, malzemenin yüzeyine temas eden aşındırıcı partiküllerin boyutu önem arz etmektedir [62, 63]. Son zamanlarda erozyon oranına, aşındırıcı partikül boyutunun etkisinin anlaşılabilmesi için bir çok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda nihai olarak iki farklı düşünce oluşmuştur.

G. Sundarajan, D.P. Mondal, M. Dündar ve diğerleri erozyon miktarı üzerinde aşındırıcı partikül boyutunun etkisi olduğunu, fakat kritik bir değere kadar erozyon miktarının partikül boyutundan etkilendiğini ifade etmişlerdir. Deneyler sonucunda, bu kritik değere kadar partikül boyutunun artışıyla erozyon miktarının lineer olarak arttığını raporlamışlardır.

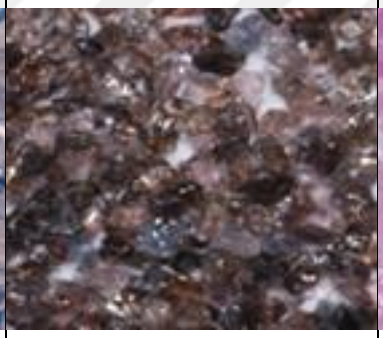
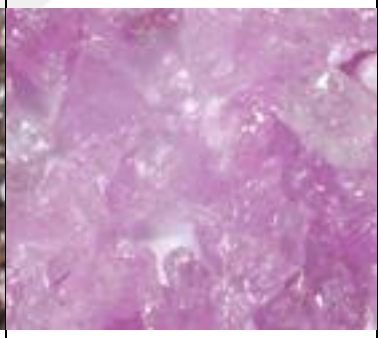


Şekil 3.6: Erozyon oranının aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi [64].

Katı partikül erozyon da Q. Chen ve D.Y. Li, aşındırıcı partikül boyut etkisinin Newton hareket prensiplerine dayandırarak dinamik bilgisayar modellemesi ile değerlendirmişlerdir. Çalışmalarda üç değişik aşındırıcı partikül boyutunun etkisi, aşındırıcı partikül debisi eşdeğer oranda tutularak incelemeler yapılmıştır. Bu şekilde aşınan malzeme yüzeyine temas ettirilen toplam aşındırıcı partikül miktarı eşit hale getirilip yalnızca partikül boyutları farklı hale getirilmiştir. Deneylerin sonunda, partikül boyutunun artmasıyla aşınma oranının arttığı tespit edilmiştir. Şekil 3.6'da erozyon oranının aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi, Şekil 3.7'de ise farklı partikül boyutlarındaki aşındırıcıların malzeme yüzey bölgesinde oluşturdukları hasar gösterilmiştir [3].

4. ALUMİNYUM OKSİT

Alüminyum oksit mineral içerikli sarf malzemesi olup saflık derecelerine göre sınıflandırılırlar. Endüstri pazarında alümina, corondum, alüminyum oksit ve corundolarak da isimlendirilen bu malzeme saflıklarına göre kahverengi, pembe ve beyaz renkte olmaktadırlar. Şekil 4.1'de Alüminyum oksit çeşitleri fotoğrafları gösterilmiştir.

Beyaz Alüminyum Oksit	Kahverengi Alüminyum Oksit	Pembe Alüminyum Oksit
		

Şekil 4.1. Alüminyum Oksit çeşitleri[65]

Alüminyum metalinin oksijene karşı yüksek afinitesi sonucunda oluşan alüminyum oksit minerali, uzun dayanma ömürleri ve çok sert olmaları sebebiyle tercih edilmektedirler. Malzemelerin yüzeylerinde pürüzlendirmeve boya kaldırma işlemleri için kullanılan ürünlerdir.Çok sert ve yapılarının köşeli olmaları sebebiyle kaplama prosesi öncesinde yüzeyde pürüzlendirme işleminde sıklıkla kullanılmaktadır. Yüzeye basınçlı hava ile püskürtürtülen alüminyum oksit, partiküllerin boyutları ile orantılı olarak yüzeyde mikron düzeyde yarıklar oluşmaktadır. Bu işlemin ardından uygulanan kaplama işlemiyle, oluşan bu yarıklara oturan kaplama malzemesi,ana metale daha kuvvetli bağlanmasından dolayı kaplama kalitesi ve ömrü yüksek olmaktadır. Köşeli bir malzeme olan alüminyum oksit, aşındırma özelliğinden dolayı kumlama ürünü olarak kuıllanılmaktadır. Aşındırma malzemesi olarak çok fazla kullanılan alimünyum oksit, yüzey özelliklerinin çok önemli olmadığı yerlede temizleme ürünü olarak

uygulanmaktadır. Saflığından dolayı beyaz alüminyum oksit, paslanmaz özelliği olan malzemelerde kumlama ürünü olarak kulllanılması tercih sebebidir. Kahverengi silisyum oksite kıyasla beyaz alüminyum oksit, porselen bazlı malzemeler, alüminyum ve titanyum alaşımları, paslanmaz çelikler, bakır ve pirinç alaşımlarında daha az toz çıkarıp daha iyi yüzey kalitesi sağlamaktadır. Serbest durumda demir içeriği sebebiyle kahverengi alüminyum oksit, malzeme yüzeyindeki paslanmaz özelliğine zarar vermektedir. Bununla birlikte kullanımın yoğun olduğu durumda, malzeme yüzeyinde renk değişimine sebebiyet vermektedir. Bu sebepten dolayı yüzey rengi ve paslanmazlık kalitesinin görmezden gelindiği durumlarda uygulanmalıdır. Hızlı kumlama ve diğer diğer sarf malzemelerine göre (garnet, silis kum ve cam kumu v.b.) yüksek sertlik ve az toz oluşması sebebiyle tercih edilme sebebidir. Alüminyum oksit neme duyarlılığı nedeniyle, nem içeren ortamlardan uzak tutulmalıdır. Bu zayıf özelliğinden dolayı depolama esnasında nemden uzak tutulmalıdır. Tablo 4.1'de Alüminyum oksit minerali fiziksel özellikleri ve Tablo 4.2'de Alüminyum oksit minerali kimyasal özelllikleri gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Alüminyum Oksit minerali fiziksel özellikler

Alüminyum Oksit minerali fiziksel özellikleri	
Alüminyum Kahverengi Oksit Özgül Ağırlığı	3,96 gr/cm^3
Beyaz Alüminyum Oksit Özgül Ağırlığı	3,92 gr/cm^3
Pembe Alüminyum Oksit Özgül Ağırlığı	3,92 gr/cm^3
Alüminyum Oksit Ortalama Dökme Yoğunluğu	2,4 gr/cm^3
Alüminyum Oksit Sertlik	9 (mohsscale)
Alüminyum Oksit Kristal Yapısı	Kübik
Alüminyum Oksit Kristal Şekil	Köşeli
Alüminyum Oksit Kırılması	Dökme Mineralin Preslenmesi
Alüminyum Oksit Dayanıklılık	Yüksek
Alüminyum Oksit Serbest Akış Özelliği	Minimum % 97
Alüminyum Oksit Asite Karşı Afinitesi	Yoktur
Alüminyum Oksit Nem Çekme Özelliği	Vardır
Alüminyum Oksit Magnetik Özelliği	Çok Az Magnetiktir
Alüminyum Oksit Elektrik İletkenliği	100 microsiemens/m
Alüminyum Oksit Radyoaktivite Özelliği	Tespit edilememiştir
Alüminyum Oksit Patalojik Zarar Özelliği	Yoktur
Alüminyum Oksit Serbest Silika ihtivası	Yoktur

Tablo 4.2. Alüminyum Oksit minerali kimyasal özellikleri

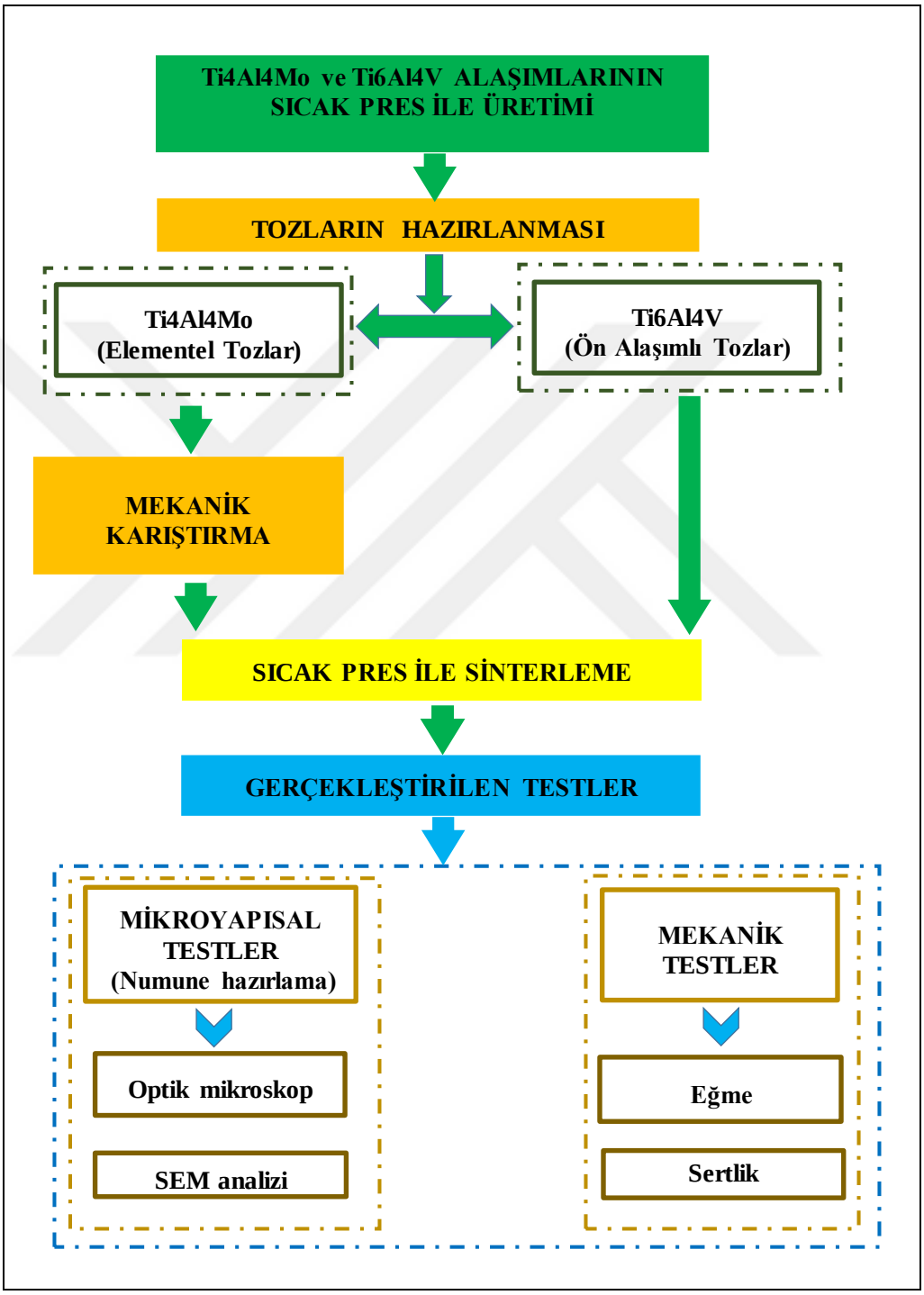
Beyaz Alüminyum Oksit Minerali Kimyasal Özellikleri	
Al_2O_3: %99,7	Klor ihtivası < 50 ppm
SiO_2: %0,02	Eriyebilen tuz ihtivası < 100 ppm
Fe_2O_3: %0,02	Su içeren durumda pH 6,93
TiO_2: %2,6-3,2	Alçıtaşı ihtivası yoktur
Na_2O: %0,2	Rutubet < 0,5 % Eser
Kahverengi Alüminyum Oksit Minerali Kimyasal Özellikleri	
Al_2O_3: %94,5-95,5	Klor ihtivası < 50 ppm
SiO_2: %0,5-0,8	Eriyebilen tuz ihtivası < 100 ppm
Fe_2O_3: %0,3	Su içeren durumda pH 6,93
TiO_2: %2,6-3,2	Alçıtaşı ihtivası yoktur
CaO+MgO: %0,3	Rutubet < 0,5 % Eser
Pembe Alüminyum Oksit Minerali Kmyasal Özellikleri	
Al_2O_3: %99,4	Klor ihtivası < 50 ppm
SiO_2: %0,3	Eriyebilen tuz ihtivası < 100 ppm
Fe_2O_3: %0,02	Su içeren durumda pH 6,93
TiO_2: %2,6-3,2	Alçıtaşı ihtivası yoktur
Na_2O: %0,2	Rutubet < 0,5 % Eser

Aşındırıcı partikül olarak kumlama prosesindekullanılan Alüminyum oksit minerallerinin bazı alanları ve sebepleri tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Alüminyum Oksit Aşındırıcıları Kullanımı

Alüminyum Oksit Aşınrıcılar Kullanımı		
Endüstri Alanı	Alüminyum Oksit Cinsi	Kullanım Sebebi
Cam Kumlaması	Kahverengi Alüminyum Oksit	Yüksek Sertliği, Uygun Fiyat
Medikal Malzeme İmalatı	Beyaz Alüminyum Oksit	Yüksek Saflığı, İnert Yapı
Zımpara ve Taş İmalatı	Kahverengi Alüminyum Oksit	Yüksek Sertliği, Uygun Fiyat
Zımpara ve Taş İmalatı	Pembe Alüminyum Oksit	Yüksek Saflığı, Yüksek Dayınım Ömrü
Paslanmaz Pürüzlendirme İşlemi	Beyaz Alüminyum Oksit	Yüksek Saflığı, İnert Yapı
Savunma Sanayi	Beyaz Alüminyum Oksit	Yüksek Saflık, İnert Yapı
Kalıp Sanayi	Kahverengi Alüminyum Oksit	Yüksek Sertliği, Uygun Fiyat
Poliüretan	Kahverengi Alüminyum Oksit	Yüksek Sertliği, Uygun Fiyat
PTFE Kaplaması	Beyaz Alüminyum Oksit	Yüksek Saflığı, İnert Yapı
Kot Taşlama İşlemi	Kahverengi Alüminyum Oksit	Yüksek Sertliği, Uygun Fiyat

5. MALZEME VE YÖNTEM



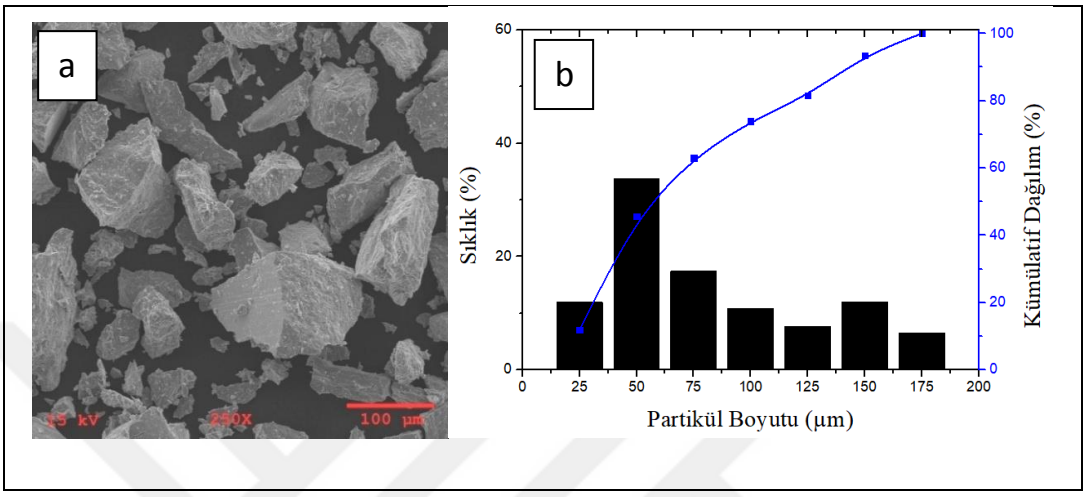
Şekil 5.1. Tez çalışması esnasında Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V Alaşımlarının Sıcak pres ile üretiminin akış şeması

Bu tez çalışmasında, Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V Alaşımlarının Sıcak pres ile üretimi ile ilgili deneysel çalışmalar Şekil 5.1'de gösterilen akış şemasında gösterildiği gibi sırasıyla uygulanmıştır. Bu doğrultuda öncelikle elementel ve ön alaşımlı tozlar hazırlanmış, ardından hazırlanan toz karışımları sıcak pres ile sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme işlemi sonrası metalografik işlemlerle hazırlanan numunelere mikroyapısal ve mekanik testler uygulanmıştır. Akış şemasında gösterilen yöntemlerde, uygulamanın nasıl yapıldığı detaylı olarak anlatılmıştır. Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan cihaz ve ekipmanlar akış şemasında gösterilen yöntemlerin anlatıldığı bölümlerde verilmiştir.

5.1. Tez Kapsamında Kullanılan Tozlar

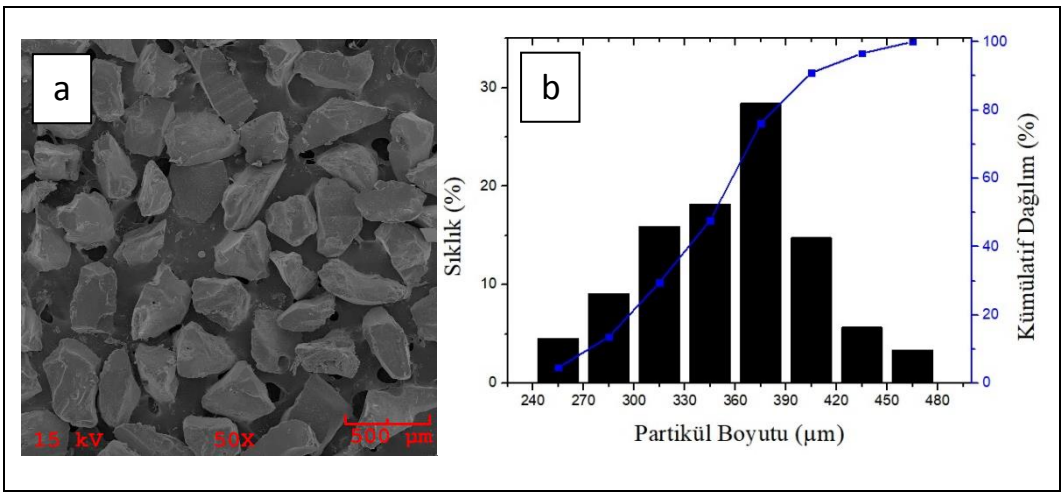
Endüstriyel uygulamalarda kullanılan birçok titanyum alaşımı vardır. Titanyum alaşımları içinde en yaygın kullanılan Ti6Al4V alaşımıdır. Bu alaşımın tozu ticari olarak birçok üretim yöntemi ile üretilebilmektedir. Dolayısıyla bu bileşime sahip tozun temini yurt içi veya yurt dışı kaynaklardan kolay bir şekilde temin edilebilmektedir. Bu doğrultuda çalışmada ön alaşımlı Ti6Al4V alaşımı tozu kullanılmıştır. Farklı üretim yöntemlerinin ortaya koyduğu toz karakteristikleri nihai malzemenin özelikleri üzerinde doğrudan etkilidir. Özellikle tozun bileşimi mekanik özellikler açısından kritik bir öneme sahiptir. Çalışmada kullanılan Ti6Al4V alaşımı tozları bir kimyasal proses olan hidrid-dehidrid prosesi ile üretilmişlerdir. Yöntemin doğası gereği elde edilen partikül şekilleri keskin köşeli kaba boyutlu bir yapıya sahiptir. Ti6Al4V ön alaşımlı tozlarının taramalı elektron mikroskobu ile çekilen görüntüleri Şekil 5.2'de verilmiştir. Ti6Al4V alaşımı tozları Çin'de bulunan Baoji RuiHong Metal Materials Co. Ltd. Şirketinden temin edilmiştir. Bu tarz bir toz karakteristiği geleneksel toz metalurjik prosesler için bazı dezavantajlar içermektedir. Hem proses sırasında kalıbın dolması açısından akış özelliklerinin kötü olması ve yoğunluk değerlerinin beklenenden çok daha düşük çıkması hem de kaba boyuta sahip olmalarından sinterleme sırasında düşük enerjileri nedeniyle düşük yoğunluklu malzeme ortaya koymaları en büyük dezavantajlardır. Fakat tez kapsamında seçilen basınç destekli üretim sayesinde karmaşık şekle sahip kaba boyutlu tozlarda yüksek yoğunluklu malzeme temin edilebilmektedir. Bunu sıcaklık ile eş zamanlı etki eden basınç sağlamaktadır. Yüksek sıcaklıkta etki eden basınç desteği ile partiküller kolay

bir şekilde deforme olabilmekte ve geleneksele yöntemlere nazaran aktifleştirilmiş bir sinterleme ortamı ortaya konmaktadır. Ti6Al4V alaşımı tozlarına ait boyut dağılım diyagramı ise Şekil 5.2'b de verilmiştir. Bu alaşım için medyan boyut ~60 µm olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.2. Tez kapsamında kullanılan ön alaşımlı Ti6Al4V alaşımı tozları, a) SEM görüntüsü, b) boyut dağılımı

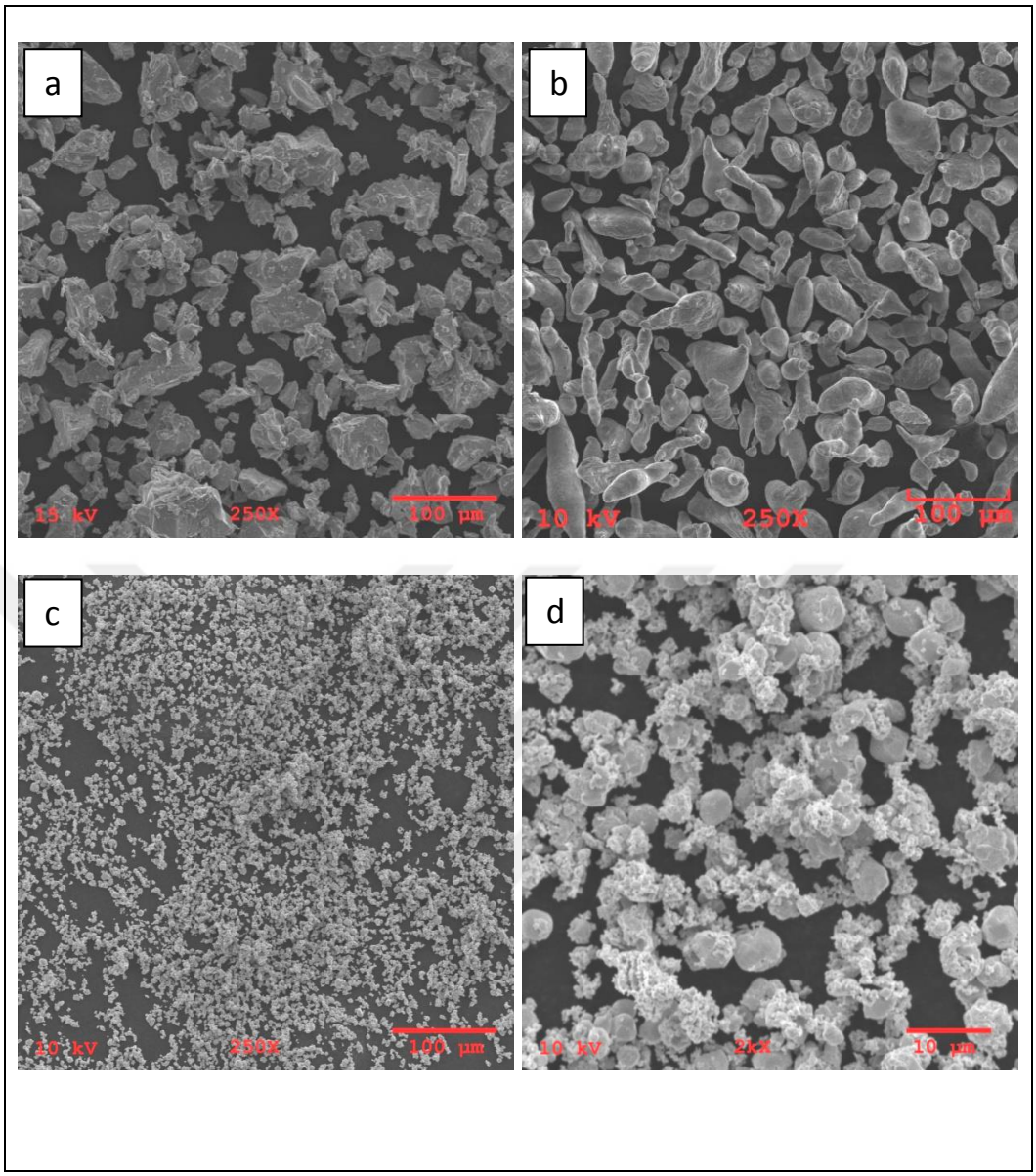
Şekil 5.3'te aşındırıcı olarak kullanılan alümina partiküllerinin SEM görüntüleri ve kümülatif dağılım eğrisi gösterilmiştir. Alümina tozları Fetaş Metalurji A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Şekil 5.3a'da SEM görüntüsünden de görüldüğü gibi alümina partikülleri keskin köşelere sahiptir. Partiküllerin medyan boyutu ise ~345 µm olarak ölçülmüştür (Şekil 5.3b).



Şekil 5.3. Tez kapsamında kullanılan Al_2O_3 tozlarının, a) SEM görüntüsü, b) boyut dağılımı

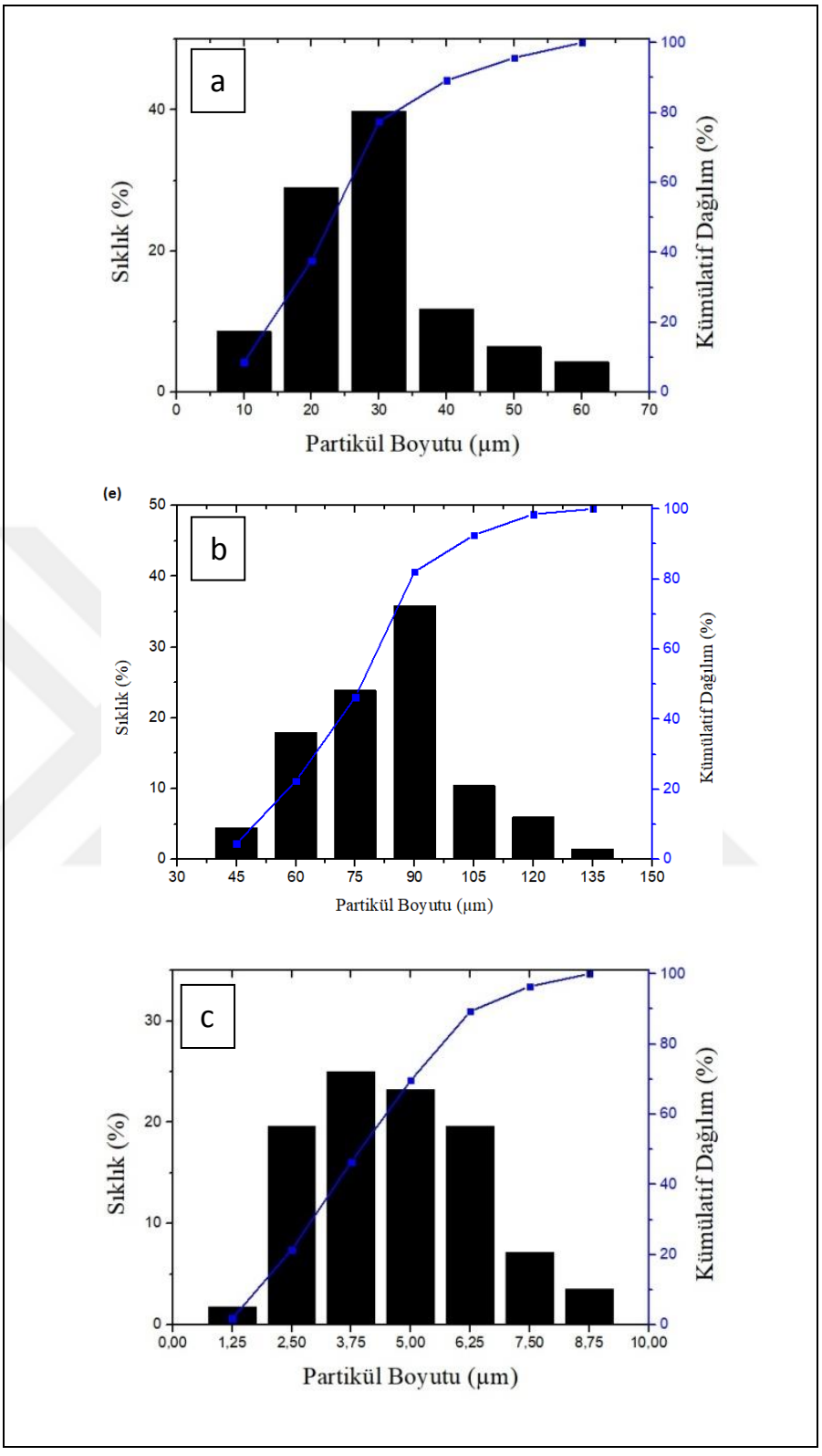
Ti4Al4Mo alaşımı ise Ti6Al4V alaşımına göre nispeten oldukça yeni bir malzemedir. Özellikle son yıllarda havacılık ve biyomedikal alanda kullanılmak üzere molibden içerikli yeni titanyum alaşımlarının üretimi üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Ticari olarak toz formunda bu alaşımın tozuna ön alaşımlı olarak ancak özel siparişler ile ulaşılabilir. Tez kapsamında bu alaşım elementel tozlar kullanılarak elde edilmiştir. Ti4Al4Mo alaşımının hazırlanması için kullanılan tozlarında taramalı elektron mikroskobu ile çekilen görüntüleri Şekil 5.3'de verilmiştir.

Görüntülerden de anlaşılacağı gibi tozlar farklı boyut ve şekil karakteristiği sergilemektedirler. Saf titanyumu Ti6Al4V alaşımı gibi kimyasal yöntemler ile üretilmişlerdir ve yine keskin köşeli düzensiz şekle sahiptirler (Şekil 5.4 a). saf Ti tozları da Çin'de bulunan Baoji RuiHong Metal Materials Co. Ltd. Şirketinden temin edilmiştir. Aluminyum tozları tipik santrifüj atomizasyonu ile üretimin ortaya koyduğu şekil ve boyut sergilemektedirler. Bu yöntem ile üretilen tozlar uzamış damlavari şekle sahip kaba boyutlu bir yapı sergilerler (Şekil 5.4 b). yaklaşık 2600 °C bir ergime sıcaklığına sahip olan molibdenin üretimi için aluminyum gibi ergitme işlemini takip eden bir üretim süreci mümkün değildir. Bu nedenle molibdenin üretim yöntemleri için kimyasal teknikler tercih edilir. Çalışmada kullanılan molibden tozunun SEM görüntüsü Şekil 5.4. c'de verilmiştir. Kimyasal tekniklerle üretilen tozlar çok ince bir boyuta sahiptirler. Bu nedenle şekil ve boyut özeliklerinin anlaşılabilmesi için molibden tozunun yüksek büyütmede çekilen görüntüsü de sunulmuştur (Şekil 5.4 d). Görüntülerden kimyasal yöntemlerin genel bir etkisi olan topaklanma izleri net bir şekilde anlaşılmaktadır. Molibden tozları Alfa Aesar Firmasından temin edilmiştir.



Şekil 5.4. Tez kapsamında Ti4Al4Mo alaşımı üretimi için kullanılan tozlar, a) saf Ti, b) Alüminyum, c) molibden (düşük büyütme), d) molibden (yüksek büyütme)

Ti4Al4Mo alaşımı üretimi için kullanılan saf Ti, Al ve Mo tozlarının boyut dağılım diyagramları ise Şekil 5.5'de verilmiştir. Boyut dağılımları SEM görüntüleri üzerinden ücretsiz bir yazılım olan Imaje J programı ile ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım the National Institute of Health tarafından hazırlanmıştır. Saf titanyum için medyan boyut ~25 µm, Al tozu için ~75 µm ve Mo tozu için ise ~4 µm'dir.



Şekil 5.5. Ti4Al4Mo alaşımı üretimi için kullanılan tozların boyut dağılımları, a) saf Ti, b) Al, c) Mo

5.2. Mekanik Karıştırma İşlemi

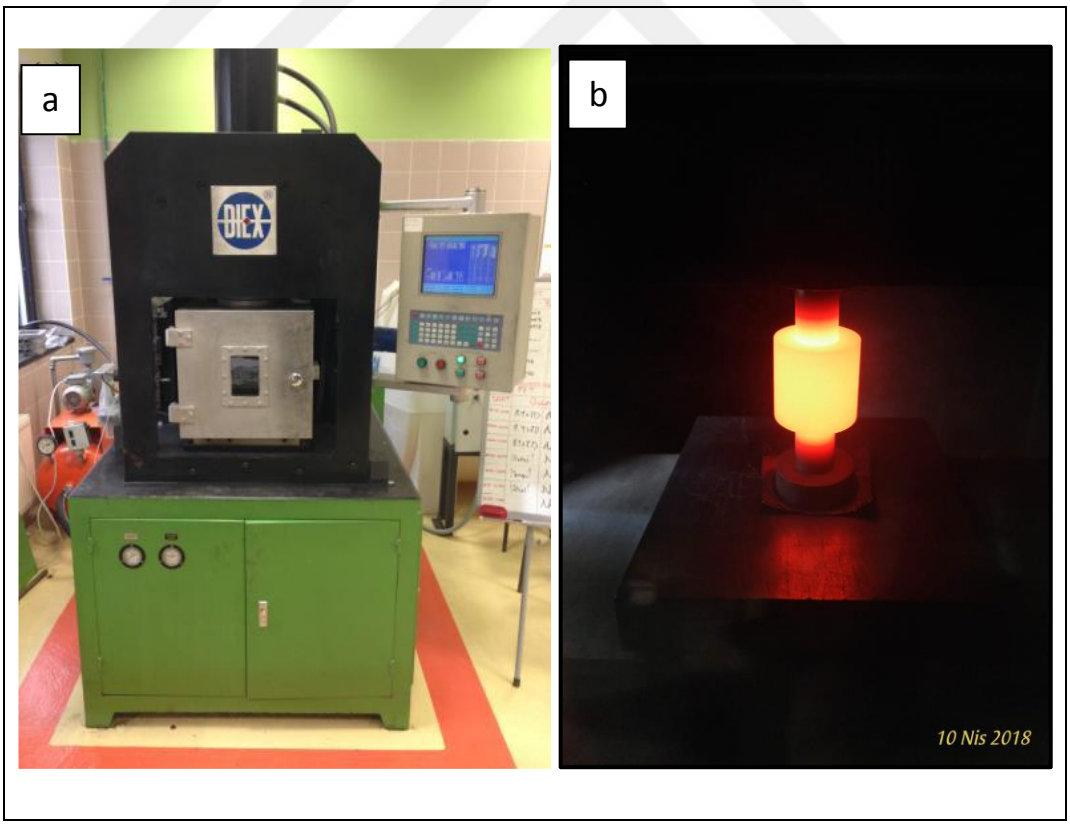
Ti4Al4Mo alaşımının üretimi için elementel tozların karıştırılması işlemi bilyeli değirmen kullanarak gerçekleştirilmiştir. Her bir karıştırma işleminde 10 adet numune üretilebilecek miktarda tartılan tozlar, 8 mm çapında çelik bilyeler yardımıyla bir cam kavanoz içerisinde karıştırılmıştır. 10 adet numune için gereken toz miktarları üretim sonrası hedeflenen numune boyutları dikkate alınarak belirlenmiştir. Elde edilmesi planlanan numunenin boyutları 20 mm çap ve 4 mm yükseklik şeklindedir. Kavanoz boyutu ve bilyelerin miktarına kullanılmak istenen tozun hacmine göre karar verilmiştir. Mekanik karıştırma işlemi prensiplerine göre, kullanılan bilyeler kavanoz hacminin %50' sini, kullanılacak tozlar ise kavanoz hacminin %25' ini doldurmalıdır. İşlem sırasında bilyelerin hareketlerinden alınabilecek en yüksek verime göre değirmenin hızı belirlenir. Bu prensip doğrultusunda mekanik karıştırma işlem hızı 175 rpm olarak belirlenmiştir. Karıştırma süresi ise 150 dakika olarak belirlenmiştir. Tüm proses boyunca her yarım saatte bir ısınmaların ve dolayısıyla ortaya çıkabilecek reaksiyonların önlenmesi amacıyla yarım saatte bir toz karışımları soğumaya bırakılmıştır. Mekanik karıştırma için kullanılan MSE-TEC markalı bilyeli değirmen Şekil 5.6'de verilmiştir.



Şekil 5.6. Mekanik karıştırma için kullanılan bilyeli değirmen

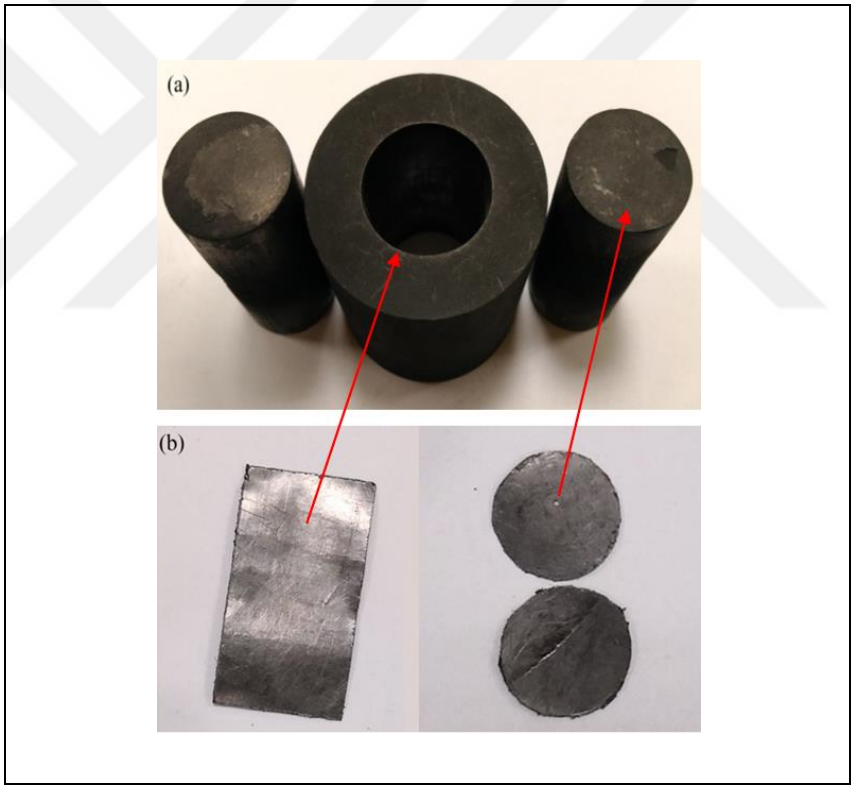
5.3. Sıcak Pres ile Numunelerin Üretimi

Çalışmada numune üretimleri için basınç destekli sinterleme tekniklerinden birisi olan sıcak pres kullanılmıştır. Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Toz Metalürjisi Laboratuvarı'nda bulunan DIEX marka sıcak pres cihazının görüntüsü Şekil 5.7 a'da verilmiştir. Geleneksel sinterlemeye nazaran sıcaklık ile basıncın eş zamanlı uygulanmasına izin veren bu yöntem sayesinde tozların daha düşük sıcaklıklarda ve daha kısa sürede sinterlenmeleri sağlanmaktadır. Hem enerji maliyeti açısından bir avantaj ortaya koymakta hem de üretilmesi planlanan malzemenin yüksek sıcaklıklara daha kısa süre maruz kalmasıyla içyapının kabalaşmadan yoğunlaşması mümkün olabilmekte ve mekanik özeliklerde düşüş önemli derecede azalmaktadır. Tez kapsamında kullanılan sıcak presin çalışma prensibi bir kalıp içinde konan tozların kalıptan geçen akıma karşı gösterdiği direnç üzerinden ısınmanın gerçekleştirilmesidir. Yüksek sıcaklıkta kalıbın görüntüsü Şekil 5.7 b'de verilmiştir.



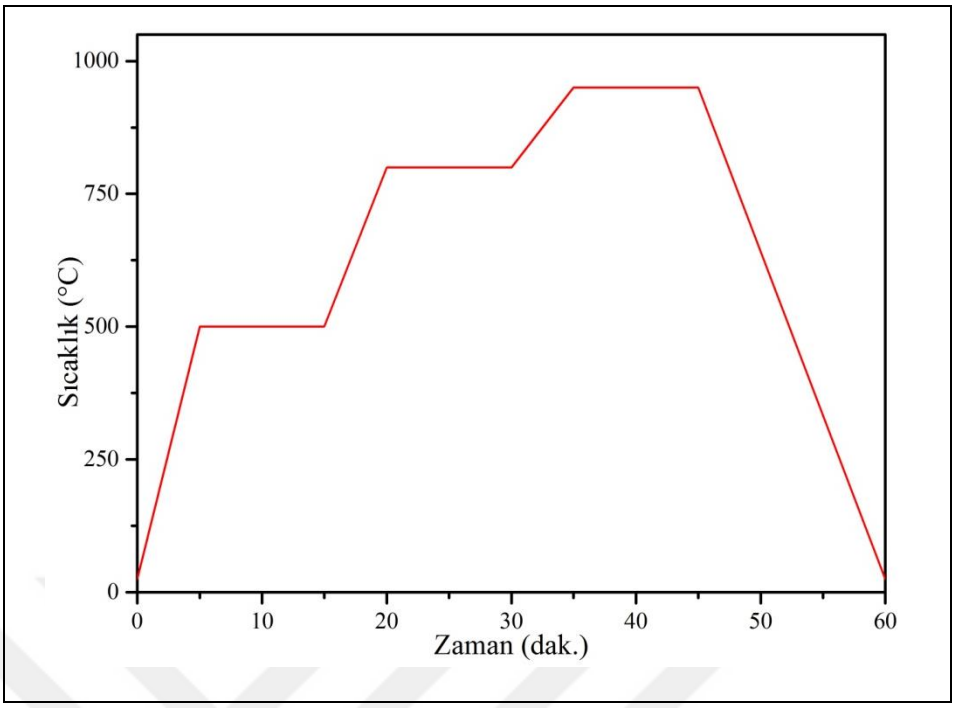
Şekil 5.7. Ti4Al4Mo veTi6Al4V alaşımlarının üretildiği a) DIEX marka sıcak pres makinası b) Yüksek Sıcaklıktaki grafit kalıbın görüntüsü

Sıcak pres işleminde grafit kalıplar kullanılmaktadır. Grafit kalıbın iki önemli özeliğinden faydalanılır. Grafitin ısıl iletkenliğinin yüksek olması ve grafitin kendisinin iyi bir yağlayıcı karakteristiği göstermesidir. Fakat grafitin sahip olduğu zayıf mekanik özellikler uygulanan basınç değerlerini sınırlamaktadır. Buna rağmen mevcut basınç değerleri ile istenen yüksek yoğunluk değerlerine ulaşılabilmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan kalıp ölçülerinin müsaade ettiği en yüksek basınç değeri 50 MPa'dır. Sıcak preste malzeme üretimi sürecinde kullanılan grafit kalıpların görüntüsü Şekil 5.8'de verilmiştir. Grafit kalıbın tüm iç yüzeyi ve zımba yüzeyleri, sinterleme prosesi esnasında yapışmayı önlemek amacıyla yağlayıcı özelliği olan grafit kağıt ile kaplanmıştır. Kaplanan bu grafit kağıdı MERSEN firması tarafından temin edilmiştir. Grafit kâğıdın kalınlığı 0,20 mm'dir.



Şekil 5.8. Sıcak preste kullanılan a) grafit kalıp ve zımbalar,
b) hem gövde hem de zımbalara serilen grafit kağıtlar

Nihai numune boyutları 20 mm çapında ve 4 mm kalınlığında üretilecek şekilde, karıştırmadan sonra elde edilen tozlar Şekil 5.8'de gösterilen grafit kalıp içerisine dökülmüştür. Sıcak prese yerleştirilen kalıp içindeki tozlar Şekil 5.9'da verilen sinterleme koşullarında yoğunlaştırılmışlardır.



Şekil 5.9. Sıcak pres ile titanyum esaslı malzemelerin üretimi sürecinde kullanılan sıcaklık ve zaman çevrimi

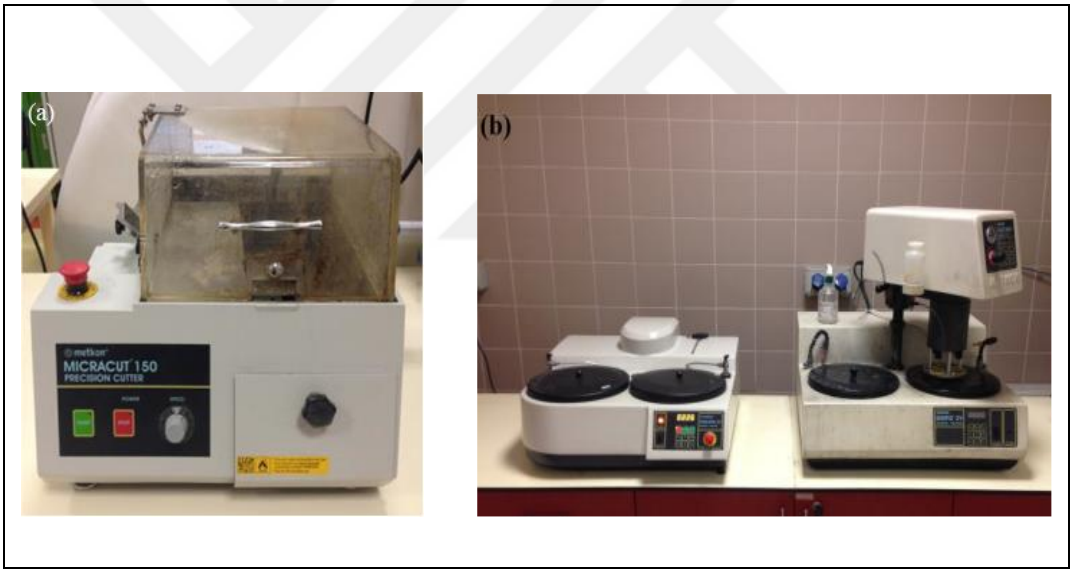
Sinterleme prosesi sıcaklık ve zaman parametreleri aşağıdaki gibidir.

- ✓ Oda sıcaklığından 500 °C'ye kadar ısıtma ve 10 dakika bekleme,
- ✓ 500 °C'den 780 °C'ye kadar ısıtma ve 10 dakika bekleme,
- ✓ 800 °C'den 950'ye kadar ısıtma ve 10 dakika bekleme,
- ✓ 950 °C'den oda sıcaklığına kadar fırın içinde soğutma (10 dakika)

Sıcak pres ile üretim sürecinde tüm proses 10^{-4} mbar vakum atmosferi altında gerçekleştirilmiştir. Sinterleme çevrimine dikkat edildiğinde kademeli bir işleyiş dikkati çekmektedir. Aluminyum elementinin ergime derecesi 660 °C dir. Dolayısıyla alüminyum elementinin alaşım bünyesinde difüzyonuna izin vererek ani sıcaklık yükselmelerinde meydana gelebilecek ergimeyi önlemek ve bu doğrultuda kalıptan sızmaları önlemek amacıyla kademeli olarak sinterleme uygulanmıştır. Nihai sinterleme sıcaklığı olarak 950 °C seçilmiş ve 15 dakika bekleme süresinin arından sıcak pres içinde numune kalıp içinde soğumaya bırakılmıştır.

5.4. Sıcak Pres ile Üretilen Numunelerin Metalografik Hazırlanması

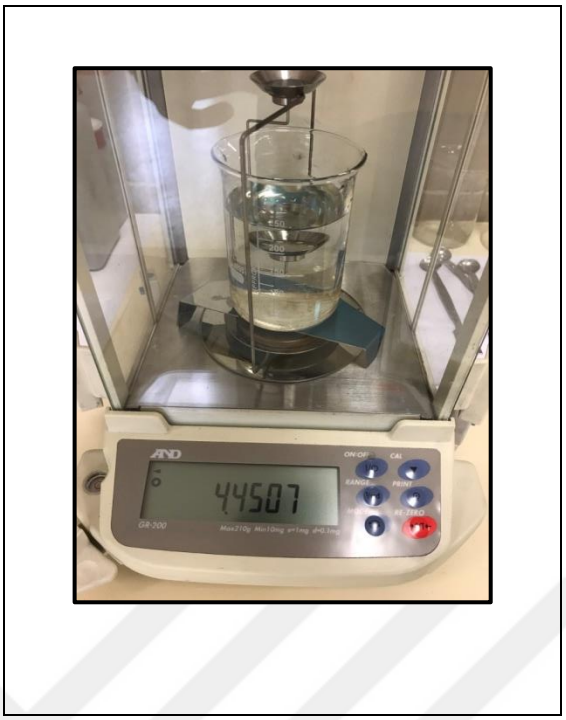
Metalografik işlemelerde sırasıyla zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri uygulanmıştır. Zımparalama işlemi için sırasıyla 600, 1000 ve 2000 gridlik zımparalar kullanılmıştır. Zımparalama işleminden sonra parlatma işlemi uygulanmıştır. Parlatma işleminde sırasıyla 6, 3 ve 1µm'lik elmas pasta kullanılarak numunelerde istenilen parlatma yüzeyleri elde edilmiştir. Mikroskobik incelemeler için numune yüzeyi, 1 saniye kadar pamuk yardımıyla Kroll solüsyonu (10 mL HF, 5 mL HNO_3, 85 mL H_2O) ile dağlama işlemi yapılmıştır. Eğme testinde kullanılmak üzere 4x4x20 mm ölçülerinde, hassas kesme cihazında kesim işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.9 (a)'da kesme işleminin gerçekleştirildiği hassas kesme cihazı, şekil 5.10 (b)'de zımparalama ve parlatma işlemlerinin yapıldığı, zımparalama ve parlatma cihazlarının görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.10. (a) Hassas Kesme cihazı (b) zımparalama ve parlatma cihazı

5.5. Numunelerin Yoğunluklarının Belirlenmesi

Arşimet prensibi ile gerçekleştirilen yoğunluk ölçümleri sırasında AND marka GR-200 model hassas terazi kullanılmıştır. Şekil 5.11'da hassas teraziye ait fotoğraf gösterilmiştir.



Şekil 5.11. AND marka GR-200 model hassas terazi

5.6. Mekanik Testler

5.6.1 Sertlik testleri

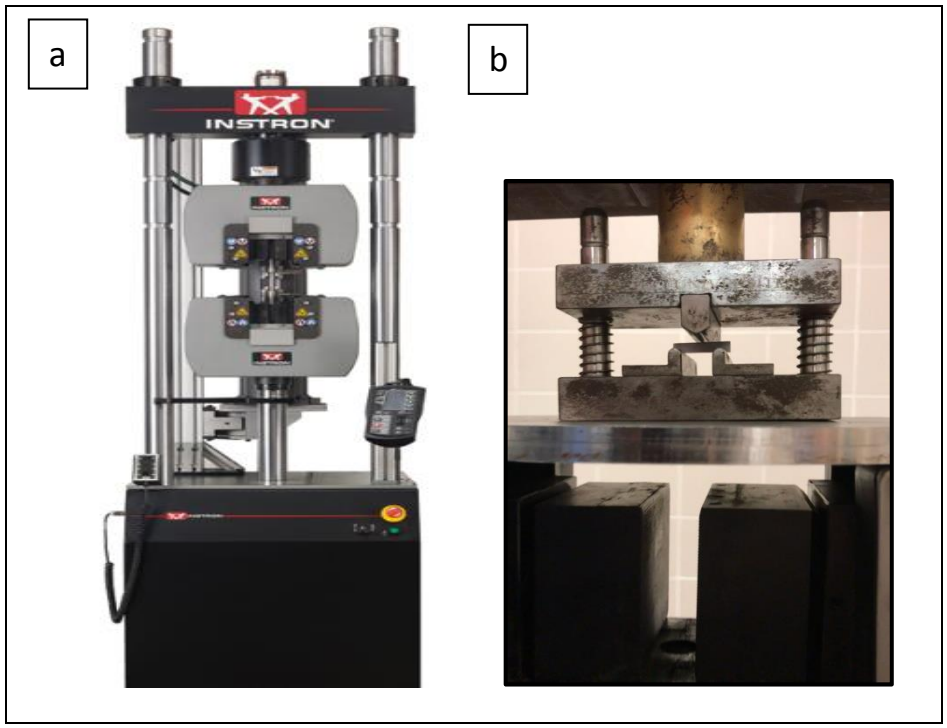
Sertlik ölçüm işlemleri FutureTech marka vickers sertlik ölçüm cihazında, 10 kgf yük altında, 10 saniye sürede gerçekleştirilmiştir. Numune kesitinden 5 faklı yerden yapılan ölçüm sonucunda ortalama değerleri alınarak değerlendirme yapılmıştır. Şekil 5.12'de ölçüm yapılan vickers sertlik cihazında ait fotoğraf gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Future Tech marka vickers sertlik ölçüm cihazı[66]

5.6.2 Eğme testi

Eğme testleri Instron marka çekme test cihazında yapılmıştır. Cihazda basma yönüne kuvvet oluşturulmasıyla özel olarak bir fikstür ile gerçekleştirilmiştir. Bu fikstür üç nokta eğme şeklinde olup çene ilerleme hızı 0,5 mm/dk. olarak tercih edilmiştir. Şekil 5.13'de çekme test cihazına ait fotoğraf gösterilmiştir.



Şekil 5.13. a) Instron marka çekme test cihazı[67], b) eğme test düzeneği

5.7. Mikroyapısal Karakterizasyon

JEOL JSM-6060 (Şekil 5.14) marka taramaları elektron mikroskobu ile deneyde kullanılan tozlar ve numunelerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri alınmıştır. Tabakalı üretilen malzemelerin EDX analizi aynı cihaz yardımı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.14. JEOL JSM-6060 marka taramaları elektron mikroskobu

Ayrıca elde edilen numunelerin incelenmesinde Olympus BX41M-LED marka optik mikroskop cihazından yararlanılmıştır (Şekil 5.15).

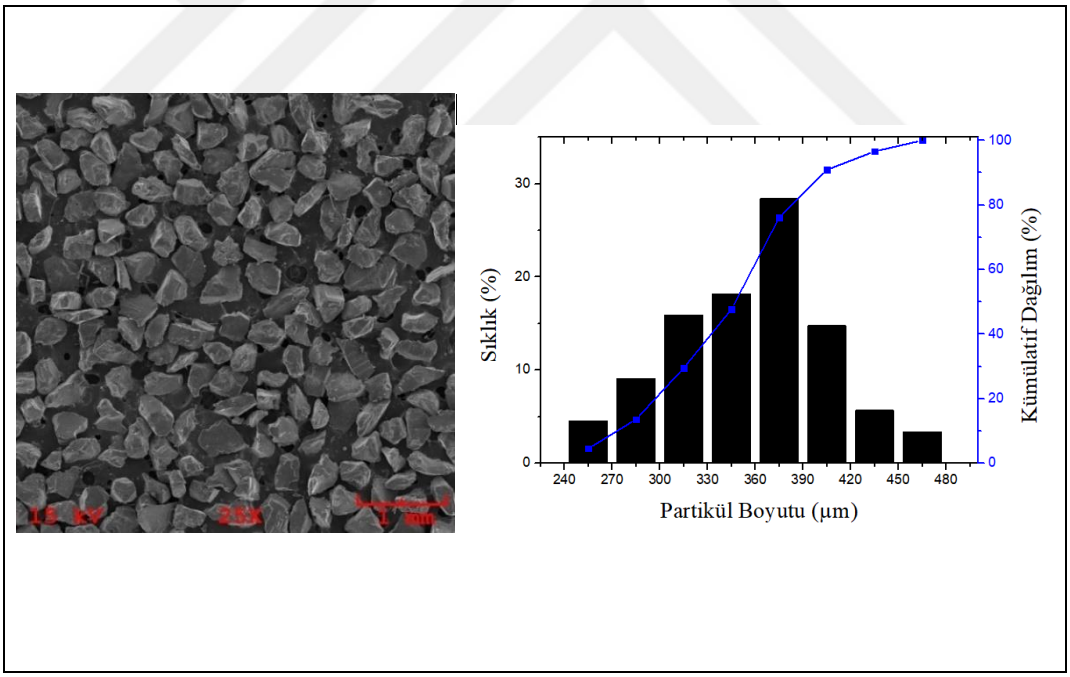


Şekil 5.15. Olympus marka, BX41M-LED model ışık mikroskop

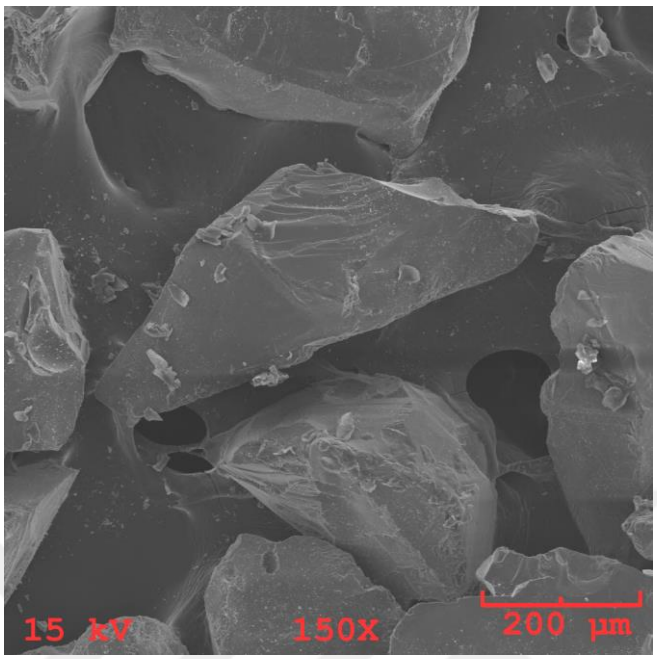
İki farklı titanyum esaslı malzemenin tez kapsamında toz metalurjik proseslerden birisi olan sıcak pres ile üretiminin ardından katı partikül erozif aşınma testleri uygulanmıştır. Bu noktadan itibaren katı partikül erozyon testi ile ilgili malzeme ve metot bilgileri sunulacaktır.

5.8. Aşındırıcı Partikül Malzemesi

Deneysel çalışmalar sırasında aşındırıcı partikül olarak kullanılan beyaz alüminyum oksit 60 mesh partikül boyutuna sahiptir. Alüminyum oksit aşındırıcı partiküller Fetaş Metalürji A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Alüminyum oksit aşındırıcılar ile ilgili 4. bölümde detaylı şekilde bahsedilmiştir. Şekil 5.16 ve 5.17'de deneysel çalışmalarda kullanılan 60 mesh partikül boyutuna sahip beyaz alüminyum oksit aşındırıcı partiküllerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri gösterilmiştir. Görüntülerin incelemesi yapıldığında 4. bölümde de bahsedildiği gibi alüminyum oksit aşındırıcıların keskin köşeli şekillerde olduğu görülmektedir.

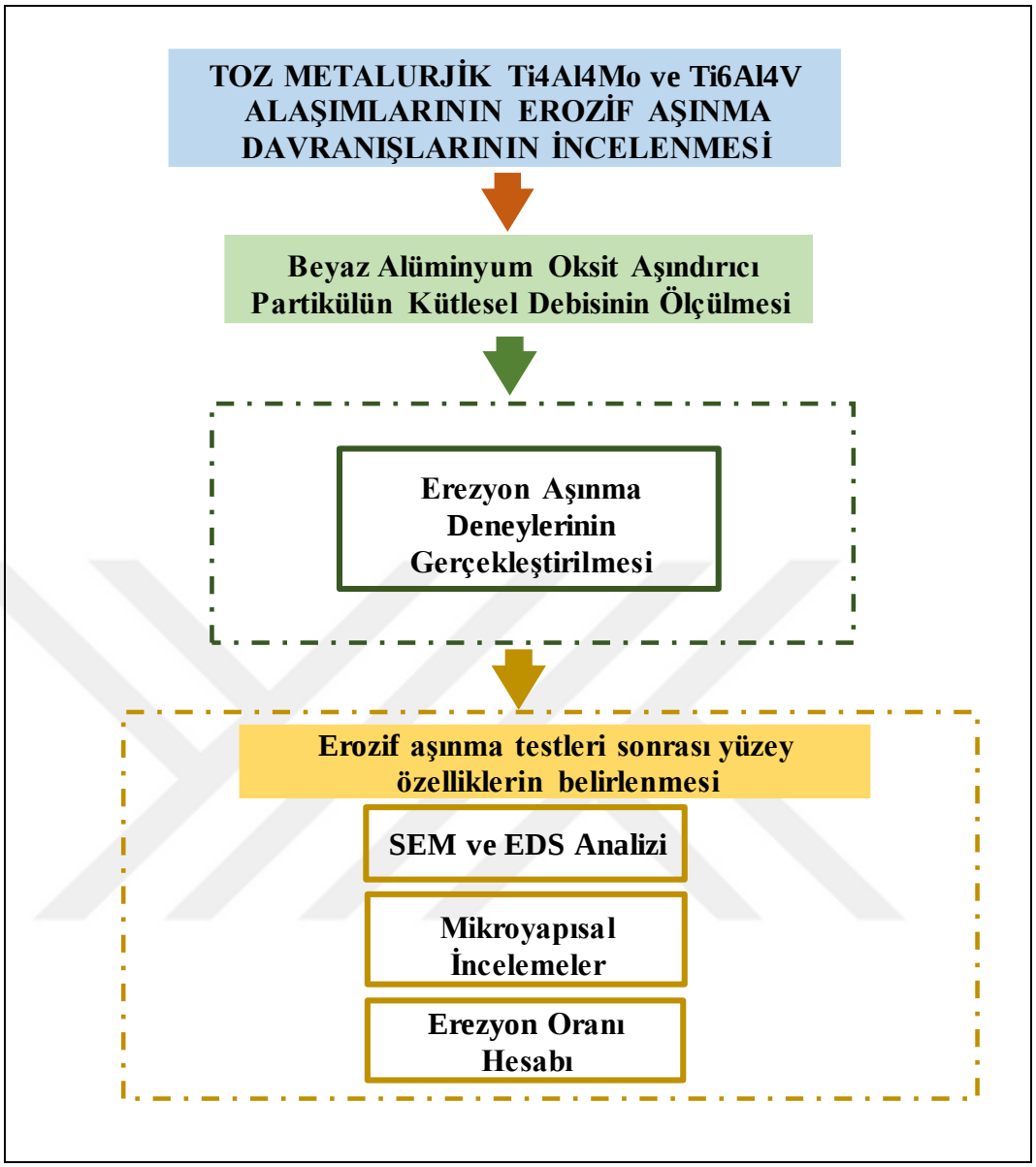


Şekil 5.16. 60 mesh partikül boyutunda aşındırıcı beyaz alüminyum oksitlerin x25 büyütmede taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı



Şekil 5.17. 60 mesh partikül boyutunda aşındırıcı beyaz alüminyum oksitlerin x150 büyütmede taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafı

Bu tez çalışmasında, erozif aşınma ile ilgili deneysel çalışmalar Şekil 5.18'te gösterilen akış şemasında gösterildiği gibi sırasıyla uygulanmıştır. Akış şemasında gösterilen yöntemlerde, uygulamanın nasıl yapıldığı bu bölümde detaylı olarak anlatılmıştır. Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan cihaz ve ekipmanlar akış şemasında gösterilen yöntemlerin anlatıldığı bölümlerde verilmiştir.



Şekil 5.18. Tez çalışması esnasında erozif aşınma çalışmalarının akış şeması

5.9. Alüminyum Oksit Aşındırıcı Partikülün Debisinin Hesaplanması

Tez çalışmasında kullanılan alüminyum oksit aşındırıcılar, 1,5 ve 3 bar olmak üzere iki farklı basınçta hızlandılıp bu basınçlarda beyaz alüminyum oksit aşındırıcı partiküllerin kütlesel debileri ölçülmüştür. Daha sonrasında elde edilen debi değerleri, sıcak pres yöntemiyle üretilmiş toz metalurjik Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V alaşımlarının 60 mesh partikül boyutunda olan beyaz alüminyum oksit ile aşındırılması sonucunda erozyon oranlarının hesaplanmasında değerlendirilmiştir.

Erozyon oranlarının hesabında kullanılan, beyaz alüminyum oksit aşındırıcı partiküllerin kütlesel debilerinin ölçümü için 1,5 ve 3 bar püskürtme basınçlarında 30

saniye boyunca püskürtme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu süre zarfında sarf edilen aşındırıcı partiküllerin kütlesinin, püskürtme süresine bölünmesiyle 60 mesh partikül boyutu ve 1,5 ve 3, bar basınç değerleri için kütlesel debi hesabı yapılmıştır. Tablo 5.1'de aşındırıcı Partiküllerin kütlesel debilerinin hesaplanması için yapılan deneylerin sonuçları gösterilmiştir. Tablo 5.1 incelendiğinde partikül boyutu ve basınç arttıkça kütlesel debinin de arttığı sonucu çıkartılabilmektedir.

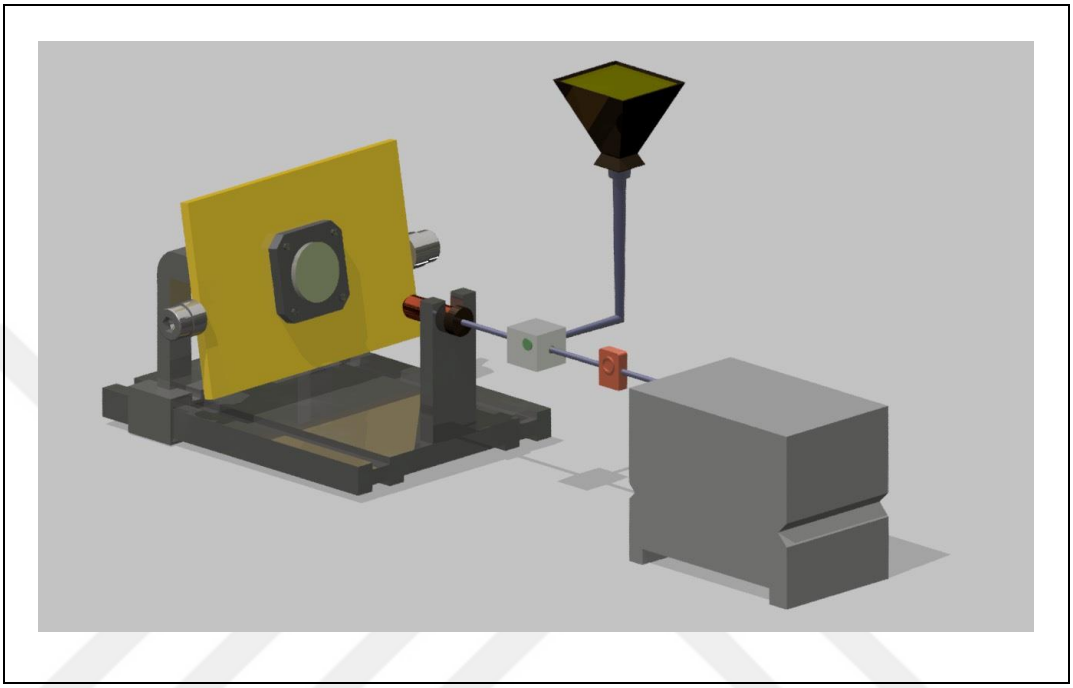
Tablo 5.1. Aşındırıcı Partiküllerin kütlesel debilerinin hesaplanması için yapılan deneylerin sonuçları

No	Aşındırıcı Partikül Boyutu (mesh)	Püskürtme Basınç (Bar)	Kullanılan Aşındırıcı Miktarı (g)	Süre (s)	Hesaplanan Kütlesel Debi (g/s)
1	60	1,5	194,7	30	6,49
2	60	3	296,5	30	9,88

5.10. Katı Partikül Erozif Aşınma Deneyleri

Erozif aşınması deney çalışmaları özel olarak tasarlanıp üretilen erozif aşınma test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Bu test düzeneği; basınçlı hava tankı, erozif aşındırma kabini, numune boyutlarına uygun olarak tasarlanmış ve üretilmiş numune fikstürü, basınçlı hava kompresörü ve erozif aşındırma tabancası ekipmanlarından meydana gelmektedir. Kabin içerisine sabitlenen erozif aşındırma tabancası dış bölümde yer alan bir ayak pedalı ile kontrol edilebilmektedir. Erozif aşındırma basıncı ise kabin gövdesinde bulunan basınç regülatörü ile ayarlanmaktadır. Erozif kabininin içine numuneyi sabitlemek ve numune yüzeyine istenilen açılarda beyaz alüminyum oksit aşındırıcı partiküllerin püskürtülmesini sağlayan numune boyutlarına uygun özel numune fikstürü yerleştirilmiştir. Bu düzenekle birlikte erozif aşınma kabini içerisine 90° (dik olarak) sabitlenen erozif aşınma tabancası, numunenin 360° dönebilen fikstürün hareketi ile numune yüzeyine istenilen açılarda beyaz alüminyum oksit aşındırıcı partikülleri püskürtülebilmektedir. Fikstür düzeneğinde istenilen açı ayarı, bir açı terazisi ile deney başlamadan önce ayarlanabilmektedir. Erozif aşınma işlemleri

esnasında numuneler, bu fikstür kullanılarak 10 mm lik hazırlanmış bir mastar yardımıyla, erozif aşınma tabancası ucu ile numune yüzeyi arasındaki mesafe 10mm olarak yerleştirilmiştir. Şekil 5.18'de özel olarak tasarlanıp üretilen erozif aşınma test düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 5.19. Katı partikül erozif aşınma test düzeneği

Şekil 5.19'de gösterilen test düzeneğinde sıcak pres yöntemiyle üretilen toz metalurjik Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V alaşımları 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° aşındırıcı partikül çarpma açılarında, farklı hızlarda, 1,5 ve 3 bar püskürtme basınçlarında, 60 mesh boyutunda beyaz alüminyum oksit minerali kullanılarak erozif aşınma işlemi geçekleştirilmiştir.

Tablo 5.2. Erozif Aşınma deneylerinde kullanılan malzeme ve parametreler

Aşındırıcı Cinsi	Beyaz Alüminyum Oksit
Aşındırılacak Malzeme Cinsi	Toz Metalurjik Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V Alaşımları
Numune Yüzeyine Partikülün Çarpım Açısı	30°, 45°, 60°, 75°, 90°
Aşındırıcı Partikül basınçları	1,5 bar, 3 bar
Aşındırıcı Partikül Çarpma Hızları	30, 60 m/s
Test Sıcaklığı	25 °C
Nozul Çapı	5 mm
Nozul uzunluğu	50 mm
Nozul ve Numune Arasındaki Mesafe	10 mm

Deney çalışmalarında 10 adet toz metalurjik Ti4Al4Mo ve 4 adet Ti6Al4V toz metalurjik alaşım olmak üzere toplam 14 adet numune kullanılmıştır. Numunelerin her iki yüzeyi, farklı parametreler uygulanarak, ayrı olarak katı partikül erozif aşınma test düzeneğinde aşınmaya tabi tutulmuştur. Aşınma testine başlamadan önce, numunenin hassas terazide tarım işlemi gerçekleştirmiştir. Aşınma testinin ardından numune yüzeyine hava uygulanarak tartım işleminin hassasiyetini arttırmak amaçlanmıştır. Yüzeye uygulanan hava işleminin ardından numune tekrar hassas terazide tartılarak kütle kaybı verileri elde edilmiştir. Şekil 5.20'de deneylerde kullanılan hassas terazi gösterilmiştir.



Şekil 5.20. Shimadzu Atx 224 Model 220 gr kapasiteli hassas terazi[68]

Aşındırılan her yüzey işlemi için ayrı ayrı tartım işlemi yapılarak tüm deneyler için toz metalurjik Ti4Al4Mo ve toz metalurjik Ti6Al4V alaşımlarının erozyon oranı hesabı gerçekleştirilmiştir.

Erozyon oranı; katı partikül erozyonu sonrasında aşınan numunede kütle kaybının, kaybın meydana gelmesini sağlayan toplam aşındırıcı partikül kütlesine oranı olarak tanımlanabilmektedir. Farklı basınçlarda aşındırılan numunelerde aynı aşınma süresinde yüzeye çarpan partikül miktarının (kütle) değişim göstereceği kesindir. Malzemelerin erozyon miktarları, erozyona sebep veren aşındırıcı partikül kütlesinden bağımsız şekilde hesaplanması gerekmektedir. Malzemelerin erozyon davranışları değerlendirilirken birim aşındırıcının meydana getirdiği erozyon miktarı hesaplanmalıdır. Böylelikle parametrelerden bağımsız şekilde malzemelerin erozyon davranışları karşılaştırılarak değerlendirilebilmektedir. Deneylerin sonuçları erozyon oranına göre hesaplanmıştır. Erozyon Oranı Denklemi (5.1)'de gösterilmiştir.

$$E=\frac{\Delta m_s}{m_e} \tag{5.1}$$

E = Erozyon Oranı (gr/gr),

Δm_s = Örnek Numune Kütle kaybı (gr),

m_e = Aşındırıcı kütlesi (gr)' dir.

Bu çalışmada birbirinden farklı paramereler kullanılarak, aşındırılan numune yüzeylerinin derinlemesine inceleme işlemi şekil 5.14'de görülen taramalı elektron mikroskobunda (SEM) gerçekleştirilmiştir. Numune yüzeylerinden EDS analizleri yapılarak farklı modlarda ve farklı büyütmelerle görüntüler elde edilmiştir. Taramalı elektron çalışmaları, malzemelerde oluşturulan erozif aşınmaların incelenmesinde önemli bir yere sahiptir. Numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda, erozif aşınma mekanizmalarının detaylandırılması ve incelenmesi yapılmıştır. Dolayısıyla birçok farklı parametrelerle Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V toz metalurjik alaşımlarına erozif aşınma davranışlarına etkilerinin anlaşılabilmesi ve aşınan malzemelerde yüzey morfoloji değişimleri, bu kapsamda malzemelerde belirlenen erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi için detaylı şekilde SEM çalışması yapılmıştır. Malzeme yüzeyinde farklı açılarda oluşturulan aşınmaların fotoğrafları alınıp, yüzey bölgesine batan partiküller, enerji dağılım spektrometresi (EDS) analiz yöntemiyle detaylı şekilde incelenmiştir.

Tez çalışması kapsamında, bütün bu çalışmaların sonuçları değerlendirilerek, Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V toz metalurjik alaşımlarının erozif aşınma davaranışları yorumlanmıştır. Özellikle farklı açılarda ve parametrelerde aşındırılan yüzeylerin fotoğrafları özgünlük kazanmıştır. Bu görüntülerle birlikte EDS analiz sonuçları da eklenerek malzemelerin erozif aşınma davranışlarının karakterizasyonu elektron mikroskobisi ile incelemeleri kapsamında farklı bir bakış açısı meydana getirilmiştir. Hazırlanan numunelere ait önemli özellikler tablo 5.3'de gösterilmiştir.

Tablo 5.3. Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V alaşımlarının önemli özellikleri

Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V Alaşımlarının Önemli özellikleri		
Fiziksel Özellikler	Ti4Al4Mo	Ti6Al4V
Yoğunluk (gr/cm^3)	4,65	4,41
Mekanik Özellikler		
Vicker Sertlik (HV10)	371	404
Eğme Mukavemeti (MPa)	1100	2150
Elastisite Modülü (GPa)	119	113
Proses Özellikleri		
Sinterleme Sıcaklığı (°C)	950	950
Kimyasal Kompozisyon		
Ti (%)	92	90
Al (%)	4	6
Mo (%)	4	-
V (%)	-	4

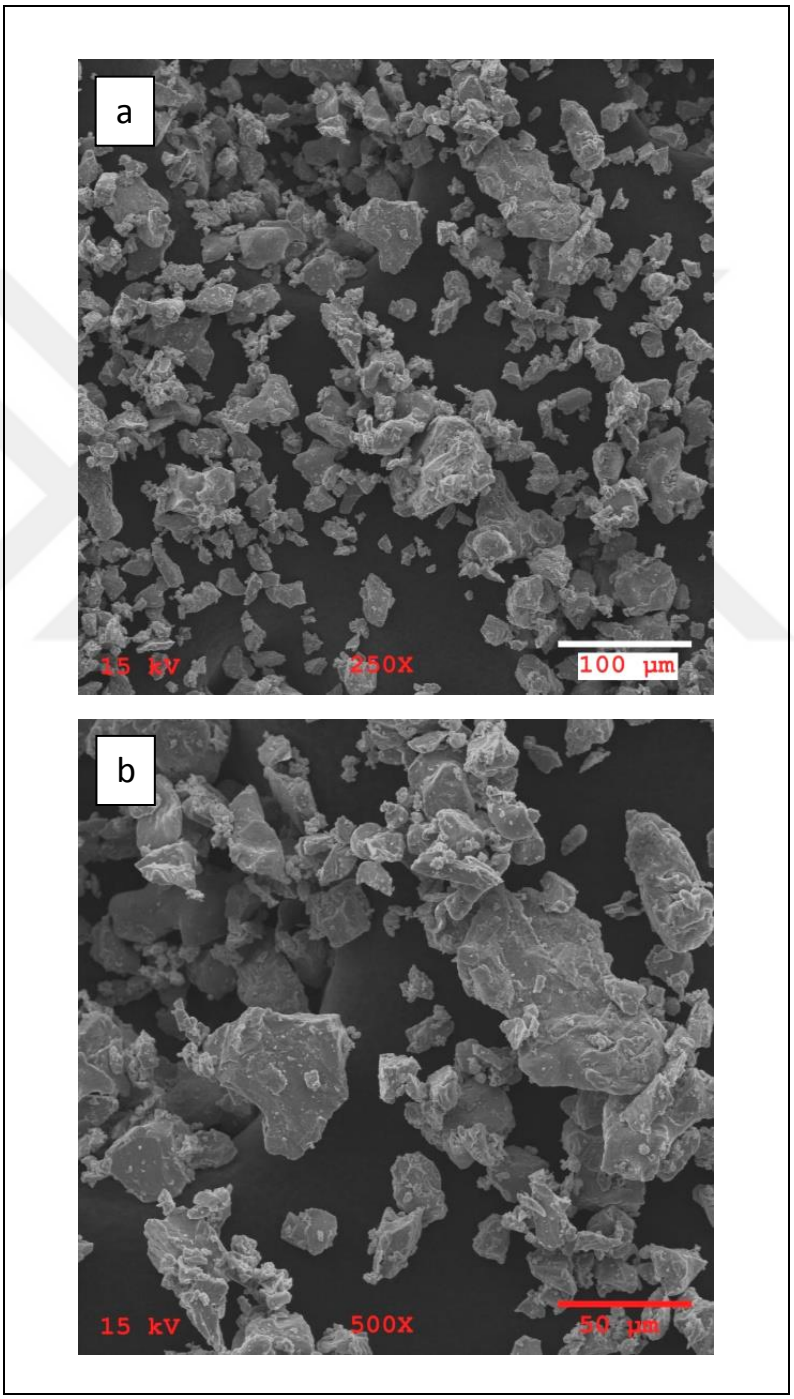
6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının ilk bölümünü daha önce belirtildiği gibi iki farklı kompozisyona sahip titanyum esaslı malzemelerin üretimi oluşturmaktadır. Molibden esaslı titanyum alaşımlarının havacılık sektöründe kullanımına yönelik araştırmalarda son yıllarda dikkati çeken bir artış olmuştur. Bu doğrultuda seçilen Ti4Al4Mo alaşımı tez kapsamında elementel tozlardan hazırlanarak sıcak pres cihazı ile üretilmiştir. Karşılaştırma amacıyla çalışmada ön alaşımlı Ti6Al4V alaşımı en yaygın kullanılan titanyum alaşımı olması sebebiyle referans teşkil etmesi açısından tez kapsamına dahil edilmiştir.

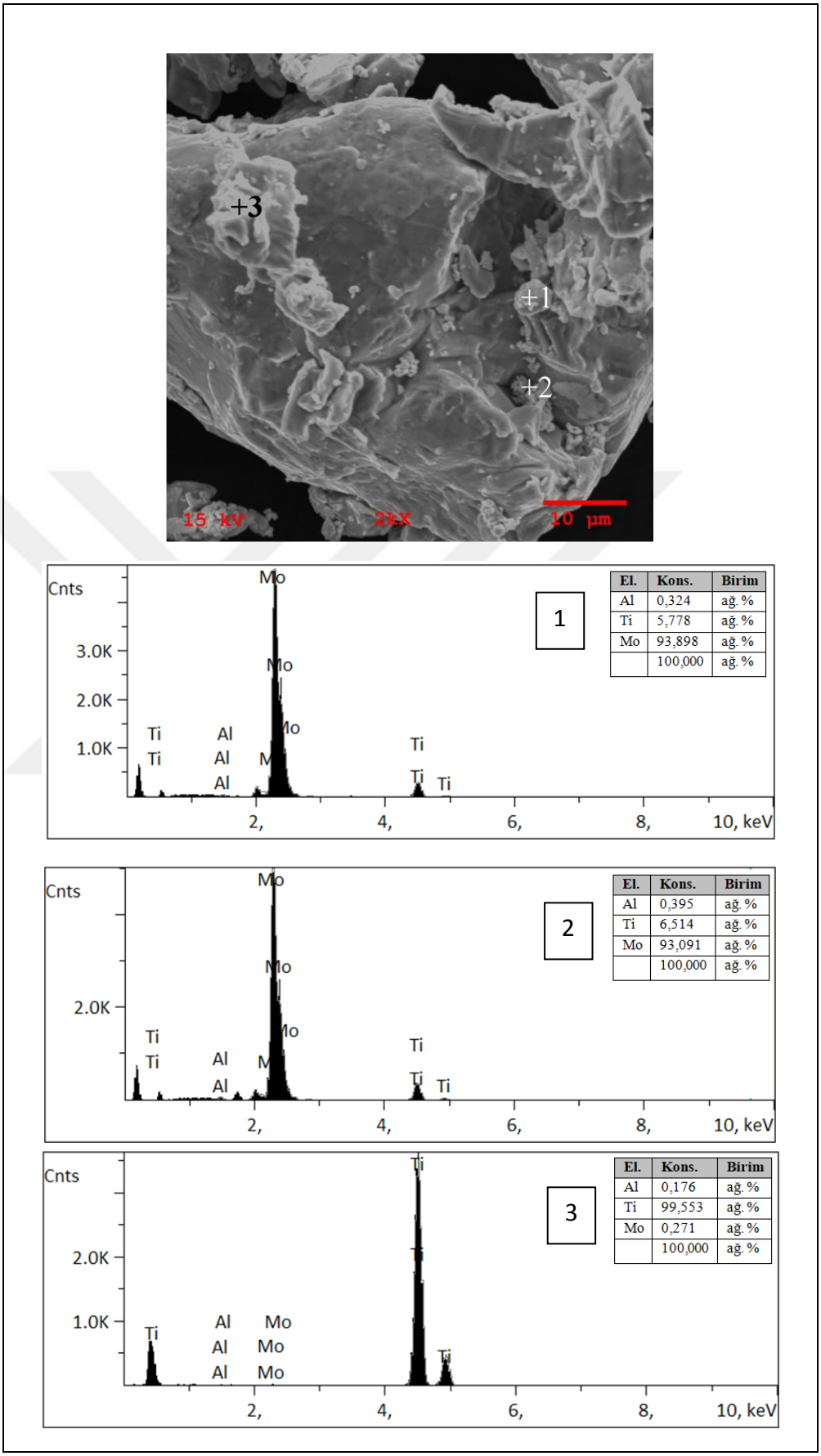
Tozların boyut ve şekilleri ile ilgili açıklamalar önceki bölümde verilmiştir. Ti4Al4Mo alaşımının hazırlanması sürecinde homojen bir karışım elde edilmesi açısından ilk önce titanyum ve molibden tozları yarım saat süre ile bilyeli değirmende karıştırılmıştır. Burada amaç titanyuma göre oldukça ince boyuta sahip olan molibden partiküllerinin yapıda homojen dağılımlarının sağlanmasıdır. Ardından elde edilen karışıma alüminyum tozları ilave edilerek 2 saat daha karıştırma işlemi devam ettirilmiştir. Alüminyum tozlarının kaba boyuta sahip olması ve alüminyumun bilyelerle karıştırma sırasında deforme olması kırılmaması nedeniyle bu süre Ti-Mo karışımına göre daha uzun tutulmuştur. Ayrıca alüminyumun düşük ergime sıcaklığı sayesinde sinterleme sırasında zaten sıvı faz oluşumu meydana gelecek ve kompakt içinde alüminyumun dağılımı homojen bir şekilde elde edilecektir.

Bilyeli değirmende karıştırma sonrası tozların çekilmiş SEM görüntüleri Şekil 6.1'de verilmiştir. Her bir partikülün yukarıdaki bölümde verilen görüntüleri doğrultusunda boyut ve şekiller göz önünde tutulduğunda makro ölçekte homojen bir dağılım olduğu söylenebilir. Mikro ölçekte partiküllerin birbiri ile etkileşimi açısından yapılan analizlerde etkili bir şekilde dağılım sağlandığı görülmüştür. Şekil 6.2'de bir alüminyum partikül üzerinde yapılan EDX analizi sonuçları SEM görüntüsü ile birlikte verilişitir. EDX analizi sonrası özellikle ince boyutlu molibdenin alüminyum

üzerinde oldukça fazla bir miktar tutunduğu görülmüştür. Ayrıca 3 numaralı nokta analizinde büyük boyutlu bir titanyum partikülünden kopan küçük boyutlu bir titanyum parçasının da alüminyum partkül yüzeyinde tutunduğu görülmektedir. Titanyum ile molibdenin ilk olarak beraber karıştırılmasının bir sonucu olarak molibdenin bulunduğu bölgelerde aynı zamanda titanyumda gözükmektedir.

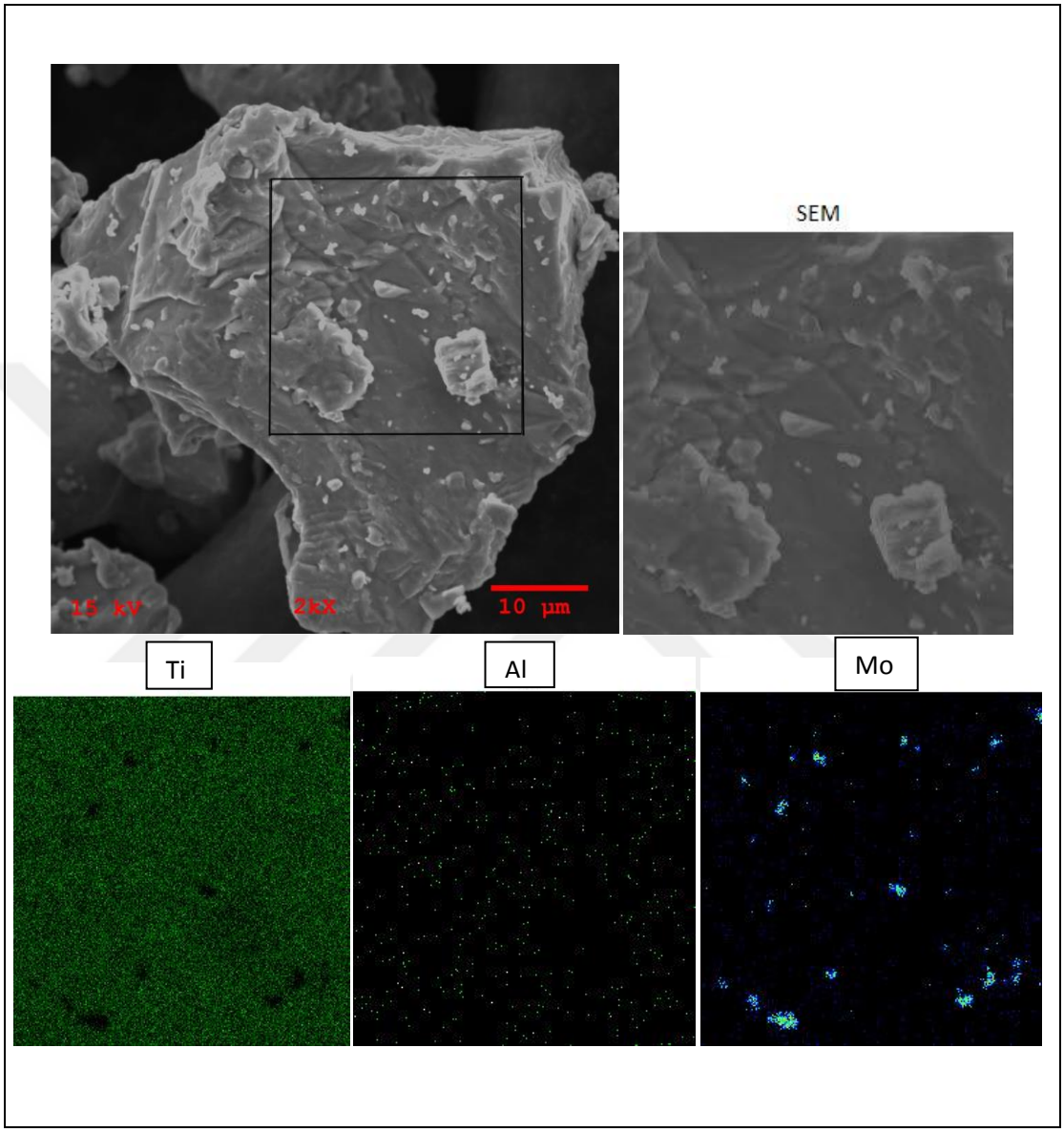


Şekil 6.1. Mekanik karıştırma sonrası tozların SEM görüntüsü, a)250X, b)500X



Şekil 6.2. Mekanik karıştırma sonrası bir Al partikülü üzerinde EDX analizleri

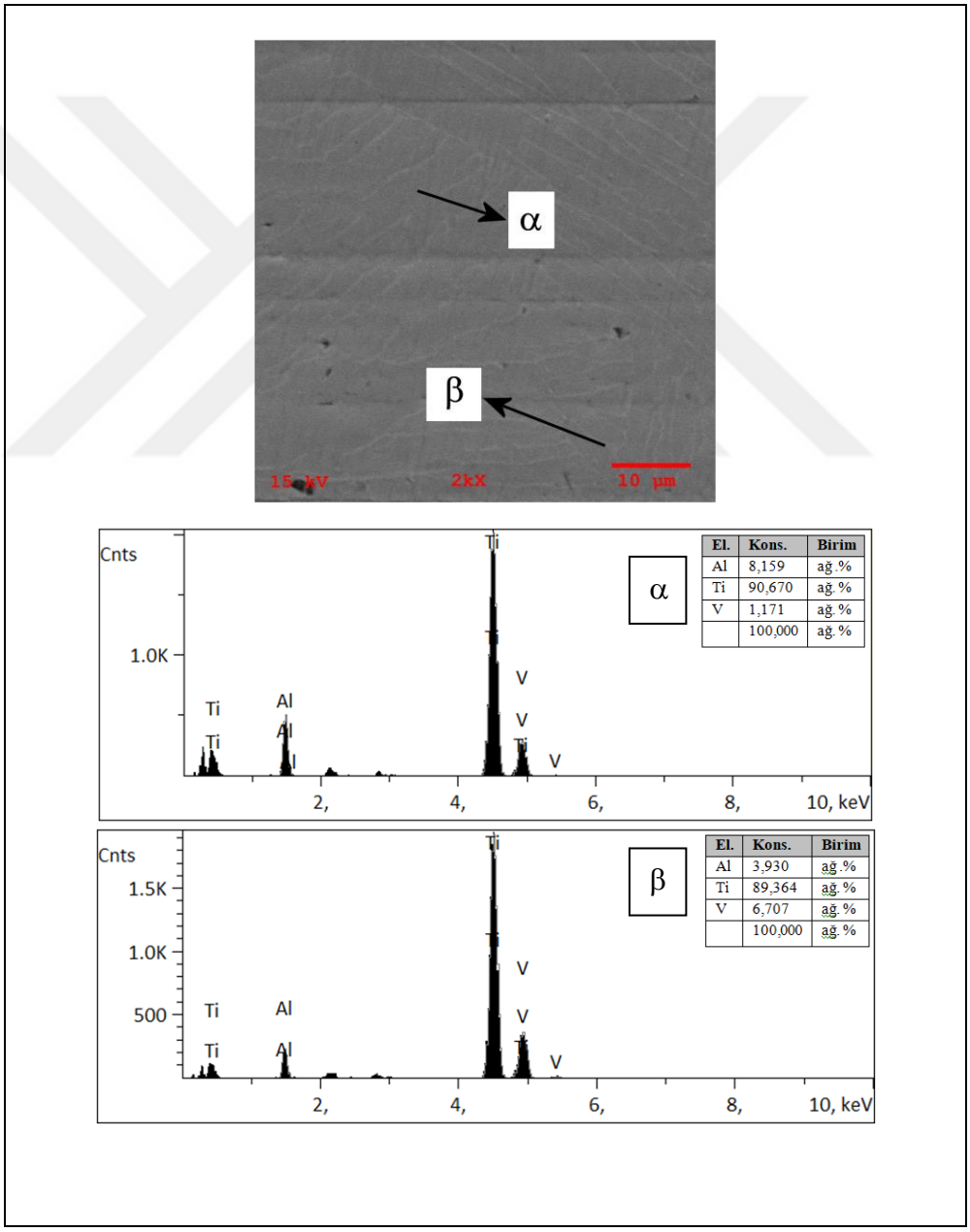
Benzer şekilde karıştırma sonrası bir titanyum partikülü üzerinde yapılan EDX haritalama analizinin görüntüsü Şekil 6.3'de verilmiştir. Yapılan haritalama analizi sonrasında karıştırma işlemi ile homojen bir dağılım elde edildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.3. Mekanik karıştırma sonrası bir Ti partikülü üzerinde EDX haritalama analizi

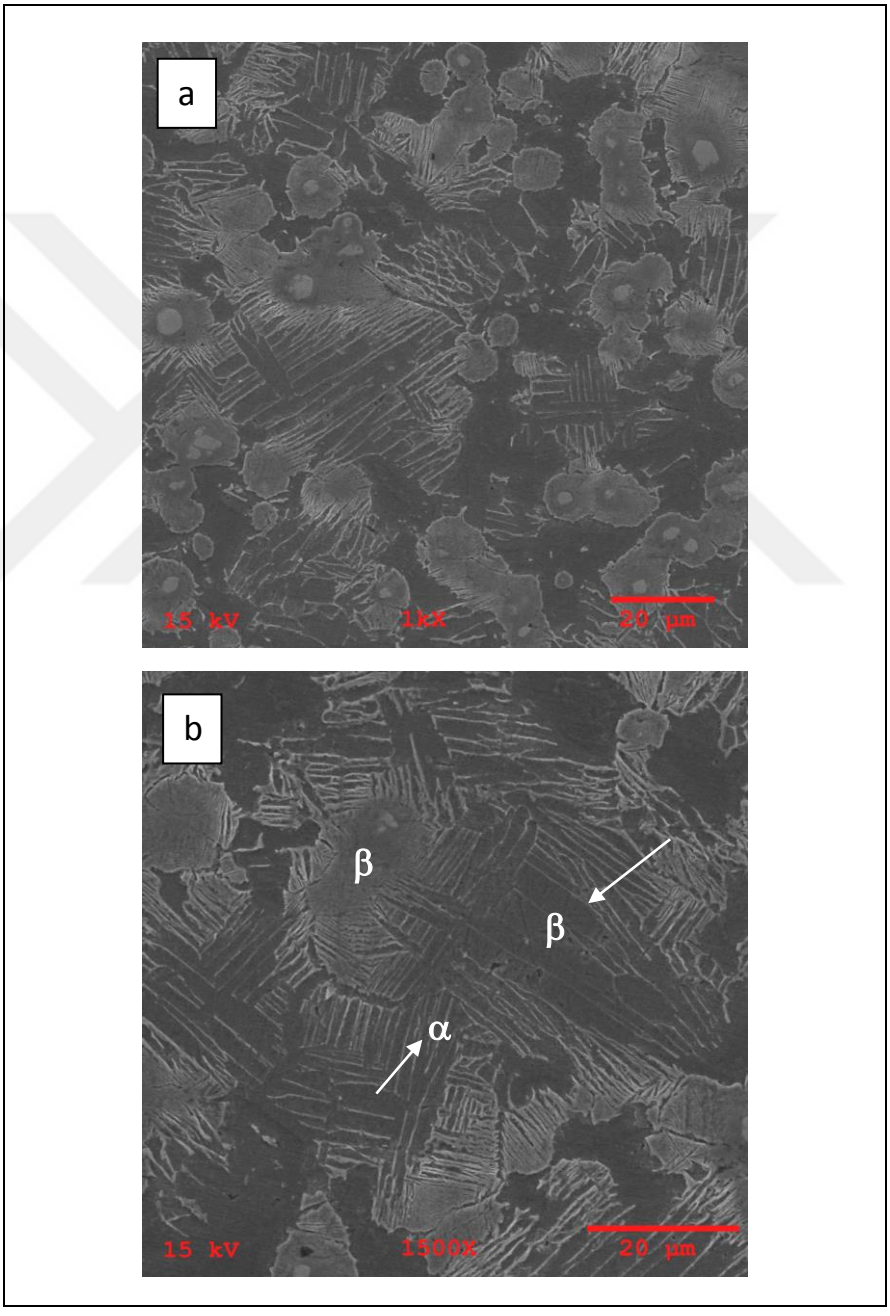
Toz karışımlarının homojen bir şekilde hazırlanmasının ardından sıcak pres ile sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ti6Al4V alaşımı için %97,3, Ti4Al4Mo alaşımı için ise %98 yoğunluk değeri elde edilmiştir. Elde edilen numuneler metalografik olarak hazırlamanın ardından Kroll ayracı ile dağlanmıştır. Şekil 6.4'de sıcak pres ile üretilen Ti6Al4V alaşımının dağlanmış konumdaki SEM mikroskop görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüsünden Ti6Al4V alaşımının tipik α+β yapısı dikkati çekmektedir. Titanyum esaslı malzemelerde mikroyapı elementlerin faz

dönüşümlerindeki etkileri üzerinden belirlenir. Ti6Al4V alaşımındaki alüminyum α stabilizer, vanadyum ise β stabilizerdir. Bu doğrultuda ortaya çıkan mikroyapı uzamış α plakaları arasında bulunan β lamellerinden oluşur. SEM görüntüsünde koyu bölgeler α, bunlar arasındaki açık kontrastlı bölgeler ise β fazını işaret etmektedir. SEM ile görüntülemenin ardından EDX analizi ile α ve β fazlarının kompozisyonu tanımlanmıştır. Şekil 6.4'de Ti6Al4V alaşımının farklı bölgelerden alınan EDX analizi sonuçları verilmiştir. Analiz için alınan bölgeler Şekil 6.4 üzerinde verilen α ve β bölgelerine aittir.



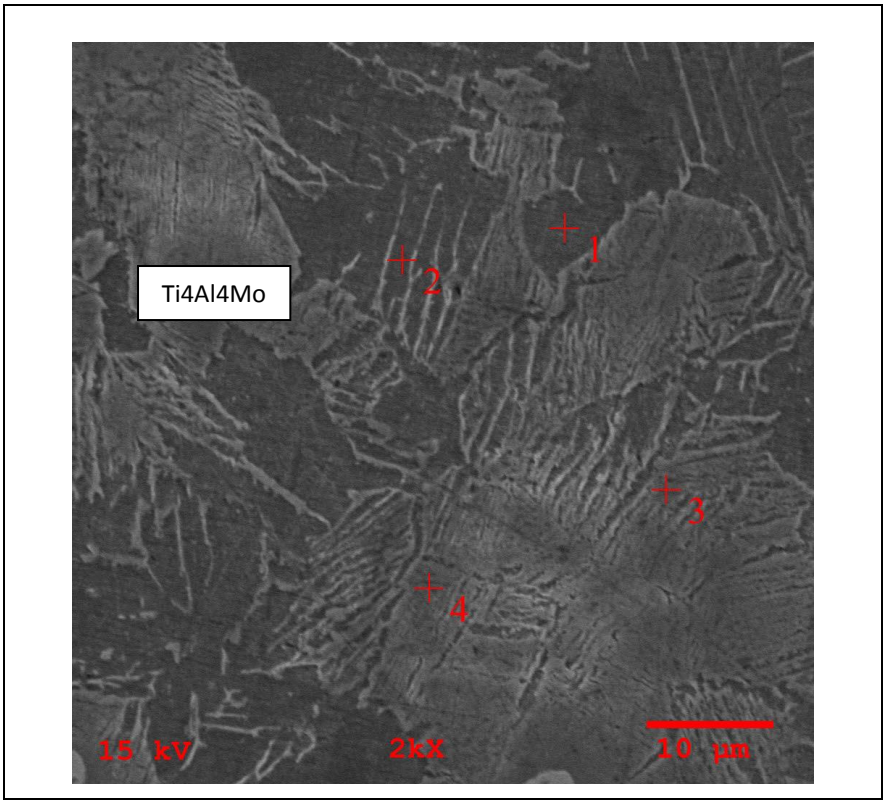
Şekil 6.4. Sıcak pres ile üretilen Ti6Al4V alaşımının mikroyapısının SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları

Referans olarak çalışmaya dahil edilen Ti6Al4V alaşımı tozları ön alaşımlı oldukları için bu alaşımın kendine has mikroyapısı ile karşılaşılmıştır. Yapılan EDX analizleri ve mikroyapı incelemeleri bunu destekler niteliktedir. Özellikle elementel tozların karışımından oluşan Ti4Al4Mo alaşımının mikroyapısı ise elementlerin homojen dağılmasının önemli bir fonksiyonu olarak yapıda etki edecektir. Sıcak pres ile elde edilen Ti4Al4Mo alaşımın SEM görüntüsü Şekil 6.5'de verilmiştir.

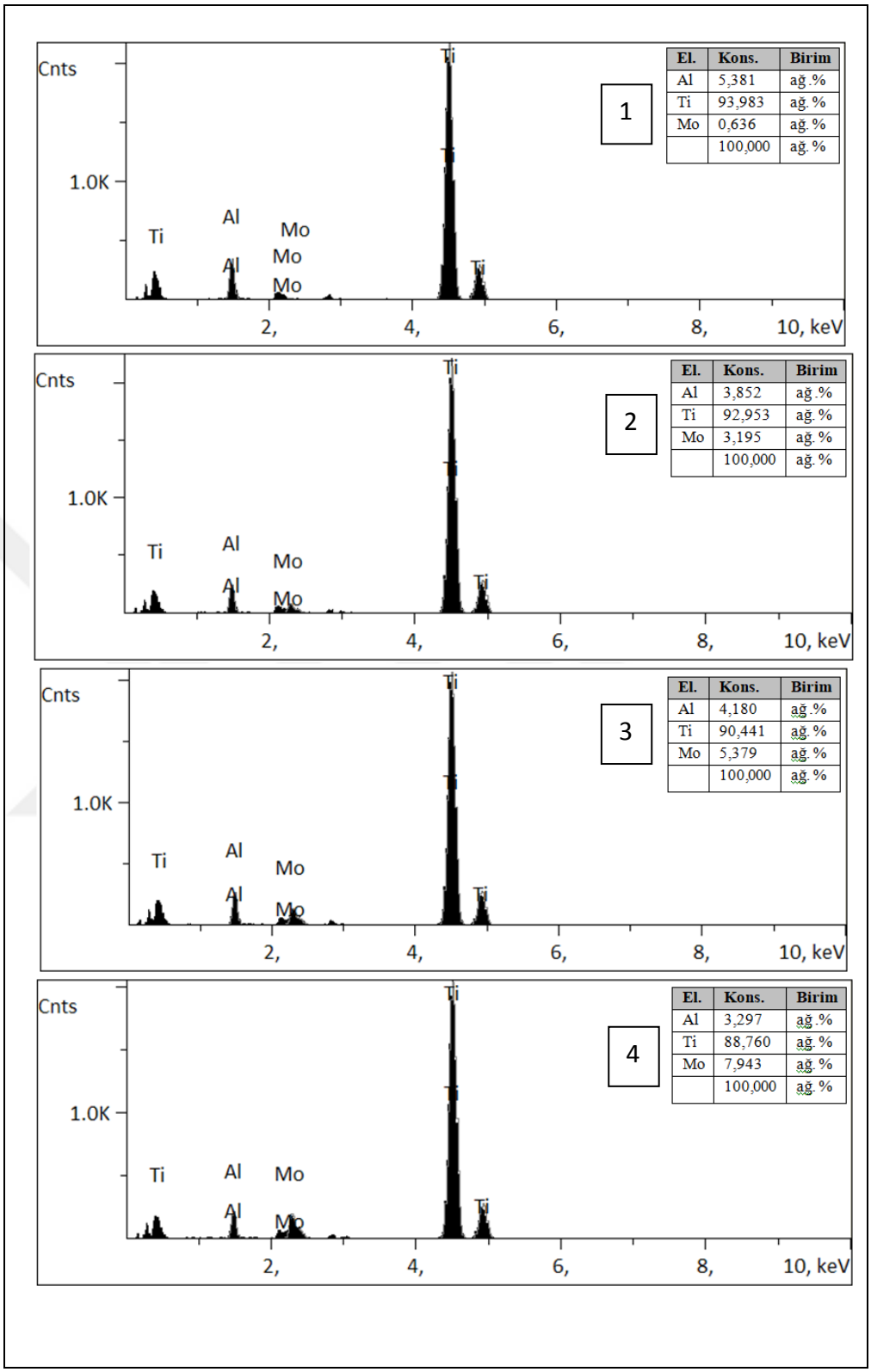


Şekil 6.5. Tez kapsamında üretilen Ti4Al4Mo alaşımının SEM görüntüleri, a) 1000X, b) 1500X büyütme ile

Molibden vanadyum gibi bir β stabilize edici elementtir. Vanadyuma göre daha yoğun β karakteristiği ortaya koymaktadır. Dolayısıyla beklenen mikroyapı alüminyum içeriğini de dikate alarak α+β kombinasyonu olacaktır. Alaşım elementel tozlardan oluşturulduğu için yapıda Mo element dağılımı ile mikroyapı karakterize edilir. Ayrıca alüminyumun titanyum ile reaksiyonu, α fazının oluşumunu destekleyecektir. Bu doğrultuda Şekil 6.5'de düşük ve yüksek büyütmede verilen mikroyapılarla açıklanabilir. Yüksek büyütmede verilen görüntüde net bir şekilde görüldüğü gibi mikroyapı genel olarak β yoğun bölgelerden ve α+β lamelli yapısından oluşmaktadır. Sinterleme sonrası sıcak pres içinde soğuma nedeniyle yapıdaki α lar oldukça kabadır. Molibdenin içyapıda dağılımı ve bu doğrultuda mikroyapı üzerindeki etkisi Şekil 6.6'da verilen SEM görüntüsü ile net bir şekilde anlaşılabilmektedir. Saf titanyumun α yapısı alüminyum içeriği ile stabilize olmakta, artan molibden içeriği ile yapı β fazına dönmektedir. Mikroyapıdan bu ilişki kaba α yapısından ince iğne yapısında β yapısına dönüş şeklinde kendini göstermektedir. Artan Mo içeriği ile yoğunlaşan β iğneleri ile yoğun bölgeler dikkati çekmektedir. Şekil 6.6'da SEM görüntüsü üzerinde verilen 1 ve 2 nolu bölgeler α, 3 ve 4 nolu bölgeler ise β fazlarını temsil etmektedir. Bahsedilen bölgelere ait EDX analiz sonuçları Şekil 6.7'de verilmiştir.

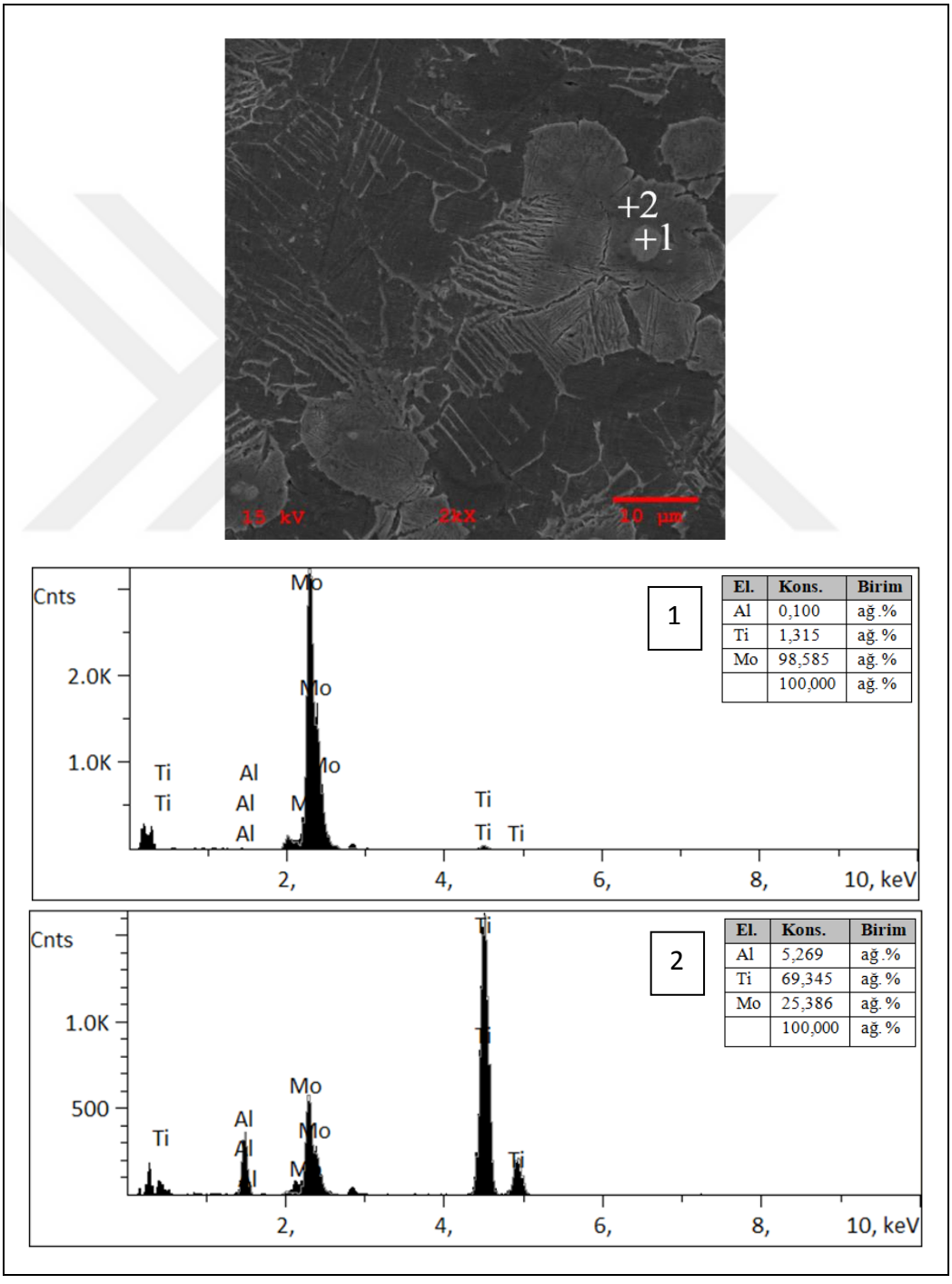


Şekil 6.6. Ti4Al4Mo alaşımının mikroyapısının SEM görüntüsü



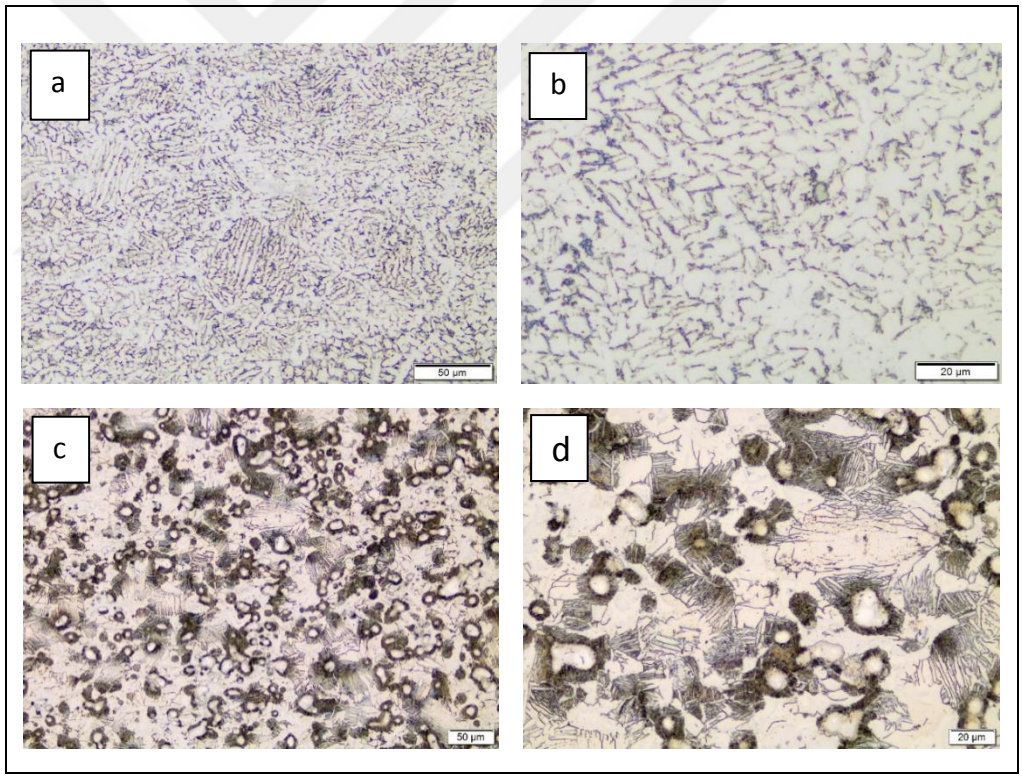
Şekil 6.7. Şekil 6.6'da verilen 4 farklı bölgenin EDX analizleri

Ti4Al4Mo alaşımına ait mikroyapılar incelendiğinde mikroyapıda yuvarlak hatlı bölgeler dikkati çekmektedir. Bu bölgeler tam olarak çözünmemiş molibden bölgeleridir. Bu bölgelere ait SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları Şekil 6.8'de verilmiştir. Açık kontraslı bölgedeki yoğun molibden içeriği dikkati çekmektedir. Molibden çözündükçe kademeli olarak yoğun intermetalik içeren bölgeden β bölgelerine bir geçiş söz konusudur. EDX analizleri bu sonuçları destekler niteliktedir.



Şekil 6.8. Yoğun Mo içeren bölgelerin SEM görüntüsü ve EDX analizleri

Şekil 6.9'da Ti6Al4V ve Ti4Al4Mo numuenlerinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri gösterilmiştir. Şekil 6.9 a ve b'de Ti6Al4V alaşımının içerisinde eş eksenli ve lokal uzamış α taneleri gözükmektedir. Bu bölgelerin arasında kalan koyu kontrasttaki kısımlar ise β bölgeleri olarak tarif edilmektedir. Mikroyapıda oluşan bu yapı farklılıkları alaşım içerisindeki α ve β stabilizer elementlerin bileşiminden kaynaklanmaktadır. Şekil 6.9 c ve d ise Ti4Al4Mo alaşımının iç yapısının 20x ve 50x büyütmedeki görüntüleri gösterilmiştir. Yapı içerisindeki açık kontrastlı, yuvarlak hatlı beyaz bölgelerin dönüşümünü tamamlayamamış Mo olduğu daha önce yapılan EDX analizi ile açıklanmıştır. Şekilden de gözüktüğü gibi Mo civarında oluşan iğnemsi yapılar β fazının yoğun olduğu bölgelerdir. Bunun dışında Ti içerisindeki Al soğuma hızına bağlı olarak iğnesel ve kaba α plakaları da içyapıda gözlenmiş, ayrıca bölgesel widmanstatten yapılarının da oluştuğu gözlenmiştir.

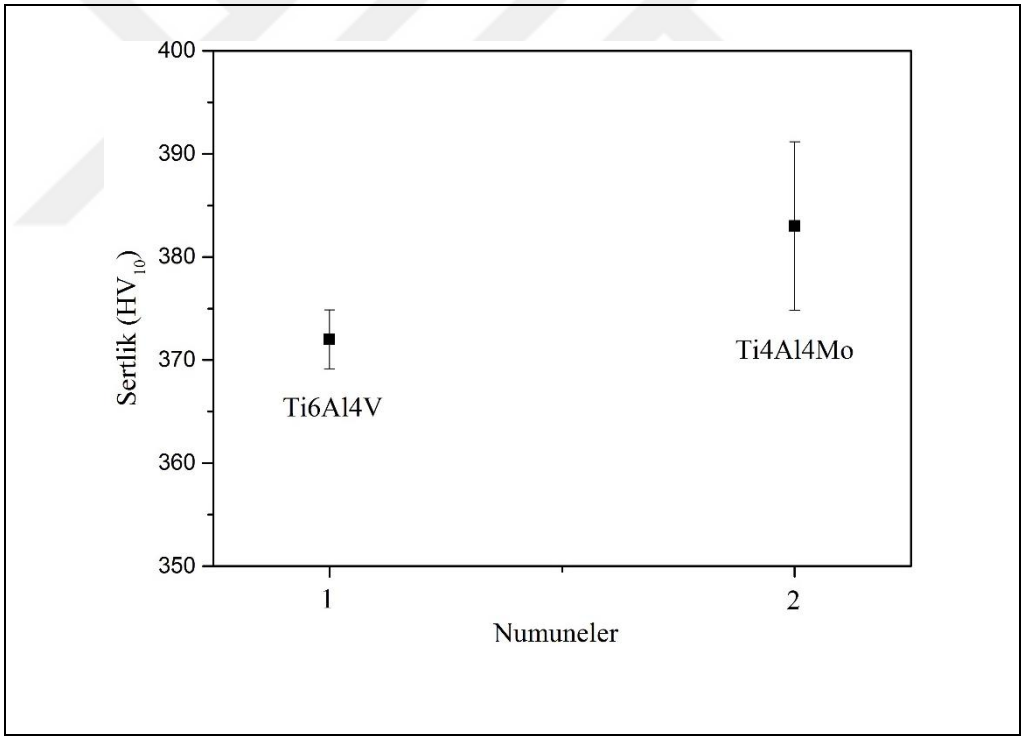


Şekil 6.9. Ti6Al4V alaşımının a) 20x ve b) 50x büyütmedeki görüntüsü; Ti4Al4Mo alaşımının c) 20x ve d) 50 x büyütmedeki görüntüsü

6.1. Mekanik Testler

6.1.1 Sertlik testi sonuçları

Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V numunelerinin yüzeyleri üzerinde farklı bölgelerden alınan 3'er sertlik testi ile elde edilen sonuçlar Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Ti6Al4V numunesinin ortalama sertlik değeri 372 HV olarak, Ti4Al4Mo numunesinden elde edilen ortalama sertlik değeri ise 383 HV olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak elde edilen sertlik değeri referans numunesine göre artma göstermiştir. Daha önce açıklandığı gibi Ti4Al4Mo alaşımı içerisinde dönüşümü tamamlanmamış Mo içeriği söz konusudur. Bu alaşımda gözlenen sertlik değerindeki artışın sebebinin de yapının içerisinde oluşan intermetalik fazların olduğu düşünülmektedir. Ön alaşımlı Ti6Al4V alaşımının faz yapısı ise daha homojen dağılmış bir katı çözelti şeklinde olup, intermetalik fazların çok fazla gözlenmediği, bir yapıya sahiptir.

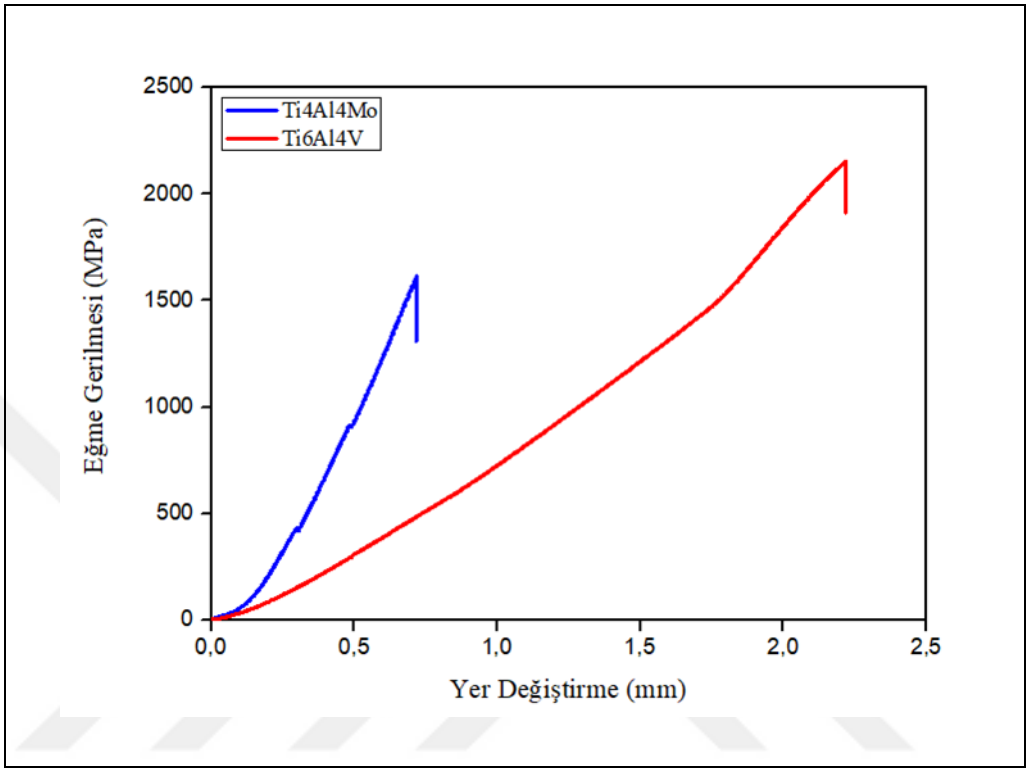


Şekil 6.10. Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V numunelerinin ortalama sertlik değerleri

6.1.2 Eğme testi sonuçları

Şekil 6.11'de Ti6Al4V ve Ti4Al4Mo numunelerine ait eğme gerilmesi-yer değiştirme diyagramı gösterilmiştir. Elde edilen diyagrama göre Ti6Al4V numunesinin eğme mukavemeti değeri yaklaşık 2100 MPa olarak ölçülmüştür. Ti4Al4Mo numunesi ise nispeten düşük bir değer vermiş ve yaklaşık 1600 MPa eğme mukavemeti ölçülmüştür.

Eğme mukavemetindeki bu azalışa paralel olarak yer değiştirme miktarında da bir azalış yaşanmıştır. Ti6Al4V numunesi yaklaşık 2 mm uzama sergilerken Ti4Al4Mo numunesi ise 0,6 mm uzama sergilemiştir.



Şekil 6.11. Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V numunelerine ait eğme gerilmesi sonuçları

Şekil 6.11'deki grafik incelendiğinde, Ti4Al4Mo numunesine ait eğme mukavemeti, Ti6Al4V numunesi eğme mukavemetine göre daha düşük bir değerde olduğu görülmektedir. Yapılan testlerin sonucunda Ti4Al4Mo numunesi eğme mukavemet değeri; 1620 MPa, Ti6Al4V numunesi eğme mukavemet değeri; 2160 MPa olarak ölçülmüştür. Burada Ti6Al4V numunesi yaklaşık %35 daha iyi eğme mukavemetine sahiptir.

6.2. Aşındırıcı Partiküllere Ait Kütlesel Debilerin Hesaplanması

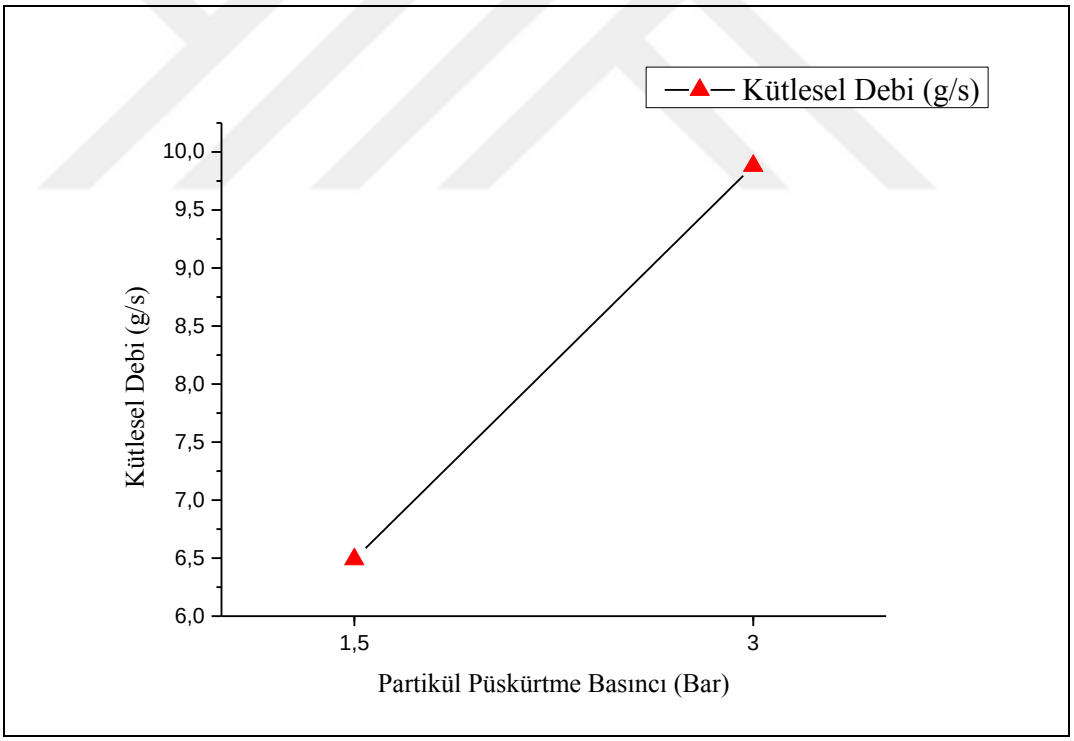
Daneysel çalışmaların başlangıcında 60 mesh partikül boyutuna sahip alüminyum oksit partiküllerin farklı basınçlarda kütlesel debileri hesaplanmıştır.

Tablo 6.1. 1,5 ve 3 bar püskürtme basınçlarında aşındırıcı partiküllerin kütlesel debileri

	Tartım 1 (g)	Tartım 2 (g)	Tartım 3 (g)	Tartım fark 1 (g)	Tartım fark 2 (g)	Ortalama Ağırlık (g)	Debi (g/s)
1,5 Bar, 30 sn, 60 mesh	2618,79	2417,12	2229,39	201,67	187,73	194,70	6,49
3 Bar, 30 sn, 60 mesh	3211,81	2900,44	2618,78	311,37	281,66	296,52	9,88

Tablo 6.1'de 60 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcıların kütlesel debilerinin hesaplanması için gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar verilmiştir.

Tablo verileri incelendiğinde, partikül püskürtme basıncının artmasıyla birlikte kütlesel debinin arttığı görülmektedir. Bu da, püskürtme basıncın artmasıyla, birim zamanda püskürtülen katı partikül miktarının artmasını göstermektedir.



Şekil 6.12. 30 saniye boyunca, farklı basınçlardaki 60 mesh aşındırıcı partikül boyutundaki kütlesel debi

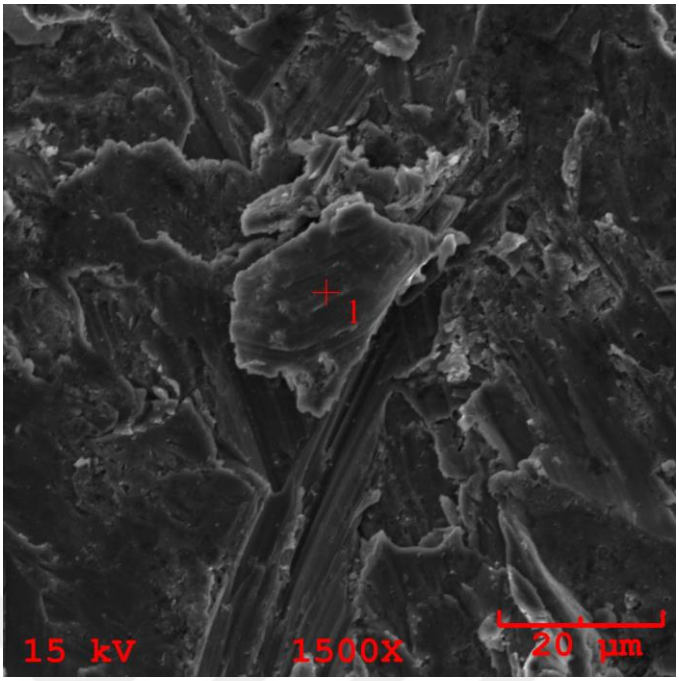
Şekil 6.12'de 60 mesh boyutundaki aşındırıcı partikülün, 30 saniye boyunca püskürtülen ve 1,5 ve 3 bardaki püskürtme basıncındaki kütlesel debi verilerinin grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde, püskürtme basıncının artmasıyla kayda

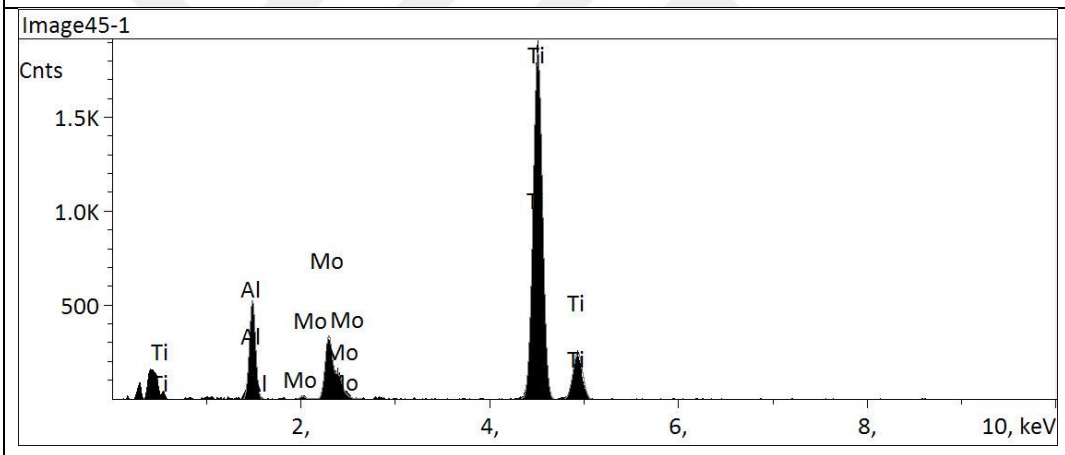
değer oranda kütlesel debinin de arttığı görülmektedir. Bu da, birim zamanda püskürtülen aşındırıcı partikülün basıncı artmasıyla, püskürtülen katı partikül miktarının artmasını ispatlar niteliktedir.

6.3. Element Analizlerinin İncelenmesi

Bu bölümde farklı parametreler uygulanarak aşındırılmış, Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V numunelerine ait element analizleri incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskubu (SEM) ve enerji dağılım spektrometresi yardımıyla elementel analizler yapılmıştır. Fotoğraflarla birlikte farklı parametrelerle aşındırılmış numunelere ait elementel analiz verileri de gösterilmiştir. Numunelere ait SEM fotoğrafları, elementel analiz yapılan bölge hakkında fikir oluşturması amacı ile verilmiştir.

Fazların daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla aşındırılmış numunelerdeki yüzeylerde EDS analizleri yapılmıştır.

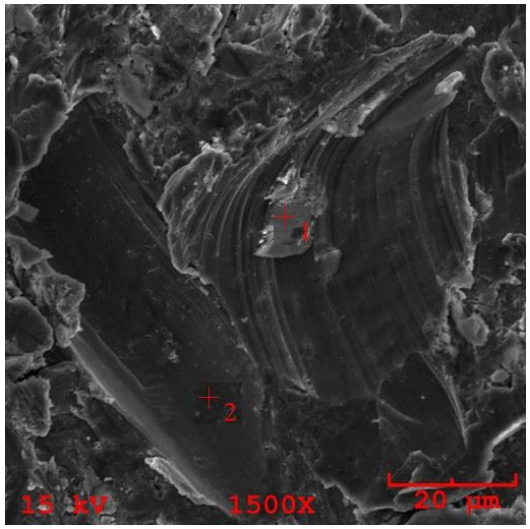


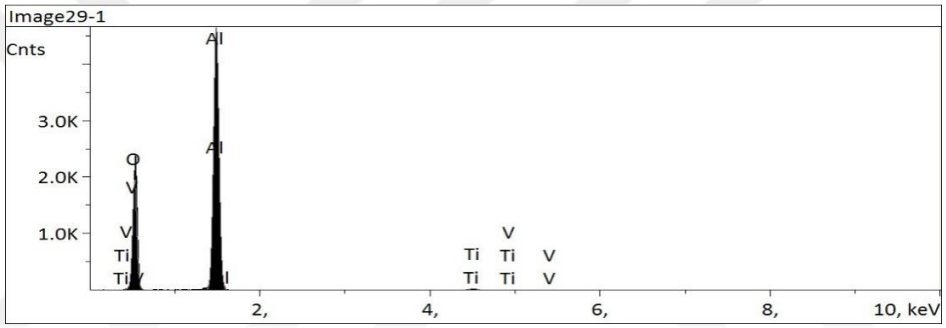


+1 Noktasındaki EDS grafiği

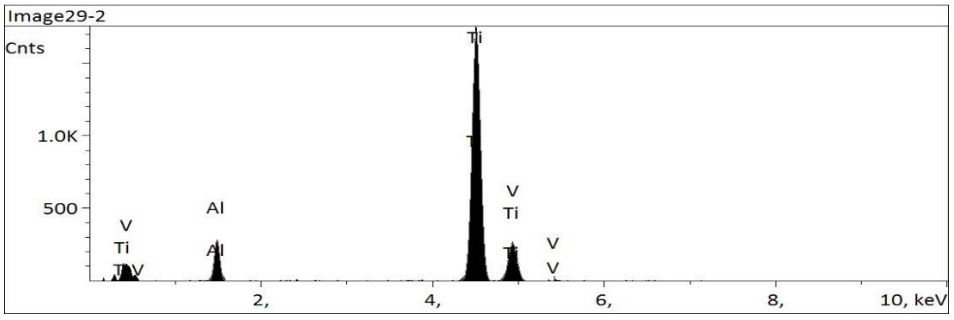
Element	Kütlesel %	Atomik %
Alüminyum (Al)	7,544	13,562
Titanyum (Ti)	78,178	79,220
Molibden (Mo)	14,279	7,219

Şekil 6.13. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesi EDS analizi.(çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 3 bar)





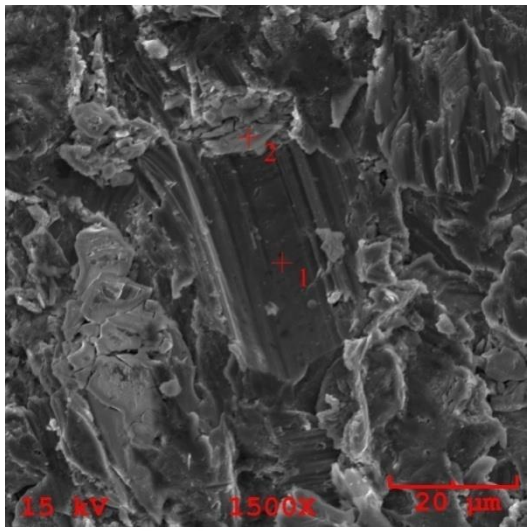
+1 Noktasındaki EDS grafiği

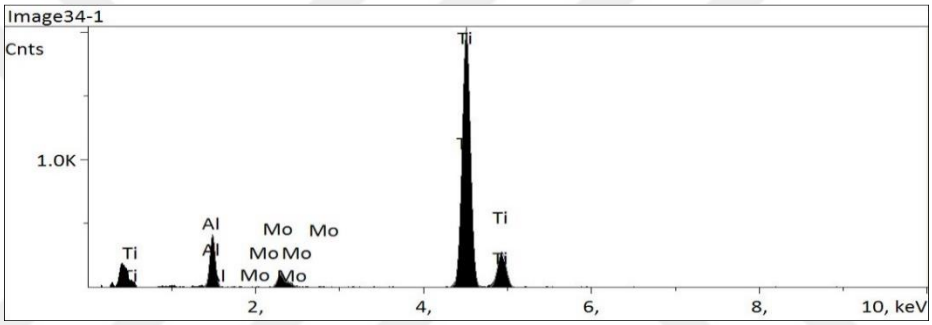


+2 Noktasındaki EDS grafiği

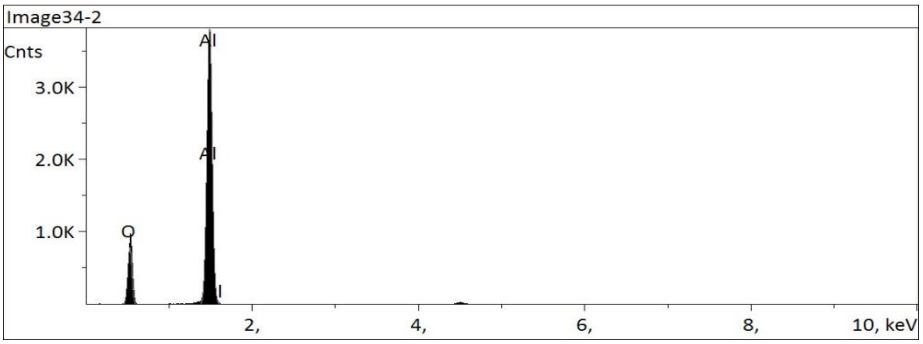
Element	**Kütlesel %**		**Atomik %**	
Oksijen (O)	42,776		56,057	
Alüminyum (Al)	**+1**	55,676	**+1**	43,266
	+2	5,446	**+2**	9,281
Vanadyum (V)	1,951		1,761	
Titanyum (T)	92,603		88,958	

Şekil 6.14. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesi EDS analizi.(Çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 3 bar)





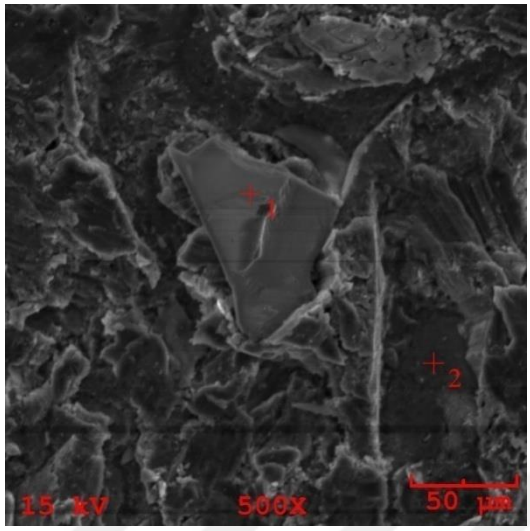
+1 Noktasındaki EDS grafiği

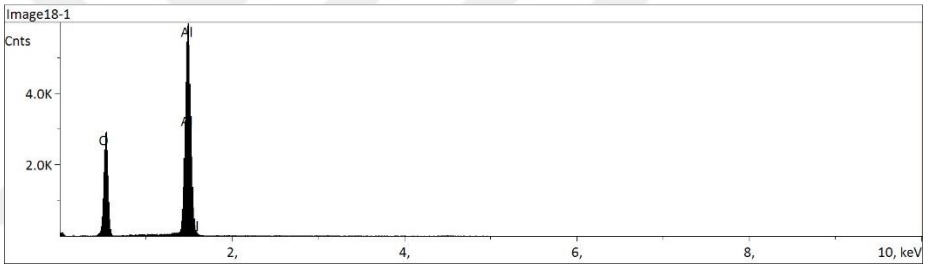


+2 Noktasındaki EDS grafiği

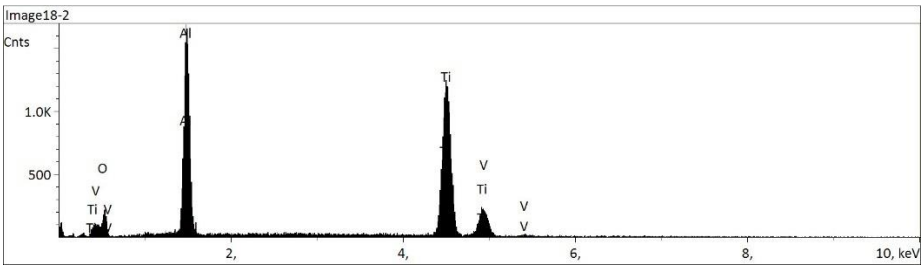
Element	**Kütlesel %**		**Atomik %**	
Oksijen (O)	30,233		42,223	
Alüminyum (Al)	**+1**	6,424	**+1**	11,067
	+2	69,767	**+2**	57,777
Molibden (Mo)	3,991		1,934	
Titanyum (T)	89,586		86,999	

Şekil 6.15. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesi EDS analizi. (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 1,5 bar)





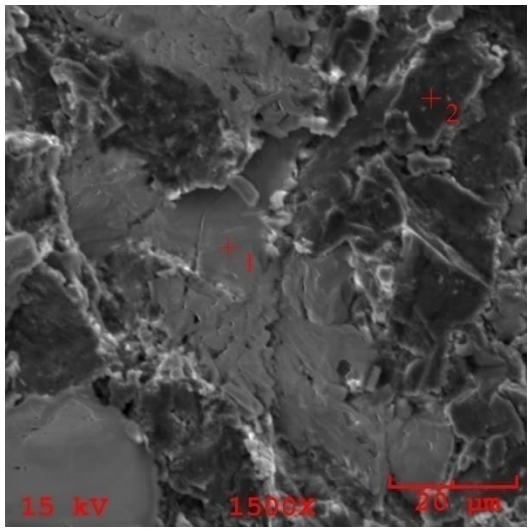
+1 Noktasındaki EDS grafiği

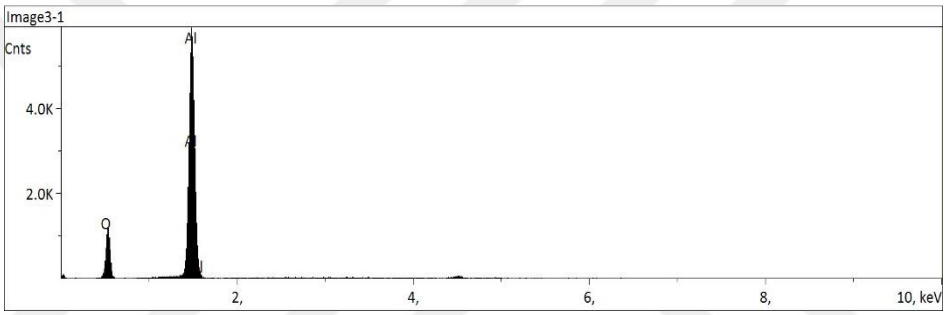


+2 Noktasındaki EDS grafiği

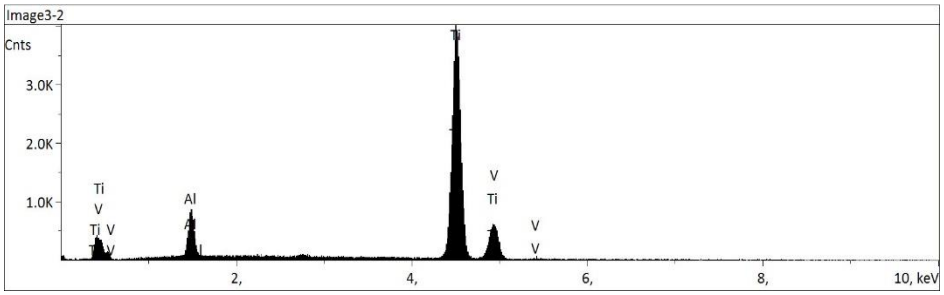
Element	**Kütlesel %**		**Atomik %**	
Oksijen (O)	41,018		53,997	
Alüminyum (Al)	**+1**	58,982	**+1**	46,023
	+2	26,796	**+2**	34,653
Vanadyum (V)	3,5		2,397	
Titanyum (T)	61,345		44,718	

Şekil 6.16. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesi EDS analizi.(çarpma açısı: 90°, püskürtme basıncı: 1,5 bar)





+1 Noktasındaki EDS grafiği



+2 Noktasındaki EDS grafiği

Element	**Kütlesel %**		**Atomik %**	
Oksijen (O)	26,254		37,515	
Alüminyum (Al)	**+1**	73,746	**+1**	62,485
	+2	6,748	**+2**	11,394
Vanadyum (V)	2,559		2,289	
Titanyum (T)	90,693		86,317	

Şekil 6.17. Katı partikül erozyonu ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesi EDS analizi.(çarpma açısı: 90°, püskürtme basıncı: 3 bar)

Şekil 6.13’ de 60 mesh boyutunda aşındırıcı alüminyum oksit partiküller ile, 3 bar püskürtme basıncında, 30° partikül çarpma açısında aşındırılan Ti4Al4Mo numunenin,

SEM fotoğrafı ile birlikte elementel analiz sonuçları ve EDS spektrumları verilmiştir. Numune yüzeyinde +1 ile işaretlenen bölgede mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları sonucunda sürülme ile birlikte ilerlemiş ve o bölgede enerjisini yitirerek kalmış Tİ4Al4Mo partikülü görülmektedir. Bu partikülün Ti4Al4Mo olduğunu grafikler ve % elementel verileri net bir şekilde göstermektedir.

Şekil 6.14' de 60 mesh boyutunda aşındırıcı alüminyum oksit partiküller ile, 3 bar püskürtme basıncında, 30° partikül çarpma açısında aşındırılan Ti6Al4V numunenin, SEM fotoğrafı ile birlikte elementel analiz sonuçları ve EDS spektrumları verilmiştir. Numune yüzeyinde +1 ile işaretlenen bölgede, püskürtme basıncının etkisiyle mikro sürme ve mikro kesme mekanizmasıyla aşındırıcı partikül alüminyum oksitin (Al_2O_3), Ti6Al4V matrisinde talaş kaldırarak aşındırdığı ayrıca +1 noktasındaki partikülün, grafik ve veriler değerlendirildiğinde, aşındırıcı partikül alüminyum oksit olduğu belirlenmiştir.+2 noktasına ait grafik ve % kütle ve atomik verileri ise Ti6Al4V matrisine ait olduğunu göstermektedir.

Şekil 6.15'de 60 mesh boyutunda aşındırıcı alüminyum oksit partiküller ile, 1,5 bar püskürtme basıncında, 30° partikül çarpma açısında aşındırılan Ti4Al4Mo numunenin, SEM fotoğrafı ile birlikte elementel analiz sonuçları ve EDS spektrumları verilmiştir. Fotoğrafta +1 noktasında plastik deformasyon sonrasında, aşındırıcı partikül alüminyum oksitin (Al_2O_3) malzeme yüzeyini sürerek enerjisini kaybederek o noktada kalmıştır. Grafik ve veriler incelendiğinde bu partikülün aşındırıcı partikül olduğu görülmektedir. +2 noktasına ait grafik ve % kütle ve atomik verileri ise bu bölgenin Ti4Al4Mo matrisine ait olduğunu göstermektedir.

Şekil 6.16'da 60 mesh boyutunda aşındırıcı alüminyum oksit partiküller ile, 1,5 bar püskürtme basıncında, 90° partikül çarpma açısında aşındırılan Ti6Al4V numunenin, SEM fotoğrafı ile birlikte elementel analiz sonuçları ve EDS spektrumları verilmiştir. Ti6Al4V matrisine gömülmüş şekildeki partikül üzerindeki +1 noktasından alınan EDS spektrumu ve elementel analiz verileri bu partikülün aşındırıcı partikül olan alüminyum oksit olduğunu göstermektedir. +2 noktasına ait grafik ve % kütle ve atomik verileri ise bu bölgenin Ti6Al4V matrisine ait olduğunu göstermektedir

Şekil 6.17'de 60 mesh boyutunda aşındırıcı alüminyum oksit partiküller ile, 3 bar püskürtme basıncında, 90° partikül çarpma açısında aşındırılan Ti6Al4V numunenin,

SEM fotoğrafı ile birlikte elementel analiz sonuçları ve EDS spektrumları verilmiştir. Numune yüzeyinde +1 ile işaretlenen bölgede Ti6Al4V matrisine saplanmış şekilde duran aşındırıcı partikül olduğu düşünülmüştür. Bu nedenle SEM fotoğrafı üzerinde +1 ile işaretlenen bölgede EDS analiz çalışması yapılmıştır. Tablo 6.6'de gösterilen +1 noktasındaki EDS grafiği irdelendiğinde bu bölgede ağırlıklı olarak alüminyum ve oksijen elementlerinin olduğu söylenebilmektedir. Deneyler sırasında aşındırıcı partikül olarak kullanılan alüminyum oksitin (Al_2O_3), SEM fotoğrafında görülen bölgede saplanmış şekilde yüzeyde olduğu görülmektedir.

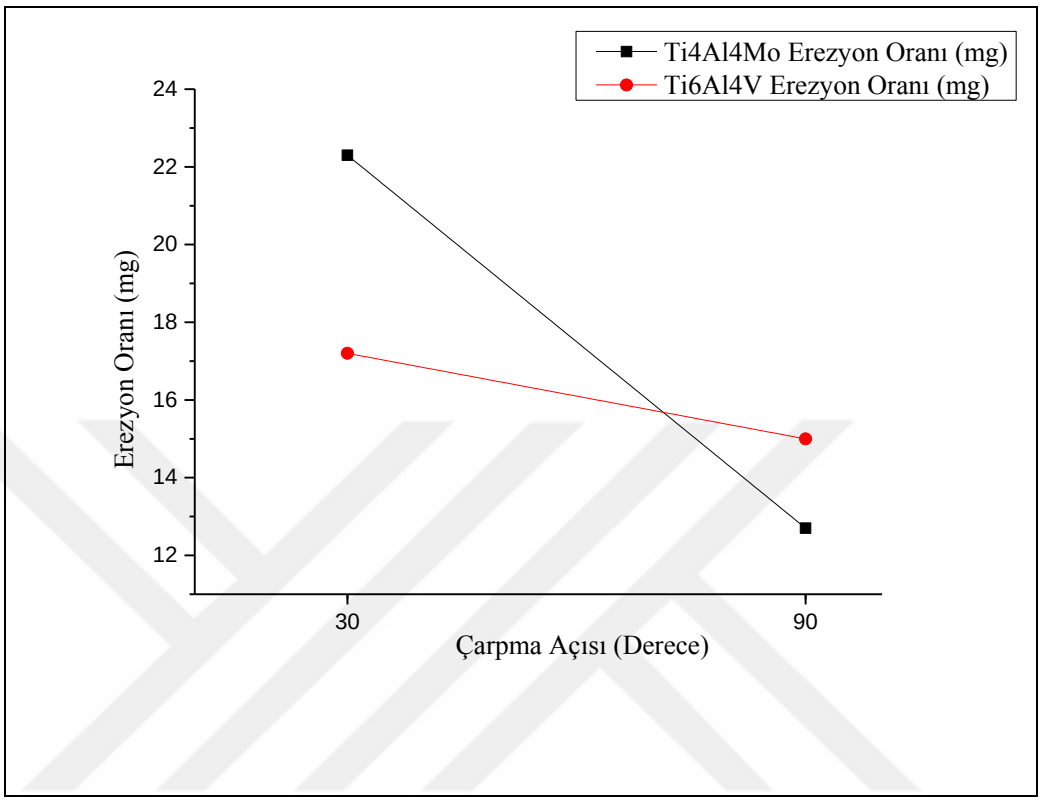
6.4. Partikül Çarpma Açısının Katı Partikül Erozyonuna Etkisi

Bu bölümde farklı partikül çarpma açılarının Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V malzemeleri yüzeylerinde katı partikül erozyonu davranışının değişimi incelenmiştir. Bu amaçla 60 mesh boyutundaki aluminyum oksit aşındırıcı partiküller 10 mm püskürtme mesafesinde 20 saniye boyunca numuneler aşındırılmış ve tartım işlemi yapılarak erozyon oranları belirlenmiştir.

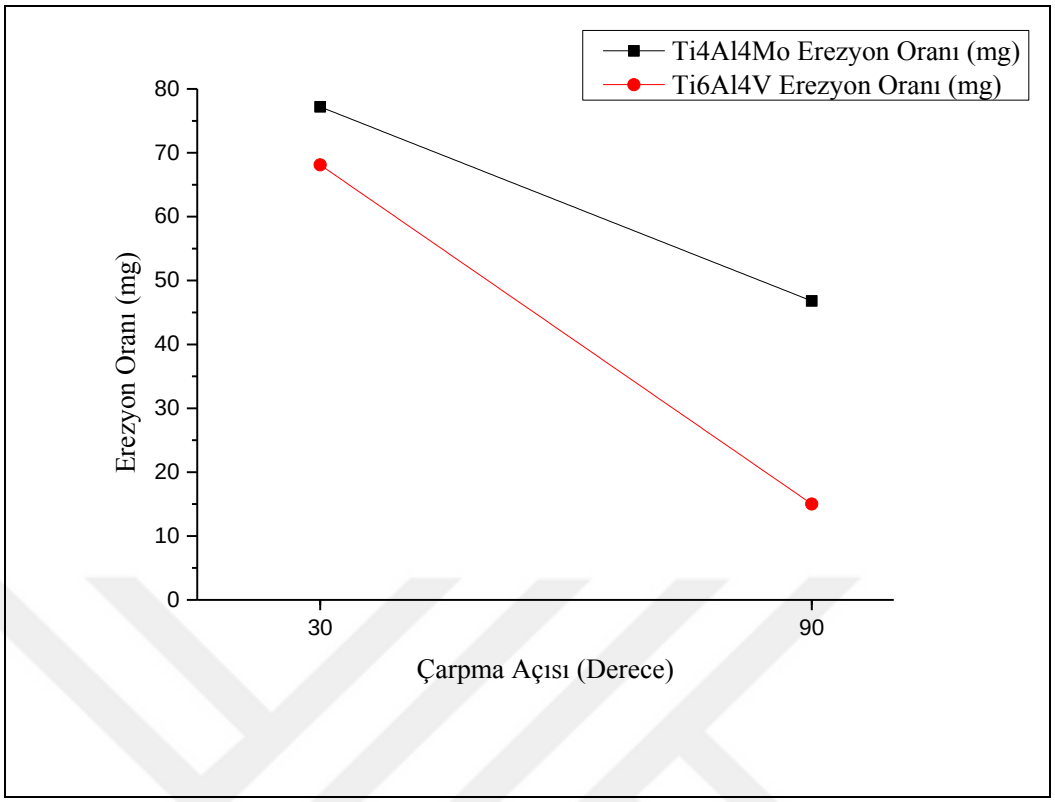
Şekil 6.18 ve 6.19'da 60 mesh boyutundaki katı partiküllerin yüzeye çarpma açılarının bir fonksiyonu olarak değişen erozyon oranları verilmiştir. Grafikte Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V numunelerinde 1,5 püskürtme basınç değerinde, katı partikül çarpma açısına bağlı olarak büyük değişim gösterdiği gözlemlenmektedir. Her iki malzeme cinsinde de en yüksek aşınma değerinin 30°'lik püskürtme açısında, en düşük aşınma ise 90°'lik püskürtme derecesinde meydana gelmektedir. Iki malzeme cinsi de burada sünek davranış göstermiştir. Bunun sebebi, çok sert olan aluminyum oksit aşındırıcı partiküllerin düşük çarpma açılarında daha az çarpma, çoğunlukla yatay hız bileşenleriyle malzeme yüzeyinde çizme ve kesme eylemleriyle aşındırmalarıdır. Deneylerin hepsinde, düşük partikül çarpma açılarında en fazla aşınmanın oluştuğu, partikül çarpma açısının büyümesiyle aşınma miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. Çarpma açısının büyümesiyle, aşındırıcı partiküllerin yatay hız bileşenlerinin küçülmesi bu durumu açıklamaktadır.

Düşük partikül çarpma açılarında, aşındırıcı partiküllerde keskin köşelere sahip olanlar malzeme yüzeyinde mikro sürme ve mikro kesme mekanizmalarıyla fazla miktarda aşındırma gerçekleştirdiği kanısına varılabilmektedir. Yüksek partikül çarpma açılarında malzeme yüzeyinde aşındırıcı partiküllerin mikro çatlak oluşturacak şekilde

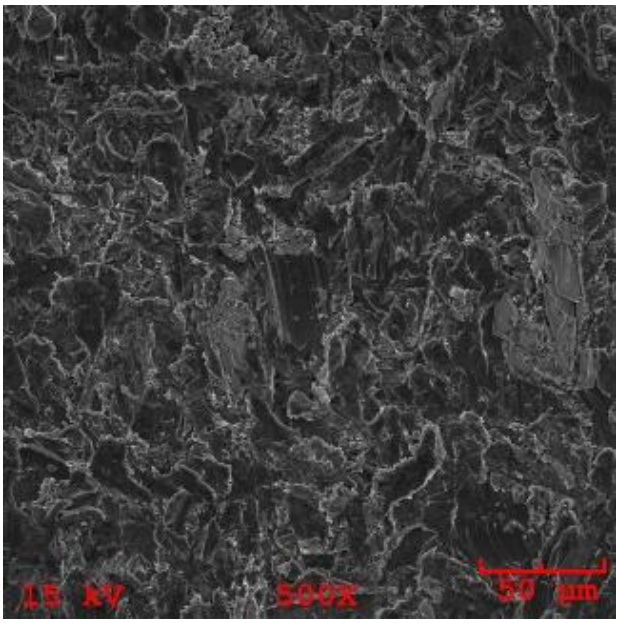
aşınma meydana getirdikleri görülmüştür. Bundan dolayı da mikro çatlak mekanizmalarıyla daha fazla aşınma görülmesi mümkün değildir.



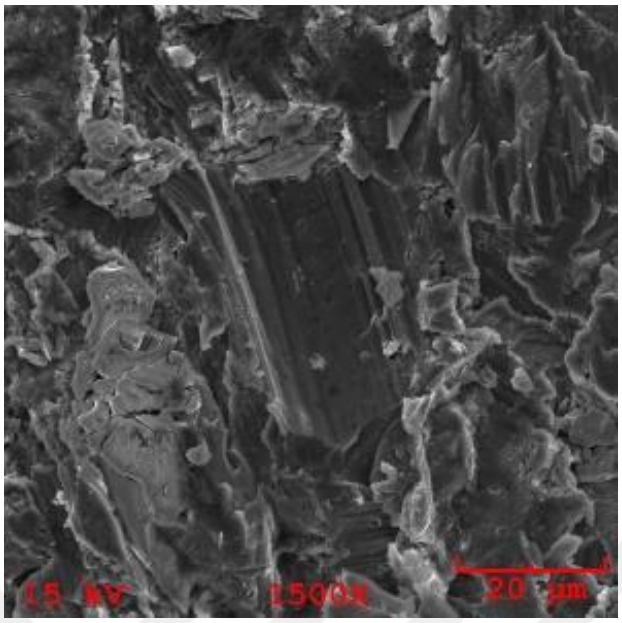
Şekil 6.18. Toz metalurjik Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V numunelerinin 1,5 Bar püskürtme basıncında Erozyon oranları



Şekil 6.19. Toz metalurjik Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V numunelerinin 3 Bar püskürtme basıncında Erozyon oranları

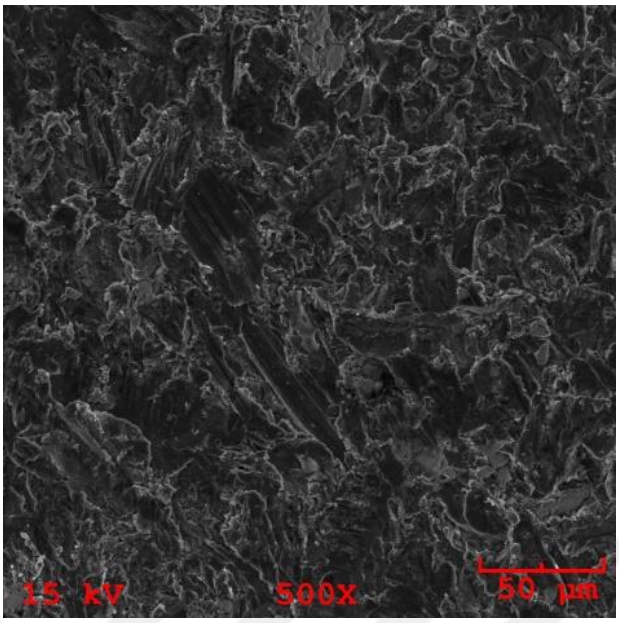


Şekil 6.20. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafi (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

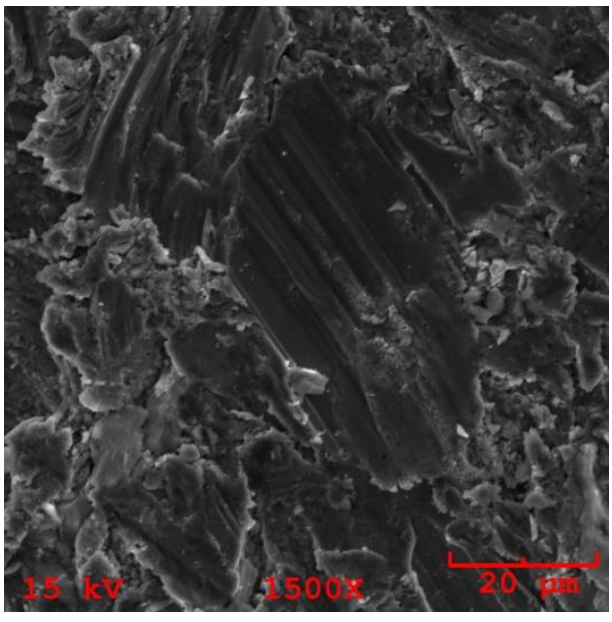


Şekil 6.21. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

Şekil 6.20 ve 6.21'de görüldüğü üzere aşınmanın maksimum olduğu 30° çarpma açısında yüzeyde mikro sürme izleri ve bunun sonucunda malzeme koparılmasıyla oluşan aşınma izleri görülmektedir. 60 mesh boyutundaki aşındırıcı alüminyum oksit partiküller malzeme yüzeyinde çok fazla miktarda darbe izi bırakmış olup, bu darbelerin enerjisinin yüksek olması sebebiyle malzeme kaybı oldukça fazla derecede meydana gelmiştir. Şekil 6.18'de ki grafikde de görüldüğü üzere 30° püskürtme açısında, 1,5 bar püskürtme basıncında Ti4Al4Mo numunesinde erozyon oranı 22,3 mg olarak ölçülmüştür.

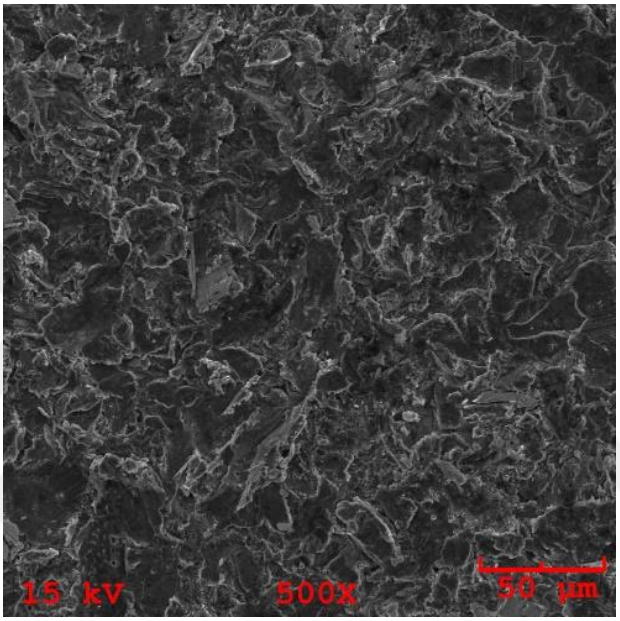


Şekil 6.22. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

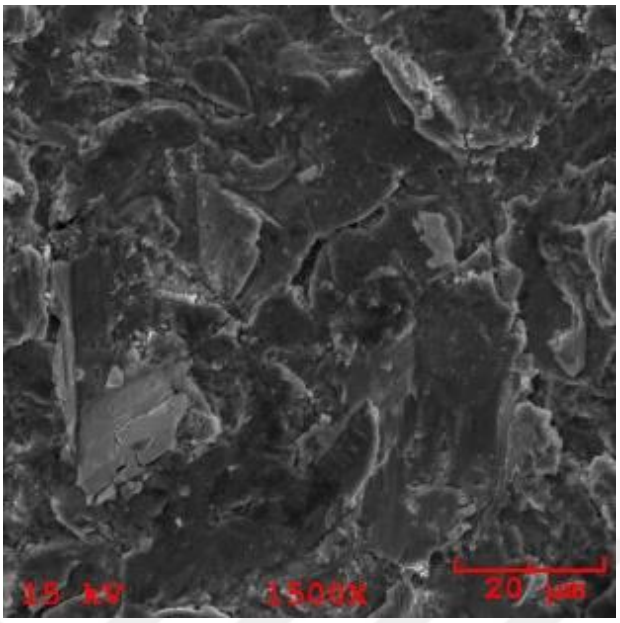


Şekil 6.23. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

Şekil 6.22 ve şekil 6.23 incelendiğinde 30°'lik partikül çarpma açılarında numune yüzeyinde mikro sürme ve mikro kesme makanizmalarının çalıştığı ve yoğun şekilde aşındırdıkları görülmektedir. Aşınma izlerinin malzeme yüzeyini sürerek oluştuğu ve yüzeyde plastik deformasyon meydana geldiği gözlemlenmektedir. Şekil 6.18'de ki grafikde de görüldüğü üzere 30° püskürtme açısında, 1,5 bar püskürtme basıncında Ti6Al4V numunesinde erozyon oranı 17,2 mg olarak ölçülmüştür.



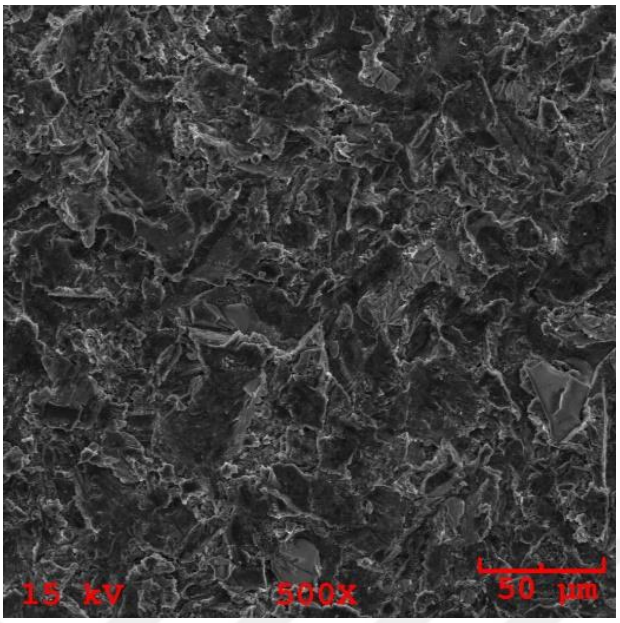
Şekil 6.24. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)



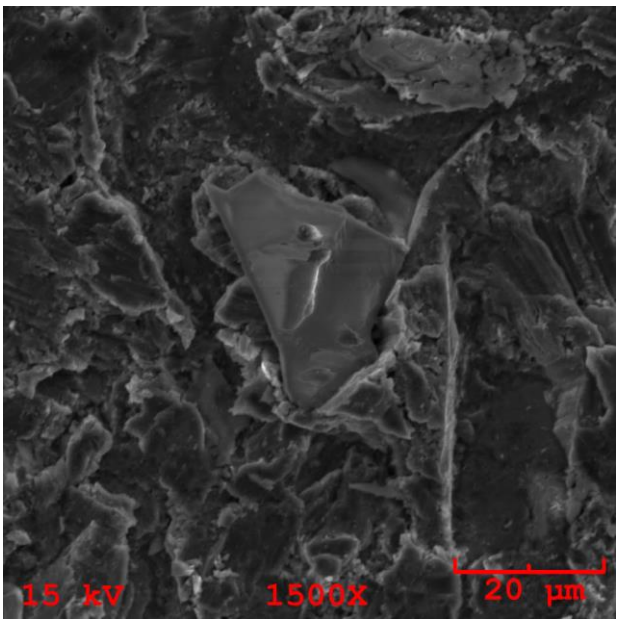
Şekil 6.25. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

Şekil 6.24 ve şekil 6.25'de 60 meshlik aşındırıcı alüminyum oksit partiküllerin 1,5 bar püskürtme basıncında 90° partikül çarpma açısında aşındırılan Ti4Al4Mo numunelerin farklı büyütmelerdeki fotoğrafları verilmiştir. 90° çarpma açısıyla aşındırılan numune ile 30° çarpma açısında gözlemlenen izler burada gözükmemektedir. Numune yüzeyi, mikro çatlak mekanizması ile plastik deformasyon görüldüğü söylenebilir.

Yüksek büyütmede görüldüğü üzere, aşındırıcı aluminyum oksit partikülleri plastik deformasyon sonrasında yüzeye saplandıkları ve çok sayıda vadiler oluşturduğu gözlemlenmektedir. Partiküller, plastik deformasyon sonucunda çok sayıda tepecikler meydana getirmişlerdir. Burada malzeme sünek davranış sergilemiştir. Şekil 6.18'de ki grafikde de görüldüğü üzere 90° püskürtme açısında, 1,5 bar püskürtme basıncında Ti4Al4Mo numunesinde erozyon oranı 12,7 mg olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.26. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

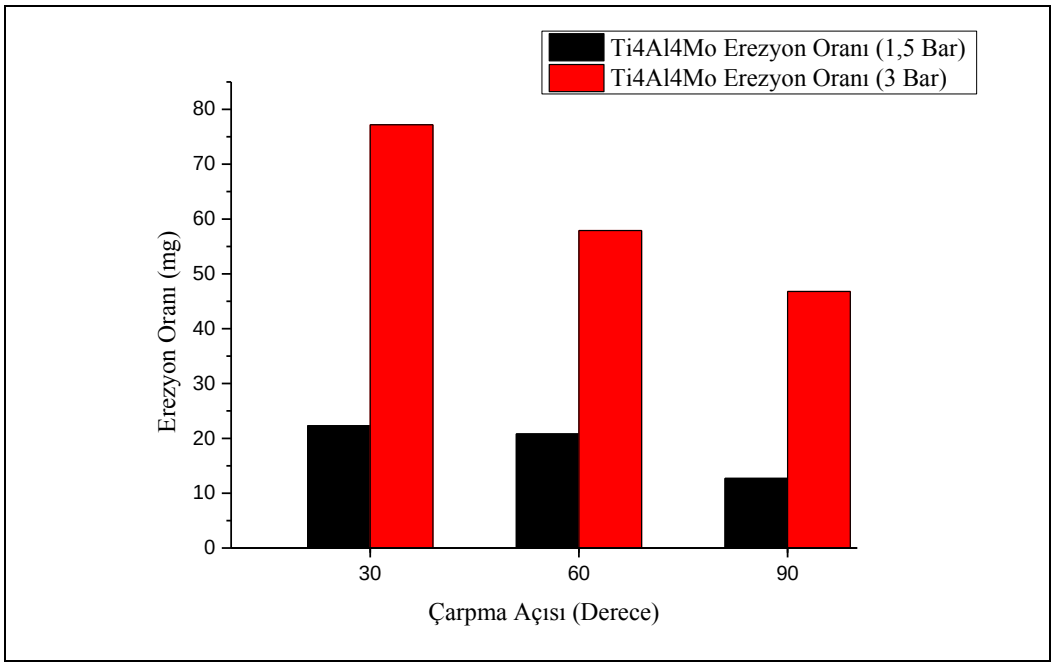


Şekil 6.27. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

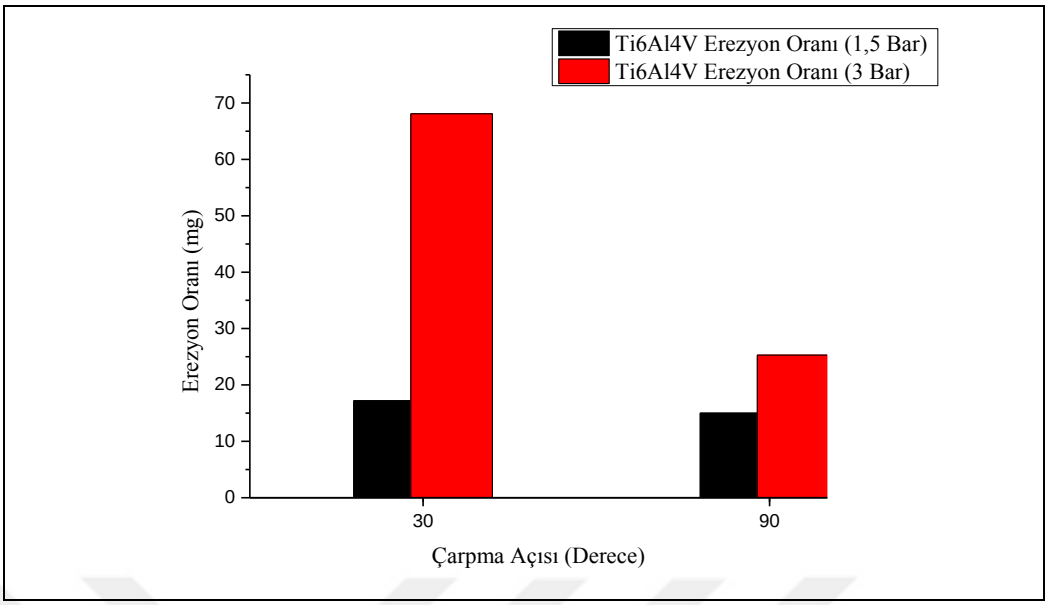
Şekil 6.26 ve şekil 6.27'de 60 meshlik aşındırıcı alüminyum oksit partiküllerin 1,5 bar püskürtme basıncında 90° partikül çarpma açısında aşındırılan Ti6Al4V numunelerin farklı büyütmelerdeki fotoğrafları verilmiştir. Burada, 90°'lik çarpmanın etkisiyle aşındırıcı alüminyum oksit partikülülünün numune yüzeyine gömülüp kaldığı ve gömüldüğü noktada malzemeden kıvrımlı şekilde talaş kaldırma mantığında aşındırdığı görülmektedir. Ti4Al4Mo malzemesinde görülen mekanizmalar bu malzeme yüzeyinde de gözlemlenmiştir. Şekil 6.18'de ki grafikde de görüldüğü üzere 90° püskürtme açısında, 1,5 bar püskürtme basıncında Ti6Al4V numunesinde erozyon oranı 15 mg olarak ölçülmüştür.

6.5. Partkül Basıncına Bağlı Olarak Katı Partikül Erozyonu Değişimi

Bu bölümde Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V malzemelerinin katı partikül erozyon davranışı farklı püskürtme basınçlarında değişimi incelenmiştir. Bu hedefle 60 mesh partikül boyutunda alüminyum oksit aşındırıcı kullanılarak 1,5 ve 3 bar basınçlarında hedef malzemeler aşındırılmıştır. Daha önceki bölümde Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V malzemelrde en yüksek aşınmanın 30°'de, en düşük aşınmanın ise 90°'de meydana geldiği belirlenmiştir. Aşınma işlemi bütün deneylerde 20 saniye boyunca gerçekleştirilmiştir.



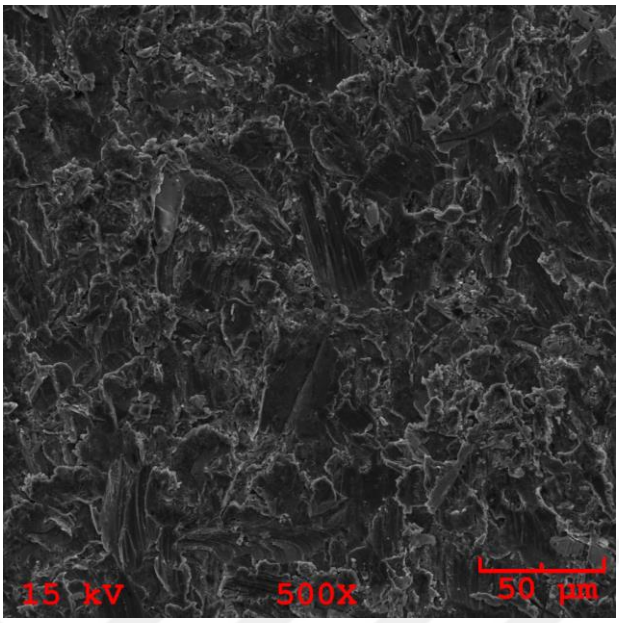
Şekil 6.28. Ti4Al4Mo malzemesinde katı partikül erozyonunda, erozyon oranının püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi



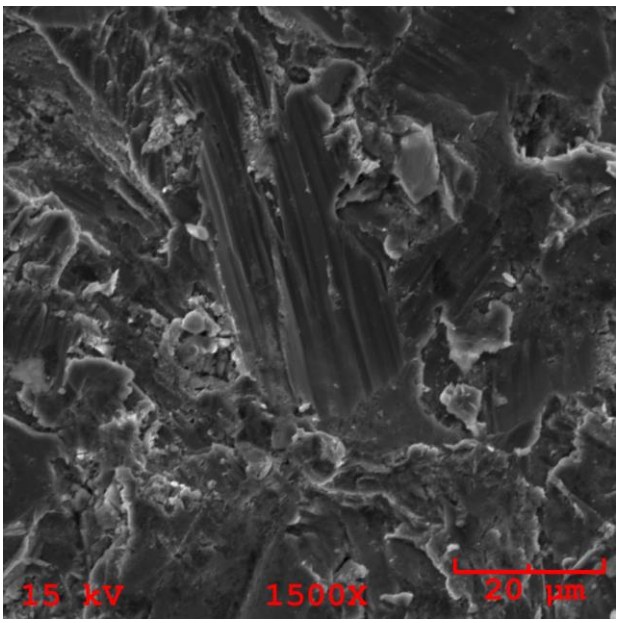
Şekil 6.29. Ti6Al4V malzemesinde katı partikül erozyonunda erozyon oranının püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi

Şekil 6.28'de Ti4Al4Mo ve şekil 6.29'de Ti6Al4V malzemeleri için 1,5 bar ve 3 bar aşındırıcı partikül basınçlarındaki erozyon oranları verilmiştir. Ti4Al4Mo malzemesi için bu değer; 1,5 barda 30° püskürtme açısında 22,3 mg, 1,5 bar 60° püskürtme açısında 20,8 mg, 1,5 bar 90° püskürtme açısında 12,7 mg, 3 bar 30° püskürtme açısında 77,2 mg, 3 bar 60° püskürtme açısında 67,9 mg, 3 bar 90° püskürtme açısında 46,8 olarak ölçülmüştür. Bu değer Ti6Al4V için ise; 1,5 bar 30° püskürtme açısında 17,2 mg, 1,5 bar 90° püskürtme açısında 15 mg, 3 bar 30° püskürtme açısında 68,1 mg, 3 bar 90° püskürtme açısında 25,3 mg olarak ölçülmüştür.

Bu sonuçlar doğrultusunda, 60 mesh partikül boyutunda ve farklı çarpma açılarında, püskürtme basıncının artmasıyla erozyon oranının arttığı gözlemlenmektedir. Ayrıca en yüksek aşınmanın 30°'lik püskürtme açısında ve en yüksek erozyon oranına sebep verdiği her iki malzeme içinde söylemek mümkündür. Her iki malzeme de burada sünek davranış sergilemiştir. Her iki şekilde ki grafik incelediğinde püskürtme basıncının artmasıyla aşınma miktarıda buna paralel olarak artmıştır. Bu durumu püskürtme basıncının artmasıyla birlikte, malzemelerin yüzey bölgesine püskürtülen katı partiküllerin kütlesel debisinin artması ile açıklayabiliriz. Bu artışla birlikte partikül çarpma hızlarında artma meydana gelmektedir. Birim zamanda malzeme yüzeyine temas eden aşındırıcı paritkül sayısı daha fazladır. Böylelikle aşınmada, basıncın artmasıyla daha da fazla olmaktadır.

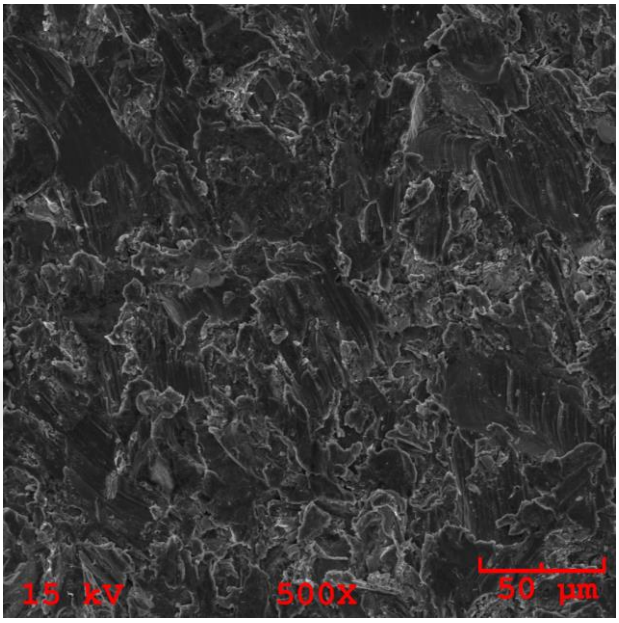


Şekil 6.30. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

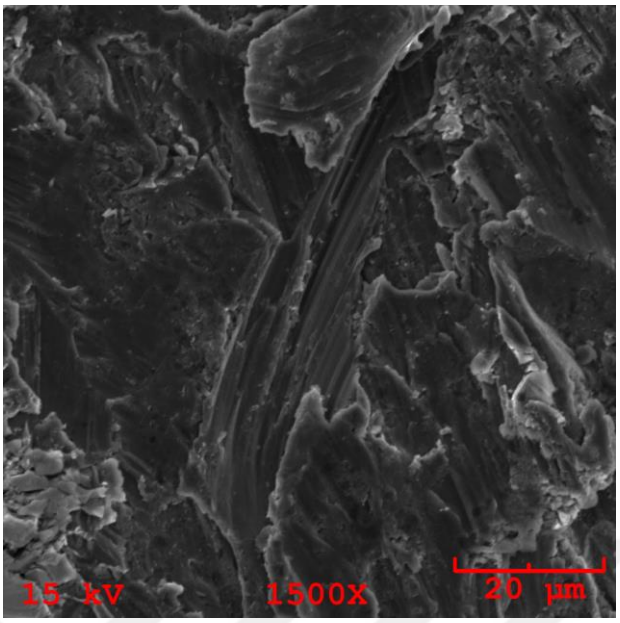


Şekil 6.31. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

Şekil 6.30 ve şekil 6.31'de 60 mesh boyutunda aşındırıcı alüminyum oksit partiküller ile 1,5 bar püskürtme basıncında, 30° partikülçarpma açısında aşındırılmış Ti4Al4Mo numunelerin, farklı büyütmelerdeki SEM fotoğrafları verilmiştir. Fotoğraflar analiz edildiğinde malzeme yüzeyinde mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları ile aşınma gerçekleştiği ve aşındırıcı partikülün belli bir yere kadar aşındırdığı ve o bölgede saplanarak gömüldüğü görülmektedir. Yüzeyde tamamen plastik deformasyon oluştuğu ve aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyini sürerek aşınma izlerinin meydana geldiği gözlemlenmiştir.

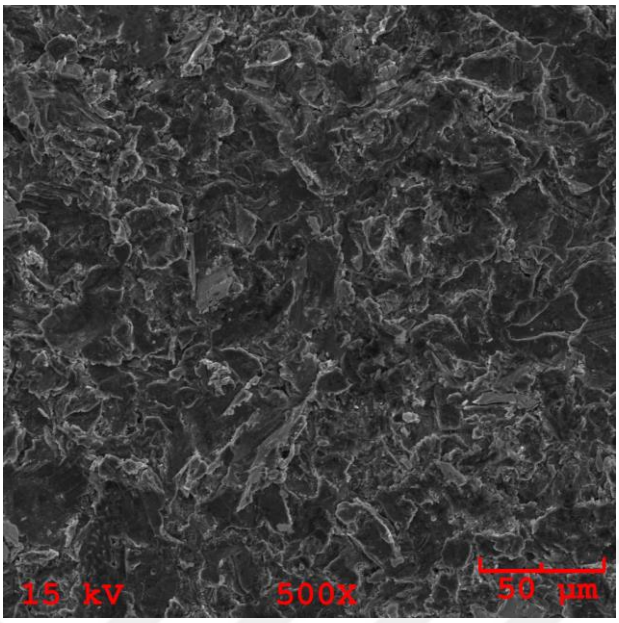


Şekil 6.32. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

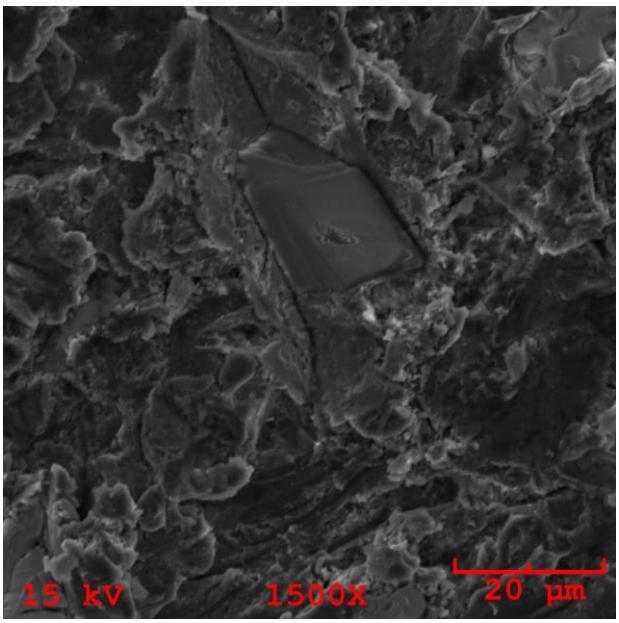


Şekil 6.33. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

Şekil 6.32 ve şekil 6.33'de 60 mesh boyutunda aşındırıcı alüminyum oksit partiküller ile 3 bar püskürtme basıncında, 30° partikül çarpma açısında aşındırılmış Ti4Al4Mo numunelerin, farklı büyütmelerdeki SEM fotoğrafları verilmiştir. Basıncın artmasıyla mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları şiddetini arttırarak daha fazla miktarda aşınma gerçekleştiği söylenebilmektedir. Bununla birlikte yine yüzeyde plastik deformasyonun oluştuğu aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyindeki sürme eyleminin hızın etkisiyle daha da fazla olduğu görülmektedir. Aşınmanın tüm yüzeyde eş doğrultuda gerçekleştiği söylenebilmektedir. Basıncın artmasıyla birlikte malzeme yüzeyindeki karakterizasyon, derin vadicikler ve yarıklar oluşması şeklindedir.

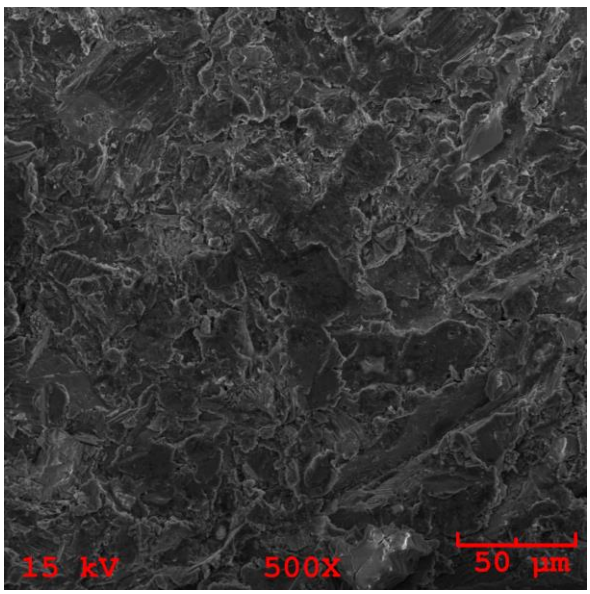


Şekil 6.34. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

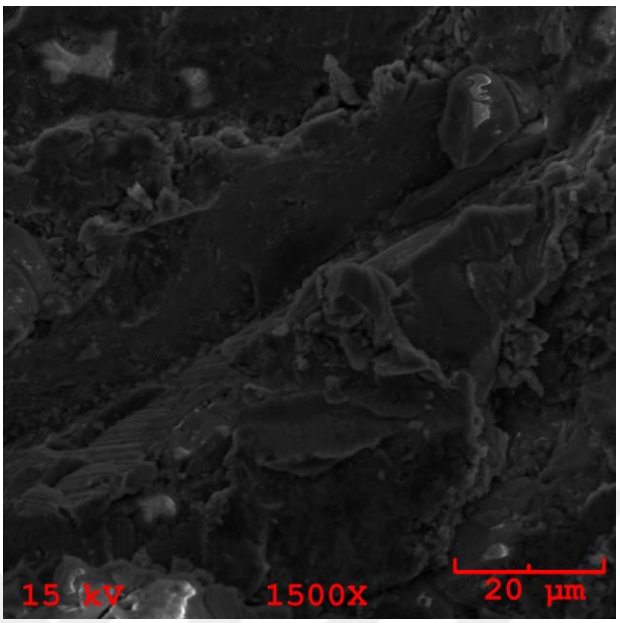


Şekil 6.35. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

Şekil 6.34 ve şekil 6.35'de 60 mesh boyutunda aşındırıcı alüminyum oksit partiküller ile 1,5 bar püskürtme basıncında, 90° partikül çarpma açısında aşındırılmış Ti4Al4Mo numunelerin, farklı büyütmelerdeki SEM fotoğrafları verilmiştir. 90° çarpma açısıyla aşındırılan malzeme yüzeyinin, 30° çarpma açısı ile aşındırılan yüzeyden çok daha farklı olduğu görülmektedir. 30° çarpma açısındaki aşınma izleri bu malzemede görünmemektedir. Şekil 6.33'de ki 1500 büyütmedeki fotoğrafta alüminyum oksit partikülün yüzeye saplandığı görülmektedir. Malzeme yüzeyinde mikro çatlak mekanizmasıyla plastik deformasyon oluştuğu söylenebilmektedir. Aşındırıcı partiküllerin, plastik deformasyon sonucunda yüzeyde vadiler meydana getirmişlerdir. Bu anlamda malzeme yüzeyinde aşındırıcı partiküllerin dik açıyla gelmesi sonucunda çok fazla tepecikler oluştuğu söylenebilir. Sünek bir davranışın sonucu olan bu durum malzemenin karakterizasyonu hakkında bilgi vermektedir. Dolayısıyla literatürden de bilindiği gibi sünek malzemelerin yüsek oranda aşınma oluşturması beklenmez. Düşük çarpma açılarında fotoğraflarda görüldüğü gibi mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları aşınma miktarlarının daha fazla olmasına neden olur. Dik ve daha fazla çarpma açılarında ise yüzeyin, partiküllerin darbeleri ile plastik deformasyon sonrasında malzeme yüzeyinde tepeciklerin daha fazla oluştuğunu gösterir. Böylece malzemede daha az aşınma meydana gelmektedir.

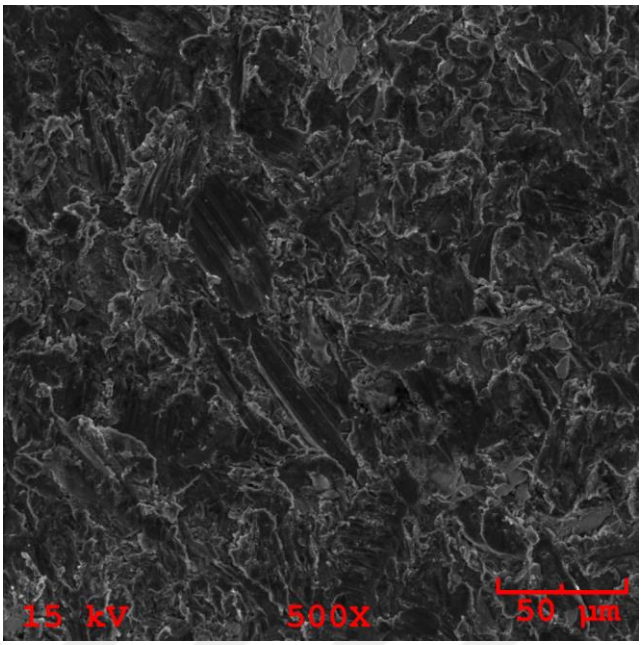


Şekil 6.36. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

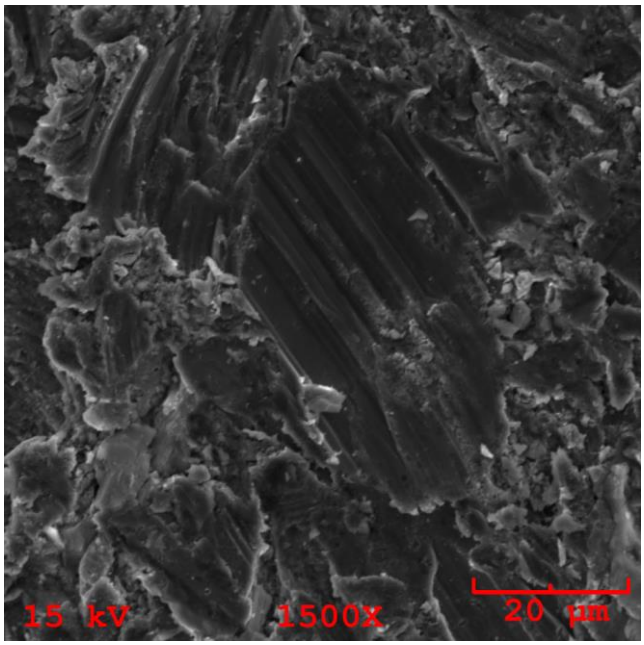


Şekil 6.37. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti4Al4Mo numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

Şekil 6.36 ve şekil 6.37'de 60 mesh boyutunda aşındırıcı alüminyum oksit partiküller ile 3 bar püskürtme basıncında, 90° partikül çarpma açısında aşındırılmış Ti4Al4Mo numunelerin, farklı büyütmelerdeki SEM fotoğrafları verilmiştir. Fotoğraflar incelendiğinde 90° partikül çarpma açısında basıncın artmasıyla malzeme yüzeyinde mikro çatlak mekanizmasıyla plastik deformasyonun daha şiddetli oluştuğu söylenebilmektedir. Aşındırıcı partiküllerin, plastik deformasyon sonucunda yüzeyde vadilerin daha büyük boyutlarda oluştuğu görülmektedir. Malzeme yüzeyinde aşındırıcı partiküllerin dik açıyla gelmesi ve basıncında artmasıyla tepecik sayılarının arttığı söylenebilir. Şekil 6.35'de 1500x büyütmeki fotoğrafta basıncın artış etkisi net şekilde görülmektedir. Birim zamandaki hızın da artışıyla, aşındırıcı partikülün malzemeyi bir yere kadar kestiği ve yarık oluşturduğu gözlemlenmektedir.

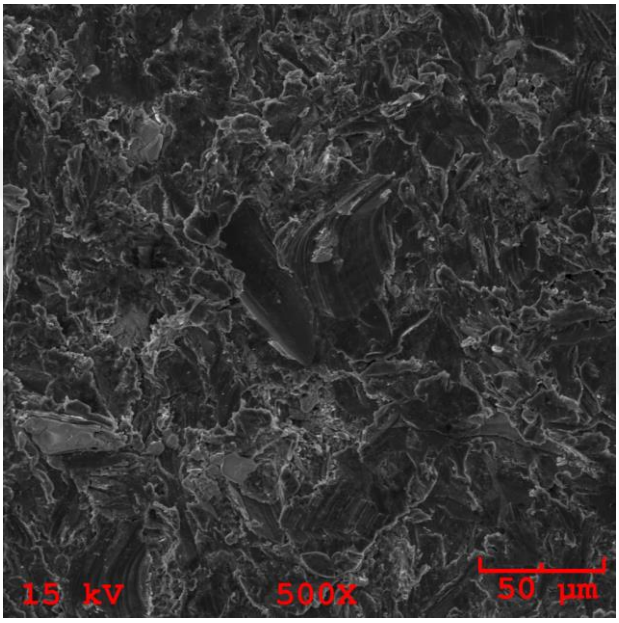


Şekil 6.38. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

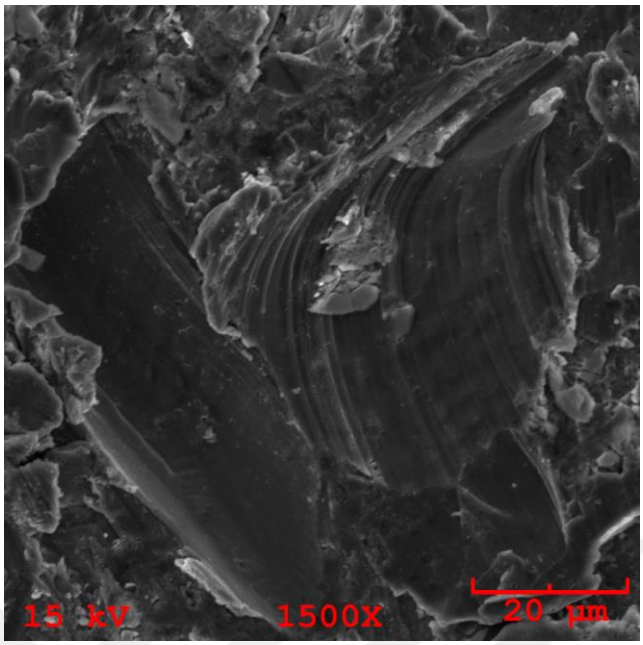


Şekil 6.39. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

Şekil 6.38 ve şekil 6.39'de 60 mesh boyutunda aşındırıcı alüminyum oksit partiküller ile 1,5 bar püskürtme basıncında, 30° partikül çarpma açısında aşındırılmış Ti6Al4V numunelerin, farklı büyütmelerdeki SEM fotoğrafları verilmiştir. Özellikle şekil 6.39'de mikro sürme ve mikro kesme mekanizmalarının çalışmasıyla aşınmanın gerçekleştiği görülmektedir. Aşınma izlerinin aynı yönde olduğu ve aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyini sürdüğü ve daha sonrasında ise yüzeye saplanarak o bölgede kaldığı gözlenmektedir. Aşındırıcı partiküllerin kırılıp daha küçük parçalara ayrılarak malzeme yüzeyine dağılmıştır.



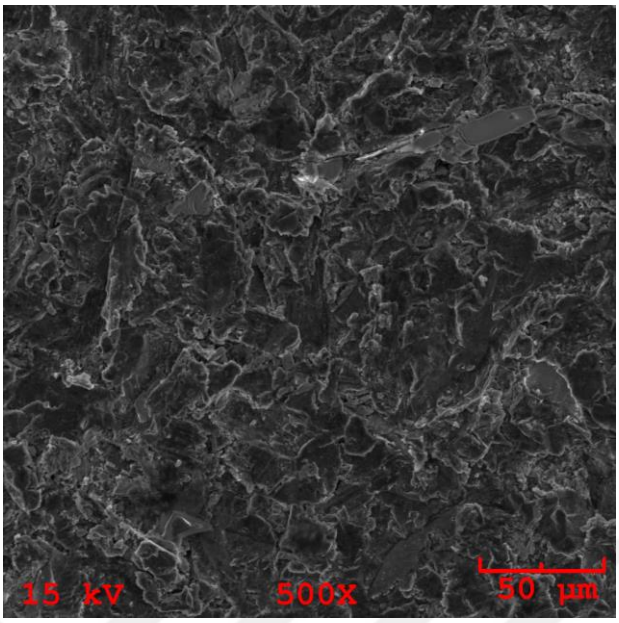
Şekil 6.40. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)



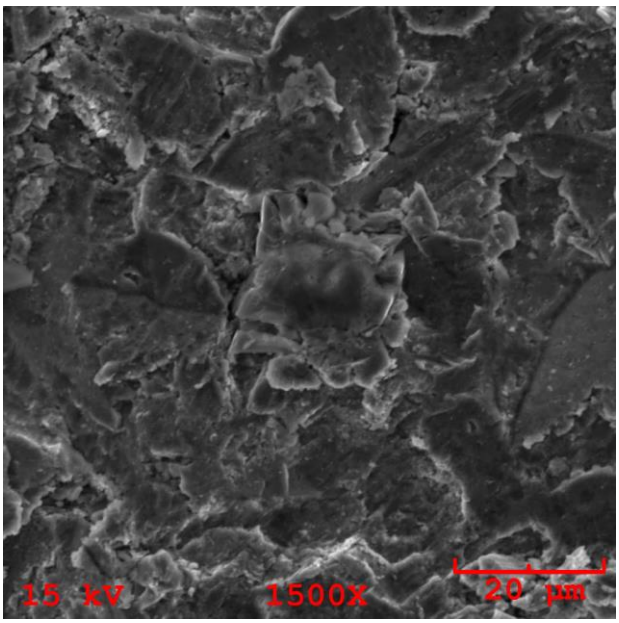
Şekil 6.41. 30° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

Şekil 6.40 ve şekil 6.41'de 60 mesh boyutunda aşındırıcı alüminyum oksit partiküller ile, 3 bar püskürtme basıncında, 30° partikül çarpma açısında aşındırılmış Ti6Al4V numunelerin, farklı büyütmelerdeki SEM fotoğrafları verilmiştir. Basıncın artmasıyla partikül hızları doğrudan etkilenmektedir. Şekil 6.41'deki SEM fotoğrafında, partikül püskürtme basıncının artmasıyla mikro sürme ve mikro kesme mekanizmalarının daha şiddetli çalışarak aşınmayı gerçekleştiği görülmüştür. 3 bar partikül püskürtme basıncında, 1,5 bar partikül püskürtme basıncına nazaran daha fazla miktarda malzeme kopma izleri görüldüğü söylenebilmektedir. Malzeme yüzeyinde plastik deformasyonun arttığı ve buna paralel olarak plastik deformasyon izlerinin ve derinliklerinin arttığı söylenebilmektedir. Aşındırıcı partiküllerin, yüzeydeki aşınma izlerindeki derinlikleri arttırması püskürtme basıncı hasar mekanizmasının etkisini göstermektedir.

Partikül basıncının 1,5 bardan 3 bara yükselmesiyle, malzeme yüzeyinde mikro sürülme sonrasında yer yer kopmalar olmuş ve bu şekilde aşınmanın gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

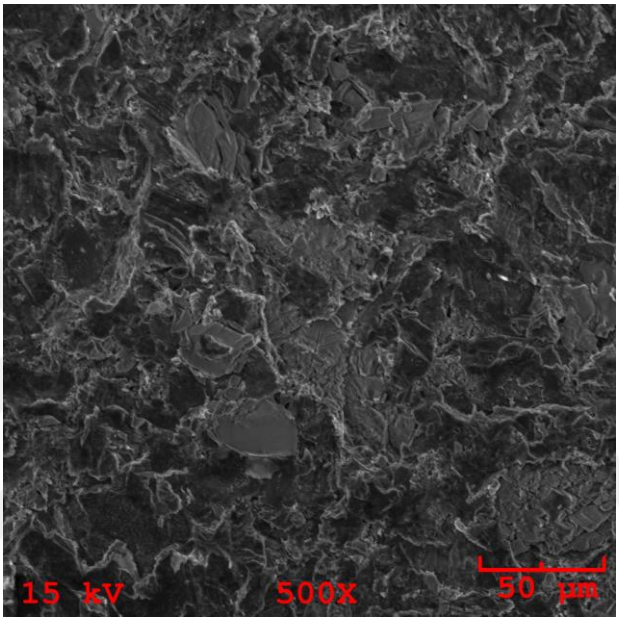


Şekil 6.42. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

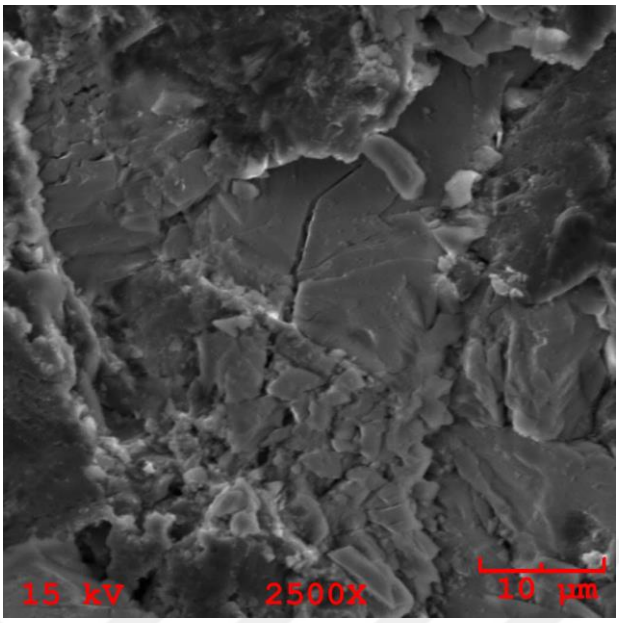


Şekil 6.43. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x1500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

Şekil 6.42 ve şekil 6.43'de 60 mesh boyutunda aşındırıcı alüminyum oksit partiküller ile, 1,5 bar püskürtme basıncında, 90° partikül çarpma açısında aşındırılmış Ti6Al4V numunelerin, farklı büyütmelerdeki SEM fotoğrafları verilmiştir. Fotoğraflar incelendiğinde, yüzeye saplanan alüminyum oksit partikülleri görülmektedir. Vadi ve tepecik oluşumları Ti6Al6V malzemesinin, sünek malzeme karakterinde olduğunu göstermektedir. Plastik deformasyon sonrasında mikro çatlaklarda görülmektedir.



Şekil 6.44. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

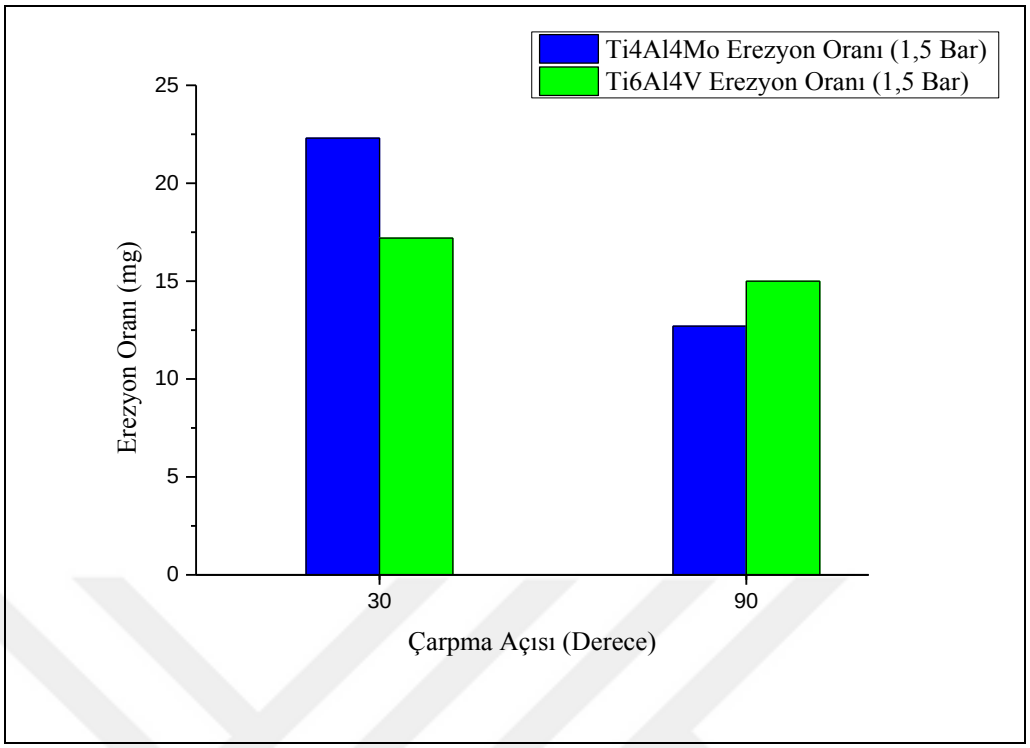


Şekil 6.45. 90° çarpma açısı ile aşındırılmış Ti6Al4V numunesinin x2500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

Şekil 6.44 ve şekil 6.45'de 60 mesh boyutunda aşındırıcı alüminyum oksit partiküller ile, 3 bar püskürtme basıncında, 90° partikül çarpma açısında aşındırılan Ti6Al4V numunelerin, farklı büyütmelerdeki SEM fotoğrafları verilmiştir. Artan püskürtme basıncının etkisiyle aşındırıcı partikülün malzeme yüzeyine daha derin şekilde saplandığı ve saplanmanın ardından aşındırıcı partikülün mevcut enerjisi ile kırıldığı, kalan enerjisi ile de malzemede çatlak oluşturduğu söylenebilmektedir. Basıncın artması ile 1,5 bar püskürtme açısına nazaran, 3 bar püskürtme açısında daha derin saplanmalar ve bununla birlikte daha derin izler meydana gelmiştir. Artan basınç ile birlikte yüzeyde oluşan plastik deformasyon şiddetini arttırmış ve daha yüksek miktarda aşınmaya neden olmuştur.

6.6. Ti4Al4Mo ve Ti6AlV Malzemelerinin Katı Partikül Erozyonu Davranışlarının Kıyaslanması

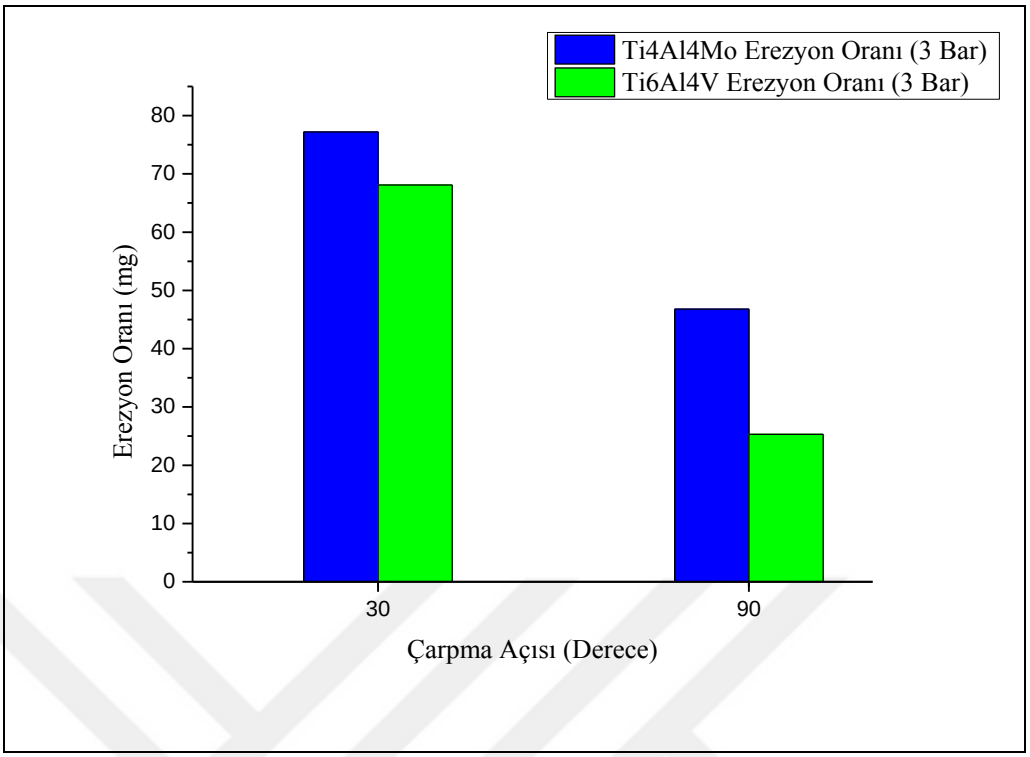
Bu bölümde Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V malzemeleri SEM fotoğrafları ve grafikleri ile karşılaştırılarak katı partikül erozyon davranışları kıyaslanacaktır. Her iki malzeme için malzeme kaybı göz önünde bulundurularak, katı partikül erozyon davranışları değerlendirilecektir.



Şekil 6.46. Ti4Al4Mo malzemesine ait farklı püskürtme açılardaki erozyon oranı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

Tablo 6.2. Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V malzemelerine ait 1,5 bar partikül püskürtme basıncındaki ve farklı püskürtme açılarındaki katı partikül erozyon oranı verileri.

Malzeme Cinsi	Partikül Çarpa Açısı (°)	Aşındırıcı Partikül Boyutu (mesh)	Basınç (Bar)	Erozyon Oranı (mg)
Ti4Al4Mo	30	60	1,5	22,3
Ti4Al4Mo	90	60	1,5	12,7
Ti6Al4V	30	60	1,5	17,2
Ti6Al4V	90	60	1,5	15



Şekil 6.47. Ti6Al4V malzemesine ait farklı püskürtme açılardaki erozyon oranı (püskürtme basıncı: 3 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 60 mesh, partikül püskürtme mesafesi: 10 mm, partikül püskürtme zamanı: 20 sn.)

Tablo 6.3. Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V malzemelerine ait 3 bar partikül püskürtme basıncındaki ve farklı püskürtme açılarındaki katı partikül erozyon oranı verileri.

Malzeme Cinsi	Partikül Çarpa Açısı (°)	Aşındırıcı Partikül Boyutu (mesh)	Basınç (Bar)	Erozyon Oranı (mg)
Ti4Al4Mo	30	60	3	77,2
Ti4Al4Mo	90	60	3	46,8
Ti6Al4V	30	60	3	68,1
Ti6Al4V	90	60	3	25,3

Şekil 6.46'da 60 mesh boyutunda aşındırıcı partikül ile 1,5 bar partikül basıncında, 30° ve 90° çarpma açılarında aşındırılmış, Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V malzemelerinde meydana gelen erozyon oranları, grafik olarak verilmiştir.

Şekil 6.47'da ise 60 mesh boyutunda aşındırıcı partikül ile 3 bar partikül basıncında, 30° ve 90° çarpma açılarında aşındırılmış, Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V malzemelerinde meydana gelen erozyon oranları, grafik olarak verilmiştir.

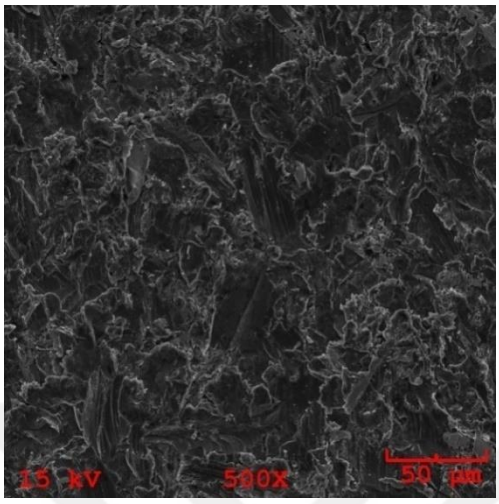
Tablolar ve grafikler incelendiğinde, tüm partikül püskürtme basınçlarında en yüksek aşınmanın 30° çarpma açısında ve 3 bar püskürtme basıncında oluştuğu görülmektedir. Ti4Al4Mo malzemesinin Ti6Al4V malzemesine göre daha fazla katı partikül aşıınma davranışı sergilediği gözlenmektedir. 30° çarpma açısında her iki malzemede sünek davranış sergilemekte olup püskürtme basıncının artmasıyla aşınma miktarının arttığı söylenebilmektedir. Bu durum birim zamanda kütlesel debinin artmasıyla malzeme yüzeyine temas eden aşındırıcı partikül sayısının atması ve talaş kaldırma işleminin de daha fazla miktarda olması olarak açıklanabilir. Böylelikle malzemenin yüksek basınçlarda düşük basınçlara kıyasla çok daha fazla aşınma meydana geldiği net şekilde görülmektedir.

Erozif aşınma deneylerinden önce literatür çalışmalarında edinilen bilgiler doğrultusunda en fazla aşınmanın her iki basınç değerinde (1,5 bar ve 3 bar) 30°'de ve en az aşınmanın ise 90°'de olduğu söylenebilmektedir. Bu anlamda eşdeğer sonuçlar elde edilmiştir.

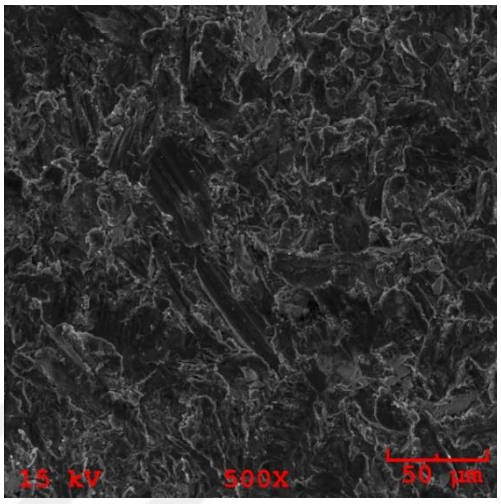
Egemen Avcu ve arkadaşları çalışmalarında, Ti6Al4V alaşımında maksimum erozyonun 30°'de görüldüğünü belirtmişlerdir. Tez çalışmasında da benzer sonuclara ulaşılmıştır. Titanyum alaşımlarında 30° partikül çarpma açısında maksimum erozyon oranının görülmesi, sünek malzemelerin düşük partikül çarpma açılarında mikrosürme ve mikrokesme mekanizmaları ile yüksek miktarda aşınması nedeniyle meydana geldiği söylenebilir [44].

Diğer bir örnek şekil 6.45'de verilen SEM fotoğrafinda 90° çarpma açısında oluşan çatlak ve yarıklar görülmektedir. Benzer hasar mekanizmaları titanyum alaşımları için literatürde belirtilmiştir [3].

Yine bir başka çalışma olan, Mohommad A Chowdhury ve arkadaşları araştırmalarında benzer katı partikül erozyon mekanizmalarını elde etmişlerdir [56].

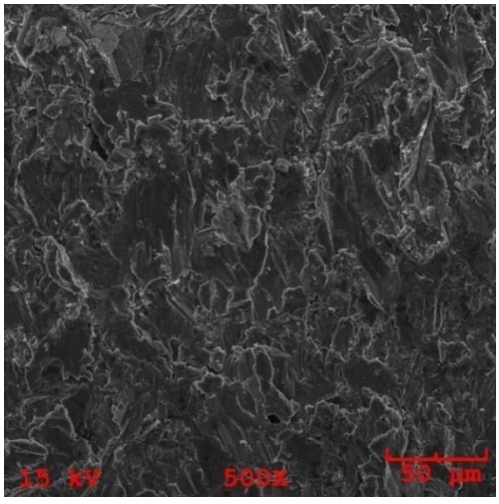


(a)

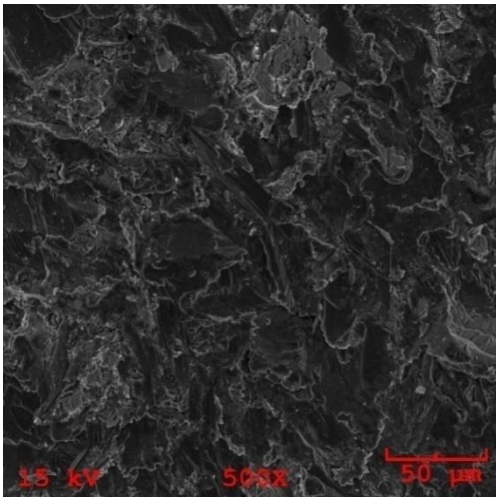


(b)

Şekil 6.48. (a) 30° partikül çarpma açısı, 1,5 bar partikül basıncında aşındırılmış Ti4Al4Mo malzemesine ait SEM fotoğrafı
(b) 30° partikül çarpma açısı, 1,5 bar partikül basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemesine ait SEM fotoğrafı

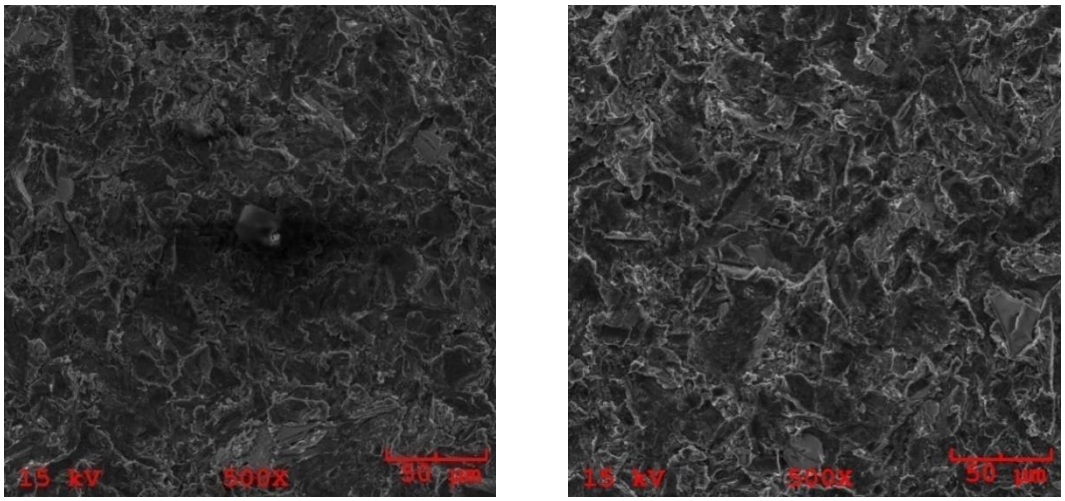


(a)



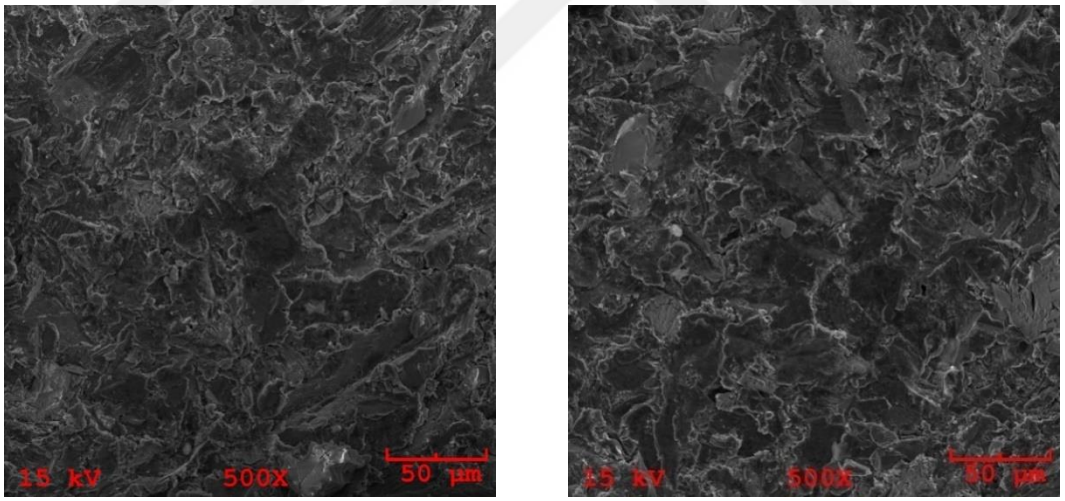
(b)

Şekil 6.49. (a) 30° partikül çarpma açısı, 3 bar partikül basıncında aşındırılmış Ti4Al4Mo malzemesine ait SEM fotoğrafı
(b) 30° partikül çarpma açısı, 3 bar partikül basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemesine ait SEM fotoğrafı



(a) (b)

Şekil 6.50. (a) 90° partikül çarpma açısı, 1,5 bar partikül basıncında aşındırılmış Ti4Al4Mo malzemesine ait SEM fotoğrafı
(b) 90° partikül çarpma açısı, 1,5 bar partikül basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemesine ait SEM fotoğrafı



(a) (b)

Şekil 6.51. (a) 90° partikül çarpma açısı, 3 bar partikül basıncında aşındırılmış Ti4Al4Mo malzemesine ait SEM fotoğrafı
(b) 90° partikül çarpma açısı, 3 bar partikül basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemesine ait SEM fotoğrafı

Şekil 6.48'de 30° partikül çarpma açısında ve 1,5 bar püskürtme açısında aşındırılmış, (a)'da Ti4Al4Mo malzemesine ait (b)'de Ti6Al4V malzemesine ait SEM fotoğrafları verilmiştir. Aşındırıcı partikülerin numune yüzeyinde mikro sürme ve mikro kesme

mekanizmalarıyla yüzeyde tamamen plastik deformayonla birlikte aşınma gerçekleştirdiği görülmektedir. Ti4Al4Mo malzemesi ve Ti6Al4V malzemesi arasında çok fazla farklılıklar olmadığı gözükmektedir. İki fotoğrafda birbirlerine benzer şikilde formlar mevcuttur. Tablo 6.2'de ki verilerde bunu kanıtlar niteliktedir.

Şekil 6.49'da 30° partikül çarpma açısında ve 3 bar püskürtme açısında aşındırılmış, (a)'da Ti4Al4Mo malzemesine ait (b)'de Ti6Al4V malzemesine ait SEM fotoğrafları verilmiştir. Aşınma izlerinde yüksek basınçlarda, düşük basınçlardaki izlere nazaran daha derin olduğu, düşük basınçlarda yüzeysel izler oluştuğu görülmüştür. Fotoğraflar incelendiğinde Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V arasında çok büyük farklılıklar olmadığı Ti4Al4Mo fotoğrafındaki aşınma izlerinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Tablo 6.3'de ki veriler de de bu gözlemlenmektedir.

Şekil 6.50'de 90° partikül çarpma açısında ve 1,5 bar püskürtme açısında aşındırılmış, (a)'da Ti4Al4Mo malzemesine ait (b)'de Ti6Al4V malzemesine ait SEM fotoğrafları verilmiştir. Düşük çarpma açılarına göre daha farklı izler görülmektedir. Numune yüzeyinde mikro çatlak mekanizmaları ile deformasyon oluştuğu söylenebilmektedir. Yüzeye saplanan aşındırıcı partiküller görülmektedir. Malzeme yüzeyinde tepeciklerin ve vadilerin oluştuğu görülmektedir. Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V malzemelerine ait SEM fotoğrafları kıyaslandığında çok büyük farklılıklar görülmemektedir.

Şekil 6.51'de 90° partikül çarpma açısında ve 3 bar püskürtme açısında aşındırılmış, (a)'da Ti4Al4Mo malzemesine ait (b)'de Ti6Al4V malzemesine ait SEM fotoğrafları verilmiştir. Basıncın artmasıyla, mikro kesme ve mikro çatlak mekanizmalarıyla aşınma gerçekleşmiş ve daha derin yarıklar, tepecikler ve vadiler meydana gelmiştir. Artan basınçla birlikte, meydana gelen plastik deformasyonun şiddeti de artmıştır. Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V malzemelerine ait SEM fotoğrafları kıyaslandığında, Ti4Al4Mo'e ait fotoğrafta, daha fazla vadiler ve tepeciklerin olduğu ayrıca oluşan yarıkların daha derin olduğu görülmektedir. Tablo 6.3 değerlendirildiğinde, Ti4Al4Mo malzemesinin, %85 oranında daha fazla erozyon oranına sahip olduğu görülmektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

1. Sıcak pres ile yapılan sinterleme sonucunda, ön alaşımlı Ti6Al4V tozlarından elde edilen alaşımın mikroyapısı ile elementel tozlardan üretilen Ti4Al4Mo alaşımının mikroyapıları arasında fark gözlenmiştir. Bu fark alaşımların birbirinden farklı mekanik özellikler göstermesine sebep olmuştur.
2. Ti4Al4Mo alaşımının sertlik değerinin Ti6Al4V alaşımından yüksek çıkmasının sebebinin mikroyapıda oluşan intermetalik fazlar sonucu olduğu düşünülmektedir.
3. Ti6Al4V alaşımının eğme mukavemeti değeri Ti4Al4Mo alaşımından daha yüksek çıkmıştır. Optik mikroskop görüntülerinden elde edilen sonuçlara göre Ti6Al4V yapısı daha ince ve homojen dağılmış bir mikroyapıya sahiptir. Eğme mukavemetindeki artışın sebebinin bu homojen dağılmış mikroyapı olduğu düşünülmektedir.
4. Aşındırıcı partiküllerin farklı püskürtme basınçları altında debilerinin değiştiği, püskürtme basıncının artması ile aşındırıcı debisinin arttığı belirlenmiştir. Aşındırıcı debilerinin farklı püskürtme basınçlarında bilinmesi, erozyon oranlarının hesaplanmasında kullanıldığında ve birim partikülün aşındırdığı miktarı vermesinden dolayı önemlidir.
5. Toz metalürjik yöntem ile üretilen Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V alaşımı numunelerin farklı partikül çarpma açılarında katı partikül erozyonu davranışları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve erozyon oranları hesaplanarak incelenmiştir. Toz metalürjik yöntem ile üretilen Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V alaşımı numunelerin erozyon oranlarının düşük partikül çarpma açılarında daha yüksek olduğu, çarpma açısının artması ile erozyon oranının düştüğü belirlenmiştir. Her iki malzeme için SEM görüntüleri incelendiğinde düşük çarpma açılarında mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları belirlenirken, yüksek çarpma açılarında yüzeyde çatlaklar oluştuğu belirlenmiş ve aşındırıcı partiküllerin yüzeye saplandığı element analizlerinde incelenmiştir.
6. Toz metalürjik yöntem ile üretilen Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V alaşımı numuneler farklı partikül püskürtme basınçlarında (1,5 ve 3 bar) katı partikül erozyonu davranışları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve erozyon oranları hesaplanarak

incelenmiştir. Her iki malzeme için partikül püskürtme basıncının artması ile tüm çarpma açılarında erozyon oranının arttığı belirlenmiştir. Basıncın artması ile partiküllerin malzeme yüzeyine çarpma hızının yani partiküllerin sahip olduğu kinetik enerjinin artması ile yüzeyde gerçekleşen aşınma daha trajik hale gelmiştir. Bu nedenle basıncın artması ile numune yüzeyinde oluşan plastik deformasyonda artış meydana gelirken aşınma mekanizmalarında bir değişim olmamıştır.

7. Toz metalürjik yöntem ile üretilmiş iki malzemenin (Ti4Al4Mo ve Ti6Al4V alaşımı) aşınma davranışları kıyaslandığında, aşınma davranışlarının benzer olduğu, iki malzemenin de sünek aşınma davranışı gösterdiği erozyon oranı değerlerinin farklı partikül çarpma açılarında ve farklı partikül püskürtme basıncı değerlerinde birbirine yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir.
8. Özgün olarak elementel tozlarla karıştılarak, toz metalürjik yöntem ile üretilmiş Tİ4Al4Mo alaşımı, havacılık endüstrisinde kullanılan Ti6Al4V malzemesine alternatif malzeme olarak katı partikül erozyona maruz kalan bölümlerde kullanılması önerilebilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Songur F., Ti6Al4V Elı Alaşımı Üzerine Nanokompozit TiO2:n-HA Kaplamaların Peo Yöntemi ile Büyütülmesi; Yapısal-Korozyon-Biyoaktivite Özelliklerinin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2015, 392116.

[2] Akyol S., Ti6Al4V Titanyum Alaşımının İşlenebilirliğinin Isıl İşlem Yardımıyla Arttırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 223609.

[3] Avcu E., Farklı Büyüklüklere Sahip Aşındırıcı Partikül Karışımlarının Ti6Al4V Alaşımının Erozif Aşınma Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011, 283038.

[4] Gökdemir Y., Saf Titanyum ve Ti6Al4V Alaşımının Yüksek Sıcaklıkta Oksidasyon Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005, 166401.

[5] Smith W.F., *Structure and Properties of Engineering Alloys*, 2nd ed., McGraw-Hill, Ohio, 1993.

[6] Welsch G., Boyer R., Collings E., *Materials properties handbook titanium alloys*, 3 rd ed., ASM international, Ohio, 1993.

[7] Leyens C., Peters M., *Titanium and titanium alloys fundamentals and applications*, 1st ed., John Wiley & Sons, Köln, 2003.

[8] Özdemir B., Lazer ile titanyum ve magnezyum alaşımlarının işlenmesi ve kaynağı, Bitirme Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli, 2006.

[9] Akagündüz E., Isıl İşlem Görmüş Ti6Al4V Alaşımının Yüzey Özelliklerinin Mikroyapı ve Yüzey Çizilme Dayanımları Açısından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2008,179147.

[10] Smith W.F., *Structure and properties of engineering alloys*, 1st ed., McGraw-Hill, Ohio, 1981.

[11] İçdem C., Saf Titanyum ve Ti6Al4V, Ti6Al7Nb Alaşımlarının Akışkan Yatak Ortamında Termal Oksidasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 252003.

[12] Donachie M.J., *Titanium a technical guide*, 2nd ed., Ohio, ASM international, 2000.

[13] Ensarioğlu C., Çakır M.C., Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü, *Mühendis ve Makine*, 2005, **46**(546), 1-7.

[14] Ezugwu E. O., Wang Z. M., Titanium alloys and their machinability, *Journal of materials processing technology*, 1997, **68**(3) 262-274.

[15] Yücel Z., Lazer ve Kumlama Yöntemleri ile Ti6Al4V Alaşımında Fonksiyonel Yüzeylerin Oluşturulması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2008, 232710.

[16] Şahin A.E., Yıldıran Y., Fidan S., Avcu E., Sınmazçelik T., Aşındırıcı Partikül Karışımlarının Ti6Al4V Alaşımının Katı Partikül Erozyon Davranışına Etkileri, *UHUK*, İstanbul, Türkiye, 12-14 Ekim 2012.

[17] Yalçın B., Toz Metalurjisi Yöntemiyle İmal Edilen Titanyum Alaşımı İmplantların Temel Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2007, 200076.

[18] Özak H. C., Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilmiş Metal Matrisli Kompozitlerin Mikroyapısal ve Fiziksel Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum, 2016, 246227.

[19] Suryanarayana C., Mechanical alloying and milling, *Progress in materials science*, 2001, **46**(2), 1-184.

[20] Milli A., Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile (B4c+ FeTi) Takviyeli Fe Esaslı Kompozit Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 2017, 483513.

[21] Gökçe H., Mekanik Alaşımlama Süreçleri İle Al-20si Esaslı Toz ve Sinter Kompozitlerin Geliştirilmesi Ve Karakterizasyon Çalışmaları, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015, 389182.

[22] Gökçe A., Fındık F., Kurt A. O., Alüminyum ve Alaşımlarının Toz Metalurjisi İşlemleri, *Engineer & the Machinery Magazine*, 2017, **58**(686), 21-47.

[23] Denizalp F., Yüksek Safiyette Molibden Tozunun Spark Plazma Sinterleme Yöntemi ile Şekillendirme Şartlarının Belirlenmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012, 349640.

[24] Ormancı Ö., Titanyum Oksit İlaveli Alümina Zirkonya Kompozitlerinin Spark Plazma Sinterleme Yöntemi ile Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012, 350462.

[25] Kayhan S. M., Manufacturing, Mechanical and Microstuructural Characterization of AZ91D Magnesium Alloy for Biomedical Applications, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015, 415515.

[26] Söyler A.U., Mekanik Alaşımlama Yöntemleri İle Üretilmiş Al-fe Tabanlı Sic ve Y_2O_3 Pekiştiricili Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 223111.

[27] Avşar E., Demir esaslı toz metal parçaların sinterleme ile birleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009, 244736.

[28] Dikici B., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Nikel Titanyum Alaşımlarının Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 291925.

[29] Bhattacharjee A., Saha B., Williams J. C., Titanium Alloys Physical Metallurgy and Processing, Editors: Prasad N. E., Wanhill R. J. H., *Aerospace Materials and Material Technologies*, 1st ed., Springer, Singapore, 91-115, 2017.

[30] Murr L.E., Quinones S.A., Gaytan S.M., Lopez M.I., Rodela A., Martinez E.Y., Hernandez D.H., Martinez E., Medina F., Wicker R.B., Microstructure and mechanical behavior of Ti–6Al–4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications, *Journal of Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2009, **2**(1), 20-32.

[31] Fousová M., Vojtěch D., Doubrava K., Influence of Inherent Surface and Internal Defects on Mechanical Properties of Additively Manufactured Ti6Al4V Alloy: Comparison between Selective Laser Melting and Electron Beam Melting, *Materials*, 2018, **11**(4), 537-547.

[32] Wei D. B., Zhang P. Z., Yao Z. J., Oxidation behaviour of plasma surface alloying on Ti6Al4V alloy, *Surface Engineering*, 2018, **34**(1), 14-21.

[33] Bolzoni L., Ruiz Navas E. M., Neubauer E., Mechanical properties and microstructural evolution of vacuum hot-pressed titanium and Ti6Al7Nb alloy, *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, DOI: 10.1016/j.jmbbm.2012.01.015.

[34] Yıldızlı K., Odabaş D., Nair F., Borlanmış AISI 1020 Çeliğinin Eroziv Aşınma Davranışının İncelenmesi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2016, **5**(1), 130-140.

[35] Koraman E., Al-Fe-V-Si Alaşımlarının Yüksek Sıcaklık Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011, 295334.

[36] Erdem V.E., Aısı 1060 Çeliğinin Erozif Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi ve Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 172122.

[37] Bağcı M., İmrek H., CuZn10 ve CuSn10 Bakır Alaşımların Erozif Aşınması, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs 2009.

[38] More S. R., Nandre B. D., Desale G., Development of Pot Tester to Simulate the Erosion Wear due to Solid-liquid Mixture, *International Journal of Researchers, Scientists and Developers*, 2014, **2**(1), 6-12.

[39] Sundararajan G., Roy M., Solid Particle Erosion Behaviour of Metallic Materials at Room and Elevated Temperatures, *Tribology International*, 1997, **30**(5), 339-359.

[40] Önen Y. Y. B., Avcu E., Çınar A., Investigation of the Efects of Erosion Test Parameters on the Particle Impengement Velocity by Using CFD Analysis, *Proceedings of the 4th International Congress*, Fethiye, Türkiye, 24-27 Nisan 2014.

[41] Eltobgy M. S., Ng E., Elbestawi M. A., Finite Element Modeling of Erosive Wear, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, **45**(11) 1337-1346.

[42] Haddad Y. M., Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications, *Aes-Atema 4th International Conference*, Hambourg, Germany, 6-10 July 2009.

[43] Finnie I., Some Reflections on the Past and Future of Erosion, *Wear*, 1995, **186**(1), 1-10.

[44] Fidan S., Avcu E., Bora M. Ö., Çoban O., Sinmazçelik T., Taşkıran İ., Solid Particle Erosive Wear Behavior of Glass Mat Reinforced PPS Composites: Influence of Erodent Particle Size, Pressure, Particle Impingement Angle, and Velocity, *Fifth International Workshop on Thermoplastic Matrix Composites*, Lecce, İtaly, 23-24 June 2011.

[45] Fidan S., Sınmazçelik T., Polimerler ve Polimer Kompozitlerde Katı Partikül Erozyonunun Mekanizmaları ve Malzeme Performansını Etkileyen Faktörler, *13. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 9-11 Kasım 2006.

[46] Laguna-Camacho J. R., Vite-Torres M., Gallardo-Hernandez E., Vera-Cardenas E. E., Solid Particle Erosion on Different Metallic Materials, *Tribology in engineering*, DOI: 10.5772/51176.

[47] Tewari U., Harsha A., Häger A., Solid Particle Erosion of Carbon Fibre and Glass Fibre Epoxy Composites, *Composites Science and* Technology, 2003, **63**(3-4), 549-557.

[48] Patel B., Acharya S., Mishra D., Effect of Stacking Sequence on the Erosive Wear Behavior of Jute and Juteglass Fabric Reinforced Epoxy Composite, *International Journal of Engineering, Science and* Technology, 2011, **3**(1), 213-219.

[49] Biswas S., Satapathy A., Patnaik A., Erosion Wear Behavior of Polymer Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010, **29**(19), 2898-2924.

[50] Khalfan O. M., Dış yüklerin erosif aşınma üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2008, 178823.

[51] Avcu E., Şahin A., Fidan S., Sınmazçelik T., Taşkıran İ., Bora M. Ö., Onur Çoban O., Cam Keçe Takviyeli Polifenilen Sülfid Matrisli Kompozitlerin Katı Partikül Erozyon Davranışları, *1. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 17-19 Kasım 2011.

[52] Barkoula N. M., Karger-Kocsis J., Solid Particle Erosion of Unidirectional GF Reinforced EP Composites With Different fiber/matrix adhesion, *Journal of reinforced plastics and composites*, 2002, **21**(15), 1377-1388.

[53] Kotnarowska D., Effect of Erosive Particle Velocity on the Intensity of Polymeric Coating Wear, *Solid State Phenomena*, DOI: 10.4028/SSP.165.91.

[54] Hager A., Friedrich K., Dzenis Y., Study of Erosion Wear of Advanced Polymer Composites, *Proceedings of the Tenth International Conference on Composite Materials: Characterization and ceramic matrix composites*, 1995, **4**(1), 155-162.

[55] Harsha A., Jha S. K., Erosive Wear Studies of Epoxy-Based Composites at Normal Incidence, *Wear*, DOI: 10.1016/2008.03.003.

[56] Chowdhury M. A., Debnath U. K., Nuruzzaman D. M. *et al.*, Experimental Analysis of Aluminum Alloy Under Solid Particle Erosion Process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2016, **230**(12), 1516-1541.

[57] Kosa E., Göksenli A., Influence of Material Hardness and Particle Velocity On Erosive Wear Rate, *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, **47**(1), 9-15.

[58] Önen B., Fidan S., Sınmazçelik T., Nozul İçi Geometrilerinin Partikül Erozyonunda Hedef Malzeme Aşınma ve Pürüzlülüğüne Etkileri, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi* Dergisi, 2017, **32**(4), 1051-1061.

[59] Barkoula N. M., Karger-Kocsis J., Review Processes and Influencing Parameters of the Solid Particle Erosion of Polymers and Their Composites, *Journal of materials science*, 2002, **37**(18), 3807-3820.

[60] Yıldıran Y., 3003 H14 Alüminyum Alaşımının Katı Partikül Erozyon Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 342538.

[61] Zhao G., Hussainova I., Antonov M., Effect of Temperature on Sliding and Erosive Wear of Fiber Reinforced Polyimide Hybrids, *Tribology International*, 2015, **82**(1), 525-533.

[62] Mondal D., Das S., High Stress Abrasive Wear Behaviour of Aluminium Hard Particle Composites: Effect of Experimental Parameters, Particle Size and Volume Fraction, *Tribology international*, 2006, **39**(6), 470-478.

[63] Kosa E., Çeliklerin Erozif-abrazif Aşınmasında Aşındırıcı Tane Büyüklüğünün Aşınma Direncine Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016, 438057.

[64] Dundar M., Inal O., Solid Particle Erosion of α-brass with 5 and 25 μm Particles at Normal Incidence, *Wear*, 1999, **224**(2), 226-235.

[65] http://www.fetasmetalurji.com. (Zİyaret Tarihi: 27 Şubat 2018).

[66] http://www.ft-hardness.com. (Ziyaret Tarihi: 24 Nisan 2018).

[67] http://www.instron.com. (Ziyaret Tarihi: 24 Nisan 2018).

[68] http://www.shimadzu.com. (Ziyaret Tarihi: 24 Nisan 2018).

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Özdemir K**., Yamanoğlu R., Ti4Al4Mo Alaşımının Sıcak Pres ile Üretimi, *1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC' 18)*, Karabük, Turkey, 22-24 March 2018

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında İstanbul'da doğdu. İlk öğrenimini Kıbrıs, Orta öğrenimini Kırklareli, Lise öğrenimini ise İstanbul'da tamamladı. 2000 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Kocaeli Meslek Yüksek Okulu Makine Bölümü'nden 2002 yılında Makine Teknikeri olarak mezun oldu. 2004 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılında Metalurji ve Malzeme Mühendisi Olarak mezun oldu. 2018 yılı Mart ayından beri Meusburger Setting Standarts Gmbh. şirketinde Satış Yöneticisi olarak görev yapmaktadır.